

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 71, № 4, 2025

ARCTIC AND ANTARCTIC RESEARCH

Volume 71, No. 4, 2025

Проблемы Арктики и Антарктики

Научный рецензируемый журнал

Журнал продолжает основанное в 1937 г. периодическое издание **Проблемы Арктики.**

Издается под научно-методическим руководством Отделения наук о Земле РАН

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

Главный редактор

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

Заместители главного редактора

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

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

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

Редакционный совет

Председатель редакционного совета

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

Члены редакционного совета

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

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

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

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

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

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

Ответственный секретарь

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

Редакция

Литературный редактор

Миненко Е.В., Санкт-Петербург, Россия

Технический редактор

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

Оригинал-макет

Филиппова А.С., ААНИИ, Санкт-Петербург, Россия

Редакционная коллегия

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Семенов В.А., академик РАН, ИФА РАН, Москва, Россия

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

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

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

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

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

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

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

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

Префикс DOI: 10.30758

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

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

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

Адрес учредителя и издателя:

199397 Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38, Литера А.

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

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт.

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

Выходит ежеквартально.

© ГНЦ РФ ААНИИ, 2025 (учредитель и издатель)

© Росгидромет, 2025 (учредитель)

Знаком информационной продукции не маркируется

Arctic and Antarctic Research

Scientific peer-reviewed journal

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

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

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

Editor-in-Chief

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

Deputy Editors-in-Chief

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

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

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

Editorial Council

Chair

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

Members

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

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

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

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

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

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

Executive Secretary and Coordinator

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

Editorial

Literary Editor

Elena V. Minenko, St. Petersburg, Russia

Technical Editor

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

Original layout

Anna S. Filippova, AARI, St. Petersburg, Russia

Members of the editorial board

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Vladimir A. Semenov, Academician, IFA RAS, Moscow, Russia

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

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

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

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

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

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

DOI-prefix: 10.30758

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

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

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

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

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

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

Contacts:

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

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

<https://www.aaresearch.science>

Four issues per year.

© SSC RF AARI, 2025 (founder and publisher)

© Roshydromet, 2025 (founder)

The Journal is not marked with the Information Product label

Содержание

ОКЕАНОЛОГИЯ

- Результаты прогноза гидрометеорологических полей для Белого моря
с использованием системы атмосфера – океан – лед 378
Н.Ю. Бутаков, К.Г. Рубинштейн, Р.Ю. Игнатов

ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ГИДРОСФЕРЫ

- Экспериментальные исследования магнитосферного распространения
радиоволн средневолнового диапазона..... 396
*А.С. Калишин, Н.Ф. Благовещенская, Т.Д. Борисова, И.М. Егоров,
А.О. Мингалева, Г.А. Загорский*

МЕТЕОРОЛОГИЯ И КЛИМАТОЛОГИЯ

- Процессы сезонного протаивания грунта на архипелаге Северная Земля..... 412
А.П. Макитас, О.Р. Сидорова, И.А. Махотина, П.В. Богородский
- Zoning of the Barents and Kara Seas by surface air temperature changes
and variability. Natural climatic seasons 428
T.K. Karandasheva, B.V. Ivanov, A.D. Revina, I.A. Ilyushchenkova

ГИДРОЛОГИЯ СУШИ И ГИДРОХИМИЯ

- Some aspects of the nutrient geochemistry of Novaya Zemlya rocks 445
*G.V. Borisenko, E.V. Rakhimova, E.V. Koltovskaya,
F.A. Obrezchikov, A.Yu. Miroshnikov*
- Водный баланс вскрывающихся озер оазиса Холмы Ларсеманн 469
М.Р. Кузнецова, Г.В. Пряхина, Е.С. Зелепукина

ГЕОМОРФОЛОГИЯ И ЭВОЛЮЦИОННАЯ ГЕОГРАФИЯ

- О закономерностях изменения глобального уровня моря
в позднем четвертичном периоде 489
А.А. Екайкин, Н.Д. Дятлова

ЛЕДОТЕХНИКА

- Основные критерии применимости платформы БПЛА
в целях ближней ледовой разведки и оперативного
ледово-информационного обеспечения морских операций..... 500
С.С. Сероветников, Л.А. Старцев, В.Т. Соколов, Т.А. Алексеева

СТРАНИЦЫ ИСТОРИИ

- Первые автоматические метеорологические станции для Арктики 513
М.А. Емелина, В.Ю. Замятин

Contents

OCEANOLOGY

- Results of forecasting hydrometeorological fields for the White Sea
using the atmosphere – ocean – ice system 378
N.Yu. Butakov, K.G. Rubinstein, R.Yu. Ignatov

ATMOSPHERE AND HYDROSPHERE PHYSICS

- Experimental studies of medium radio wave propagation in the magnetosphere 396
*A.S. Kalishin, N.F. Blagoveshchenskaya, T.D. Borisova, I.M. Egorov,
A.O. Mingaleva, G.A. Zagorskiy*

METEOROLOGY AND CLIMATOLOGY

- Seasonal soil thawing processes on the Severnaya Zemlya archipelago 412
A.P. Makshtas, O.R. Sidorova, I.A. Makhotina, P.V. Bogorodsky
- Zoning of the Barents and Kara Seas by surface air temperature changes
and variability. Natural climatic seasons 428
T.K. Karandasheva, B.V. Ivanov, A.D. Revina, I.A. Ilyushchenkova

HYDROLOGY OF LAND AND HYDROCHEMISTRY

- Some aspects of the nutrient geochemistry of Novaya Zemlya rocks 445
*G.V. Borisenko, E.V. Rakhimova, E.V. Koltovskaya,
F.A. Obrezchikov, A.Yu. Miroshnikov*
- Water balance of lakes opening up from the ice in the Larsemann Hills 469
M.R. Kuznetsova, G.V. Pryakhina, E.S. Zelepukina

GEOMORPHOLOGY AND EVOLUTIONARY GEOGRAPHY

- On the global sea level change during the Late Quaternary 489
A.A. Ekaykin, N.D. Dyatlova

ICE TECHNOLOGY

- Key criteria of UAV applicability in medium range ice reconnaissance
and ice information service of maritime operations 500
S.S. Serovetnikov, L.A. Startsev, V.T. Sokolov, T.A. Alekseeva

PAGES OF HISTORY

- First automatic meteorological stations for the Arctic 513
M.A. Emelina, V.Yu. Zamyatin

ОКЕАНОЛОГИЯ OCEANOLOGY

Оригинальная статья / Original paper

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-4-378-395>

УДК 551.467



Результаты прогноза гидрометеорологических полей для Белого моря с использованием системы атмосфера – океан – лед

Н.Ю. Бутаков[✉], К.Г. Рубинштейн, Р.Ю. Игнатов

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва, Россия

[✉]butakov@ibrae.ac.ru

Аннотация. С учетом активного освоения Арктики при крайне редкой сети наблюдений существует высокая потребность в надежных гидрометеорологических прогнозах ледовой, морской и метеорологической обстановки в данном регионе. С этой целью была реализована система гидрометеорологического прогноза параметров циркуляции атмосферы, океана и состояния морского льда для района Белого моря. В качестве модели прогноза циркуляции атмосферы в работе использовалась полярная версия модели WRF, в качестве модели прогноза циркуляции океана (моря) — модель ROMS, параметры состояния морского льда считались при помощи модели CICE. Были получены первые результаты расчета гидрометеорологических параметров полей и проведена оценка качества расчетов, что помогло выявить достоинства и недостатки использованной системы. Для атмосферных расчетов ошибки находятся на уровне или ниже опубликованных оценок из аналогичных работ, где используется PWRP для моделирования в полярных регионах. Поля температуры поверхности моря, поверхностной солёности и уровня океана хорошо согласуются с данными анализа GOFS 3.1 и находятся на уровне оценок качества других авторов. Были выявлены неточности в воспроизведении приведенных характеристик на границе лед — открытая вода. Для температуры поверхности моря ошибки на границе лед — открытая вода достигали 0,4 °C, по солёности 0,4 ‰, скорости течений до 0,18 м/с, уровня 0,2 м. Был проведен сравнительный анализ двух схем параметризаций термодинамики льда в модели CICE — BL99 и Mushy. Показано, что при использовании обеих схем наблюдалась систематическая переоценка общего объема морского льда, но в сравнении со схемой Mushy более простая схема BL99 имела меньшие ошибки.

Ключевые слова: прогноз морского льда, циркуляция океана, циркуляция атмосферы, Белое море, Арктика, численное моделирование, термодинамика льда

Для цитирования: Бутаков Н.Ю., Рубинштейн К.Г., Игнатов Р.Ю. Результаты прогноза гидрометеорологических полей для Белого моря с использованием системы атмосфера – океан – лед. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2025;71(4):378–395. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-4-378-395>

Поступила 01.12.2024

После переработки 20.08.2025

Принята 16.10.2025

© Авторы, 2025

© Authors, 2025

Results of forecasting hydrometeorological fields for the White Sea using the atmosphere – ocean – ice system

Nikita Yu. Butakov✉, Konstantin G. Rubinstein, Roman Yu. Ignatov

Nuclear Safety Institute of the Russia Academy of Sciences, Moscow, Russia

✉butakov@ibrae.ac.ru

Abstract. Given the active development of the Arctic with an extremely rare network of observations, there is a high demand for reliable hydrometeorological forecasts of the ice, marine and meteorological conditions in this region. For this purpose, a system has been implemented for hydrometeorological forecasting of atmospheric, ocean and sea ice circulation parameters for the White Sea region. The polar version of the WRF model was used for predicting atmospheric circulation, the ROMS model was used for predicting ocean (sea) circulation, and the parameters of the sea ice state were calculated using the CICE model. Early results of calculating hydrometeorological parameters have been obtained and an assessment of the quality of calculations has been carried out, which helped to identify the advantages and disadvantages of the system used. For the atmospheric calculations, the errors are at or below the published estimates from similar papers. The fields of sea surface temperature, surface salinity, and ocean level are in good agreement with the GOFS 3.1 analysis data and are at the level of other authors' quality assessments. Inaccuracies have been identified in the reproduction of the above characteristics at the ice /open water boundary. For the sea surface temperature, errors at the ice /open water boundary reached 0.4 °C, for salinity 0.4 ‰, for current velocity up to 0.18 m/s, and a level of 0.2 m. A comparative analysis was carried out for two schemes of parameterization of ice thermodynamics in the CICE — BL99 and Mushy models. It is shown that when both schemes are used, a systematic overestimation of the total volume of sea ice is observed. However, compared to the Mushy scheme, the simpler BL99 scheme had fewer errors.

Keywords: Sea ice forecast, ocean circulation, atmospheric circulation, White Sea, Arctic, numerical modeling, ice thermodynamics

For citation: Butakov N.Yu., Rubinstein K.G., Ignatov R.Yu. Results of forecasting hydrometeorological fields for the White Sea using the atmosphere – ocean – ice system. *Arctic and Antarctic Research*. 2025;71(4):378–395. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-4-378-395>

Received 01.12.2024

Revised 20.08.2025

Accepted 16.10.2025

Введение

С отступлением морских льдов Арктика становится более доступной для судоходства — все большее значение приобретает Северный морской путь. Надежные прогнозы ледовой обстановки, океанической и атмосферной циркуляции могут помочь предотвратить аварии, снизить транспортные расходы и обеспечить безопасность маршрутов. Надежные прогнозы состояния океана, криосферы и атмосферы могут помочь в решении существующих радиационно-экологических проблем арктической зоны, поскольку в настоящее время на дне морей северо-западной Арктики находятся около 18 тысяч затопленных объектов различной степени радиационной опасности [1]. В дополнение ко всему за северным полярным кругом действуют Кольская и Билибинская АЭС, а также плавучая атомная теплоэлектростанция «Академик Ломоносов». Все изложенное подтверждает важность реализации системы прогноза циркуляции океана, криосферы и атмосферы для Арктического региона.

Сравнение глобальных моделей океана и морского льда проводили в рамках проекта ОМIP-2 (часть CMIP6) [2] для оценки воспроизведения современного климата океана и ледяного покрова при использовании единого атмосферного форсинга и унифицированного протокола. Эксперименты выполнялись в течение 61-летних

циклов. Результаты сравнивались с современными наблюдениями: спутниковыми данными по температуре поверхности моря и солёности на поверхности моря. Сравнение проводилось на стандартной сетке $1^\circ \times 1^\circ$ и включало метрики BIAS и RMSE.

Для улучшения прогнозов толщины льда широко применяют методы ассимиляции данных спутников. Так, авторы [3] реализовали ассимиляцию измерений CryoSat-2 [4] в модель морского льда CICE [5], сопряжённую с океанической моделью NEMO [6]. Моделирование охватывало период 2010–2020 гг., совпадающий с фазой активных наблюдений CryoSat-2. Верификацию модели проводили с использованием независимых данных ICESat-2 [7], Operation IceBridge [8] и буев. Сравнение показало, что включение спутниковых данных позволяет уменьшить систематическую ошибку толщины на 0,1–0,3 м и снизить среднеквадратическую ошибку на 10–25 %, особенно в периферийных морях Арктики. Таким образом, работа продемонстрировала эффективность ассимиляции данных CryoSat-2 для улучшения пространственных распределений и сезонной изменчивости толщины льда.

Точность краткосрочных прогнозов дрейфа морского льда в Арктике оценивали также с использованием сопряжённой модели океана и льда [9], для чего была применена система PIOMAS (Pan-Arctic Ice–Ocean Modeling and Assimilation System) [10], объединяющая трехмерную модель океанической циркуляции и динамико-термодинамическую модель морского льда. Моделирование выполняли в прогностическом режиме с различной заблаговременностью — от 24 до 120 часов, а верификацию проводили на основе сравнения с наблюдениями за дрейфом льда, полученными из спутниковых данных и данных буев. Было отмечено, что наибольшие затруднения связаны с прогнозированием слабых ветров и условий в периферийных морях, где динамика льда наиболее изменчива. Также было продемонстрировано, что сопряжённые модели океана и льда способны обеспечивать полезные прогнозы дрейфа на несколько суток вперед, но сохраняют значительные ограничения при увеличении заблаговременности и в условиях сложной пространственной изменчивости.

Для Антарктиды и Южного океана исследовали [11] применение и оценку полярной версии модели WRF [12] (далее PWRF). Проведенные численные эксперименты были направлены на тестирование производительности региональной атмосферной модели в условиях полярных широт. Период моделирования охватывал 2017 год, что обеспечивало возможность оценки сезонных особенностей воспроизведения атмосферных полей. Верификацию проводили с использованием спутниковых наблюдений, радиозондов и станционных данных. Анализ показал, что PWRF в целом адекватно воспроизводит пространственное распределение атмосферных параметров, хотя в ряде случаев отмечались систематические смещения, в частности недооценка температуры и завышение скорости ветра в прибрежных районах. Был сделан вывод, что модель в текущей конфигурации является надежным инструментом для региональных исследований атмосферы в высоких широтах, но требует дополнительных улучшений параметризаций облачности и турбулентного обмена.

В отличие от рассмотренных исследований, наша работа имеет иной масштаб и цели. Так, в рамках OMIP-2 внимание было сосредоточено на глобальных многолетних климатических экспериментах, выполняемых на сетке с разрешением порядка 1° и направленных на оценку долгосрочных трендов океанической и ледовой динамики [2]. Наша же модель ориентирована на регион Арктики и обладает существенно более высоким разрешением (6 км по горизонтали, 30 уровней по

вертикали), что позволяет анализировать мелкомасштабные процессы, но в пределах ограниченного района и короткого прогностического периода. Работа [3] была посвящена улучшению оценки толщины морского льда за счет ассимиляции спутниковых данных CryoSat-2, что обеспечивает точность климатических реконструкций, тогда как в нашей работе ассимиляция данных пока не используется, но предполагается в развитии. В исследовании [9] использовалась модель PIOMAS с пространственным разрешением около 25 км для проверки краткосрочного прогноза дрейфа льда [9]; наша модель имеет более детализированную сетку, а атмосферный форсинг задавался по данным PWRF, в отличие от использованных ими глобальных реанализов. Наконец, в [11] тестировали PWRF в условиях Антарктики и Южного океана, выявляя особенности атмосферных процессов и ошибки модели в ретроспективных расчетах, тогда как мы применяем прогноз PWRF непосредственно для задания атмосферного форсинга в региональной океанической модели Арктики. Таким образом, в отличие от глобальных и ретроспективных исследований, наша работа направлена на разработку и оценку системы оперативного прогноза океанических и ледовых характеристик Арктики с использованием региональной конфигурации с более высоким пространственным разрешением и актуальных атмосферных расчетов.

В отечественной науке исследования, посвященные численному моделированию гидрометеорологических процессов в арктических морях России, последовательно развивались от первых комплексных систем прогноза до современных высокоразрешающих моделей, способных воспроизводить как экстремальные события, так и долговременные климатические тенденции. В работе [13] представлена система оперативного диагноза и прогноза (СОДиП), созданная в ГОИН и ИВМ РАН, и проведена ее апробация для задач прогнозирования морской ледовой обстановки. Система включала региональную атмосферную модель WRF, океаническую модель INMOM и российскую атмосферно-волновую модель PABM. Такой комплекс позволял воспроизводить ключевые гидрометеорологические характеристики Карского и Печорского морей. Численные эксперименты охватывали безледный период 2003–2012 гг. и показали хорошее согласие расчетов с данными наблюдений: коэффициент корреляции по атмосферному давлению составил $\sim 0,999$, а по скорости ветра — 0,8–0,91. Полученные результаты продемонстрировали возможности комплексного моделирования атмосферы, океана и волн в арктических условиях.

Дальнейшее развитие системы СОДиП было представлено в обновленной версии, которая охватывала не только Карское и Печорское, но также Баренцево и Белое моря [14]. Усовершенствованная система отличалась увеличенным пространственным разрешением моделей (до 2,7 км для INMOM), расширенной расчетной областью и реализованной возможностью как ретроспективных, так и оперативных прогнозов до трех-пяти суток. На примере воспроизведения экстремального шторма января 1975 г. в Баренцевом море продемонстрированы возможности системы: расчеты адекватно описали поля ветра, волнения, течений и ледовых условий. Максимальная высота волн достигала 7,8 м, что совпадало с данными наблюдений. Важным результатом стало понимание вклада ветровой составляющей в формирование течений и изменений ледовой обстановки. Было показано, что разработанные комплексные системы способны не только описывать общую динамику, но и моделировать редкие и опасные экстремальные явления, что имеет ключевое значение для обеспечения безопасности деятельности в Арктике. Наша постановка работы близка к данной.

Дальнейший шаг в развитии подходов связан с переходом к более высокому пространственному разрешению, что позволило точнее воспроизводить локальные процессы в прибрежной зоне. В [15] использовали атмосферную модель COSMO-CLM с шагом порядка 3 км. Это дало возможность описывать сложные мезомасштабные структуры циркуляции, которые невозможно корректно воспроизвести с помощью глобальных реанализов или более грубых региональных моделей. Среди таких структур — мысовые струи, подветренные бури, вихревые цепочки в шхерах и локальные ветровые тени. Включение столь детализированного атмосферного форсинга в гидродинамические модели WAVEWATCH III [16] и ADCIRC [17] позволило уточнить характеристики волнения и штормовых нагонов в прибрежной зоне Карского моря. Многолетние расчеты выявили, что экстремальные нагоны (до 2,5 м) чаще всего формируются в Обской губе, где их частота примерно в два раза выше, чем в Байдарацкой. При этом в двух акваториях наблюдаются противофазные тренды по числу нагонов, что указывает на связь с изменениями розы ветров. Было показано, что использование атмосферных моделей с шагом в несколько километров является необходимым условием для адекватного воспроизведения экстремальных процессов в прибрежной зоне Арктики. В развитии наших работ мы предполагаем увеличение разрешения для прогнозов в проливах. Численные эксперименты по Баренцеву морю показали, что учет волновых параметров в параметризациях шероховатости поверхности изменяет турбулентные тепловые потоки между океаном и атмосферой в среднем на 1–3 % ($\approx 1\text{--}3 \text{ Вт/м}^2$) в обычных условиях [18]. Во время штормов относительная чувствительность возрастает до 3–5 %, а абсолютная разница может достигать 100–250 Вт/м² для экстремальных условий.

Таким образом, представленные работы демонстрируют заметный прогресс подходов: от первых комплексных систем диагностики и прогноза, позволивших воспроизвести основные черты циркуляции и взаимодействия атмосферы, океана и волн, к исследованиям, посвященным изменению ледового режима Северного морского пути, затем — к высокоразрешающему моделированию мезомасштабных процессов в прибрежной зоне и, наконец, к анализу долговременных климатических тенденций.

Используемая в нашей работе прогностическая система состоит из 2 отдельных блоков: 1) атмосферного, представленного в данной работе хорошо зарекомендовавшей себя моделью WRF [12], модифицированной для моделирования в полярных регионах, и 2) океанического, представленного моделями океана ROMS [19] и морского льда CICE [5], объединенными в совместную систему ROMS-CICE. Все выбранные нами модели, включая модель PWRF, открыты и доступны в сети Интернет. Доступны также все их модификации и обновления, которые хорошо документированы.

Целью данной работы была реализация системы прогноза температуры моря, солености моря, уровня, скорости и направления течений, толщины, сплоченности, скорости и направления дрейфа льда, а также таких атмосферных характеристик, как температура воздуха и температура точки росы на высоте 2 м, количество выпавших осадков, скорость и направление приземного ветра для Белого моря.

Методы исследования

В качестве объекта исследования для тестирования прогностической системы был выбран регион Белого моря, поскольку для него меньше открытых границ и больше, чем для большинства акваторий Арктики, метеорологических станций для оценки качества прогнозов.

Мы остановили свой выбор на модели морского льда CICE в связке с океанической моделью ROMS, т. к. модель CICE продемонстрировала более высокую точность в большинстве субрегионов на основе проведенного сравнительного анализа двух моделей морского льда CICE и Budgell с использованием в качестве океанического компонента совместной системы модели ROMS для оценки их точности в моделировании морского льда в Арктике [20]. При сравнении анализировали сплоченность морского льда и его толщину, а в качестве критериев оценки качества использовали коэффициенты корреляции и центрированные среднеквадратичные ошибки (CRMSE). Код этих моделей постоянно обновляется, и есть возможность совместной работы с моделью WRF по примеру того, как это было показано в работе [21].

В качестве атмосферного форсинга в моделях ROMS и CICE использовали посчитанные при помощи PWRF компоненты скорости ветра, приземное давление, относительную влажность, температуру воздуха на высоте 2 м, осадки, а также приходящую длинноволновую и коротковолновую радиацию. Модель PWRF была использована, так как GFS имеет относительно грубое пространственное разрешение (> 10 км для оперативной версии), что не позволяет адекватно воспроизводить мелкомасштабные процессы в Белом море: локальные бризы (морские/береговые), взаимодействие атмосферы со сложным рельефом побережья и т. д. К тому же в случае использования PWRF есть возможность более тонкой настройки модели для рассматриваемого региона в дальнейшем. Важной является также возможность сопряжения PWRF с ROMS и CICE.

Из модели ROMS в модель CICE передавались температура моря, соленость, компоненты скорости течений и динамический уровень. Из модели CICE в модель ROMS передавались напряжение лед–океан, потоки тепла, солености и воды.

На *первом этапе* работы был произведен расчет атмосферных полей с помощью модели PWRF. После чего на *втором этапе* работы с использованием полученных атмосферных полей в качестве атмосферного форсинга был произведен расчет океанических параметров и параметров морского льда по совместной модели ROMS-CICE.

Шаг вычислительной сетки для моделей PWRF, ROMS и CICE 6 км. Сетки для всех трех моделей идентичны для избежания ошибок интерполяции.

Период моделирования для атмосферы, океана и льда был выбран с 01.01.2023 по 03.02.2023 — всего 8 расчетов с заблаговременностью 120 часов с датами инициализации модели 01.01.2023, 05.01.2023, 09.01.2023, 13.01.2023, 17.01.2023, 21.01.2023, 25.01.2023, 29.01.2023 за 00 UTC. Шаг по времени для всех трех моделей 30 с. Начальные и граничные условия для модели PWRF были получены из данных глобальной модели GFS [22]. Для моделей ROMS и CICE начальные и граничные условия были получены из данных глобальной модели HYCOM-CICE [23]. Начальные условия соответствовали заблаговременности прогноза HYCOM-CICE 12 ч. Атмосферные поля считались на 40 вертикальных уровнях, а океанические — на 30. При расчете льда использовали 7 вертикальных уровней с 5 категориями толщины льда.

Выбор параметризаций для модели PWRF в данном исследовании опирался на широкий спектр работ по тестированию PWRF в полярных регионах [11]. В качестве параметризации микрофизики была выбрана двухмоментная схема Моррисона [24]. Коротковолновую и длинноволновую радиацию параметризовали по схеме RRTMG [25], пограничный слой — по схеме MYNN Level 2.5 [26], приземный слой — по схеме MYNN [27]. Для описания поверхностного слоя земли была выбрана схема Noah-MP [28]. Конвекцию считали с использованием схемы параметри-

зации Каина–Фрича [29]. Для описания вертикального турбулентного перемешивания в модели ROMS использовалась схема GLS (Generic Length Scale) [30].

Моделирование морского льда было выполнено с двумя разными схемами термодинамики, используемыми для моделирования вертикального теплового баланса и эволюции льда. Первая схема, схема Bitz и Lipscomb (далее BL99) [31], представляет собой энергосохраняющий многослойный подход. В ней корректируются теплоемкость и теплопроводность льда с учетом наличия солевых включений. Скрытая теплота, связанная с таянием или замерзанием рассола, учитывается так, чтобы сохранялся полный баланс энергии. BL99 решает уравнение теплопроводности по вертикали численно устойчивым методом и позволяет описывать сезонный ход температуры льда и толщину покрова. Однако в данной схеме соленость льда, как правило, задается априорно (в виде постоянного профиля) и не является прогностической переменной. Механизмы удаления соли (гравитационный дренаж, промывка талой водой и образование ледо-снежного слоя) явно не моделируются, а влияние океанических условий подо льдом учтено через граничные условия на нижней поверхности. Основные достоинства BL99 — простота, относительная вычислительная экономичность и корректный учет баланса энергии. Ограничения — отсутствие прогноза эволюции солености и связанных с ней процессов.

Во второй схеме, «многофазной» схеме (далее Mushy) [32], морской лед рассматривается как двухфазная пористая среда, состоящая из твердой ледяной матрицы и жидкой рассольной фазы. Прогнозируются как температура (энтальпия), так и объемная соленость, а фазовое равновесие задается через кривую ликвидуса, связывающую температуру, соленость и долю жидкой фазы. В результате модель способна описывать процессы опреснения льда: гравитационный дренаж рассола и размывание талой водой. Такие механизмы определяют эволюцию солености, пористости и теплопереноса, а также влияют на механические свойства льда и его взаимодействие с океаном. Эта схема более сложна численно, что повышает вычислительную нагрузку. Однако физическая обоснованность выше: она позволяет воспроизводить наблюдаемые изменения солености и структуры льда в течение сезона и при изменении гидрологических условий.

Таким образом, в BL99 прогностической переменной является температура, а соленость задается; в Mushy схеме прогностическими являются и температура, и соленость. Первая учитывает скрытую теплоту и корректирует энергетический баланс, но не моделирует перенос соли. Вторая описывает перенос соли и эволюцию пористости. По вычислительным затратам BL99 проще и подходит для долгосрочных климатических расчетов, Mushy сложнее, но обеспечивает более полное физическое описание процессов. BL99 дает корректный баланс энергии и сезонный цикл толщины льда, однако менее чувствительна к изменениям солености. Mushy схема позволяет воспроизводить наблюдаемые процессы опреснения и лучше описывает внутреннюю структуру льда.

Нами были получены оценки качества расчета атмосферных параметров, параметров состояния океана и параметров состояния морского льда. Причем первые 24 часа после каждой инициализации модели для анализа не использовали, так как это время на согласование моделей. Атмосферные параметры оценивались с помощью пакета инструментов MET (Model Evaluation Tools) [33]. Была произведена оценка качества прогноза приземных температуры, температуры точки росы, скорости и направления ветра, а также количества выпавших за 12 часов осадков

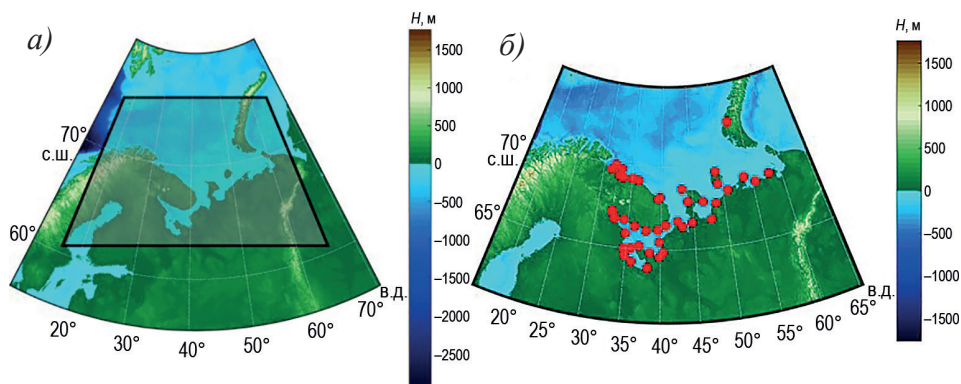


Рис. 1. Карты региона. Вычислительная область для моделей WRF, ROMS, CICE (а) и метеостанции, отображенные для оценок (б)

Fig. 1. Maps of the region. Computational domain for the WRF, ROMS, CICE models (а) and weather stations selected for evaluation (б)

по данным наблюдений на метеостанциях ISD (Integrated Surface Database) [34]. Данные наблюдений имеют 3-часовую дискретизацию, поэтому в случае атмосферы оценивали заблаговременности 27–120 ч с шагом 3 ч. Для оценок качества расчетов использовали только прибрежные и островные метеостанции с условием, чтобы они не были дальше 18 км (3 шага сетки атмосферной модели) от моря (рис. 1б).

Параметры состояния океана и морского льда оценивали по данным анализа GOFS 3.1 (Global Ocean Forecasting System 3.1) [23] с пространственным разрешением $0,04^\circ$ и с 40 уровнями по вертикали. Анализ доступен только за 12 часов по UTC каждого дня, поэтому в случае океана и морского льда оценивали заблаговременности 36, 60, 84 и 108 ч с последующим осреднением оценок по заблаговременности. Таким образом, статистика была получена по 700 928 парам прогноз-реанализа для каждого океанического параметра. В случае океана были получены оценки для всех рассчитываемых по ROMS океанических параметров на свободной ото льда поверхности — температуры поверхности моря, солёности на поверхности моря, скорости и направления течений на поверхности моря, а также динамического уровня моря. В случае морского льда оценивали толщину и сплоченность льда, а также скорость и направления дрейфа. Чтобы исключить при оценках пертурбации полей, вызванные граничными условиями, из анализа были исключены 50 узлов сетки (300 км) вблизи открытых границ (Север, Восток). Расчетная область выбиралась больше, чем нужно исходя из этих соображений.

Анализ результатов экспериментов

Анализ результатов расчета атмосферных параметров

В табл. 1 представлены систематическая (BIAS), абсолютная (MAE) и среднеквадратическая (RMSE) ошибки прогноза атмосферных параметров. Ошибки осреднены за весь период моделирования (для заблаговременностей 27, 30, ..., 120 ч) и по всей расчетной области. Статистический анализ для приземной температуры выполнен на основе 10648 пар прогноз–наблюдение; среднее число пар для каждого момента времени составило около 42 при общем количестве моментов порядка 257. Для приземной температуры точки росы для получения статистики использовали

Таблица 1

Ошибки расчета параметров атмосферной циркуляции

Table 1

Errors in calculating atmospheric circulation parameters

Параметр	BIAS	MAE	RMSE	SI
Приземная температура, °K	−2,11	2,82	3,50	0,01
Температура точки росы, °K	−1,30	2,36	3,04	0,01
Скорость приземного ветра, м/с	0,13	2,71	3,54	0,65
Направление приземного ветра, °	6,34	14,85	—	—
Количество выпавших за 12 ч осадков, мм	0,50	0,80	1,25	2,75

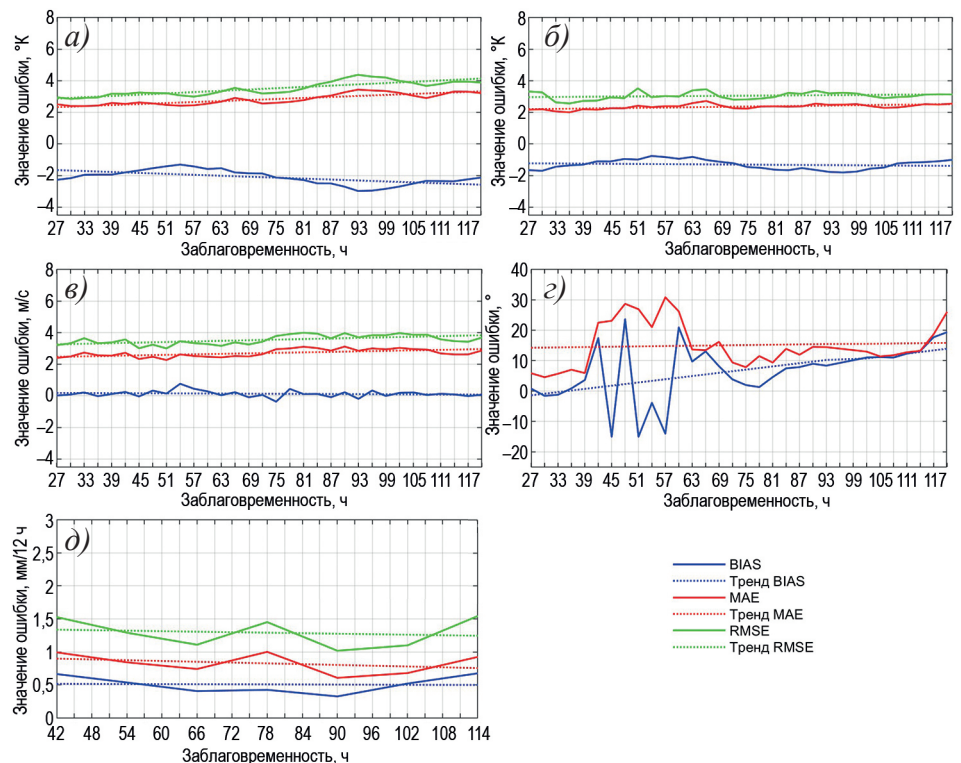


Рис. 2. Графики зависимости ошибок расчета от заблаговременности: приземная температура (а), приземная температура точки росы (б), скорость (в) и направление (г) приземного ветра, количество осадков (д)

Fig. 2. Graphs of the dependence of calculation errors on lead time: surface temperature (а), surface dew point temperature (б), surface wind speed (в), surface wind direction (г), precipitation (д)

10336 пары прогноз–наблюдение. Для скорости и направления приземного ветра — 10649. Для осадков — 1250. Интерполяция модельных данных в точки с координатами метеостанций проводилась методом усреднения с весами, обратно пропорциональными расстоянию до точки. Использовали 4 модельных узла, окружающих точку с координатами метеостанции.

Прогноз температуры и скорости ветра для арктического региона имеет несколько бóльшие ошибки, чем для умеренных широт, что обусловлено сложностью происходящих в Арктике метеорологических процессов, включая сильное влияние арктических морей на атмосферные процессы в данном регионе и редкость измерительной сети. Наблюдали систематическую недооценку рассчитанной приземной температуры и температуры точки росы на 2,11 °C и 1,30 °C соответственно и переоценку количества выпавших осадков на 0,50 мм.

На рис. 2 представлены графики зависимости ошибок расчета от заблаговременности для приземной температуры (2а), приземной температуры точки росы (2б), скорости (2в) и направления (2г) приземного ветра и количества осадков (2д). На графиках также приведены линейные тренды.

Анализируя рис. 2, можно сделать вывод о том, что для всех метеопараметров за исключением осадков наблюдаются положительные тренды роста ошибок с увеличением заблаговременности.

Анализ результатов расчета параметров состояния морского льда и океанических параметров

В табл. 2 представлены ошибки расчета толщины сплоченности и общего объема льда при использовании двух схем термодинамики льда BL99 и Mushy. Ошибки осреднены за весь период моделирования и по всей расчетной области. Общий объем льда считался по формуле (1):

$$V = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (H_{ij} \cdot A_{ij} \cdot S_{ij}), \quad (1)$$

где H — поле толщины льда, м; A — поле сплоченности льда (0–1); S — площадь каждой ячейки, м².

На рис. 3а представлены графики временного хода общего объема льда, рассчитанного для двух схем параметризаций и анализа GOFS 3.1, а также зависимости общего объема льда от заблаговременности (рис. 3б).

Из табл. 2 видно, что более простая схема BL99 оказывается более реалистичной, чем Mushy. Особенно при расчете сплоченности льда, когда наблюдается относительно большое завышение рассчитанной сплоченности льда при моделировании с использованием схемы Mushy. В случае толщины морского льда расчет с использованием схемы Mushy приводит к систематическому завышению толщины льда на 1 см, а расчет с использованием схемы BL99, наоборот, к занижению на 1 см. Бóльшая эффективность схемы BL99 подтверждается также при рассмотрении такого интегрального показателя качества расчета, как общий объем льда. Обе

Таблица 2

Ошибки расчета толщины, сплоченности и общего объема льда

Table 2

Errors in calculating ice thickness, concentration, and total volume

Параметр	Термодинамика льда	BIAS	MAE	RMSE
Толщина льда, м	BL99	–0,01	0,08	0,13
	Mushy	0,01	0,08	0,14
Сплоченность льда, %	BL99	2	12	20
	Mushy	10	14	25
Общий объем льда, км ³	BL99	1,50	1,63	2,11
	Mushy	4,67	4,67	4,96

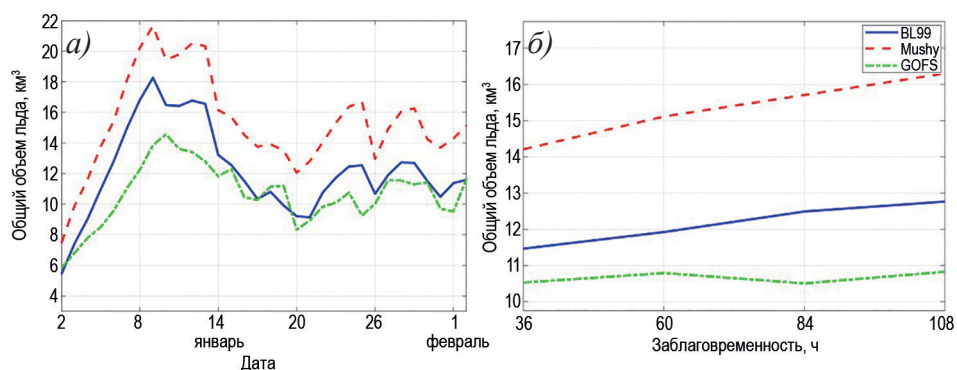


Рис. 3. Графики для общего объема льда: временной ход на 12 часов указанной даты (а), зависимость от заблаговременности (б)

Fig. 3. Graphs for total ice volume: time course at 12 o'clock on specific dates (a), dependence on lead time (b)

схемы склонны к завышению общего объема льда относительно данных анализа, но в случае использования схемы BL99 все ошибки существенно меньше (в 2–3 раза). На графиках, представленных на рис. 3а, хорошо видно, что на протяжении всего периода моделирования общий объем льда, посчитанный с использованием схемы Mushy, был больше рассчитанного с использованием схемы BL99. Объем льда в случае использования схемы BL99 лучше соотносится с данными анализа, особенно после 14.01.2023. На графике, представленном на рис. 3б, видно, что в случае использования схемы Mushy лед намерзает быстрее с ростом заблаговременности, чем для случая использования схемы BL99, и при расчете с заблаговременностью более 120 ч наблюдается тенденция к еще более быстрому росту расхождения рассчитанного с использованием схемы Mushy общего объема льда с данными анализа, чем для случая использования схемы BL99.

Бóльшие ошибки при расчетах с использованием более сложной схемы термодинамики Mushy, чем при использовании более простой BL99, можно объяснить тем, что схема Mushy, как физически более сложная, требует большей точности входных океанических параметров. Например, схема Mushy использует формулу теплообмена с учетом турбулентного теплопереноса и более чувствительна к ошибкам в скорости течений подо льдом, ошибкам в температуре и солености, параметризации турбулентности в ROMS, горизонтального и вертикального разрешения.

Так как при данной конфигурации моделей схема BL99 показала несколько лучшие результаты, дальнейший анализ рассчитанных полей состояния льда и океана проводился для варианта с использованием схемы BL99 в модели CICE.

В табл. 3 представлены ошибки расчета остальных параметров состояния льда и океанических параметров. Ошибки осреднены за весь период моделирования и по всей расчетной области.

По результатам верификации океанических параметров можно сделать вывод о том, что рассчитанная температура поверхности моря ниже температуры из анализа, что связано с занижением рассчитанной при помощи PWRP приземной температуры, которая является входным параметром. Наблюдалось незначительное завышение скорости течений и скорости дрейфа льда. В случае динамического уровня, наоборот, занижение.

Таблица 3

Ошибки расчета океанических параметров и параметров состояния морского льда

Table 3

Errors in the calculation of oceanic parameters and sea ice condition parameters

Параметр	BIAS	MAE	RMSE
Температура, °K	−0,09	0,16	0,27
Соленость, ‰	0,00	0,03	0,10
Скорость течений, м/с	0,03	0,07	0,13
Скорость дрейфа льда, м/с	0,09	0,14	0,26
Направление течений, °	−5	37	62
Направление дрейфа льда, °	−16	42	70
Уровень, м	−0,09	0,12	0,15
Толщина льда (BL99), м	−0,01	0,08	0,13
Сплоченность льда (BL99), %	2	12	20

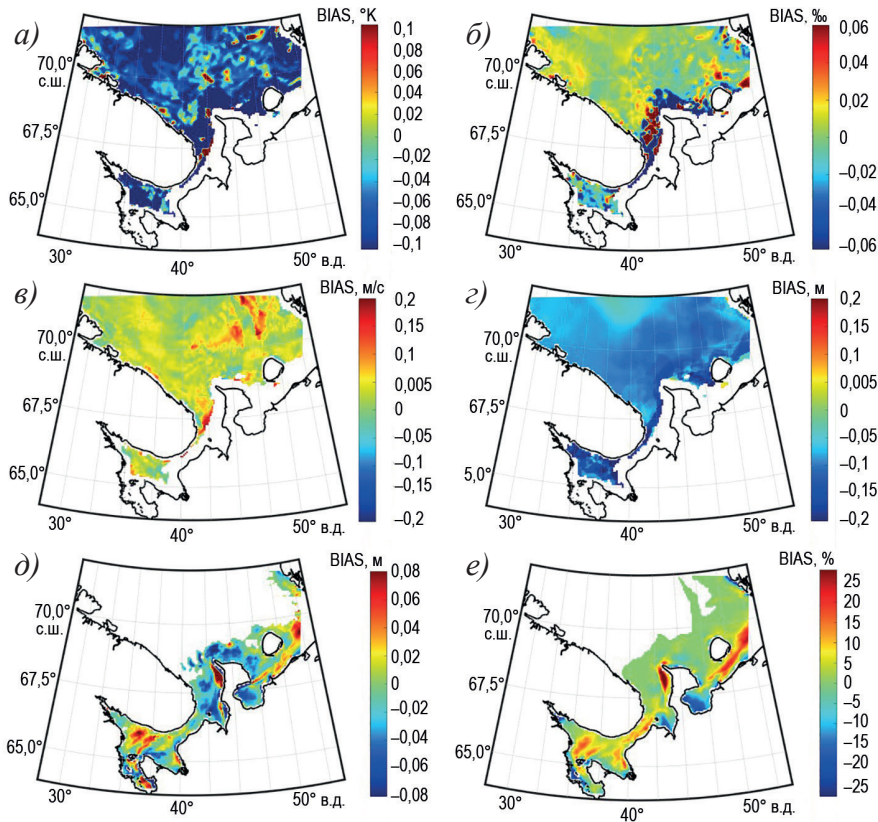


Рис. 4. Пространственное распределение систематических ошибок расчета: температура поверхности моря (а), соленость на поверхности моря (б), скорость течений на поверхности моря (в), динамический уровень (г), толщина морского льда (д) и сплоченность морского льда (е)

Fig. 4. Spatial distribution of BIAS in the calculation: sea surface temperature (a), sea surface salinity (b), sea surface current velocity (в), driving level (г), sea ice cover (д), and sea ice concentration (е)

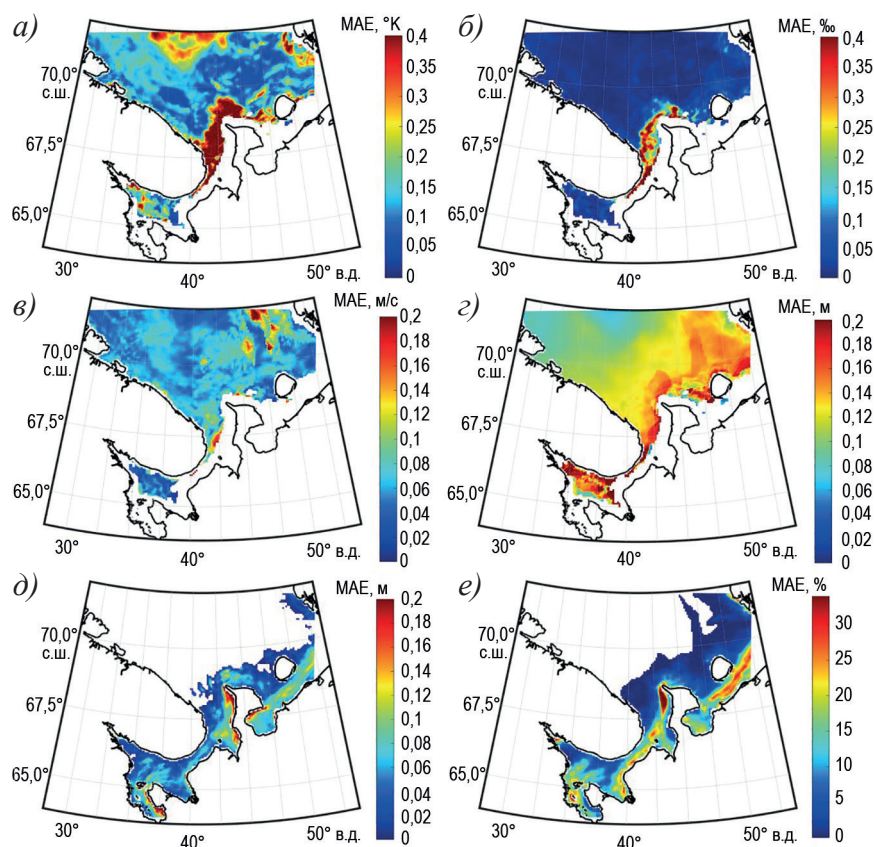


Рис. 5. Пространственное распределение абсолютных ошибок расчета: температура поверхности моря (а), соленость на поверхности моря (б), скорость течений на поверхности моря (в), динамический уровень (г), толщина морского льда (д) и сплоченность морского льда (е)

Fig. 5. Spatial distribution of MAE in the calculation: sea surface temperature (а), sea surface salinity (б), sea surface current velocity (в), driving level (г), sea ice cover (д), and sea ice concentration (е)

На рис. 4 представлены осредненные за весь период моделирования пространственные распределения систематических ошибок расчета температуры поверхности моря, солености на поверхности моря, скорости течений на поверхности моря, динамического уровня, толщины морского льда и его сплоченности. На рис. 5 представлены осредненные за весь период моделирования пространственные распределения абсолютных ошибок.

На представленных рисунках хорошо видно, что наибольшие ошибки расчета температуры, солености и скорости течений на поверхности моря наблюдались в Горле вблизи кромки льда, так как ледяная динамика в этом районе расчетной области может приводить к смещению фронтов, термоклинов и нарушению распределения массы воды. К тому же касательное напряжение трения атмосферного ветра на открытую воду гораздо сильнее, чем на лед, этим могут быть объяснены сравнительно большие ошибки (с завышением) в скорости поверхностных течений вблизи кромки льда в Горле (рис. 4), если кромка льда воспроизводится моделью

недостаточно точно. Что касается расчета толщины и сплоченности морского льда, то наибольшие ошибки наблюдались у п-ова Канин с систематическим завышением этих параметров относительно данных анализа.

Сравнение полученных результатов с другими исследованиями

Сравнение ошибок наших экспериментов по моделированию атмосферных характеристик (приземной температуры воздуха, приземной температуры точки росы, скорости приземного ветра) с результатами, приведенными в [11], показало следующее.

В наших расчетах приземной температуры воздуха систематическая ошибка составила $-2,11$ °C при $RMSE = 3,50$ °C, тогда как в работе зарубежных коллег систематическая ошибка варьировала от $-0,72$ °C (с Noah LSM) до $-0,98$ °C (с Noah MP), а $RMSE$ находилась в пределах $3,5-4,0$ °C. Таким образом, у нас отмечается более выраженное отрицательное смещение, однако среднеквадратичная ошибка оказалась практически идентичной результатам для Антарктики, что может указывать на схожие проблемы конфигурации моделей в передаче теплообмена в приповерхностном слое в условиях сложных ледово-морских покровов, но с региональными особенностями проявления холодного смещения.

По приземной температуре точки росы наша систематическая ошибка составила $-1,30$ °C при $RMSE = 3,04$ °C. В исследовании [11] систематическая ошибка составила $-0,48$ °C (Noah MP) и $-0,6$ °C (Noah LSM), а $RMSE$ достигал $3,5-4,0$ °C. Таким образом, в наших расчетах наблюдается более сильное отрицательное смещение по температуре точки росы, но при этом среднеквадратичная ошибка оказалась меньше, чем в Антарктике, что может быть связано с более высокой устойчивостью атмосферного пограничного слоя в Арктике, где условия испарения и влагосодержания воздуха сильнее ограничены низкими температурами.

Для скорости приземного ветра в наших расчетах значения ошибок составили: $BIAS = +0,13$ м/с при $RMSE = 3,54$ м/с. В работе [11] $BIAS$ изменялась от ~ 0 м/с в летний период до $+1,0$ м/с зимой, $RMSE$ находилась в диапазоне $3,0-4,5$ м/с. Следовательно, наши результаты по ветру весьма близки к опубликованным значениям, причем $BIAS$ ближе к нулю, чем для Антарктики.

Сравнение качества рассчитанных нами океанических параметров (температуры поверхности моря, солености, уровня моря) и параметров морского льда (толщины льда и скорости дрейфа льда) с результатами из других исследований показало следующие закономерности. В наших расчетах по температуре поверхности моря $BIAS$ равен $-0,09$ °C при $RMSE$, равном $0,27$ °C. Согласно межмодельному эксперименту OMIP-2 [2], $RMSE$ по температуре поверхности моря у участников варьировала от $\sim 0,2$ до $1,0$ °C, при этом лучшие реализации с ассимиляцией демонстрировали $RMSE \sim 0,2-0,4$ °C. Таким образом, наши ошибки по температуре поверхности моря находятся в лучшей части диапазона опубликованных значений. Для поверхностной солености нами получены значения $BIAS = 0,00$ ‰ и $RMSE = 0,10$ ‰. В моделях OMIP-2 $RMSE$ по солености обычно составляет $0,05-0,5$ ‰ в зависимости от региона. Наш результат соответствует нижней границе диапазона. Для уровня моря наши ошибки составили $BIAS = -0,09$ м и $RMSE = 0,15$ м. В глобальных и региональных системах $RMSE$ уровня колеблется в пределах $0,05-0,3$ м [35, 36]. Таким образом, наши значения находятся в типичном диапазоне для региональных моделей без детальной ассимиляции уровня. Для толщины льда (BL99) нами получено $BIAS = -0,01$ м и $RMSE = 0,13$ м. Сравнение модельных данных, представленных

в работе [37] и работе [3], со спутниковыми продуктами CryoSat-2 и ICESat-2 показывает RMSE толщины льда в диапазоне 0,08–0,3 м, в зависимости от региона и сезона. Таким образом, наши ошибки находятся на нижней границе опубликованных значений. Для скорости дрейфа льда нами получено $BIAS = 0,09$ м/с и $RMSE = 0,26$ м/с. В литературе для лучших схем с уточненной параметризацией ветрового трения ошибки RMSE варьируются от 0,05 до 0,07 м/с [9]. Таким образом, наши значения RMSE несколько выше лучших опубликованных результатов.

Заключение

По итогам работы была реализована система прогноза морского льда, состояния океана и атмосферы для Белого моря. Расчеты циркуляции атмосферы выполнялись с использованием модели WRF отдельно, а модели ROMS и CICE были объединены в единую систему для воспроизведения океанических параметров и динамики морского льда.

Полученные результаты показали, что система воспроизводит атмосферные и океанические параметры с качеством, сопоставимым с аналогичными зарубежными исследованиями. Атмосферные расчеты демонстрируют более выраженное холодное смещение приземной температуры воздуха и приземной температуры точки росы по сравнению с результатами над Антарктикой, однако значения RMSE находятся на уровне или ниже опубликованных оценок, а скорость ветра воспроизводится с меньшей систематической ошибкой, чем для Антарктики. Температура поверхности моря, соленость на поверхности моря, уровень моря и толщина льда воспроизводятся с малыми ошибками, находящимися на нижней границе диапазона опубликованных данных. Основным слабым местом системы является описание скорости дрейфа льда, а также описание температуры поверхности моря, поверхностной солености и уровня на границе лед — открытая вода. Важным результатом работы стало сравнение двух схем параметризации термодинамики льда. Более простая схема BL99 показала лучшие результаты и более стабильную работу по сравнению со схемой Mushy, требующей высокого разрешения и большего числа вертикальных уровней. Несмотря на систематическую переоценку общего объема льда, использование BL99 обеспечивает лучшее согласование с данными анализа GOFS 3.1.

Среди ограничений работы следует отметить относительно грубое горизонтальное разрешение расчетных сеток и отсутствие ассимиляции данных наблюдений. Эти факторы во многом объясняют выявленные ошибки, особенно в районах перехода лед — открытая вода, где динамичность границы приводит к существенным отклонениям в распределении океанических характеристик. В дальнейшем предполагаем это учесть. Перспективы дальнейшего развития связаны с увеличением пространственного разрешения моделей, внедрением более совершенных схем параметризаций, а также использованием ассимиляции спутниковых данных по морскому льду и океаническим полям. Это позволит, как мы надеемся, повысить точность прогноза дрейфа льда и океанических течений. Отметим и практическую значимость работы, которая заключается в том, что созданная система прогноза может быть использована для оперативного прогноза состояния Белого моря, поддержки судоходства и хозяйственной деятельности в регионе, а также для исследования климатических изменений в полярных широтах.

Конфликт интересов. Конфликт интересов отсутствует.

Финансирование. Исследование выполнено без финансовой поддержки в рамках работы над диссертацией.

Competing interests. No conflict of interests.

Funding. This research received no external funding.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Кузнецов М.В., Гецов А.А., Лукина. С.М. Проблемные вопросы, связанные с необходимостью преодоления последствий радиационных загрязнений экосистемы арктической зоны Российской Федерации. *Инновационная наука*. 2023;3-1:51–52.
Kuznetsov M.V., Getsov A.A., Lukina S.M. Problematic issues related to overcoming the consequences of radioactive contamination in the ecosystem of the Arctic zone of the Russian Federation. *Innovatsionnaya Nauka = Innovation Science*. 2023;3-1:51–52. (In Russ.).
2. Tsujino H., Urakawa L.S., Griffies S.M., Danabasoglu G., Adcroft A.J., Amaral A.E., Arsouze T., Bentsen M., Bernardello R., Böning C.W., Bozec A., Chassignet E.P., Danilov S., Dussin R., Exarchou E., Fogli P.G., Fox-Kemper B., Guo C., Ilicak M., Iovino D., Kim W.M., Koldunov N., Lapin V., Li Y., Lin P., Lindsay K., Liu H., Long M.C., Komuro Y., Marsland S.J., Masina S., Nummelin A., Rieck J.K., Ruprich-Robert Y., Scheinert M., Sicardi V., Sidorenko D., Suzuki T., Tatebe H., Wang Q., Yeager S.G., Yu Z. Evaluation of global ocean–sea-ice model simulations based on the experimental protocols of the Ocean Model Intercomparison Project phase 2 (OMIP-2). *Geoscientific Model Development*. 2020;13(8):3643–3708. <https://doi.org/10.5194/gmd-13-3643-2020>
3. Sievers I., Rasmussen T.A.S., Stenseng L. Assimilating CryoSat-2 freeboard to improve Arctic sea ice thickness estimates. *The Cryosphere*. 2023;17(9):3721–3738. <https://doi.org/10.5194/tc-17-3721-2023>
4. *Product User Guide & Algorithm Specification — AWI CryoSat-2 Sea Ice Thickness v2.4*. Alfred Wegener Institute (AWI); 2021. 58 p.
5. Hunke E.C., Lipscomb W.H., Turner A.K., Jeffery N., Elliott S. CICE: *The Los Alamos Sea Ice Model Documentation and Software User's Manual Version 5.1 (LA-CC-06-012)*. Los Alamos, NM: Los Alamos National Laboratory; 2015.
6. Madec G. and the NEMO System Team. *NEMO Ocean Engine Reference Manual. Version 5.0.0*. Zenodo; 2024. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1464816>
7. *ICESat-2 Algorithm Theoretical Basis Document for Global Geolocated Photons (ATL03), Release 005*. Greenbelt, Maryland: Goddard Space Flight Center; 2021. 208 p.
8. *Operation IceBridge: An airborne mission for Earth's polar ice*. NASA Goddard Space Flight Center; 2009–2020. Available at: <https://icebridge.gsfc.nasa.gov/> (accessed 20.03.2025).
9. Schweiger A.J., Zhang J. Accuracy of short-term sea ice drift forecasts using a coupled ice-ocean model. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2015;120(12):7827–7841. <https://doi.org/10.1002/2015JC011273>
10. Schweiger A., Lindsay R., Zhang J., Steele M., Stern H. Uncertainty in modeled Arctic sea ice volume. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2011;116:C07001. <https://doi.org/10.1029/2011JC007084>
11. Xue J., Xiao Z., Bromwich D.H., Bai L. Polar WRF V4.1.1 simulation and evaluation for the Antarctic and Southern Ocean. *Frontiers of Earth Science*. 2022;16:1005–1024. <https://doi.org/10.1007/s11707-022-0971-8>
12. Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Liu Z., Berner J., Wang W., Powers J.G., Duda M.G., Barker D.M., Huang X.-Y. A description of the advanced research WRF model Version 4.1. 2019. Available at: <https://doi.org/10.5065/1dfh-6p97> (accessed 20.03.2025).
13. Дианский Н.А., Фомин В.В., Кабатченко И.М., Грузинов В.М. Воспроизведение циркуляции Карского и Печорского морей с помощью системы оперативного диагноза и прогноза морской динамики. *Арктика: экология и экономика*. 2014;1:57–73.

- Diansky N.A., Fomin V.V., Kabatchenko I.M., Gruzinov V.M. Simulation of circulation of the Kara and Pechora seas through the system of express diagnosis and prognosis of marine dynamics. *Arctic: Ecology and Economy*. 2014;1:57–73. (In Russ.).
14. Дианский Н.А., Кабатченко И.М., Фомин В.В., Панасенкова И.И., Резников М.В. Система диагноза и прогноза термогидродинамических характеристик и ветрового волнения в западных морях российской Арктики и расчет параметров экстремального шторма 1975 г. в Баренцевом море с учетом ледовых условий. *Вести газовой науки*. 2018;4(36):156–165.
15. Платонов В.С., Мысленков С.А., Архипкин В.С., Кислов А.В. Высокоразрешающее моделирование гидрометеорологических полей в прибрежных районах Карского моря в условиях сложной конфигурации береговой линии. *Вестник Московского университета. Серия 5. География*. 2022;1:87–106.
- Platonov V.S., Myslenkov S.A., Arkhipkin V.S., Kislov A.V. High-resolution modeling of hydrometeorological fields over the Kara Sea coastal regions with irregular coastline. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5, Geografiya = Lomonosov Geography Journal* 2022;(1):87–106. (In Russ.).
16. The WAVEWATCH III Development Group. User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 5.16. Technical Note 329. NOAA/NWS/NCEP/MMAB: College Park, MD, USA; 2016. 326 p. Available at: <https://polar.ncep.noaa.gov/waves/wavewatch/manual.v5.16.pdf> (accessed 20.03.2025).
17. ADCIRC. Advanced CIRCulation Model. The University of North Carolina at Chapel Hill; 2025. Available at: <https://adcirc.org/> (accessed 20.03.2025).
18. Myslenkov S., Shestakova A., Chechin D. The impact of sea waves on turbulent heat fluxes in the Barents Sea according to numerical modeling. *Atmos. Chem. Phys.* 2021;21:5575–5595. <https://doi.org/10.5194/acp-21-5575-2021>
19. Shchepetkin A.F., McWilliams J.C. The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model. *Ocean Modelling*. 2005;9(4):347–404. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2004.08.002>
20. Kumar R., Li J., Hedstrom K., Babanin A.V., Tang Y. Intercomparison of Arctic sea ice simulation in ROMS-CICE and ROMS-Budgell. *Polar Sci.* 2021;29:100716. <https://doi.org/10.1016/j.polar.2021.100716>
21. Yang C.-Y., Liu J., Chen D. An improved regional coupled modeling system for Arctic sea ice simulation and prediction: a case study for 2018. *Geosci. Model Dev.* 2022;15:1155–1176. <https://doi.org/10.5194/gmd-15-1155-2022>
22. Wang W., Chen M., Kumar A. An assessment of the CFS real-time forecast. *Weather Forecast.* 2010;25:950–969. <https://doi.org/10.1175/2010WAF2222345.1>
23. Metzger E.J., Helber R.W., Hogan P.J., Posey P.G., Thoppil P.G., Townsend T.L., Wallcraft A.J., Smedstad O.M., Franklin D.S., Zamudo L., Phelps M. W. *Global ocean forecast system 3.1 Validation test. Report No. AD1034517*. Stennis Space Center, MS: Naval Research Laboratory; 2017. 112 p. Available at: https://archive.org/details/DTIC_AD1034517 (accessed 20.03.2025).
24. Morrison H., Thompson G., Tatarskii V. Impact of cloud microphysics on the development of trailing stratiform precipitation in a simulated squall line: comparison of one- and two-moment schemes. *Mon. Wea. Rev.* 2009;137:991–1007. <https://doi.org/10.1175/2008MWR2556.1>
25. Iacono M.J., Delamere J.S., Mlawer E.J., Shephard M.W., Clough S.A., Collins W.D. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: calculations with the AER radiative transfer models. *J. Geophys. Res.* 2008;113:D13103. <https://doi.org/10.1029/2008JD009944>
26. Nakanishi M., Niino H. Development of an improved turbulence closure model for the atmospheric boundary layer. *J. Meteor. Soc. Japan*. 2009;87(5):895–912. <https://doi.org/10.2151/jmsj.87.895>

27. Olson J.B., Kenyon J.S., Angevine W.M., Brown J.M., Pagowski M., Sušelj K. A description of the MYNN-EDMF scheme and the coupling to other components in WRF–ARW. *NOAA Technical Memorandum OAR GSD*. 2019;61:37. <https://doi.org/10.25923/n9wm-be49>
28. Niu G.-Y., Yang Z.-L., Mitchell K.E., Chen F., Ek M.B., Barlage M., Kumar A., Manning K., Niyogi D., Rosero E., Tewari M., Xia Y. The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah–MP): 1. Model description and evaluation with local-scale measurements. *J. Geophys. Res.* 2011;116:D12109. <https://doi.org/10.1029/2010JD015139>
29. Kain J.S. The Kain–Fritsch convective parameterization: an update. *J. Appl. Meteor. Climatol.* 2004;43:170–181. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2004\)043<0170:TKCPAU>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2004)043<0170:TKCPAU>2.0.CO;2)
30. Warner J.C., Sherwood C.R., Arango H.G., Signell R.P. Performance of four turbulence closure methods implemented using a generic length scale method. *Ocean Modelling*. 2005;8:81–113.
31. Bitz C.M., Lipscomb W.H. An energy-conserving thermodynamic model of sea ice. *J. Geophys. Res. Oceans*. 1999;104(C7):15669–15677. <https://doi.org/10.1029/1999JC900100>
32. Turner A.K., Hunke E.C., Bitz C.M. Two modes of sea-ice gravity drainage: a parameterization for large-scale modeling. *J. Geophys. Res. Oceans*. 2013;118:2279–2294. <https://doi.org/10.1002/jgrc.20171>
33. Jensen T., Prestopnik J., Soh H., Goodrich L., Brown B., Bullock R., Halley Gotway J., Newman K., Opatz J. The MET Version 12.0.2 User’s Guide. Developmental Testbed Center; 2025. Available at: <https://github.com/dtcenter/MET/releases> (accessed 12.03.2025).
34. Smith A., Lott N., Vose R. The integrated surface database: recent developments and partnerships. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2011;92(6):704–708. <https://doi.org/10.1175/2011BAMS3015.1>
35. Treu S., Muis S., Dangendorf S., Wahl T., Oelsmann J., Heinicke S., Frieler K., Mengel M. Reconstruction of hourly coastal water levels and counterfactuals without sea level rise for impact attribution. *Earth System Science Data*. 2024;16(2):1121–1136. <https://doi.org/10.5194/essd-16-1121-2024>
36. Muis S., Irazoqui Apecechea M., Dullaart J., de Lima Rego J., Madsen K.S., Su J., Yan K., Verlaan M. A high-resolution global dataset of extreme sea levels, tides, and storm surges, including future projections. *Frontiers in Marine Science*. 2020;7:263. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00263>
37. Liu Y., Key J. R., Wang X., Tschudi M. Multidecadal Arctic sea ice thickness and volume derived from ice age. *The Cryosphere*. 2020;14(4):1325–1345. <https://doi.org/10.5194/tc-14-1325-2020>

ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ГИДРОСФЕРЫ ATMOSPHERE AND HYDROSPHERE PHYSICS

Оригинальная статья / Original paper

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-4-396-411>

УДК 533.951; 551.510.413.7; 621.396.98



Экспериментальные исследования магнитосферного распространения радиоволн средневолнового диапазона

А.С. Калишин[✉], Н.Ф. Благовещенская, Т.Д. Борисова, И.М. Егоров,
А.О. Мингалева, Г.А. Загорский

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

[✉]askalishin@ari.ru

ID АСК, 0000-0001-7299-6546; НФБ, 0000-0003-1752-3273; ТДБ, 0000-0003-1727-5310;
ИМЕ, 0009-0004-7062-6161; АОМ, 0009-0003-1284-8447; ГАЗ, 0000-0002-4342-7907

Аннотация. В работе приведены результаты экспериментальных исследований аномального распространения радиоволн средневолнового диапазона. Было обнаружено, что в пункте излучения зондирующего сигнала регистрировались эхо-сигналы с необычно большими временами задержки 310–324 мс. Результаты экспериментов можно объяснить эффектом гидирования — попаданием радиоволны в волноводный канал, ориентированный вдоль силовой линии магнитного поля Земли. В таком канале волна распространяется в магнитосопреженную точку в Южном полушарии и возвращается обратно в пункт излучения, пройдя 93000 км. Выполнен анализ фоновых геофизических условий, и рассмотрены механизмы формирования волнового канала вдоль магнитной силовой линии. Эффект гидирования может иметь прикладное значение для разработки средств наземного мониторинга параметров космической погоды и радиолокационного зондирования околоземного космического пространства.

Ключевые слова: средние волны, радиоэхо, ионосфера, магнитосфера, плазмопауза, главный ионосферный провал, геомагнитные возмущения, магнитные силовые линии, магнитосопреженная точка

Для цитирования: Калишин А.С., Благовещенская Н.Ф., Борисова Т.Д., Егоров И.М., Мингалева А.О., Загорский Г.А. Экспериментальные исследования магнитосферного распространения радиоволн средневолнового диапазона. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2025;71(4):396–411. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-4-396-411>

Поступила 29.08.2025

После переработки 06.10.2025

Принята 09.10.2025

© Авторы, 2025

© Authors, 2025

Experimental studies of medium radio wave propagation in the magnetosphere

Alexey S. Kalishin✉, Nataly F. Blagoveshchenskaya, Tatiana D. Borisova,
Ivan M. Egorov, Anna O. Mingaleva, Gleb A. Zagorskiy

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

✉askalishin@aari.ru

ID ASK, 0000-0001-7299-6546; NFB, 0000-0003-1752-3273; TDB, 0000-0003-1727-5310;
IME, 0009-0004-7062-6161; AOM, 0009-0003-1284-8447; GAZ, 0000-0002-4342-7907

Abstract. The paper presents experimental studies of anomalous propagation of medium radio waves. Radio echo signals with unusually long delay times of 310–324 ms were recorded at the transmitter point of the sounding signal. The experimental results can be explained by the guiding effect, when a radio wave penetrates into a waveguide channel oriented along the Earth's magnetic field line. In this case, the radio wave propagates to the magnetic conjugated point in the southern hemisphere and returns to the transmission point traveling a distance of 93,000 km. The echo signals were recorded with the use of AARI-developed transmitting and receiving measuring equipment that has a minimum radiation power of 1 kW, while in the previous LDE observation experiments the radiation power was 5 and 17 kW. For the first time, echo signals that radiated from the Earth's surface were recorded not at a single fixed frequency, but in a frequency band of 400 kHz, from 2.100 to 2.400 kHz. The noise environment at frequencies below 2.100 kHz did not allow us to determine the lower boundary of the channel. Analysis of the background geophysical conditions was performed. It was shown that the long delayed echo (LDE) signals were observed under disturbed magnetic conditions (the planetary magnetic index $K_p = 4^+$) in evening hours. The echo signal frequencies exceeded the critical frequencies of the ionosphere at the transmitter point and were less than the critical frequencies at the magnetically conjugate point. A distinctive feature seen from the CADI ionograms was the presence of the F3S layer, which is the main signature of the development of a subauroral polarization stream (SPS) near the station's zenith. Swarm satellite observations revealed that the Gorkovskaya observatory was located at the bottom of the main ionospheric trough (MIT), near its equatorial boundary. The projection of the plasmapause was also located at the MIT bottom, between its polar boundary and Gorkovskaya. Plausible mechanisms for the creation of a waveguide along the magnetic field line were considered. The guiding effect may find practical significance in the development of means and methods for ground-based monitoring of space weather parameters, as well as radar sounding of the near-Earth space.

Keywords: medium radio-waves, long-delay echoes, ionosphere, magnetosphere, plasmapause, main ionospheric trough, geomagnetic disturbances, magnetic field line, magnetic conjugated point

For citation: Kalishin A.S., Blagoveshchenskaya N.F., Borisova T.D., Egorov I.M., Mingaleva A.O., Zagorskiy G.A. Experimental studies of medium radio wave propagation in the magnetosphere. *Arctic and Antarctic Research*. 2025;71(4):396–411. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-4-396-411>

Received 29.08.2025

Revised 06.10.2025

Accepted 09.10.2025

Введение

При распространении радиоволн средневолнового (СВ) и коротковолнового (КВ) диапазонов достаточно редко наблюдается эффект радиоэха, когда в пункте излучения регистрируется собственный сигнал с необычно большими временами задержки от сотен миллисекунд до единиц секунд [1]. С подобным явлением сталкивались не только исследователи и специалисты, эксплуатирующие различные системы связи, но и радиолюбители. Например, П. Мартинес приводит результаты своих многолетних наблюдений эхо-сигналов с большими временами задержки на

территории Великобритании и делает попытку объяснения данного явления за счет воздействия гравитационного поля Луны [2].

Задержки эхо-сигналов в сотни миллисекунд могут быть обусловлены кругосветным распространением радиоволн, отражением от космических объектов или магнитосферным распространением вдоль магнитных силовых линий. При кругосветном распространении сигналов должен произойти захват радиоволны в канал ионосферы — Земля. В таком канале радиоволна может обогнуть земной шар и возвратиться в пункт излучения. При этом волна может совершить не один оборот вокруг Земли, и эхо-сигнал будет наблюдаться несколько раз. При подобном распространении эхо-сигналы имеют постоянную задержку, а в случае двух или трех витков задержка будет кратной. Время огибания земного шара весьма стабильно и составляет 136–139 мс [1].

При магнитосферном распространении радиоволна, пройдя ионосферу, проникает в магнитосферу и канализируется вдоль магнитных силовых линий Земли. Данное явление получило название гидирование — волноводное распространение электромагнитных волн вдоль силовых линий магнитного поля. Эхо с большими задержками регистрируется при попадании радиосигнала в плазменные неоднородности, играющие роль волноводов. В таком волноводе сигнал распространяется до магнитосопряженной точки, отражается от внешней ионосферы и возвращается обратно. К подобному волноводу можно отнести крупномасштабные неоднородности с пониженной или повышенной электронной концентрацией в магнитосфере, которые образуются вдоль силовых линий магнитного поля. Различные эксперименты по исследованию аномальных механизмов распространения средних и коротких волн показали возможность подобного механизма распространения [3–5]. Наиболее часто эхо-сигналы от волн, распространяющихся в магнитосферных каналах (дактах), регистрировались в диапазоне частот 1,8–3 МГц, а в некоторых случаях инжекция радиоволн в магнитосферу и их дальнейшее распространение наблюдались даже в диапазоне 9–12 МГц [6]. Попадание радиоволн средневолнового диапазона в волноводный канал между магнитосопряженными точками регистрировалось и по данным спутниковых наблюдений. По результатам зондирования ионосферы сверху на ИСЗ «АЛЮЭТТ» показано, что зондирующие сигналы, частотой менее 4 МГц, могли проникнуть в узкие дакты, ориентированные вдоль магнитных силовых линий, и распространяться в магнитосопряженную точку противоположного полушария [7]. Эхо-сигналы наблюдались на L -оболочках со значением менее 4 и временными задержками до 500 мс. Авторами было показано, что наиболее часто эхо-сигналы регистрировались на частотах до 2 МГц. При этом нужно отметить, что подобный механизм распространения наблюдается крайне редко и составляет единицы процентов от всего времени проведения экспериментов. Например, в ходе выполнения исследований по гидированию на нагревном стенде EISCAT/Heating не удалось получить положительного результата [8]. Нагревной стенд использовался в качестве радиолокационной КВ-станции, которая работала на частотах 4,9; 5,4 и 7,9 МГц. Эффективная мощность излучения доходила до 1200 МВт.

Целью данной работы являлось экспериментальное исследование эффекта гидирования радиоволн средневолнового и коротковолнового диапазонов. Зондирующие сигналы попадали в волноводный канал, ориентированный вдоль силовых линий магнитного поля Земли, распространялись в магнитосопряженную точку, находящуюся в Южном полушарии, отражались от внешней ионосферы и возвращались

обратно в пункт излучения. В статье приводится краткое описание оборудования, разработанного для проведения исследований, и результаты регистрации эхо-сигналов. Основное внимание уделяется анализу фоновых геофизических условий, необходимых для регистрации эхо-сигналов, и возможных механизмов распространения радиоволн вдоль магнитной силовой линии.

Описание эксперимента и используемой аппаратуры

Эксперименты по гидированию радиоволн выполнялись на научно-исследовательской станции (НИС) «Горьковская» в январе 2024 и 2025 гг. НИС «Горьковская» расположена в Ленинградской области, севернее Санкт-Петербурга (60,27° с. ш., 29,38° в. д.). Станция предназначена для проведения круглосуточного мониторинга параметров ионосферы и условий распространения радиоволн. Помимо этого, на станции выполняются исследования по дистанционной диагностике эффектов активных воздействий мощного радиоизлучения нагревных стендов на ионосферную плазму.

Эксперименты выполнялись в вечерние и ночные часы. Это обусловлено тем, что эффект гидирования радиоволн с последующей регистрацией эхо-сигналов возможен при совпадении ряда условий, которые обеспечивают прохождение зондирующего сигнала за пределы ионосферы в точке излучения и его отражение в магнитосопреженной точке (МСТ) [4]:

– критическая частота в пункте излучения — НИС «Горьковская» ($foF2_{GRK}$) должна быть ниже, чем в магнитосопреженной точке ($foF2_{MCP}$)

$$foF2_{GRK} < foF2_{MCP}; \quad (1)$$

– частота зондирующих сигналов fss должна соответствовать условию

$$foF2_{GRK} < fss < foF2_{MCP}. \quad (2)$$

Для обеспечения условий (1) и (2) необходимо выполнение экспериментов в зимний период для Северного полушария (НИС «Горьковская»), что будет соответствовать летнему периоду в Южном полушарии. Анализ поведения $foF2$ на НИС «Горьковская» и МСТ показал, что данное условие реализуется в период с ноября по февраль.

Значение критической частоты слоя $F2$ и наличие спорадического слоя Es на НИС «Горьковская» определялось по данным вертикального зондирования (ВЗ) ионосферы, которое проводилось каждые 15 минут. На станции установлен ионозонд CADI, который выполняет сетевые наблюдения параметров ионосферы [9].

Значение критических частот в МСТ оценивалось по данным, представленным на сайте австралийского Центра прогнозирования космической погоды <https://www.sws.bom.gov.au>. Модельные расчеты сравнивались с результатами вертикального зондирования ближайшего к магнитосопреженной точке ионозонда, расположенного на станции Моусон (Антарктида). Инограммы вертикального зондирования станции Моусон доступны в реальном времени на том же сайте.

Основной задачей экспериментов являлось излучение диагностического сигнала и поиск его эха. Для расчета положения МСТ, номера L -оболочки, протяженности радиотрассы вдоль магнитной силовой линии, а следовательно, и задержки радиоэха зондирующего сигнала использовался программный пакет GEORACK T-89 [10]. Для учета магнитосферной активности в модели применяется Kp -индекс магнитной активности. L -оболочка (параметр Мак-Илвейна) характеризует геоцентрическое расстояние до вершины магнитной силовой линии в радиусах Земли (R_j).

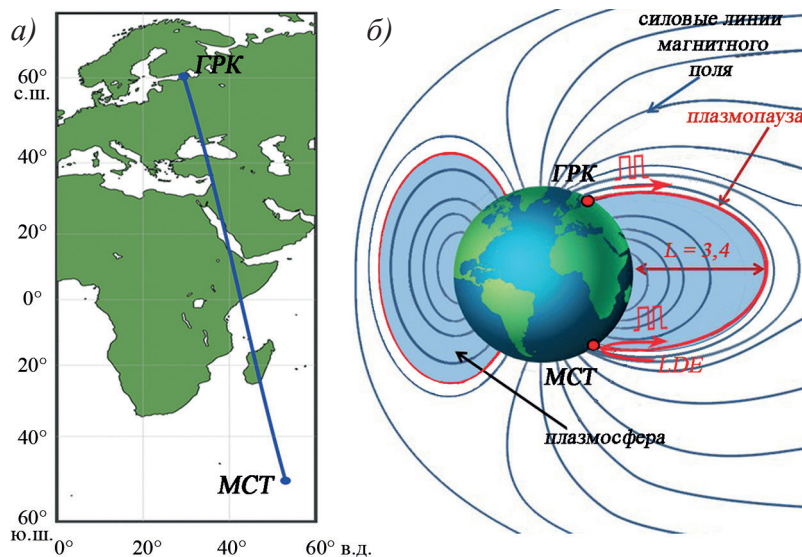


Рис. 1. Геометрия проведения эксперимента. (а) Положение обсерватории ААНИИ НИС «Горьковская» (ГРК), магнитосопряженной точки (МСТ) и проекции траектории распространения радиоволны на поверхность Земли; (б) геометрия распространения зондирующего сигнала вдоль магнитной силовой линии для НИС «Горьковская» при значении $Kp = 3-5$

Fig. 1. The geometry of experiments. The location of the AARI “Gorkovskaya” observatory (GRK), the magnetically conjugate point (MCP) and the projection of the trajectory of radio waves to the Earth’s surface (a); the propagation trajectory of the sounding signal from GRK to MCP and back along the magnetic field line for $Kp = 3-5$ (b)

На рис. 1 приведены расчетные значения координат магнитосопряженной точки и значение L -оболочки в радиусах Земли при $Kp = 3-5$. Положение МСТ находится в районе 51° ю. ш. и 53° в. д., значение L -оболочки составляет 3,4–3,5. Расчетное расстояние до магнитосопряженной точки и обратно вдоль силовой линии составляет 94546–96712 км, время задержки эхо-сигналов должно находиться в диапазоне 315–322 мс. Также схематически показано (см. рис. 1) положение плазмопаузы — верхней границы холодной плазменной оболочки Земли, которая характеризуется резким спадом концентрации плазмы. Область высот атмосферы от 1000 км до плазмопаузы называется плазмосферой. Силовые линии геомагнитного поля в плазмосфере замкнуты и практически дипольны. Высотные положения нижней границы плазмопаузы и форма плазмопаузы зависят от геофизических условий.

Для поиска эхо-сигнала автокорреляционным методом и его однозначной идентификации в качестве зондирующего сигнала использовалась пятиимпульсная амплитудная последовательность Баркера. Длительность импульсов последовательности выбиралась из условия безотказной работы имеющихся в наличии трансивера и усилителя мощности. В эксперименте использовался трансивер IC-718 и усилитель PW-1 фирмы ICOM. Опыт их эксплуатации показал, что оборудование может стабильно работать с импульсами длительностью не менее 30 мс. Таким образом, длительность зондирующей последовательности составляла 150 мс. Зондирующий сигнал передавался каждые 4 с. Усилитель PW-1 обеспечивал выходную мощность сигнала от 500 до 1300 Вт в зависимости от частоты излучения.

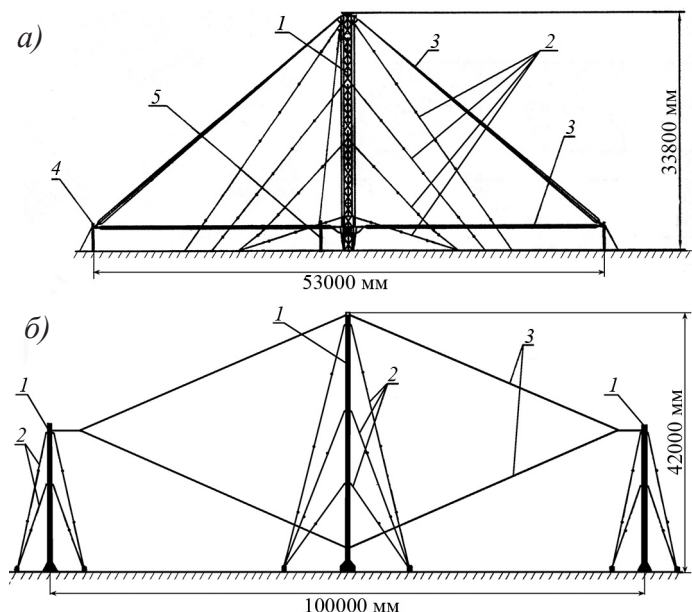


Рис. 2. Антенно-фидерная система комплекса зондирования. Передающая (а) и приемная (б) антенны: 1 — мачтовое устройство, 2 — оттяжка, 3 — антенное полотно, 4 — оттягивающая опора, 5 — опора с согласованной нагрузкой

Fig. 2. Antenna and feedline of the remote sensing sounder complex. а) Transmitting antenna and б) receiving antenna: 1 — radio mast, 2 — guy wire, 3 — antenna curtain, 4 — guy anchor, 5 — support with balanced/unbalanced device

В эксперименте использовалась передающая антенна, которая представляет собой широкополосное «дельта-полотно» с рабочим диапазоном частот 1–16 МГц (рис. 2а). Антенное полотно состоит из двух наклонных и двух горизонтальных вибраторов, которые крепятся на мачте высотой 33 м [11]. Верхние части двух наклонных вибраторов подключаются к согласованной нагрузке 600 Ом. Нижние части наклонных вибраторов соединяются с концами вибраторов горизонтальных частей полотна. Вторые концы горизонтальных вибраторов подключаются к согласующему высокочастотному трансформатору, выполняющему согласование симметричного тракта с волновым сопротивлением 600 Ом с несимметричным трактом фидерной линии с волновым сопротивлением 50 Ом. В антенне обеспечивается однонаправленное излучение, диаграмма направленности ориентирована вертикально вверх относительно поверхности земли.

Прием зондирующих сигналов осуществлялся при помощи КВ приемного комплекса, представляющего собой анализатор спектра декаметрового диапазона на базе приемника IC-R75 [12]. Данное оборудование предназначено для регистрации сигналов КВ нагревных стендов и узкополосного искусственного радиоизлучения ионосферы во время экспериментов по активным воздействиям на ионосферную плазму. Для использования его в экспериментах по гидированию было разработано программное обеспечение (ПО), позволяющее регистрировать, визуализировать, проводить корреляционный и спектральный анализ последовательности радиоим-

пульсов. Ширина полосы анализа принимаемых сигналов составляла 250 Гц и задавалась полосовым фильтром на промежуточной частоте. Регистрация сигналов выполнялась в бинарный файл для дальнейшего анализа.

Прием сигналов выполнялся на вертикальную ромбическую антенну с длиной одной стороны 50,4 м и высотой центральной мачты 42 м (см. рис. 2б). Антенна нагружена на сопротивление 600 Ом, закрепленное на мачте. Для согласования антенны с несимметричной линией 50 Ом используется симметрирующий трансформатор, закрепленный под мачтой. Антенна обеспечивает прием или излучение зондирующих сигналов в частотном диапазоне от 1 до 5 МГц.

Для синхронизации работы радиопередатчика и приемника было разработано соответствующее программное обеспечение, позволяющее проводить сканирование выбранного частотного диапазона с заданным числом повторений зондирующих последовательностей. ПО формирует сетку излучения по времени и частоте, синхронизирует перестройку передатчика и приемника. Таким образом, по функциональному исполнению комплекс оборудования напоминал ионозонд, с тем отличием, что ожидаемые задержки отраженных импульсов составляют не микросекунды, а сотни миллисекунд.

Результаты эксперимента

Всего было выполнено 19 серий экспериментов. Длительность каждой серии составляла от 4 до 10 часов. Эксперименты проводились при спокойных геомагнитных условиях за исключением 15, 16 и 20 января 2025 г., когда наблюдались магнитные возмущения. При спокойных условиях максимальное значение Kp -индекса составляло от 1– до 3+ при суммарном значении за сутки ΣKp от 8– до 16. В воз-

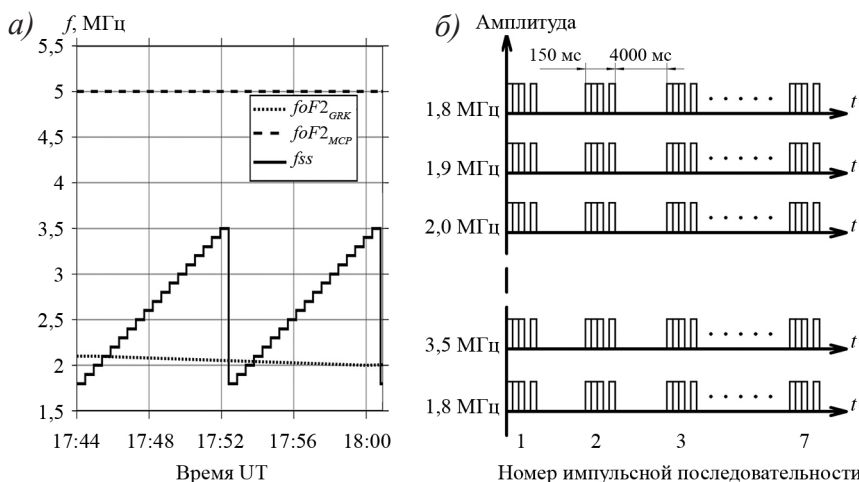


Рис. 3. Ход критических частот $F2$ -слоя ионосферы на НИС «Горьковская» ($foF2_{GRK}$) и в магнитосопряженной точке ($foF2_{MCP}$) (см. рис. 1), а также изменение частоты зондирующего сигнала (fss) 20 января 2025 г. с 17:44 до 18:10 UT (а). Периодограмма зондирующего сигнала (б)

Fig. 3. Behavior of the critical frequencies of the ionospheric $F2$ layer at the Gorkovskaya observatory ($foF2_{GRK}$) and at the magnetically conjugate point ($foF2_{MCP}$) (see Fig. 1), as well as the frequency changes of the sounding signal (fss) on January 20, 2025 from 17:44 to 18:10 UT (a). The periodogram of the sounding signal (b)

мушенные периоды значение $Kp \approx 4$, при $\Sigma Kp = 22\text{--}27\text{--}$. Наиболее возмущенные условия наблюдались 20 января 2025 г. Максимально значение Kp -индекса за сутки составляло 4+, при $\Sigma Kp = 27\text{--}$.

Эхо-сигналы с задержкой 310–324 мс были зарегистрированы только 20 января 2025 г. в период с 17:45 до 18:00 UT. В данный период наблюдались возмущенные магнитные условия, значение Kp -индекса составляло 4+, критическая частота $F2$ -слоя на НИС «Горьковская» составляла 2,1 МГц, E_s -слой отсутствовал. Излучение зондирующих сигналов выполнялось в диапазоне 1,8–3,5 МГц, с шагом 100 кГц. На каждой частоте излучалось 7 импульсных последовательностей с интервалом 4 с. Мощность излучения составляла 1 кВт. На рис. 3а приведен ход критических частот на НИС «Горьковская» и в магнитосопряженной точке, а также частоты зондирующих сигналов в данный период. На рис. 3б показана периодограмма излучаемых сигналов.

На рис. 4 представлены осциллограммы амплитудно детектированных зондирующих сигналов, зарегистрированных в 17:46 UT 20 января 2025 г. Пример последовательности диагностических сигналов с регистрацией эха приведен на рис. 4а. Поскольку зондирующий сигнал (см. рис. 4а, обозначен «3С») представляет собой пятиимпульсную последовательность Баркера (1 1 1 0 1), на осциллограмме он выглядит как два импульса, разделенных паузой. Длительность первого импульса составляет 90 мс, длительность второго — 30 мс, длительность паузы между импульсами также 30 мс. Зондирующие импульсы располагаются на нулевой секунде осциллограммы. При частоте излучения 2,2 МГц на 310-й мс после начала зондирования был зарегистрирован эхо-сигнал (long delay echo — LDE), который имеет такие же временные характеристики, как и излученный сигнал, но меньшую амплитуду.

На рис. 4б приведены зарегистрированные сигналы после амплитудного детектирования в координатах период зондирования — время — интенсивность. На нулевой секунде располагается зондирующий сигнал. Изменение частоты излучения показано на рис. 4в. Первый цикл зондирования начался в 17:44:00 UT, частота составляла 1800 кГц. На данной частоте было выполнено семь зондирований с периодом 4 с. Через 28 с частота излучения перестроилась на 100 кГц и стала составлять 1900 кГц. На данной частоте также было выполнено семь зондирований с интервалом в 4 с. Таким образом, перестройка частоты излучения осуществлялась каждые 28 с до 17:52:00 UT, пока частота не достигла верхнего предела зондирования 3500 кГц. С 17:52:25 цикл зондирования повторился с частоты 1800 кГц. Всего было выполнено три цикла зондирования с 17:44 до 18:09 UT. Показаны (см. рис. 4) только первые два цикла, в которых наблюдались эхо-сигналы.

Эхо-сигналы в первом цикле зондирования стали наблюдаться с 17:45:25 UT. На частоте излучения 2,1 МГц были зарегистрированы эхо-сигналы в 5 зондирующих последовательностях из 7. На частотах 2,2 и 2,3 МГц было зарегистрировано по 6 эхо-сигналов.

Во втором цикле зондирования с 17:52:25 до 18:00:50 эхо-сигналы регистрировались в частотном диапазоне 2,1–2,4 МГц. На частоте 2,1 МГц зарегистрировано 6 эхо-сигналов, на частоте 2,2 МГц — 7, на частоте 2,3 МГц — 6 и на 2,4 МГц — 2 эхо-сигнала. В третьем цикле эхо-сигналы не регистрировались, поэтому они не приводятся (см. рис. 4).

В диапазоне от 1,8 до 2,1 МГц регистрировались сигналы различных источников излучения, что проявилось в высоком уровне шумов, поэтому нельзя однозначно определить наличие эхо-сигналов на этих частотах.

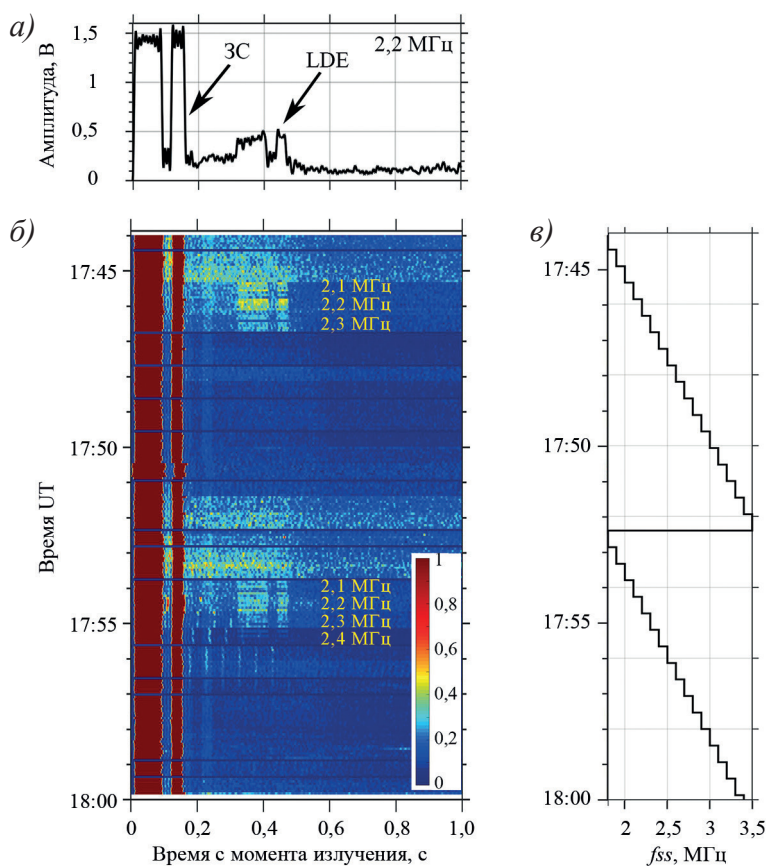


Рис. 4. Интенсивности зарегистрированных сигналов и значение частоты зондирования 20 января 2025 г. с 17:44 до 18:00 UT. (а) Осциллограмма зарегистрированных сигналов на частоте 2,2 МГц. (б) Зарегистрированные сигналы в координатах период зондирования — время — интенсивность. (в) Частота излучения зондирующего сигнала

Fig. 4. The intensity of the recorded signals and the frequency changes of the sounding signal on January 20, 2025 from 17:44 to 18:00 UT. (a) Oscillogram of received signal at frequency of 2,2 MHz. (б) Intensities of the received signals depending on the delay time and time of observations. (в) The frequency of the sounding signal

Из рис. 4 видно, что на всех частотах регистрировался эхо-сигнал с задержкой 95 мс. В нашей работе природа данного сигнала не рассматривается. Скорее всего, он может быть связан с перегрузкой входного каскада приемника излучающим сигналом.

Обсуждение результатов

В период с декабря 2023 по январь 2025 г. было проведено 19 экспериментов по гидированию радиоволн. Эхо-сигналы с задержкой в 310–324 мс были зарегистрированы только 20 января 2025 г. с 17:45 до 18:00 UT. В этот период значение критических частот и частоты зондирования соответствовало условиям (1) и (2). Анализ фоновой геофизической обстановки, при которой наблюдались эхо-сигналы, показал некоторые особенности по сравнению с другими днями, в которые прово-

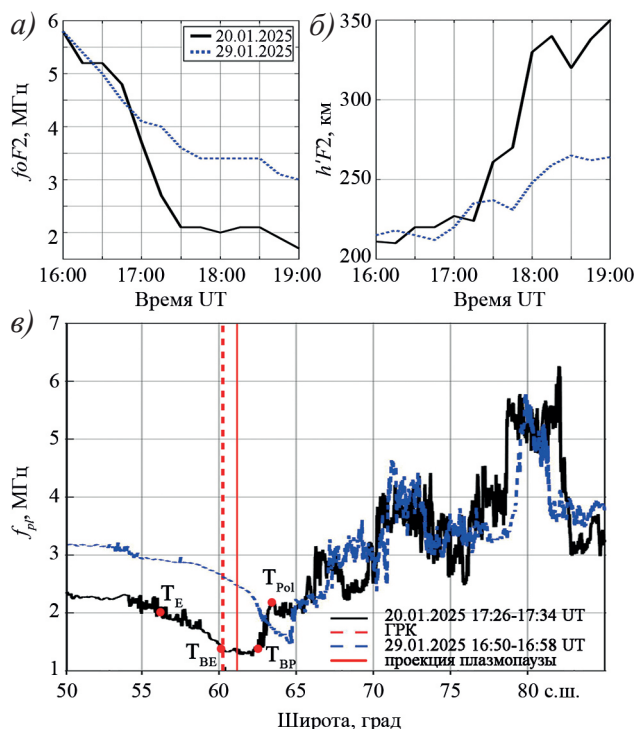


Рис. 5. Характеристики ионосферы в период проведения экспериментов. Значения критических частот (а) и действующих высот (б) F2-слоя, широтное распределение плазменных частот по данным спутника Swarm C 20 и 29 января 2025 г. (в)

Fig. 5. The ionosphere conditions during experiments. The behavior of critical frequencies (a) and virtual heights (б) of the F2-layer, the latitudinal distribution of plasma frequencies from the Swarm C satellite measurements on January 20 and 29, 2025 (в)

дились эксперименты. В этот день наблюдалось максимальное значение Kp -индекса, которое составляло 4+. Анализ критических частот F -области ионосферы показал, что эхо-сигналы наблюдались после резкого падения критической частоты в пункте размещения передатчика. В качестве примера на рис. 5а приведены значения критических частот $foF2$ в магнитоспокойный день 29 января 2025 г. и в возмущенный 20 января 2025 г. В данные дни проводились эксперименты по гидированию, но эхо-сигналы регистрировались только 20 января. В спокойный период значение $foF2$ с 16:00 до 18:00 UT уменьшалось с 5,8 МГц до 3,4 МГц, при этом максимальный градиент снижения составлял 0,5 МГц за 15 минут. 20 января наблюдалось резкое уменьшение $foF2$ до 2,1 МГц, при этом максимальный градиент снижения был существенно больше и составлял 1,1 МГц за 15 минут. Одновременно с уменьшением критической частоты 20 января наблюдался резкий рост высоты отражения ионосферных следов. На рис. 5б приведен ход действующей высоты F2-слоя. 20 января отражения наблюдались на 60 км выше, чем в спокойных условиях 29 января. Таким образом, за 15 минут до регистрации эхо-сигналов наблюдалось резкое снижение критической частоты с увеличением высоты слоя F2, что несвойственно для спокойной январской ионосферы.

Наглядное представление о широтном распределении плазменных частот ионосферы дают данные спутников Swarm A и Swarm C, на борту которых размещен зонд Ленгмюра, работающий с частотой измерений 16 Гц [13]. Орбиты спутников, запущенных Европейским космическим агентством в 2014 г., имеют высоту 451–481 км и наклонение $87,3^\circ$. Расстояние между космическими аппаратами по долготе составляет $1,4^\circ$.

За двадцать минут до наблюдения эффекта гидирования Swarm A и Swarm C прошли по траектории на 5° восточнее НИС «Горьковская», высота пролета составляла примерно 460 км. Значения плазменной частоты по результатам измерений ближайшего к станции спутника Swarm C приведены на рис. 5в (черная линия). Разница между значениями плазменных частот по данным Swarm A и Swarm C составляла десятки кГц, что не является существенным для анализа, поэтому результаты измерений со спутника Swarm A в данной статье не приведены.

По значениям плазменной частоты, измеренной на спутниках Swarm, и результатам вертикального зондирования видно, что 20 января 2025 г. НИС «Горьковская» вошла в зону дна главного ионосферного провала (ГИП). Южная граница ГИП (T_E), соответствующая 20 % понижению электронной концентрации [14], располагалась на широте $55,9^\circ$, дно провала находилось в диапазоне широт $60,3^\circ$ (T_{ME}) — $62,6^\circ$ (T_{MP}), т. е. ширина дна провала составляла $2,3^\circ$, а северная стенка на $63,4^\circ$ (T_{Pol}). Широта станции указана красной пунктирной (см. рис. 5в).

Сравнение положения основных структур ГИП в зависимости от геомагнитных условий показывает, что при возмущенных условиях ГИП находится южнее, чем при спокойных. С ростом возмущенности увеличивается и ширина дна провала, но при этом уменьшаются плазменные частоты на южной стенке и дне провала. Например, 29 января (см. рис. 5в, синяя пунктирная линия) при спокойных геомагнитных условиях северная стенка провала располагалась на широте 65° , ширина дна провала составляла $1,2^\circ$. Плазменные частоты на южной стенке были выше на 0,9 МГц, а на дне провала на 0,3 МГц, по сравнению с 20 января во время наблюдения эффекта гидирования. Таким образом, в спокойных геомагнитных условиях станция находилась на южной, пологой стенке провала.

Анализ ионограмм ВЗ и поведения критической частоты указывает на наличие поляризационного джета (ПД) над НИС «Горьковская», который представляет собой узкие струи очень быстрых ионных дрейфов к западу вблизи проекции плазмопаузы на высотах F -области ионосферы [15]. ПД имеет протяженность вдоль меридиана 100–200 км ($1\text{--}2^\circ$ по широте) и регистрируется всегда экваториальнее границы высыпания авроральных электронов, с увеличением геомагнитной активности смещается на более низкие широты [16]. ПД наблюдается преимущественно в вечернем и предполуденном секторе и вызывает быстрое формирование узкого провала ионизации. Критические частоты $foF2$ в большинстве случаев начинают резко уменьшаться и в течение 15–45 мин снижаются на 2–4 МГц. Одновременно с резким падением критической частоты наблюдается рост высоты слоя $F2$.

Основным признаком развития ПД вблизи зенита станции вертикального зондирования является наличие дополнительного следа отражений $F3s$ на ионограмме [17]. На рис. 6 приведена серия ионограмм вертикального зондирования на НИС «Горьковская» в период с 16:45 до 18:15 UT 20 января 2025 г. По следам отражений от $F2$ -слоя видно резкое падение критической частоты и увеличение высоты слоя. В 16:45, 17:15, 17:45 и 18:15 UT на ионограммах наблюдается дополнительный след $F3s$. Анализ ионограмм показывает, что в период регистрации эхо-сигналов поглощение зондирующих сигналов было минимально. По данным наземных и спутниковых

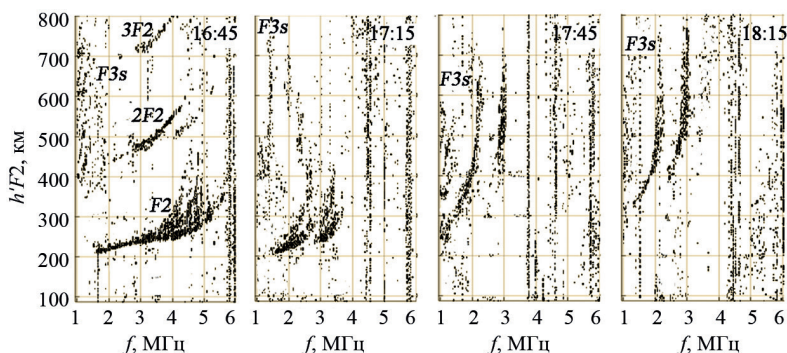


Рис. 6. Ионограммы вертикального зондирования на НИС «Горьковская» 20 января 2025 г. с 16:45 по 18:30 UT)

Fig. 6. Ionograms of vertical sounding at the Gorkovskaya observatory on January 20, 2025 from 16:45 to 18:30 UT

наблюдений показано, что ПД приводит к быстрому формированию узких и глубоких провалов ионизации или углублению уже существующего главного провала ионизации вблизи его полярной стенки, т. е. ПД всегда находится внутри главного провала, экваториальнее его полярной стенки [16, 17].

Таким образом, анализ фоновых геофизических условий показывает, что эхосигналы на НИС «Горьковская» регистрировались в период существования ПД при минимальном ионосферном поглощении. В остальные периоды проведения эксперимента подобных условий не наблюдалось.

В работах Д.В. Благовещенского и соавторов [4, 18] выполнен анализ и предложен механизм распространения радиоволн СВ-диапазона вдоль магнитных силовых линий в районе плазмопаузы, являющейся верхней границей границей плазмосферы, где силовые линии геомагнитного поля замкнуты и практически дипольны. Для создания оптимальных условий гидирования волн вдоль замкнутых силовых линий необходимо, чтобы положение проекции плазмопаузы было внутри главного ионосферного провала (ГИП), а передатчик находился в провале, южнее плазмопаузы. Распространение волн происходит вдоль ступеньки ионизации, образованной структурами ГИП и плазмопаузой.

Полярная стенка провала создается за счет ионизации электронами диффузной авроральной зоны и может совпадать с проекцией плазмопаузы, на что указывают результаты наблюдений, полученные как по наземным средствам измерений параметров ионосферы [19], так и с борта космических аппаратов [20, 21]. При возмущенных условиях, когда положение плазмопаузы изменяется гораздо быстрее, чем происходит перестройка ГИП, проекция плазмопаузы смещается южнее полярной стенки провала и стремится к области центра дна провала.

Взаимное расположение полярной стенки провала, проекции плазмопаузы и ПД достаточно подробно изучены по спутниковым наблюдениям, а также наземным сетям вертикального и наклонного зондирования ионосферы [16]. При возмущениях геомагнитного поля ПД находится в минимуме провала, а проекция плазмопаузы — между ПД и полярной стенкой ГИП.

Положение плазмопаузы можно приблизительно оценить при помощи эмпирической модели, предложенной Д. Карпентером и Р. Андерсеном [22]:

$$Lp = 5,6 - 0,46Kp_{max}, \quad (3)$$

где Kp_{max} — максимальное значение Kp -индекса за предшествующие 24 часа.

Модель построена по результатам наблюдений на спутниках ISEE и применима для расчета положения плазмопаузы в диапазонах L -оболочек от 2,25 до 8.

Геоцентрическое расстояние плазмопаузы изменяется в зависимости от геомагнитной активности и уменьшается с ростом Kp -индекса (плазмопауза приближается к Земле).

В период появления эхо-сигналов в СВ-диапазоне максимальные значения Kp составляло $Kp_{max} = 4+$, что соответствует положению внутренней границы плазмопаузы на $L = 3,6$ (3). Для НИС «Горьковская» значения L -параметра по модели GEOPACK T-89 составляет $L = 3,4-3,5$. Таким образом, проекция плазмопаузы на ионосферу находилась севернее НИС «Горьковская» на один градус широты (рис. 5в). В остальные дни проведения экспериментов при спокойных геомагнитных условиях, соответствующих значению Kp -индекса 1–3, значение L -параметра составляет 4,2–5,1.

Необходимо отметить, что антенна передатчика имеет ширину диаграммы направленности в вертикальной плоскости порядка 50° и пятно засветки антенны на высоте F -слоя составляет 370 км, поэтому зондирующий сигнал облучает все магнитные силовые трубки, опирающиеся на дно провала. Таким образом, при сложившихся фоновых геофизических условиях 20 января 2025 г. в период проведения экспериментов действительно могли сложиться геофизические условия, приведенные в [4, 18], и распространение радиоволн осуществлялось вдоль ступеньки ионизации между минимумом ГИП, усиленным влиянием ПД, и плазмопаузой.

Еще одним механизмом распространения может быть канализация волны между неоднородностями, ориентированными вдоль силовых линий магнитного поля Земли. Данный способ распространения предложен по результатам наблюдений на спутнике «АЛУЭТТ» [7]. Канал распространения образовывался между неоднородностями, концентрация плазмы в которых могла превышать всего 1 % от фонового значения.

Поскольку НИС «Горьковская» располагалась южнее проекции плазмопаузы в периоды регистрации эхо-сигналов, то канал распространения мог образоваться между неоднородностями на внутренней границе плазмопаузы. Внутри подобных неоднородностей плотность плазмы может превышать фоновую более чем на 10 % [23]. В ряде теоретических работ рассмотрены возможные причины возникновения подобных неоднородностей [24, 25]. При всем их различии они сводятся к действию одного механизма — образованию локального электрического поля в основании силовой трубки, под влиянием которого в магнитном поле Земли возможно формирование вытянутых вдоль поля неоднородностей [26]. Например, по данным Якутской меридиональной сети ионосферных станций было показано, что в полосе ПД происходит перенос плазмы вдоль магнитного поля из ионосферы в плазмосферу, который является определяющим в потерях ионизации в F -слое [27]. Данные спутниковых наблюдений также показывают формирование неоднородностей плотности плазмы на L -оболочках, проецирующихся на ионосферную область развития ПД [28].

ПД, как правило, наблюдается в ночном секторе и представляет собой поток ионов в западном направлении, сосредоточенный в узкой полосе широт [15]. Ввиду условий замагниченности плазмы на высотах F -слоя такая узкая полоса быстрого западного ионного дрейфа ассоциируется с сильным электрическим полем, направленным к полюсу. Таким образом, ПД над НИС «Горьковская» в период приема эхо-сигналов указывает на возможность канализации радиоволны посредством плазменных неоднородностей в области внутренней границы плазмопаузы.

Заключение

Проведенные исследования позволили экспериментально обнаружить эффект гидирования средних радиоволн вдоль силовых линий магнитного поля, который определялся по регистрации эхо-сигналов с задержками 310–324 мс. При этом впервые эффект гидирования с поверхности Земли регистрировался в диапазоне частот, а не на одной фиксированной частоте. Эхо-сигналы наблюдались в диапазоне от 2,1 до 2,4 МГц при их регистрации с шагом 100 кГц. Экспериментально показано, что ширина полосы канала, ответственного за канализацию диагностических сигналов, составляла 400 кГц. Однако шумовая обстановка на частотах ниже 2,1 МГц не позволила однозначно определить нижнюю границу канала. Также необходимо отметить, что в экспериментах по гидированию радиоволн, выполненных ранее [3, 5], эхо-сигналы наблюдались цугами от десятков секунд до единиц минут. Таким образом, однозначно нельзя говорить о частотном диапазоне канала распространения, поскольку он мог «закрыться» прежде, чем завершится сеанс сканирования выбранного радиодиапазона.

Эхо-сигналы регистрировались при минимальных мощностях излучения по сравнению с проведенными ранее исследованиями. Мощность излучения в наших экспериментах находилась в пределах 1 кВт. В экспериментах, выполненных под руководством Д.В. Благовещенского [3], использовался усилитель мощности на 5 кВт, а мощность сигналов зондирования в экспериментах, проведенных австралийской группой исследователей, составляла 17 кВт [5].

Эффект гидирования средних волн наблюдался в вечернем секторе в районе 21:00 MLT в зимний период только при возмущенных условиях. Частоты эхо-сигналов превышали критические частоты ионосферы в пункте излучения и были меньше критических частот в магнитосопряженной точке. Пункт излучения располагался в зоне минимума главного ионосферного провала, в зените наблюдался поляризационный джет. Гидирование радиоволн происходило на внешней границе плазмосферы вблизи плазмопаузы.

Для поиска ответов на вопросы о механизмах гидирования, условиях генерации и характеристиках каналов, ответственных за туннелирование радиоволн, необходимо продолжение экспериментов. Эффект гидирования может иметь прикладное значение для разработки средств и методов наземного мониторинга состояния плазмосферы и положения проекции плазмопаузы. Помимо этого, в последнее время интенсивно проводятся исследования на нагревных стендах, которые могут быть использованы в качестве радиолокационных станций средних и коротких волн. В подобных исследованиях проводится радиозондирование околоземного космического пространства и оболочек других планет, поэтому эффект гидирования может найти применение и в данной сфере.

Конфликт интересов. Конфликт интересов отсутствует.

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-27-00248, <https://rscf.ru/project/24-27-00248/>.

Благодарности. Авторы признательны австралийскому Центру прогнозирования космической погоды за предоставление данных о состоянии ионосферы по наблюдениям глобальной сети ионозондов.

Competing interests. No conflict of interest involved.

Funding. The investigation was carried out within grant № 24-27-00248 from the Russian Scientific Foundation, <https://rscf.ru/project/24-27-00248/>.

Acknowledgements. We are grateful to the Australian Space Weather Forecasting Centre for providing data on the state of the ionosphere, as observed by the global network of ionosondes.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Шлионский А.Г. *Дальнее распространение радиоволн в ионосфере*. М.: Наука; 1979. 152 с.
2. Martinez P. Long delayed echoes, a study of magnetospheric duct echoes 1997–2007. *Radio Communication*. 2007;83(10):60–63.
3. Благовещенский Д.В., Добросельский К.А., Румянцев Г.А., Благовещенская Н.Ф., Киргетов В.Д. Средние радиоволны в космосе, эффекты плазмопаузы. *Космические исследования*. 1996;34(5):483–490.
Blagoveshchenskii D.V. Dobrosel'skii K.A., Rumyanzev G.A., Blagoveshchenskaya N.F., Kirgetov V.D. Medium waves in space and phenomena of plasmopause. *Cosmic Res*. 1996;34(5): 446–453.
4. Благовещенский Д.В. *Средние радиоволны в космосе. Наблюдения, модели*. Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing GmbH & Co; 2011. 129 p.
5. Ellis G.R, Goldstone G.T. The probability of observing ducted magnetospheric echoes from the ground. *J. Geophys. Res. Space Physics*. 1990;95(A5):6587–6590. <https://doi.org/10.1029/JA095iA05p06587>
6. Grossi M.D., Padula-Pintos V.H. Ground-based radio sounding of the Earth magnetosphere. *J. Geophys. Res.* 1971;76(16):3755–3763. <https://doi.org/10.1029/JA076i016P03755>
7. Muldrew D.B. Medium frequency conjugate echoes observed on topside-sounder data. *Canad. J. Phys.* 1967;45(12):3935–3941. <https://doi.org/10.1139/p67-331>
8. Senior A., Honary F., Chapman P.J., Rietveld M.T., Kelso T.S., Kosch M.J. High-frequency magnetospheric sounding at EISCAT: Some trials and their implications. *Radio Sci.* 2008;43(4):RS4009. <https://doi.org/10.1029/2007RS003779>
9. Выставной В.М., Макарова Л.Н., Широчков А.В., Егорова Л.В. Исследования высокоширотной ионосферы методом вертикального зондирования с использованием современного цифрового ионозонда CADI. *Гелиогеофизические исследования*. 2013;4:1–10.
Vystavnoy V.M., Makarova L.N., Shirochkov A.V., Egorova L.V. Investigations of the high-latitude ionosphere by using data of the modern digital vertical ionosonde CADI. *Heliogeophysical Research*. 2013;4:1–10. (In Russ.).
10. Tsyganenko N.A. A magnetospheric magnetic field model with a warped tail current sheet. *Planetary and Space Science*. 1989;37(1):5–20.
11. *Руководство по ионосферным, магнитным и гелиогеофизическим наблюдениям. Часть I. Ионосферные наблюдения*. РД 52.26.817–2023. Обнинск: ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД»; 2023. 199 с.
12. Калишин А.С., Благовещенская Н.Ф., Борисова Т.Д., Рогов Д.Д. Дистанционные методы диагностики эффектов воздействия высокоширотных нагревных комплексов. *Метеорология и гидрология*. 2021;4:22–36. <https://doi.org/10.52002/0130-2906-2021-4-22-36>
Kalishin, A.S., Blagoveshchenskaya, N.F., Borisova, T.D., Rogov D.D. Remote Diagnostics of effects induced by high-latitude heating facilities. *Russ. Meteorol. Hydrol.* 2021;46:231–240. <https://doi.org/10.3103/S1068373921040038>
13. Buchert S., Zangerl F., Sust M., Andre M., Eriksson A., Wahlund J.-E., Opgenoorth H. SWARM observations of equatorial electron densities and topside GPS track losses. *Geophys. Res. Lett.* 2015;42:2088–2092. <https://doi.org/10.1002/2015GL063121>
14. Ishida T., Ogawa Y., Kadokura A., Hiraki Y., Häggström I. Seasonal variation and solar activity dependence of the quiet-time ionospheric trough. *J. Geophys. Res. Space Physics*. 2014;119:6774–6783. <https://doi.org/10.1002/2014JA019996>
15. Гальперин Ю.И., Пономарев Ю.Н., Зосимова А.Г. Прямые измерения скорости дрейфа ионов в верхней ионосфере во время магнитной бури. I. Описание прибора и измерения в магнитно-спокойное время. *Космические исследования*. 1973;11(2):273–282.
Galperin Yu.I., Ponomarev V.N., Zosimova, A.G. Direct measurements of drift rate of ions in upper atmosphere during a magnetic storm. *Kosm. Issled.* 1973;11(2):273–282. (In Russ.).

16. Степанов А.Е., Халипов В.Л., Голиков И.А., Бондарь Е.Д. *Поляризационный джет: узкие и быстрые дрейфы субавроральной ионосферной плазмы*. Якутск: Издательский дом СВФУ; 2017. 128 с.
17. Степанов А.Е., Кобяков С.Е., Халипов В.Л. Наблюдение быстрых субавроральных дрейфов ионосферной плазмы по данным Якутской меридиональной цепочки станций. *Солнечно-земная физика*. 2019;5(4):73–79. <https://doi.org/10.12737/szf-54201908>
Stepanov A.E., Kobyakova S.E., Khalipov V.L. Fast subauroral drifts of ionospheric plasma according to data from Yakut meridional chain of stations. *Solar-Terrestrial Physics*. 2019;5(4):60–65. <https://doi.org/10.12737/stp-54201908>
18. Благовещенский Д.В., Мальцева О. А. Моделирование распространения средних волн в магнитосфере. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2022;62(2):198–205. <https://doi.org/10.31857/S0016794022020043>
Blagoveshchensky D.V., Maltseva O.A. Simulation of medium wave propagation in the magnetosphere. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2022;62(1–2):58–65. <https://doi.org/10.1134/S0016793222020049>
19. Благовещенский Д.В., Жеребцов Г.А. *Высокоширотные геофизические явления и прогнозирование коротковолновых радиоканалов*. М.: Наука; 1987. 272 с.
20. Titheridge J.E. Plasmopause effects in the topside ionosphere. *J. Geophys. Res.* 1976;81(19):3227–3233. <https://doi.org/10.1029/JA081i019p03227>
21. Brace L.H., Theis R.F. The behavior of the plasmopause at mid-latitudes: Isis 1 Langmuir probe measurements. *J. Geophys. Res.* 1974;79(13):1871–1884. <https://doi.org/10.1029/JA079i013p01871>
22. Carpenter D.L., Anderson R.R. An ISEE whistler model of equatorial electron density in the magnetosphere. *J. Geophys. Res.* 1992;97:1097–1108.
23. Angerami J.J. Whistler duct properties deduced from VLF observations made with the Ogo 3 satellite near the magnetic equator. *J. Geophys. Res.* 1970;6115–6135. <https://doi.org/10.1029/JA075i031p06115>
24. Bernhardt P.A., Park C.G. Protonospheric-ionospheric modeling of VLF ducts. *J. Geophys. Res.* 1977;82(32):5222–5230. <https://doi.org/10.1029/ja082i032p05222>
25. Борисов Н.Д., Золотарев И.П. О возможность образования магнитосферных дуктов при локальном нагреве ионосферы. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 1983;23(5):797–803.
Borisov N.D. Zolotarev I.P. On a possibility of formation of magnetospheric ducts with local heating of the ionosphere. *Geomagnetism and Aeronomy*. 1983;23(5):797–803. (In Russ.).
26. Cole K.D. Formation of field-aligned irregularities in the magnetosphere. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1971;33(5):741–750. [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(71\)90027-4](https://doi.org/10.1016/0021-9169(71)90027-4)
27. Халипов В.Л., Степанов А.Е., Котова Г.А., Кобякова С.Е., Богданов В.В., Кайсин А.В., Панченко В.А. Вертикальные скорости дрейфа плазмы при наблюдении поляризационного джета по наземным доплеровским измерениям и данным дрейфометров на спутниках DMSP. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2016;56:568–578. <http://doi.org/10.7868/S0016794016050060>
Khalipov V.L., Stepanov A.E., Kotova G.A., Kobyakova S.E., Bogdanov V.V., Kaisin A.B., Panchenko V.A. Vertical plasma drift velocities in the polarization jet observation by ground Doppler measurements and driftmeters on DMSP satellites. *Geomagn. Aeron.* 2016;56(5):535–544. <https://doi.org/10.1134/S0016793216050066>
28. Котова Г.А., Халипов В.Л., Степанов А.Е., Безруких В.В. Влияние суббурь на процессы в ионосфере и плазмосфере Земли. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2024;64:208–216. <https://doi.org/10.31857/S0016794024020043>
Kotova G.A., Khalipov V.L., Stepanov A.E., Bezrukykh V.V. The Substorms Impact on Processes in the Ionosphere and Plasmasphere of the Earth. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2024;64:180–188. <https://doi.org/10.1134/S0016793223601023>

МЕТЕОРОЛОГИЯ И КЛИМАТОЛОГИЯ METEOROLOGY AND CLIMATOLOGY

Оригинальная статья / Original paper

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-4-412-427>

УДК 551.34



Процессы сезонного протаивания грунта на архипелаге Северная Земля

А.П. Макштас✉, О.Р. Сидорова, И.А. Махотина, П.В. Богородский

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

✉ maksh@aari.ru

АПМ, 0000-0002-9690-9133; ОРС, 0000-0002-5517-1427; ИАМ, 0000-0001-7208-685X;
ПВБ, 0000-0002-1750-7903

Аннотация. Происходящее в последние годы потепление Арктики обуславливает деградацию вечной мерзлоты, поступление в атмосферу парниковых газов, образующихся при разложении ранее мерзлого органического вещества, увеличение площади и разнообразия растительного покрова, уменьшение несущей способности вечномёрзлых грунтов. В этой связи особый интерес вызывает эволюция сезонно-талого слоя грунта (СТС). В статье рассмотрены особенности процессов сезонного протаивания СТС в северной части о. Большевик (арх. Северная Земля). Описаны особенности динамики глубины сезонно-талого слоя по данным комплексных наблюдений, выполненных в 2016–2020 гг. Проанализирована роль уменьшения альбедо подстилающей поверхности вследствие кратковременных вторжений теплых воздушных масс как триггера, приводящего к интенсификации процессов таяния. С помощью модели, реализующей алгоритм Лейбензона, получены и валидированы по данным наблюдений оценки сезонной изменчивости толщины СТС в зависимости от используемого форсинга и характеристик растительного покрова. Предложенный подход может быть использован для оценок СТС по данным дистанционных измерений температуры подстилающей поверхности.

Ключевые слова: Северная Земля, многолетняя мерзлота, сезонно-талый слой, энергомассообмен

Для цитирования: Макштас А.П., Сидорова О.Р., Махотина И.А., Богородский П.В. Процессы сезонного протаивания грунта на архипелаге Северная Земля. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2025;71(4):412–427. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-4-412-427>

Поступила 30.07.2025

После переработки 20.10.202

Принята 01.11.2025

© Авторы, 2025

© Authors, 2025

Seasonal soil thawing processes on the Severnaya Zemlya archipelago

Alexander P. Makshtas✉, Olga R. Sidorova,
Irina A. Makhotina, Petr V. Bogorodsky

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

✉maksh@aari.ru

APM, 0000-0002-9690-9133; ORS, 0000-0002-5517-1427; IAM, 0000-0001-7208-685X;
PVB, 0000-0002-1750-7903

Abstract. The recent warming of the Arctic causes degradation of permafrost, release of greenhouse gases due to the decomposition of previously frozen organic matter, increase in the area and diversity of vegetation, and decrease of in the bearing capacity of permafrost soils. In this regard, the evolution of the seasonally thawed soil layer is of particular interest. The paper presents the results of comprehensive studies of energy exchange processes in the atmospheric surface layer and the upper layer of permafrost, carried out in 2016–2020 at the Research Station “Ice Base Mys Baranova” (Bolshevik Island, Severnaya Zemlya Archipelago), supplemented by the results of model calculations of seasonally thawed depth (STD) dynamics. The study examines the role of surface snow albedo decreases due to short-term intrusions of warm air masses, leading to the intensification of snow melting and soil surface heating due to increase in absorbed incoming solar radiation, is analyzed. A version of the Leibenson model, validated by data of observations, is used for assessing the role of landscape factors and meteorological conditions in the dynamics of STD. Despite the simplified formulation of the problem and the approximate assignment of heat and mass transfer of soil properties in the area under study, the model results could be considered satisfactory, and proposed approach can be used for assessing the state of STD.

Keywords: Severnaya Zemlya, permafrost, seasonal thawing depth, energy and mass exchange

For citation: Makshtas A.P., Sidorova O.R., Makhotina I.A., Bogorodsky P.V. Seasonal soil thawing processes on the Severnaya Zemlya archipelago. *Arctic and Antarctic Research*. 2025;71(4):412–427. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-4-412-427>

Received 30.07.2025

Revised 20.10.202

Accepted 01.11.2025

Введение

В последние десятилетия происходит значительное и более интенсивное по сравнению с другими регионами Земли потепление Арктики¹. Повышение температуры приземного слоя воздуха обуславливает быстрые изменения в наземных экосистемах, в частности сокращение продолжительности и площади снежного покрова², увеличение площади и разнообразия растительного покрова (так называемое «позеленение Арктики» [1]) и ускорение таяния вечномёрзлых грунтов [2, 3]. Поступление в атмосферу парниковых газов, преимущественно углекислого газа и метана, образующихся при разложении ранее мерзлого органического вещества, относится к одному из основных последствий потепления и деградации многолетней

¹ Meredith M., Sommerkorn M., Cassotta S., Derksen Ch., Ekaykin A., Hollowed A., Kofinas G., Mackintosh A., Melbourne-Thomas J., Muelbert M. M.C., Ottersen G., Pritchard H., Schuur E. A.G. Polar Regions. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press; 2019. P. 203–320. <https://doi.org/10.1017/9781009157964.005>

² Mudryk, L., Brown, R., Derksen, C., Luojus K., Decharme B., Helfrich S. Terrestrial snow cover. URL: <https://arctic.noaa.gov/report-card/report-card-2019/terrestrial-snow-cover-4/> (accessed 20.11.2025)

мерзлоты³. Создаваемую этим процессом положительную обратную связь с ростом температуры тропосферы необходимо адекватно учитывать в современных климатических моделях. В этой связи особый интерес вызывает эволюция сезонно-талого слоя грунта (СТС) и его растительного покрова, определяющих тепло-, влаго- и газообмен на границе атмосфера — поверхностный слой многолетнемерзлых пород [4].

На архипелаге Северная Земля до последнего времени исследования мерзлых грунтов ограничивались немногочисленными описаниями морфологического строения почвогрунтов [5] и их растительных покровов [6]. Ситуация начала меняться с организацией в 2013 г. научно-исследовательского стационара (НИС) ААНИИ «Ледовая база Мыс Баранова», расположенного на северном побережье о. Большевик (79°16' с. ш., 101°45' в. д.), где для оценки сезонной и межгодовой изменчивости параметров энергомассообмена приземного слоя атмосферы с подстилающей поверхностью и характеристик СТС был развернут измерительный комплекс для проведения теплобалансовых и геокриологических наблюдений [7, 8].

Первые расчеты эволюции мерзлоты, выполненные с помощью методики В.А. Кудрявцева [9] по данным о среднегодовой температуре приземного слоя воздуха из реанализа ERA-Interim, позволили выявить особенности ее межгодовой изменчивости в районе НИС [8]. Было показано, что глубина СТС за последние 70 лет, несмотря на существенные межгодовые колебания, обусловленные изменчивостью атмосферных условий, хорошо согласуется с ходом глобального повышения температуры и достаточно близка к измеренной на НИС в 2016–2017 гг. Ниже представлены результаты комплексных исследований, выполненных в 2016–2020 гг., направленных на оценку влияния метеорологических и ландшафтных факторов, определяющих характеристики взаимодействия приземного слоя атмосферы и подстилающей поверхности, на динамику сезонного протаивания многолетней мерзлоты. В частности, проанализирована роль уменьшения альбеда подстилающей поверхности вследствие кратковременных вторжений теплых воздушных масс как триггера, приводящего к интенсификации процессов таяния. Анализ данных срочных наблюдений в приземном слое атмосферы и деятельном слое грунта дополнен оценками глубины СТС, полученными с помощью варианта термодинамической модели Л.С. Лейбензона [10], валидированными по данным наблюдений, а также модельными оценками сезонной изменчивости СТС в зависимости от используемых при расчетах форсинге и характеристиках растительного покрова. Показано, что предложенный метод расчета может быть применен для оценок СТС по данным дистанционных измерений температуры подстилающей поверхности.

Методы наблюдений и расчетов

НИС «Ледовая база Мыс Баранова» располагается на берегу пролива Шокальского в северной части острова Большевик, второго по величине (30,6 % общей площади) и самого южного острова архипелага. Для его прибрежных зон характерны ландшафты арктических пустынь (тундр) с низкими температурами и частыми циклами замерзания–оттаивания [4, 5]. Суровость климата обуславливает скудность видового разнообразия растительного покрова пятнистого характера, представлен-

³ Второй оценочный доклад «Изменение климата на территории Российской Федерации». Основной том / Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет); под общ. ред. В.М. Катцова, С.М. Семенова. М., 2014. 984 с.

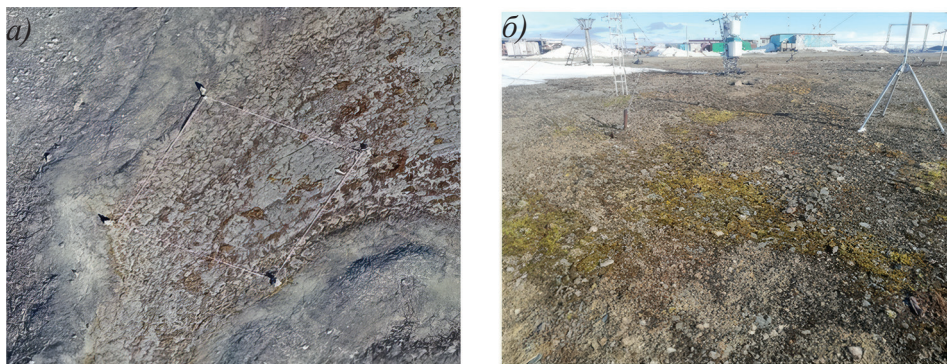


Рис. 1. Вид подстилающей поверхности в районе НИС с высот 30 (а) и 1,5 м (б)

Fig. 1. Underlying surface at the station from heights 30 (a) and 1.5 m (b)

ного в основном мохообразными (бриофитами) [5, 11]. Почвенный покров состоит преимущественно из малоизученных мерзлотных (горно-тундровых глеевых, горно-тундровых дерновых, горно-арктических) и примитивных (неразвитых песчаных и щебнисто-скелетных) арктических почв [12]. Общий вид подстилающей поверхности исследуемого района в июле представлен на рис. 1.

Исследования процессов энергообмена были начаты на НИС с установки в 2016 г. измерительного метеокомплекса MAWS-110 (впоследствии замененного на MAWS-420), регистрирующего с дискретностью 10 минут температуру и влажность воздуха на высотах 2 и 8 м, температуру подстилающей поверхности, атмосферное давление, скорость ветра на высотах 2 и 10 м и его направление на высоте 10 м, приходящую и отраженную солнечную радиацию, длинноволновое излучение атмосферы и подстилающей поверхности. Тогда же на метеоплощадке стационара был развернут комплекс аппаратуры для измерения характеристик верхнего слоя грунта. В него вошли термокоса, укомплектованная датчиками температуры IKES PT00 (диапазон измерений от -40 до $+60$ °C, погрешность измерений $\pm 0,1$ °C), установленными на глубинах 20, 40, 60, 80 и 100 см, и два датчика влажности грунта ThetaProbetype ML3 (диапазон измерений влажности 0–100 %, погрешность ± 1 %, диапазон температур от $+5$ до $+30$ °C). Частота опроса датчиков составляет 10 мин. Подробное описание аппаратуры и первых результатов измерений приведено в работе [8]. На основе собранной информации в настоящее время создан пополняемый Электронный архив среднечасовых, среднесуточных и среднемесячных значений измеряемых параметров и характеристик энергообмена подстилающей поверхности с атмосферой, рассчитанных на основе алгоритмов, описанных в работах [7, 13].

По данным термокосы, в предположении линейности профиля температуры грунта между соседними датчиками, были рассчитаны потоки тепла F между горизонтами измерений:

$$F = -k_1 \Delta T / \Delta z, \quad (1)$$

где $k_1 = 3$ Вт/(м·К) — коэффициент теплопроводности талого грунта (обоснование выбора значения k_1 приведено ниже); ΔT и Δz — разность температур и расстояние между соответствующими горизонтами измерений.

Для оценки временной изменчивости глубины СТС (h) по среднесуточным данным датчиков термокосы использовался метод линейной интерполяции между горизонтами измерений [14]:

$$H = h_i + T_i \cdot \Delta h / (T_i - T_{i+1}), \quad (2)$$

где h_i — глубина самого нижнего горизонта с температурой $T_i > 0$ °С на данные сутки; Δh — расстояние между датчиками. В случае, если на двух самых нижних горизонтах температура была выше 0 °С, величина h рассчитывалась методом линейной экстраполяции при условии, что перепад температуры, зафиксированный датчиками, превышал, учитывая погрешность измерений каждого датчика, $-0,2$ °С.

Температура верхней поверхности грунта (подстилающей поверхности) в дополнение к измеренной контактным датчиком метеоконцентра MAWS (T_s) рассчитывалась по данным измерений приходящей и уходящей длинноволновой радиации:

$$T_{ir} = (LWup - (1 - \varepsilon_s) \cdot LWdn)^{1/4} \cdot (\sigma \cdot \varepsilon_s)^{-1/4}, \quad (3)$$

где $LWup$ и $LWdn$ — уходящая и приходящая длинноволновая радиация; ε_s — излучательная способность подстилающей поверхности; σ — постоянная Стефана–Больцмана. Следует отметить, что T_{ir} , вычисленная по закону Стефана–Больцмана, дает интегральную оценку температуры для участка, включающего различные типы поверхности, как покрытые растительностью, так и свободные от нее [15]. Согласно инструкции к радиометру CNR 4⁴, поверхность, которая на 99 % формирует восходящий поток, измеряемый прибором, покрывает площадь радиусом в 10 высот установки датчика. Для датчика приходящей длинноволновой радиации, установленного на НИС на высоте 1,5 м над поверхностью, обзор площади составляет около 700 м². При этом наибольшее влияние на величину восходящего потока излучения оказывает участок поверхности, находящийся непосредственно под датчиками и на окружающей площади, примерно равной 20 м².

Точность определения T_{ir} зависит от интегрального коэффициента поглощения длинноволнового излучения ε_s , характерного для выбранного участка подстилающей поверхности. Для типичных грунтов в районе исследований значения ε_s , в зависимости от их состава и влажности, находятся в пределах 0,95–0,98⁵. По результатам сравнительных расчетов это обуславливает для исследуемого периода (июнь–сентябрь) среднее расхождение величин T_{ir} не более чем на 0,3 °С, что близко к погрешности измерений температуры грунта T_s контактным датчиком. При этом радиационные измерения температуры подстилающей поверхности имеют преимущество перед контактными вследствие исключения возможного влияния нагрева корпуса контактного датчика солнечной радиацией.

Поток тепла на границе подстилающая поверхность — приземный слой атмосферы (B) рассчитывался по методике, базирующейся на данных радиационных и градиентных наблюдений, подробно изложенной в работе [7]. При этом отрица-

⁴ Instruction manual Kipp&Zonen CNR4 Net Radiometer, 2014 Version 1409, pp. 36. URL: https://cdn.hach.com/1XMCM0ZF/at/99293f63svbvqssmz8z95wh/KippZonen_Manual_CNR4_NetRadiometer_1409.pdf (accessed 20.11.2025)

⁵ Evett S.R., Prueger J.H., Tolck J.A. Water and energy balances in the soil-plant-atmosphere continuum. Handbook of soil science properties and processes. 2nd edition. Boca Raton, FL: CRC Press; 2011. P. 1–44.

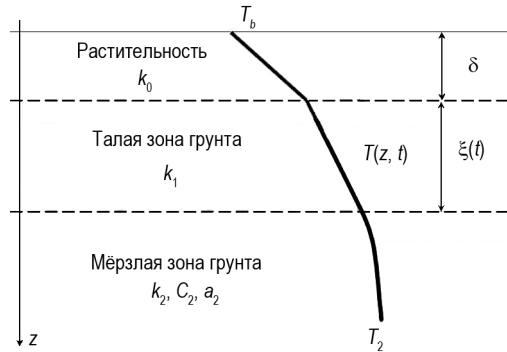


Рис. 2. Схема распределения температуры в слоях растительности и грунта

Fig. 2. Temperature distribution diagram in vegetation and soil layers

тельные значения B определяют охлаждение деятельного слоя грунта, а положительные — его прогрев.

Вклад температуры подстилающей поверхности, характеристик растительного покрова и температуры мерзлоты в формирование глубины СТС оценивался с помощью варианта термодинамической модели Л.С. Лейбензона [10] для полубесконечной одномерной области, состоящей из расположенных под растительной зоной (индекс «0») зон талого (индекс «1») и мерзлого грунта (индекс «2»), разделенных подвижной границей раздела $\xi(t)$ (рис. 2). Во всех зонах происходит кондуктивный перенос тепла, температура поверхности растительного слоя T_b полагается заданной. Граничные условия устанавливают равенство температур и тепловых потоков на границе растительной и талой зон грунта, а также учитывают теплоту фазового перехода на границе талой и мерзлой зон. Распределение температур задается линейным для зон «0» и «1» и гауссовым для зоны «2», что сводит задачу к единственному дифференциальному уравнению:

$$k_1 \frac{T_b}{\xi + \delta k_1 / k_0} - k_2 \frac{T_2}{\sqrt{\pi a_2 t}} = Q \frac{d\xi}{dt}, \quad (4)$$

где δ — толщина растительного слоя; $a = k/C$ — коэффициент температуропроводности; k и C — коэффициенты эффективной теплопроводности и объемной теплоемкости; Q — объемная теплота фазового перехода.

Коэффициент теплопроводности талых мхов $k_0 = 0,18$ Вт/(м·К) был рассчитан по универсальной эмпирической зависимости от влажности мохового покрова⁶, принятой, согласно работе [11], равной 1,5 кг/кг. Из-за отсутствия сведений о теплофизических свойствах североземельских почвогрунтов, состоящих до глубины первых метров, согласно работе [5], в основном из каменистых суглинков (80 % плоских пластин мелкого щебня и дресвы), их значения рассчитывались по параметризациям⁷ с использованием данных о теплофизических свойствах аналогичных грунтов поляр-

⁶ Гаврильев Р.И. Теплофизические свойства компонентов природной среды в криолитозоне. Справочное пособие. Новосибирск: СО РАН; 2004. 145 с.

⁷ СНИП СНИП2.02.04-88 «Основания и фундаменты на многолетнемерзлых грунтах». М.: Стройиздат; 1990. 53 с.

ных пустынь Западного Шпицбергена [16]. По результатам расчетов были приняты величины $k_1 = 2,83 \text{ Вт/(м·К)}$, $k_2 = 3,18 \text{ Вт/(м·К)}$, $C_2 = 2,87 \cdot 10^6 \text{ Дж/(м}^3\text{·К)}$, $Q = 9,71 \cdot 10^7 \text{ Дж/м}^3$. Температура мерзлоты на глубине ее нулевых годовых амплитуд T_2 принималась постоянной и равной $-7,5 \text{ }^\circ\text{C}$ [17]. Для расчетов использовалась система компьютерной математики Mathematica 5 фирмы Wolfram Research, Inc.

Результаты измерений

На рис. 3 представлен временной ход температур в верхнем слое грунта, дополненный данными о температуре воздуха на высоте 2 м (T_a), температуре подстилающей поверхности, измеренной контактным датчиком (T_s), потоках тепла между горизонтами измерений температуры грунта (F) и потоке тепла на границе подстилающая поверхность — приземный слой атмосферы (B). Согласно рис. 3а, годовой ход температур в грунте отчетливо проявляется на всех глубинах. Следует отметить существенную, практически синхронную изменчивость температур вплоть до глубины 1 м, что свидетельствует о высокой теплопроводности грунта в районе наблюдений. При этом температура на всех горизонтах в июле, месяце с положительными температурами, по крайней мере на глубине 0,2 м оказалась минимальной в 2017 г. и максимальной в 2020 г. В этот месяц 2020 г. среднемесячные значения температуры грунта были положительными на всех глубинах. Как показано в работе [18], 2020 г. характеризовался аномальной атмосферной циркуляцией в зимний и весенний периоды, что отразилось не только на температуре воздуха на о. Большевик, но и на температурах воздуха в региональном масштабе.

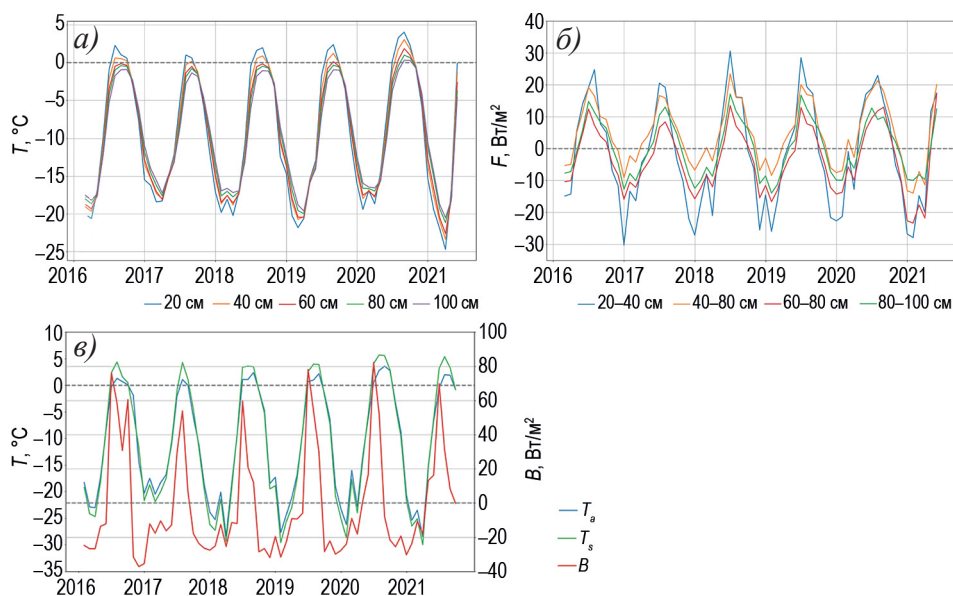


Рис. 3. Межгодовая изменчивость среднемесячных значений температур (а) и потоков тепла в деятельном слое грунта (б), потока тепла на границе подстилающая поверхность — атмосфера и температур воздуха и подстилающей поверхности (в)

Fig. 3. Interannual variability of monthly averaged soil temperature (а), heat fluxes F in the active soil layer (б), heat flux on the boundary of underlying surface-atmosphere, air and surface temperatures (в)

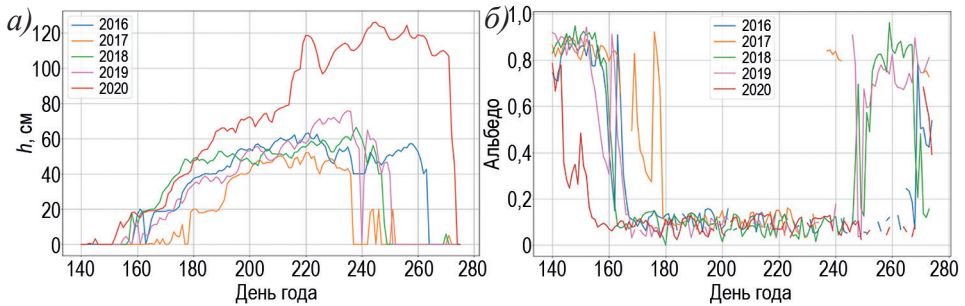


Рис. 4. Глубины протаивания (а) и альbedo подстилающей поверхности (б) в 2016–2020 гг.

Fig. 4. Thawing depth (a) and albedo of underlying surface (б) in 2016–2020

Потоки тепла в грунте в летний период (положительные значения F на рис. 3б) относительно невелики по сравнению с потоком тепла B (рис. 3в) и достигают максимальных значений порядка $20\text{--}30\text{ Вт/м}^2$ в слое $0,2\text{--}0,4\text{ м}$ в июне. На этот месяц приходится окончательное стаивание снега и, соответственно, уменьшение альbedo подстилающей поверхности (рис. 4б), что в совокупности с максимальными в годовом ходе значениями приходящей коротковолновой радиации обуславливает максимальные, до 80 Вт/м^2 , положительные значения B (рис. 3в) и, как следствие, интенсивный прогрев верхнего слоя грунта.

В зимний период (январь 2017 г., февраль 2018, 2020, 2021 гг., декабрь 2019 г.) следует отметить наличие локальных максимумов среднемесячных значений температуры как в грунте, так и в приземном слое атмосферы, отчетливо проявляющихся также и в величинах потоков тепла. Происхождение таких экстремумов в декабре–марте согласно работе [19] обусловлено особенностями циркуляции атмосферы и, соответственно, дрейфа морского ледяного покрова, способствующих формированию разво́дий и/или типичных для района исследований за́припайных по́лыней. Это приводит к аномальным потокам тепла из океана и, в свою очередь, к повышению температуры воздуха в нижних слоях атмосферы.

Представляет интерес изменение влажности грунта на каменистом и покрытом мхами участках в летний период. Ее среднемесячное значение на каменистом участке составляло $0,2\text{ м}^3/\text{м}^3$ в июне и закономерно уменьшалось к сентябрю, в то время как в верхнем 15-сантиметровом слое грунта на участке, покрытом мхами, влажность в июне достигала величины $0,7\text{ м}^3/\text{м}^3$, уменьшаясь в августе–сентябре до $0,6\text{--}0,4\text{ м}^3/\text{м}^3$. Это связано как с интенсивностью поступления влаги в верхний слой грунта за счет таяния снежного покрова и атмосферных осадков, так и с сезонными изменениями свойств растительного покрова, препятствующего быстрому испарению с поверхности по сравнению с каменистыми участками. Предварительные оценки показывают, что затраты тепла на уменьшение влагосодержания в верхнем 20-сантиметровом слое грунта вследствие испарения обуславливают столь большое различие в величинах потока тепла на границе подстилающая поверхность — атмосфера (B) и потоков тепла в грунте (F).

На рис. 4 представлен временной ход глубины протаивания СТС и альbedo подстилающей поверхности в весенне-летний период 2016–2020 гг. Как видно из рисунка, в 2020 г. глубина протаивания в два раза превышала наблюдавшуюся в предыдущие годы. В то же время величина альbedo, резкое уменьшение которого служит индикатором начала интенсивного таяния снежного покрова, а впоследствии и одной

Таблица 1

Даты изменения альbedo подстилающей поверхности
 и максимальные глубины протаивания СТС

Table 1

Dates of changes in the albedo of underlying surface and maximum thawing depths

Год	$A \leq 0,40$	$A \leq 0,15$	$A \geq 0,4$	h_{\max} , см
2016	13.06	15.06	25.09	63
2017	21.06	28.06	23.08	52
2018	10.06	12.06	8.09	66
2019	12.06	15.06	30.08	72
2020	23.05	01.06	26.09	126

из причин ускоренного прогрева грунта, достигала значений, характерных для бес-
 снежной поверхности, на 20 дней раньше, чем в другие годы. Таблица 1 содержит
 даты начала таяния снега, определенные по уменьшению альbedo в поле зрения
 датчика отраженной коротковолновой радиации от 0,8 до 0,4 ($A \leq 0,4$), полного его
 исчезновения ($A \leq 0,15$) и восстановления снежного покрова ($A \geq 0,4$). В соответствии
 с табл. 1 и рис. 4, можно выделить 2017 и 2020 гг. как годы с минимальной и мак-
 симальной продолжительностью бесснежного периода (56 и 117 дней) и глубиной
 протаивания СТС (52 и 126 см). Ниже данные этих двух лет будут использованы
 для анализа процессов формирования СТС.

На рис. 5 показана временная изменчивость среднесуточных значений температур
 деятельного слоя грунта (рис. 5а, б), температур подстилающей поверхности и призем-
 ного слоя атмосферы на высоте 2 м (рис. 5в), потока тепла на границе атмосфера —
 подстилающая поверхность (рис. 5г) в мае–октябре 2017 и 2020 гг., годах минимальной
 и максимальной за период наблюдений глубины протаивания СТС. На рис. 5д, е при-
 ведены распределения температуры воздуха в нижнем слое атмосферы для временных
 интервалов начала протаивания в эти годы, построенные по данным радиозондирований.

Приведенные на рис. 5 данные позволяют объяснить аномально теплое состоя-
 ние верхнего метрового слоя грунта в мае–июне 2020 г., несмотря на то что в конце
 апреля его температуры были практически такими же, как и в 2017 г. (рис. 5а, б).
 Как видно из рис. 5в, в 2020 г. температуры воздуха и подстилающей поверхности
 в конце мая вследствие вторжения теплых воздушных масс (рис. 5е) на короткое
 время достигли положительных значений. Это произошло на 25 дней раньше, чем
 в 2017 г. (рис. 5в, д), и привело к таянию снежного покрова, радикальному умень-
 шению альbedo подстилающей поверхности (рис. 4б), резкому увеличению притока
 тепла к подстилающей поверхности (рис. 5г) и, соответственно, продолжитель-
 ности периода и интенсивности прогрева деятельного слоя грунта. Как видно из
 рис. 5а, б, в июле–августе 2020 г. максимальная среднесуточная температура на
 глубине 20 см достигала 8 °С, в то время как в 2017 г. она составляла не более 2 °С.

Следует отметить, что обусловленные синоптической изменчивостью поляр-
 ной атмосферы физические процессы в нижнем слое атмосферы, определяющие
 тепловой баланс подстилающей поверхности и, соответственно, момент перехода
 к режиму таяния морского ледяного покрова в Арктическом бассейне, были описа-
 ны в [20], а снежного покрова на архипелаге Шпицберген — в [21]. В этих работах
 была проанализирована роль уменьшения альbedo снежного покрова как триггера,

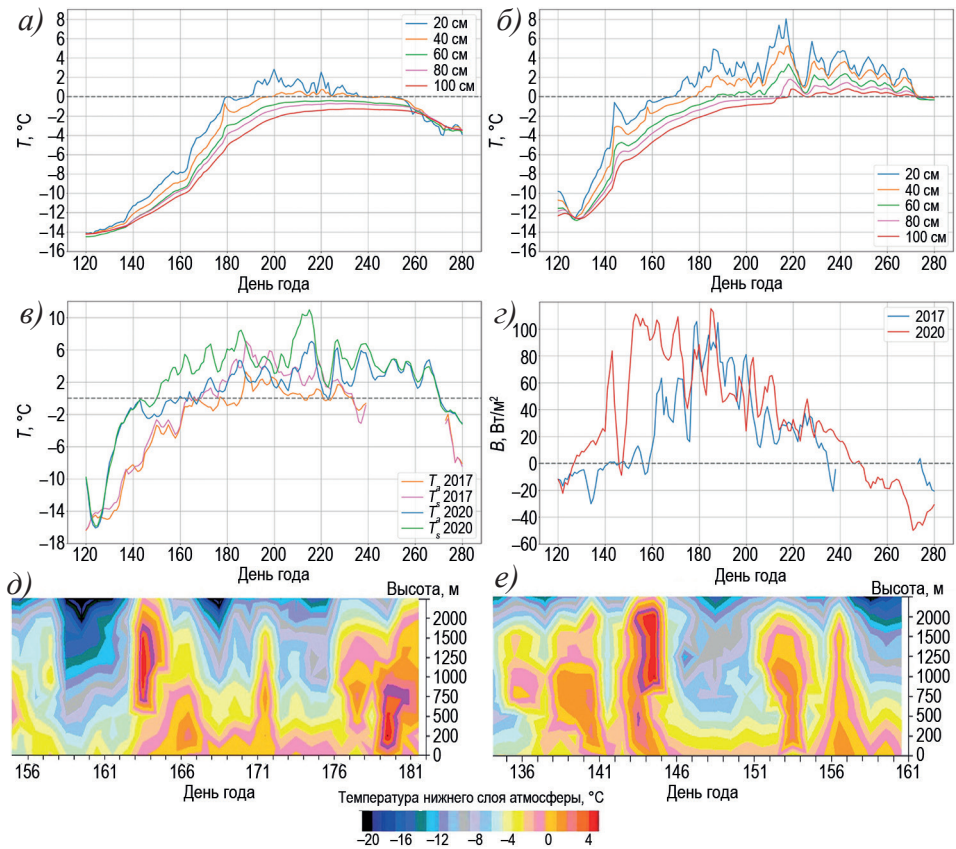


Рис. 5. Временная изменчивость среднесуточных значений температур деятельного слоя грунта в 2017 (а) и 2020 (б) гг., температур воздуха на высоте 2 м и подстилающей поверхности (в), потока тепла на границе подстилающая поверхность — атмосфера (г) и температур нижнего слоя атмосферы в период начала протаивания грунта в 2017 (д) и 2020 (е) гг.

Fig. 5. Temporal variability of daily averaged active soil layer temperatures in 2017 (a) and 2020 (б), air and surface temperatures (в), heat flux on the boundary of underlying surface — atmosphere (г), and temperatures of low atmosphere at the onset of thawing in 2017 (д) and 2020 (е)

приводящего к интенсификации таяния вследствие резкого увеличения поглощения коротковолновой солнечной радиации. Аналогичная ситуация имела место и в 2020 г. При этом очевидно, что роль изменения альбедо в прогреве верхнего слоя грунта более значима, поскольку в отличие от снежно-ледяного покрова, альбедо которого изменяется от 0,85 до 0,5, альбедо поверхности грунта уменьшается в период таяния от 0,85 (альбедо снежного покрова) до 0,1 (альбедо грунта).

Результаты моделирования

Расчеты по модели (4) выполнялись для летних периодов 2017 и 2020 гг. В качестве температуры подстилающей поверхности (T_s) последовательно принимались температура воздуха на высоте 2 м — T_a , радиационная температура поверхности — T_{ir} и температура верхнего сантиметрового слоя поверхности почвы, измеренная контакт-

Таблица 3

Средняя относительная ошибка MB, средняя абсолютная ошибка MAB
и коэффициент детерминации R^2
воспроизведения моделью глубины протаивания в 2017 и 2020 гг.

Table 3

Average relative error MB, average absolute error MAB and determination coefficient R^2
for model estimations of thaw depth in 2017 and 2020

Год		2017			2020		
Форсинг	H , см	MB	MBA, м	R^2	MB	MBA, м	R^2
T_a	0	-0,75	0,31	0,45	-0,33	0,25	0,97
T_{ir}	0	0,52	0,16	0,75	0,16	0,13	0,94
T_s	0	0,72	0,22	0,73	0,09	0,08	0,96
T_a	1	-0,92	0,29	0,27	-0,56	0,43	0,98
T_{ir}	1	-0,10	0,05	0,79	-0,14	0,11	0,96
T_s	1	0,23	0,08	0,78	-0,10	0,08	0,96
T_a	2	-1,00	0,30	0	-0,72	0,56	0,96
T_{ir}	2	-0,54	0,16	0,81	-0,38	0,30	0,97
T_s	2	-0,18	0,06	0,8	-0,29	0,23	0,97
T_a	3	-1,00	0,30	0	-0,84	0,65	0,91
T_{ir}	3	-0,84	0,25	0,78	-0,59	0,46	0,97
T_s	3	-0,49	0,15	0,8	-0,45	0,35	0,91

Таблица 4

Оценки начала оттаивания и максимальной глубины СТС
на НИС «Ледовая база Мыс Баранова» в 2017 и 2020 гг.

Table 4

Estimates of thawing onset and maximum depth of STD
at "Ice Base Mys Baranova" in 2017 and 2020

Год	Форсинг	$H_{\text{мол}} = 0$ см		$H_{\text{мол}} = 1$ см		$H_{\text{мол}} = 2$ см		$H_{\text{мол}}$		Данные	
		T	h , см	T	h , см	T	h , см	T	h , см	T	h , см
2017	T_a	164	24	166	9	—	—	—	—	165	42
	T_{ir}	170	72	182	48	188	27	196	10		
	T_s	165	76	172	60	180	45	189	30		
2020	T_a	171	98	171	74	183	54	187	37	153	108
	T_{ir}	151	133	158	109	166	86	178	65		
	T_s	151	129	156	112	163	97	172	82		

с данными наблюдений (рис. 6, табл. 3, 4), использование температуры T_a в качестве форсинга приводит к неудовлетворительным результатам, поскольку в летние месяцы температура воздуха, как правило, существенно ниже температуры подстилающей поверхности, которая интенсивно прогревается приходящей солнечной радиацией (рис. 5б). Соответствующая разность среднечасовых значений более чем в 50 % случаев превышает 2 °С, достигая в ясные солнечные дни 10–12 °С, при разности среднемесячных значений около 3 °С. В то же время использование при модельных расчетах температуры поверхности почвы по данным контактных и радиационных измерений позволяет достаточно достоверно воспроизвести динамику

протаивания. Как видно из рис. 6, значения измеренной глубины СТС находятся в пределах между смоделированной глубиной в отсутствие растительности и глубиной протаивания слоя грунта под моховым покровом высотой 1 см.

Для количественной оценки результатов моделирования в зависимости от вариантов форсинга и задаваемой высоты растительности (H) использовались коэффициент детерминации R^2 , относительная ошибка МВ и средняя абсолютная ошибка МАВ [14]:

$$MB = \frac{\sum (h_{mod} - h_{meas})}{\sum h_{meas}}, \quad MAB = \frac{\sum |h_{mod} - h_{meas}|}{n}, \quad (5)$$

где h_{mod} и h_{meas} — расчетная и наблюдаемая глубины протаивания; n — количество пар параллельных данных наблюдений и расчетов. Результаты воспроизведения моделью среднесуточных данных наблюдений глубины протаивания приведены в табл. 3.

Как видно из табл. 3, наилучшее соответствие смоделированной динамики глубины СТС (положение нулевой изотермы) глубине, рассчитанной по данным термокосы, обеспечивает использование в качестве форсинга температур T_{ir} и T_s при заданной высоте растительности 0 и 1 см (при этом следует иметь в виду, что T_{ir} , как было указано выше, является, по сути, средней для участка площадью более 20 м²). Расчет сезонного протаивания по температуре T_a , амплитуды годового цикла которой часто используются в качестве форсинга для оценки глубины протаивания по методике Кудрявцева [9, 22], оказался наиболее далеким от реальности. Это неудивительно, учитывая роль поглощенной коротковолновой радиации в формировании температуры подстилающей поверхности в летний период, обуславливающей, как было показано в табл. 2, разницу в индексах протаивания в несколько раз. В табл. 4 приведены модельные оценки имеющих прикладное значение характеристик деятельного слоя грунта: срок начала оттаивания (T) и максимальная глубина протаивания h в сравнении с данными наблюдений. Как следует из таблицы, наряду с рассмотренной выше проблемой адекватного задания температурного форсинга, наибольшее влияние на результаты модельных расчетов глубины СТС оказывает выбор характеристик мохового покрова, защищающего многолетнюю мерзлоту от быстрого прогревания и протаивания [5]. Судя по данным расчетов, с увеличением толщины растительного покрова от 0 до 1 см максимальная глубина СТС уменьшается, например, при радиационном форсинге с 0,72 до 0,48 м в 2017 г. и с 1,33 до 1,09 м в 2020 г. При этом увеличение толщины мохового покрова сдвигает и начало процесса протаивания на всё более поздние сроки, вплоть до того, что при ее некоторой критической толщине и использовании в качестве форсинга T_a в холодное лето 2017 г. протаивание не начинается вообще, поскольку за период нагрева тепловой фронт не успевает дойти до мерзлого грунта.

Согласно модельным расчетам аналогичные, хотя и более слабые, эффекты оказывают влажность мохового покрова и температура мерзлоты, обуславливающая охлаждение протаивающего слоя снизу. Изменение влажности бриофитов от 1 до 3 приводит к росту максимальной глубины СТС на 3–5 см. При понижении температуры мерзлоты T_2 на 2,5 °С максимальная толщина СТС при форсинге T_{ir} уменьшилась бы в 2017 и 2020 гг. на 7 см и 10 см соответственно. К сожалению, важный вопрос о величине температуры мерзлоты может быть прояснен только по данным прямых наблюдений в глубокой скважине.

Выводы

Выполненные в 2016–2021 гг. на НИС «Ледовая база Мыс Баранова» комплексные исследования термического режима верхнего слоя мерзлого грунта, дополненные результатами теплобалансовых наблюдений и модельными расчетами динамики протаивания, позволили оценить роль процессов взаимодействия атмосферы с подстилающей поверхностью и адекватного описания состояния растительного покрова в формировании СТС. Показано, что глубина и продолжительность сезонного протаивания многолетней мерзлоты на побережье арктических островов характеризуется существенной межгодовой изменчивостью.

Проанализирована роль уменьшения альбеда снежно-ледяного покрова в весенний период вследствие кратковременных вторжений теплых воздушных масс как триггера, приводящего к интенсификации процессов таяния и прогрева подстилающей поверхности вследствие резкого увеличения поглощения коротковолновой солнечной радиации.

Показано, что оценки глубины протаивания по данным о температуре воздуха на высоте 2 м, доступным в большинстве реанализов, мало репрезентативны и имеют смысл только для получения примерных характеристик процессов протаивания в летний период. Для их адекватного расчета необходимы измерения температуры подстилающей поверхности радиационным или контактными методами.

Ряд модельных экспериментов показал, что для улучшения качества прогноза глубины протаивания СТС необходима постановка комплексных наблюдений за температурой мерзлоты и теплофизическими свойствами растительного покрова.

В целом, с учетом упрощенной постановки задачи и приближенного задания тепломассобменных свойств протаивающих сред, результаты расчетов могут быть признаны удовлетворительными, а предложенный подход рекомендован для оценок СТС районов арктических пустынь по данным дистанционных измерений температуры подстилающей поверхности.

Конфликт интересов. У авторов исследования нет конфликта интересов.

Финансирование. Исследование выполнено в рамках темы 5.1.4 Плана НИТР Росгидромета на 2020–2024 гг. Регистрационный номер НИТР AAAA-A20-120041590009-7.

Благодарности. Коллектив авторов выражает благодарность руководству и сотрудникам Высокоширотной арктической экспедиции (ВАЭ) ААНИИ, ее зимовочным и сезонным составам.

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

Financing. The research was funded within project 5.1.4 of Roshydromet STW' Plan 2020–2024. STW registration number AAAA-A20-120041590009-7.

Acknowledgments. The team of authors expresses gratitude to the management and staff of the High-Latitude Arctic Expedition of AARI, as well as its wintering and seasonal teams.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Berner L.T., Massey R., Jantz P., Forbes B.C., Macias-Fauria M., Myers-Smith I., Kumpula T., Gauthier G., Andreu-Hayles L., Gaglioti B.V., Burns P., Zetterberg P., D'Arrigo R., Goetz S.J. Summer warming explains widespread but not uniform greening in the Arctic tundra biome. *Nature Communications*. 2020;11:4621. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18479-5>
2. Serreze M.C., Walsh J.E., Chapin III F.S., Osterkamp T., Dyurgerov M., Romanovsky V., Oechel W.C., Morison J., Zhang T., Barry R.G. Observational evidence of recent change in the northern high-latitude environment. *Clim. Chang.* 2000;46:159–207. <https://doi.org/10.1023/A:1005504031923>

3. Biskaborn B.K., Smith S.L., Noetzi J., Matthes H., Vieira G., Streletskiy D.A., Schoeneich P., Romanovsky V.E., Lewkowicz A.G., Abramov A., Allard M., Boike J., Cable W.L., Christiansen H.H., Delaloye R., Diekmann B., Drozdov D., Etzelmueller B., Grosse G., Guglielmin M., Ingeman-Nielsen Th., Isaksen K., Ishikawa M., Johansson M., Johannsson H., Joo A., Kaverin D., Kholodov A., Konstantinov P., Kröger T., Lambiel Ch., Lanckman J.-P., Luo D., Malkova G., Meiklejohn I., Moskalenko N., Oliva M., Phillips M., Ramos M., Sannel A.B.K., Sergeev D., Seybold C., Skryabin P., Vasiliev A., Wu Q., Yoshikawa K., Zheleznyak M., Lantuit H. Permafrost is warming at a global scale. *Nature Communications*. 2019;10:264. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-08240-410>
4. Степаненко В.М., Репина И.А., Федосов В.Э., Зилитинкевич С.С., Лыкосов В.Н. Обзор методов параметризации теплообмена в моховом покрове для моделей Земной системы. *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2020;56(2):127–138. <https://doi.org/10.1134/S0001433820020139>
Stepanenko V.M., Repina I.A., Fedosov V.E., Zilitinkevich S.S., Lykosov V.N. Review of methods for parameterization of heat transfer in moss cover for Earth system models. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Atmospheric and Oceanic Physics*. 2020;56(2):127–138. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0001433820020139>
5. Апарин Б.Ф., Апарин В.Б., Пфайффер Е.-М. Почвы и почвенный покров о-ва Большевик архипелага Северная Земля. *Вестник СПбГУ*. 2007;3(1):104–116.
Aparin B.F., Aparin V.B., Pfeiffer E.-M. Soils and soil cover of the Bolshevik Island of the Severnaya Zemlya archipelago. *Bulletin of St. Petersburg State University*. 2007;3(1):104–116. (In Russ.).
6. Матвеева Н.В. Растительность южной части острова Большевик (архипелаг Северная Земля). *Растительность России*. 2006;8:3–87.
Matveeva N.V. Vegetation of the southern part of the Bolshevik Island (Severnaya Zemlya archipelago). *Vegetation of Russia*. 2006;8:3–87. (In Russ.).
7. Махотина И.А., Макштас А.П., Тимачев В.Ф. Процессы взаимодействия подстилающей поверхности с атмосферой на о-ве Большевик. В кн.: Макштас А.П., Соколов В.Т. (ред.) *Исследование природной среды высокоширотной Арктики на НИС «Ледовая база Мыс Баранова»*. СПб.: ААНИИ; 2021. С. 31–38.
Makhotina I.A., Makshtas A.P., Timachev V.F. Processes of air — surface interaction at Bolshevik Island. In: Makshtas A.P., Sokolov V.T. (ed.) *Study of the natural environment of the high-latitude Arctic on the research station “Ice Base Mys Baranova”*. St. Petersburg: AARI; 2021. P. 31–38. (In Russ.).
8. Богородский П.В., Макштас А.П., Кустов В.Ю. Первые результаты мерзлотных наблюдений на «Ледовой базе Мыс Баранова» (о-в Большевик, арх. Северная Земля). В кн.: Макштас А.П., Соколов В.Т. (ред.) *Исследование природной среды высокоширотной Арктики на НИС «Ледовая база Мыс Баранова»*. СПб.: ААНИИ; 2021. С. 184–193.
Bogorodskiy P.V., Makshtas A.P., Kustov V.Yu. First results of permafrost observations at the “Ice Base Mys Baranova” (the Bolshevik Island, Severnaya Zemlya Archipelago). In: Makshtas A.P., Sokolov V.T. (ed.) *Study of the natural environment of the high-latitude Arctic on the research station “Ice Base Mys Baranova”*. St. Petersburg: AARI; 2021. P. 184–193. (In Russ.).
9. Кудрявцев В.А., Гарагуля Л.С., Кондратьева К.А., Меламед В.Г. *Основы мерзлотного прогноза при инженерно-геологических исследованиях*. М.: Наука; 1974. 431 с.
10. Лейбензон Л.С. *Движение природных жидкостей и газов в пористых средах*. М.: Гостехиздат; 1947. 244 с.
11. Сосновский А.В., Осокин Н.И. Влияние мохового и снежного покровов на устойчивость многолетней мерзлоты на Западном Шпицбергене при климатических изменениях. *Вестник Кольского научного центра РАН*. 2018;3(10):178–184.

- Sosnovsky A.V., Osokin N.I. The influence of moss and snow covers on the stability of permafrost in the Western Spitsbergen under climate change. *Bulletin of the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences*. 2018;3(10):178–184. (In Russ.).
12. Тишков А.А., Осокин Н.И., Сосновский А.В. Влияние синузий мохообразных на деятельный слой арктических почв. *Известия РАН. Серия географическая*. 2013;3:39–46.
Tishkov A.A., Osokin N.I., Sosnovsky A.V. Influence of bryophyte synusia on the arctic active soil layer. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Geographical Series*. 2013;3:39–46. (In Russ.).
13. Макштас А.П., Иванов Б.В., Тимачев В.Ф. Сравнение параметризаций турбулентного энерго-массообмена в устойчиво-стратифицированном приземном слое атмосферы. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2012;3(93):5–18.
Makshtas A.P., Ivanov B.V., Timachev V.F. Comparison parameterizations of turbulent energy-mass exchange in stable-stratified atmospheric surface layer. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. 2012;3(93):5–18. (In Russ.).
14. Li J., Luo Y. Natali S., Schuur E.A.G., Xia J., Kowalczyk E., Wang Y. Modeling permafrost thaw and ecosystem carbon cycle under annual and seasonal warming at an Arctic tundra site in Alaska. *J. Geophys. Res. Biogeosci.* 2014;119(6):1129–1146. [https:// doi.org/ 10.1002/2013JG002569](https://doi.org/10.1002/2013JG002569)
15. Chechin D.G., Repina I.A., Artamonov A.Y., Drozd I.D., Dyukarev E.A., Kazantsev V.S., Krivenok L.A., Larina A.V., Pashkin A.D., Shmonin K.N., Stepanenko V.M., Varentsov M.I. Quantifying spatial heterogeneities of surface heat budget and methane emissions over West-Siberian peatland: highlights from the Mukhrino 2022 campaign. *Forests*. 2024;15(1):102. <https://doi.org/10.3390/f15010102>
16. Putkonen J. Soil thermal properties and heat transfer processes near Ny-Ålesund, northwestern Spitsbergen, Svalbard. *Polar Research*. 1998;17(2):165–179. [https:// doi.org/ 10.3402/polar.v17i2.6617](https://doi.org/10.3402/polar.v17i2.6617)
17. Osterkamp T.E. A thermal history of permafrost in Alaska. In: Phillips M., Springman S.M., Arenson L.U. (ed.). *Proceedings of the 8th International Conference on Permafrost. vol. 2*. Brookfield: A.A. Balkema; 2003. P. 863–868.
18. Ballinger T.J., Overland J.E., Wang M., Bhatt U. S., Hanna E., Hanssen-Bauer I., Kim S.-J., Thoman R.L., Walsh J.E. *Arctic Report Card: Surface air temperature*. 2020. <https://doi.org/10.25923/gcw8-2z06>
19. Alekseev G.V., Nagurny A.P. Influence of sea ice cover on carbon dioxide concentration in the Arctic atmosphere in the winter period. *Doklady Earth Sciences*. 2025;401A(3):486–489.
20. Persson P.O.G. Onset and end of the summer melt season over sea ice: thermal structure and surface energy perspective from SHEBA. *Climate Dynamics*. 2011;39(6):1–23. [https:// doi.org/ 10.1007/s00382-011-1196-9](https://doi.org/10.1007/s00382-011-1196-9)
21. Shestakova A.A., Chechin D.G., Lüpkes C., Hartmann J., Maturilli M. The foehn effect during easterly flow over Svalbard. *Atmos. Chem. Phys.* 2022;22:1529–1548. <https://doi.org/10.5194/acp-22-1529-2022>
22. Анисимов О.А., Кокорев В.А. Моделирование мощности сезонноталого слоя с учетом изменений климата и растительности: прогноз на середину XXI века и анализ неопределенностей. *Криосфера Земли*. 2017;21(2):3–10. [https:// doi.org/ 10.21782/KZ1560-7496-2017-2\(3-10\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2017-2(3-10))
Anisimov O.A., Kokorev V.A. Russian permafrost in the 21st century: model-based projections and analysis of uncertainties. *Earth's Cryosphere*. 2017;21(2):3–9. (In Russ.).

Оригинальная статья / Original paper

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-4-428-444>

УДК 551.506.3



Zoning of the Barents and Kara Seas by surface air temperature changes and variability. Natural climatic seasons

Tatiana K. Karandasheva¹, Boris V. Ivanov^{1,2},
Anastasiia D. Revina^{1✉}, Irina A. Ilyushchenkova¹

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

² Saint Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

✉adrevina@aari.ru

ID TTK, 0000-0003-1859-4612; BVI, 0000-0002-4493-9410; ADR, 0000-0001-8004-7228; IAI, 0009-0006-9643-3063

Abstract. Studies of the present-day Arctic climate are becoming increasingly relevant and in high demand in the light of the observed global warming and the expansion of long-term programs for the development of the Arctic regions. A quantitative assessment of changes and variability in surface air temperature (SAT) is presented for the climate norm period of 1991–2020, based on data from 31 meteorological stations (MSs), which reflect the diversity of climatic conditions in the area studied. Average monthly SAT values were taken as indicators of changes in the thermal regime, and the standard deviations (SD) of average monthly SAT were used as indicators of the thermal regime variability. The annual course of SAT (one maximum and one minimum) mainly reflects the radiation factor. The annual course of SD (in the northern part of the area — one maximum and one minimum, in the southern part — two maxima and two minima) reflects the patterns of the atmospheric and ocean circulation and the type of the underlying surface. The assessment of the changes and variability in the thermal regime of the surface atmosphere was based on a comprehensive analysis of the annual cycle of indicators on the SAT-SD plane using closed SAT-SD curves characterizing annual and seasonal cycles. 31 SAT-SD curves were classified, and the corresponding regions of the Barents and Kara Seas were identified. A typical SAT-SD curve was obtained for each region. The boundaries of natural climatic seasons (NCS) were determined based on a comparative analysis of the seasonal cycle of SAT-SD indicators and the absolute SAT-SD values characteristic of different seasons within each region. Zoning and determining the duration of the NCS refine the general understanding of the climate of the Western sector of the Arctic.

Keywords: Barents Sea, Kara Sea, climate change, climate variability, natural climatic seasons, seasonal zoning

For citation: Karandasheva T.K., Ivanov B.V., Revina A.D., Ilyushchenkova I.A. Zoning of the Barents and Kara Seas by surface air temperature changes and variability. Natural climatic seasons. *Arctic and Antarctic Research*. 2025;71(4):428–444. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-4-428-444>

Received 05.08.2025

Revised 07.11.2025

Accepted 18.11.2025

© Авторы, 2025

© Authors, 2025

Introduction

The development prospects of the Russian Arctic zone largely depend on the current and expected climatic conditions. Increasing the accuracy of assessing changes and variability of the Arctic climate by taking into account natural climatic seasons (NCS) is necessary for the development of strategic programs for the Arctic regions.

The basic principles for determining the internal structure of the year, the selection of criteria for dividing a year into natural climatic seasons (NCSs) (unlike calendar seasons), as well as the definition of the very concept of NCS were formulated back in the middle of the last century. For example, NCS was understood as a period characterized by a uniform course of meteorological processes and a certain thermal regime [1]. Air temperature in itself should be considered as a synthetic indicator reflecting the impact of all the components of climate formation: solar radiation, atmospheric circulation, and the type of the underlying surface [2].

Previously, the annual course of air temperature, cloudiness, and atmospheric pressure was analyzed to identify climatic seasons in the Arctic seas. The summer season was limited to the dates of the transition of the average monthly minimum temperature through 0 °C, the beginning of winter was determined by the time of a sharp decrease in lower cloudiness (the physical basis for this was associated with a change in atmospheric circulation), the beginning of spring — by the change of a trough of low pressure to an area of high pressure [3]. However, as has been noted, the criterion of transition through 0 °C is not suitable for the Arctic because in most of the Arctic, negative air temperatures are observed even in summer [4]. The main criterion for establishing climatic seasons and their boundaries was the annual course of the average monthly air temperature, while the annual course of atmospheric pressure and cloudiness were secondary criteria [4]. Using the example of the Murmansk region, it was shown that the identification of climatic seasons depends on the choice of a meteorological criterion that would take into account temperature contrasts between land and sea, temperature fluctuations associated with fluctuations in the radiation regime, and with features of atmospheric circulation [5]. The best criterion is assessment of the variability of the average daily air temperature [5].

In the work of Z.M. Prik [6], the climatic zoning of the Arctic was determined by the features of the circulation of the atmosphere and the ocean, and the type of the underlying surface. It was indicated that the influence of these factors varied in different seasons. The author identified seven large climatic regions and provided their climatic characteristics. Prik's zoning was entrenched in the fundamental Atlas of the Arctic [7] and is actively used by modern researchers [8]. It is also worth noting the zoning of individual Arctic seas based on the characteristics of ice conditions. For example, this was done for the Greenland and Barents Seas [9] and for the Kara Sea [10]. In general, a limited number of studies are devoted to the climatic zoning of the Arctic [6–8]. At the same time, the zoning was carried out based on physical and geographical conditions without identifying the NCS.

According to Terziev et al., the most valid criteria for dividing a year into NCSs were the characteristics of atmospheric circulation [11].

Modern studies of the Arctic climate, including its thermal regime, are mainly based on estimates obtained for calendar seasons and average annual temperatures [12–17]. At the same time, a number of studies use the concept of “winter season”. For example, in one study, “winter” was the period from December to March inclusive [18], and in another one, the year was divided into two equal periods: winter (November–April) and summer (May–October) [19].

Previously, the authors of this work, in a joint analysis of the indicators of change and variability of the thermal regime of the surface atmosphere, determined the duration of the NCS for the conditions of Franz Josef Land [20]. Further, the NCSs were identified for the Barents Sea region, based on the data of 4 MSs (Barentsburg, Teriberka, Malyye Karmakuly, and the E.T. Krenkel Observatory) for the period of the present-day climate norm of 1991–2020 [21]. The NCSs identified corresponded to the physical and geographical conditions of the location of the MSs used.

The aim of this study is to identify the NCS in a large Arctic region using the Barents and Kara Seas as an example. The 1991–2020 climate norm period was chosen as a significant time interval, reflecting the current climate characteristics of the study region [22]. Based on the aim, the following objectives were set:

- assessing changes and variability in air temperature in the Barents and Kara Seas for the period 1991–2020;
- zoning the region through a comprehensive analysis of the annual cycle of average monthly temperature and its variability;
- identifying the NCS.

Materials and methods

The materials for the study were observation data from 31 MSs, located in the region of the Barents and Kara Seas (see Fig. 1), and the database (DB)¹.

To assess changes in SAT, monthly average SAT values were used as quantitative indicators. Standard deviations (SD) from the mean are typically used as a measure of variability (dispersion). For non-stationary processes, it is assumed that the total variability is divided into the variability explained by the trend of the mean and the residual variability associated with deviations from the trend. Residual variability is estimated as a SD from the trend [23].

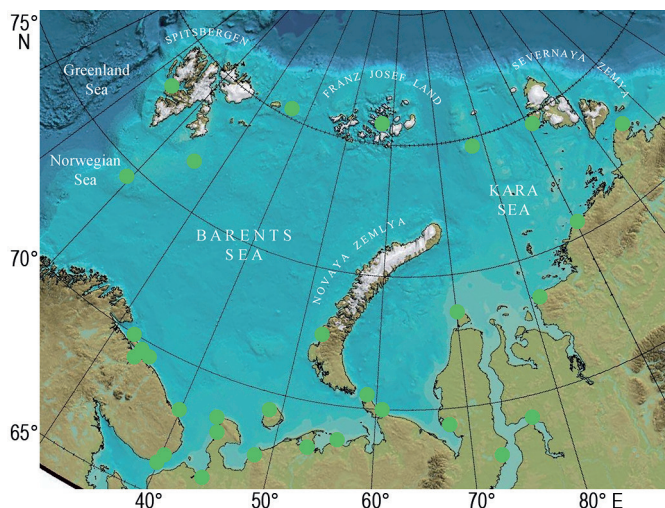


Fig. 1. Location of the 31 MSs in the Barents and Kara Seas region

Рис. 1. Местоположение 31 метеостанции в регионе Баренцева и Карского морей

¹ Ivanov B., Karandasheva T., Demin V., Ilyushchenkova I., Revina A. Database: Characteristics of current trends in surface air temperature in the Western sector of the Russian Arctic (CLIMATE), 2024. Patent No. 2024622557.

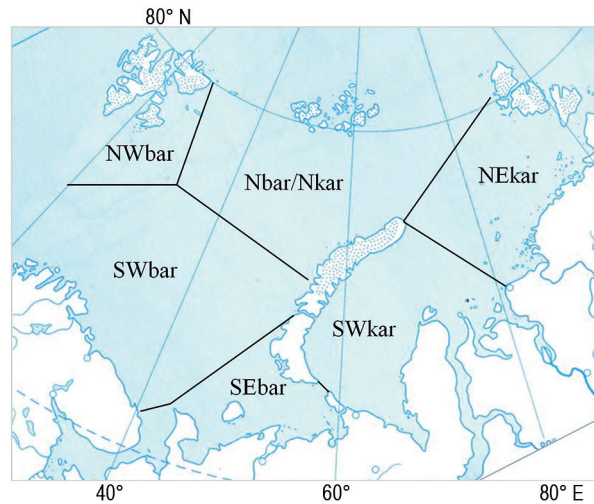


Fig. 2. Zoning of study region.

Nbar/Nkar — the north of the Barents and Kara Seas; NWbar — the northwest of the Barents Sea; SWbar — the southwest of the Barents Sea; SEbar — the southeast of the Barents Sea; NEkar — the northeast of the Kara Sea; SWkar — the southwest of the Kara Sea

Рис. 2. Районирование исследуемого региона.

Nbar/Nkar — север Баренцева и Карского морей; NWbar — северо-запад Баренцева моря; SWbar — юго-запад Баренцева моря; SEbar — юго-восток Баренцева моря; NEkar — северо-восток Карского моря; SWkar — юго-запад Карского моря

The characteristics of the linear trends of monthly average SAT value series for the MSs used were presented previously [24]. In this study, the SD was calculated in two ways: as the SD from the mean and as the SD from the trend. Preliminary analysis showed that, for a statistically significant trend of $p > 0.20$, the SD calculated from the SAT trend differs from the SD calculated from the mean SAT value by no more than 3 %. Therefore, for time series with statistically significant trends ($p \leq 0.20$), the SD from the trend was calculated, and for other series, the SD from the mean SAT value was calculated.

At the first stage, a 30-year time series of monthly average SAT values and characteristics of linear SAT trends for 31 MSs for the period 1991–2020, obtained by the authors earlier [24], were used. For each MS, average SAT values were calculated for each calendar month and, depending on the statistical significance of the linear SAT trend, the corresponding SD of the SAT trend or SD of the average SAT values was obtained. Further, for each MS, a closed curve of the annual SAT-SD indicators was constructed on the SAT-SD plane. The resulting curves differed in shape, timing of maxima/minima, maximum/minimum values, and amplitude of the SAT and SD indicators.

At the second stage, an expert method was used to analyze the shapes of the curves obtained, the number and time of occurrence of the maxima and minima of the SAT and SD, and the amplitudes of the annual variation of these indicators. Taking into account the identified differences in the curve shapes and the features of the annual and seasonal cycles, 6 characteristic groups were identified. Each selected group of curves naturally corresponded to the geographic location of the MSs, according to the data from which they were constructed. As shown in Fig. 1, the MSs for which the SAT and SD

indicators were calculated are located mainly on the coast of the Barents and Kara Seas. In the open part of the sea waters, the boundaries of the areas were drawn taking into account the features of the thermal regime of the surface atmosphere and the surface layer of the sea, the wind and ice regime of the seas in modern climatic conditions [25]. The straight lines dividing the selected areas and drawn through open water (see Fig. 2) largely correspond to the boundaries of the ice regions of the Barents and Kara Seas, validated by E.U. Mironov [9] and V.P. Karklin et al. [10].

Then, for each identified area, average SAT values were calculated for the year and calendar months (as the arithmetic mean of the corresponding SAT values based on the MSs data for each area). For each area, linear trends in average monthly and average annual SAT values were calculated, estimates of the SD from the trend and from the average SAT value were obtained, and typical SAT-SD curves were constructed. Thus, we have zoned the sea areas using SAT-SD curves.

At the third stage, a comparative analysis was carried out of the SAT and SD values and the rates of their increase/decrease were carried out, which allowed us to identify and determine the duration of the NCS for each region. The winter and summer seasons were characterized by low and high values of the average monthly SAT, respectively, with relatively small changes in the average monthly SAT. At the same time, the winter season was characterized by high SD values, and the summer season was characterized by low SD values. In the transitional seasons (spring and autumn), relatively rapid changes in the values of the average monthly SAT and SD were observed.

The magnitude of the velocity of a point with coordinates (t ; σ) on the plane of the SAT-SD was adopted as a complex indicator of the rates of change of the SAT and SD:

$$V_i = \sqrt{(t_i - t_{i-1})^2 + (\sigma_i - \sigma_{i-1})^2},$$

where V_i is the velocity of the point in the i — the calendar month, t_i and σ_i are the values of the SAT and its SD in the current calendar month, t_{i-1} and σ_{i-1} are the SAT and SD values in the previous calendar month.

Thus, for each area studied, the rates of change of the SAT-SD-indicator from month to month during the year, the ranges of SAT and SD values characteristic of winter/spring/summer/autumn, and the duration of the NCS were estimated.

Results

A comparative analysis of the closed SAT-SD curves characterizing the annual and seasonal SAT cycles obtained for all MSs revealed 4 characteristic shapes of these curves, typical of the region studied. Examples of such curves are shown in Fig. 3 (*a, b, e, f*). The shape of the figure formed by the closed SAT-SD curve is determined by the annual variation of the SAT and SD indices (see Fig. 3: *c, d, g, h*).

Certain patterns are observed in the annual variations of the SAT and SD indices. In the annual SAT variations, one maximum and one minimum were observed at all MSs. In the annual SD variations, two minima and two maxima were observed at most of the MSs (see Fig. 3*c, b, h*), while the remaining MSs exhibit one minimum and one maximum (see Fig. 3*g*). Accordingly, based on the shape of the SAT-SD curves and the number and timing of SAT and SD minima/maxima, the set of SAT-SD curves was divided into four groups.

Geographically, it looks as follows: the northwest of the Barents Sea (3 MSs), the north of the Barents and Kara Seas (3 MSs), the northeast of the Kara Sea (4 MSs), and the southern part of the Barents and Kara Seas (21 MSs). In the last group, there were

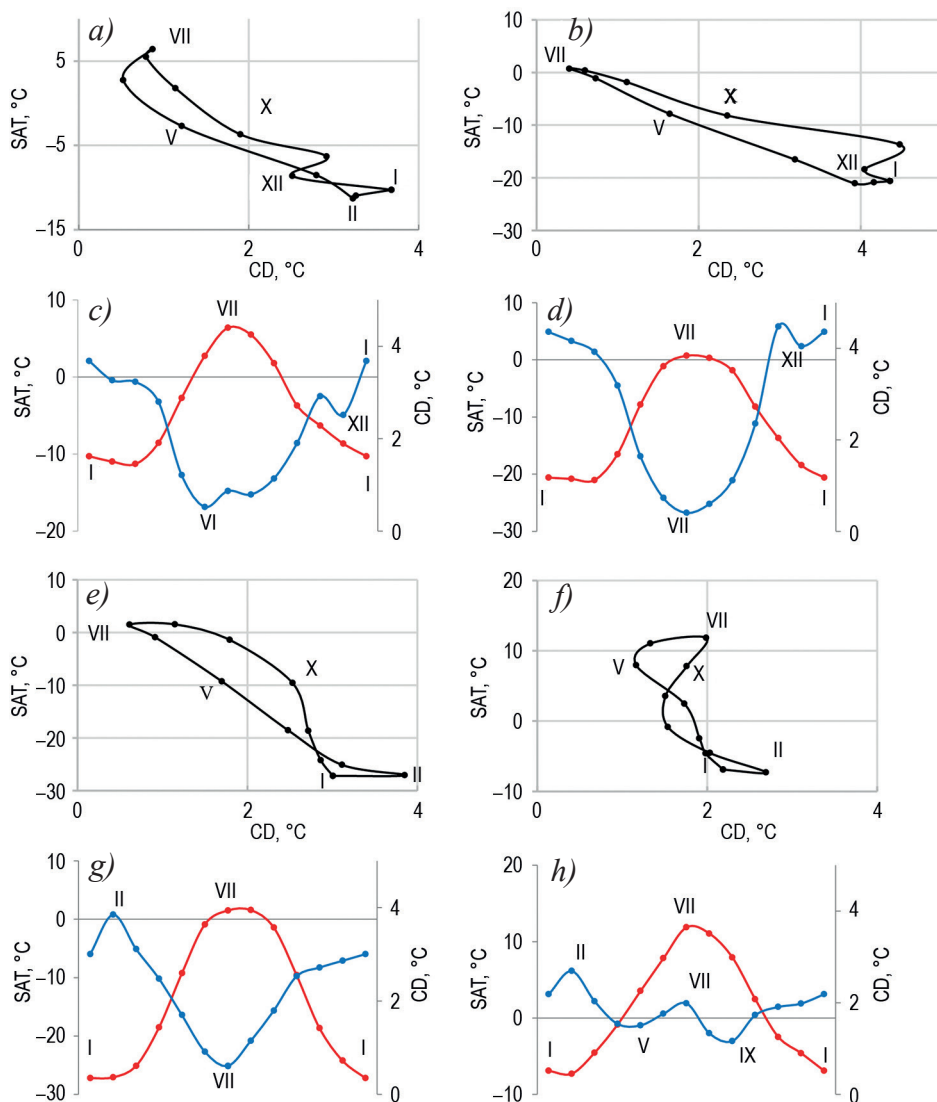


Fig. 3. Four characteristic shapes of the SAT-SD curves (*a, b, e, f*) and the annual cycle of SAT and SD (from January to January inclusive) (*c, d, g, h*).

(*a, c*) — Barentsburg MS (northwest of the Barents Sea); (*b, d*) — E.T. Krenkel GMO (north of the Barents and Kara Seas); (*e, g*) — E.K. Fedorov OGMS (northeast of the Kara Sea); (*e, g*) — Teriberka MS (south of the Barents Sea). The Roman numerals indicate months. The point on SAT-SD curve corresponds to the 15th day of the month

Рис. 3. Четыре характерные формы ПТВ-СКО-кривых (*a, b, e, f*) и годовой ход (с января по январь включительно) (*c, d, g, h*) ПТВ и СКО.

(*a, c*) — МС Баренцбург (северо-запад Баренцева моря); (*b, d*) — ГМО им. Э.Т. Кренкеля (север Баренцева и Карского морей); (*e, g*) — ОГМС им. Е.К. Федорова (северо-восток Карского моря); (*e, g*) — МС Териберка (юг Баренцева моря). Римскими цифрами обозначены месяцы. Точка на ПТВ-СКО-кривой соответствует 15 числу месяца

significant differences in the amplitude of the annual cycle of the SAT (from 15 °C to 35 °C) and SD indicators (from 1 °C to 4.5 °C). Therefore, this group, based on the location of the MSs, was divided into three subgroups (6, 9 and 6 MSs in each) with different amplitudes of the SAT and SD indicators, respectively: 1) from 15 to 23 °C and from 1 to 2.5 °C; 2) from 20 to 30 °C and from 2.5 to 4.0 °C; 3) from 25 to 35 °C and from 3.5 to 4.5 °C.

Thus, we classified the SAT-SD curves for all MSs and identified the regions of the Barents and Kara Seas corresponding to this classification. In the northern part of the study region (see Fig. 2), three characteristic SAT-SD curve shapes were observed (the NWbar, Nbar/Nkar, and NEkar regions), while in the southern part, one shape was observed (the SWbar, SEbar, and SWkar regions).

For each area, the average SAT values and linear trend indicators were calculated for the year and calendar months. All linear trends calculated for the average annual SAT values were statistically significant at the $p < 0.01$ level. The statistical significance of the linear SAT trends for calendar months varies within a fairly wide range (see Table 1). The majority (89 %) of the linear trends were statistically significant at the $p < 0.20$ level, and for these cases, the SD from the trend was calculated to exclude the influence of the trend. Statistically insignificant trends ($p > 0.20$) were observed mainly in the southern Barents Sea (the SWBar and SEBar areas) in January–March and June. For cases of statistically insignificant trends, the SD from the mean was calculated.

Quantitative estimates of the SAT and SD, reflecting seasonal changes and variability of air temperature for 6 regions, are presented in Table 2.

Table 1

Surface air temperature linear trend indicators

Таблица 1

Показатели линейных трендов поверхностной температуры воздуха												
Area	NWbar		Nbar/Nkar		NEkar		SWbar		SEbar		SWkar	
	<i>a</i>	<i>p</i> <	<i>a</i>	<i>p</i> <	<i>a</i>	<i>p</i> <	<i>a</i>	<i>p</i> <	<i>a</i>	<i>p</i> <	<i>a</i>	<i>p</i> <
I	0.228	0.01	0.367	0.01	0.246	0.01	−0.042	0.45	0.060	0.50	0.140	0.15
II	0.221	0.01	0.403	0.01	0.262	0.01	0.046	0.50	0.126	0.20	0.200	0.10
III	0.023	0.75	0.138	0.10	0.143	0.10	0.041	0.40	0.064	0.45	0.098	0.35
IV	0.083	0.20	0.181	0.01	0.238	0.01	0.081	0.05	0.116	0.05	0.159	0.10
V	0.093	0.01	0.089	0.01	0.087	0.10	0.088	0.01	0.083	0.05	0.063	0.15
VI	0.045	0.01	0.028	0.01	0.074	0.01	0.045	0.20	0.028	0.45	0.083	0.05
VII	0.045	0.01	0.015	0.10	0.046	0.05	0.082	0.05	0.095	0.05	0.122	0.01
VIII	0.022	0.20	0.047	0.01	0.086	0.01	0.046	0.10	0.064	0.05	0.062	0.10
IX	0.074	0.01	0.125	0.01	0.161	0.01	0.088	0.01	0.087	0.01	0.093	0.05
X	0.157	0.01	0.441	0.01	0.324	0.01	0.067	0.10	0.087	0.10	0.136	0.05
XI	0.155	0.01	0.344	0.01	0.219	0.01	0.113	0.01	0.166	0.01	0.137	0.10
XII	0.199	0.01	0.349	0.01	0.224	0.01	0.064	0.15	0.136	0.05	0.172	0.10
Год	0.112	0.01	0.211	0.01	0.176	0.01	0.060	0.01	0.093	0.01	0.122	0.01

Note. *a* — slope of the linear trend, °C/year; *p* — level of statistical significance.
 Примечание. *a* — угловой коэффициент линейного тренда, °C/год; *p* — уровень статистической значимости.

Table 2

**Average annual and seasonal characteristics of changes (surface air temperature)
and variability (standard deviation) of air temperature for 6 regions**

Таблица 2

**Среднегодовые и сезонные характеристики изменений
(поверхностная температура воздуха)
и изменчивости (среднеквадратическое отклонение)
температуры воздуха для 6 районов**

Areas	SAT			SD		
	$t_{cp}, ^\circ\text{C}$	$A_p, ^\circ\text{C}$	min/max	$\sigma_{year}, ^\circ\text{C}$	$A_\sigma, ^\circ\text{C}$	max/min
NWbar	-2.6	14	II–III / VII–VIII	0.9	2.9	I / VI–VIII; XII
Nbar/Nkar	-10.5	21	II–III / VII–VIII	1.3	4.0	I / VI–VIII; XII
NEkar	-12.2	29	I–II / VII–VIII	1.1	2.9	II / VI–VII
SWbar	1.3	19	I–II / VII–VIII	0.7	1.7	II, VII / IV–VI; VIII–IX
SEbar	-1.4	24	I–II / VII–VIII	1.1	2.9	II, VII / VI; VIII–IX
SWkar	-6.9	30	I–II / VII–VIII	1.5	3.8	II, VII / VI; VIII

Note. $t_{cp}, ^\circ\text{C}$ — average annual SAT value; $A_p, ^\circ\text{C}$ — amplitude of annual SAT variation; min/max — coldest/warmest months; $\sigma_{year}, ^\circ\text{C}$ — SD of average annual SAT values; $A_\sigma, ^\circ\text{C}$ — amplitude of annual SD variation; max/min — months with maximum and minimum SD values (or months with maximum/minimum SAT variability).

Примечание. $t_{cp}, ^\circ\text{C}$ — среднегодовое значение ПТВ; $A_p, ^\circ\text{C}$ — амплитуда годового хода ПТВ; мин/макс — самый холодный/самый теплый месяцы; $\sigma_{year}, ^\circ\text{C}$ — СКО среднегодовых значений ПТВ; $A_\sigma, ^\circ\text{C}$ — амплитуда годового хода СКО; макс/мин — месяцы с максимальным и минимальным значением СКО (или месяцы с максимальной/минимальной изменчивостью ПТВ).

Typical SAT-SD curves, constructed using average monthly SAT values and corresponding SD values, are shown in Fig. 4.

In the region studied, the average annual SAT value decreased significantly from southwest to northeast: from 1.3 $^\circ\text{C}$ (SWbar) to -12.2 $^\circ\text{C}$ (NEkar). The amplitude of the annual SAT cycle increased from west to east, from 14 $^\circ\text{C}$ (NWbar) and 19 $^\circ\text{C}$ (SWbar) to 30 $^\circ\text{C}$ (NEkar, SWkar) (see Table 2 and Fig. 4a, d and c, f).

The SAT minimums were shifted to the time of the Sun's appearance above the horizon after the polar night: in the southern regions, the minima were observed in January–February, while in the northern regions they were observed later — in February–March (see Table 2 and Fig. 4). The shift of the SAT minimum to March in the northern regions was also due to the fact that anticyclonic circulation begins to predominate over the Arctic, and heat transfer from the ice-covered sea significantly decreases [11]. The maxima were observed after the summer solstice — in July–August (see Table 2 and Fig. 4).

SD values in the northern regions were within a relatively narrow range: 0.9–1.3 $^\circ\text{C}$. In the southern regions, SD values increased significantly (almost doubling) from west to east: from 0.7 $^\circ\text{C}$ (SWbar) to 1.5 $^\circ\text{C}$ (SWkar) (see Table 2 and Fig. 4).

The smallest annual amplitude of the SD (1.7 $^\circ\text{C}$) was observed in the southwest of the region (SWbar) (see Table 2 and Fig. 4d). In this area, frequent changes in air masses (temperate and arctic) should have led to significant variability in air temperature, but this was prevented by the relatively rapid transformation of air masses over the non-freezing water surface. In other regions, the annual amplitude of the SD was significantly

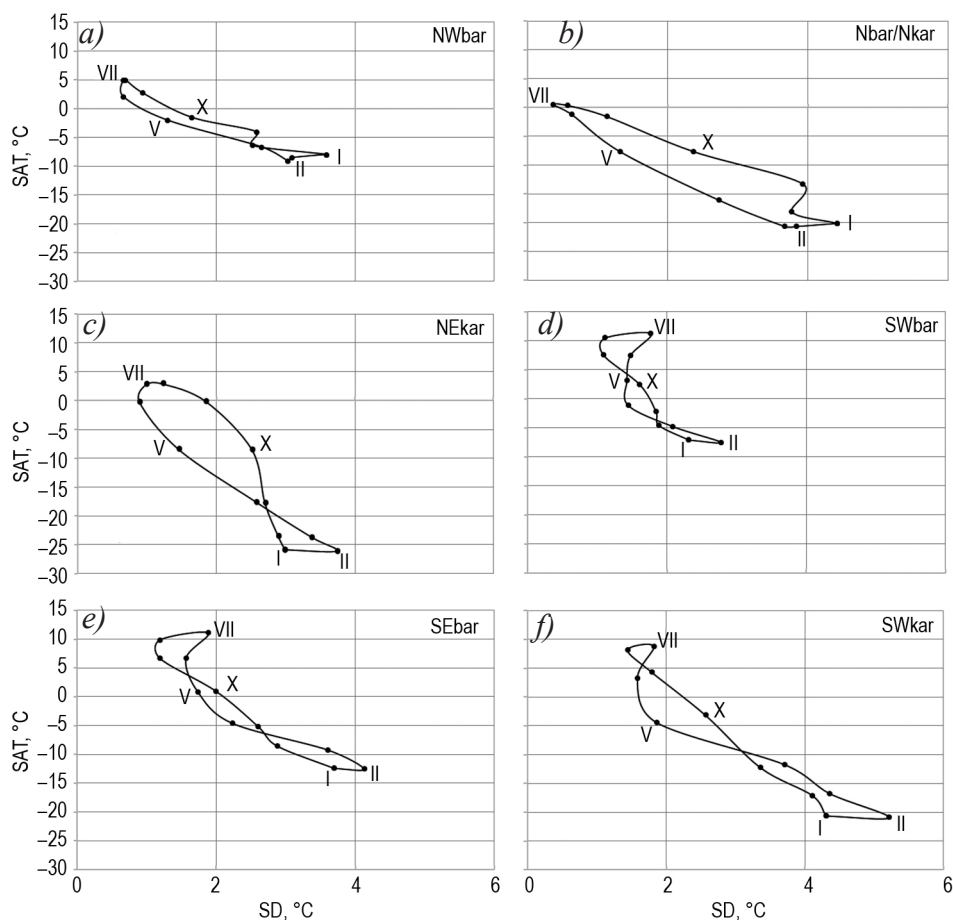


Fig. 4. Annual cycle of SAT-SD indicators for 6 regions of the Barents and Kara Seas.

The point on SAT-SD curve corresponds to the 15th day of the month

Рис. 4. Годовой цикл ПТВ-СКО-показателей для 6-ти районов Баренцева и Карского морей.

Точка на ПТВ-СКО-кривой соответствует 15 числу месяца

larger, (about 3–4 °C)(see Table 2 and Fig. 4). This could be explained, firstly, by frequent winter temperature inversions and a sharp increase in SAT as a result of the destruction of the inversion layer (increased wind strength, cloud formation, advection of air masses). Secondly, by the influence of cold air masses of continental origin formed in the Siberian anticyclone (SEbar) and warm air masses transported by cyclones (eastern trough of the Icelandic low) (SWkar). Third, by ocean circulation: a complex system of alternating warm and cold currents (NW and SE currents), and the influx of warm Barents Sea waters through the Kara Strait and Yugorsky Strait (SWkar). This leads to thermal heterogeneity of the underlying surface (open water, ice of varying concentrations).

The main winter maximum of the SD occurred during the period of the most intense atmospheric circulation and was also formed under the influence of the radiation regime during the polar night: in the northern regions (NWbar, Nbar/Nkar) — in January, in NEkar

and in the southern regions — in February (see Table 2, Fig. 4). In the southern regions, in July, against the background of the summer decrease in the SD, a small secondary summer maximum of the SD was observed, associated with the alternation of cold Arctic and warm continental air masses in the region of the Arctic front [11].

The spring-summer minimum of the SD was caused by the seasonal decrease in atmospheric circulation intensity and the melting of sea ice and snow on the coast and islands. Melting processes prevent a rapid increase in air temperature during the influx of warm air masses and a sharp decrease in temperature during the influx of cold air masses (due to the latent heat released during refreezing) [11]. The earliest spring-summer minimum of the SD was observed in April-June in the southwest of the study region (SWbar), the latest in June-August in the northern regions (NWbar and Nbar/Nkar), and in other regions in June-July (see Table 2 and Fig. 4).

In the southern regions (SWbar, SEbar, SWkar), the summer-autumn minimum in SD was still observed in August-September (see Table 2 and Fig. 4d–f). The main reason for the low air temperature variability in autumn is the intense heat transfer from the sea surface, as water heat content of sea reaches its maximum value at this time.

In the north of the study region (NWBar, Nbar/Nkar), a slight minimum in SD was observed in December. The physical origin of the decrease in air temperature variability in December is still unclear, but under current warming conditions (for the period 1985–2015), a similar decrease in other meteorological parameters (mean monthly wind speed, average monthly precipitation) was recorded at the beginning of winter (November) in the Barents and Kara Seas [25].

To identify the NCS, we propose considering both the change in air temperature (SAT), whose annual cycle in polar regions is determined by the radiation factor, and its variability (SD), whose annual cycle, as shown above, reflects the characteristics of atmospheric/oceanic circulation and the type of the underlying surface. By winter and summer seasons, we mean periods of time during which SAT and SD values change relatively slowly and within narrow ranges, while during transitional seasons (spring, autumn), these values change relatively rapidly and within wide ranges. Quantitative estimates of the rates of change in SAT and SD for various seasons are presented in Table 3.

Table 3

**Ranges of the module of the complex indicator of the velocity of change
of surface air temperature and standard deviation (V_p °C/month)
for the natural climatic seasons**

Таблица 3

**Диапазоны модуля комплексного показателя скоростей изменения
приземной температуры воздуха и среднеквадратического отклонения (V_p °C/мес)
для естественных климатических сезонов**

Areas	Winter	Spring	Summer	Autumn
NWbar	1–2	4–5	0–3	3–4
Nbar/Nkar	0–5	6–9	0–2	6
NEkar	1–6	8–9	0–3	8–9
SWbar	1–3	4	1–4	5
SEbar	0–4	5–6	1–4	6
SWkar	1–5	8	1–6	7–9

Table 4

**Ranges of values of surface air temperature and standard deviation (°C)
 for natural climatic seasons**

Таблица 4

**Диапазоны значений поверхностной температуры воздуха
 и среднеквадратического отклонения (°C)
 для естественных климатических сезонов**

Areas	Winter		Spring		Summer		Autumn	
	SAT	SD	SAT	SD	SAT	SD	SAT	SD
NWbar	−9...−4	3...4	−7...−2	1...3	2...5	1	−4...3	1...3
Nbar/Nkar	−21...−13	3...4	−16...−1	1...3	−1...1	0...1	−13...−1	1...4
NEkar	−26...−18	3...4	−18...0	1...3	0...3	1...2	−18...0	2...3
SWbar	−7...−2	2...3	−3...5	1...2	5...11	1...2	−2...5	1...2
SEbar	−13...−7	3...4	−7...4	2...3	4...11	1...2	−7...4	2...3
SWkar	−21...−12	3...5	−12...3	2...4	3...9	1...2	−12...4	2...3

Table 5

Duration of NCS for the study region

Таблица 5

Продолжительность ЕКС для региона исследований

Regions	Months											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
NWbar	Winter			Spring			Summer			Autumn		
Nbar/Nkar												
NEkar												
SWbar												
SEbar												
SWkar												

In the north and northeast of the study region (Nbar/Nkar and NEkar), in summer, lower V_i values than in winter were observed; in other areas, summer and winter V_i values were comparable. During the transitional seasons, V_i values were significantly higher: in spring compared to winter and in autumn compared to summer, 1.5 to 2 times. The highest V_i values were observed in the Kara Sea regions.

The observed relatively low/high SAT values and relatively high/low SD values for the winter/summer seasons, as well as the intermediate SAT and SD values for the transitional seasons, are presented in Table 4.

In winter, negative SAT values were observed in all regions, with the lowest values in Nbar/Nkar and NEkar, and the highest in SWbar. SD values in winter in most of the regions of the Barents and Kara Seas were within a narrow range of 3–4 °C. In spring, SAT values crossed 0 °C in all the regions, with the exception of Nbar/Nkar and NEkar, and SD values decreased. However, in the northern regions, the range of SD values increased, while in the southern regions, it remained the same. In summer, positive SAT values and the lowest SD values were observed in almost all the regions. In autumn, SAT values crossed 0 °C in most regions. SD values increased significantly, with the range of SD values increasing in the northern regions (with the exception of NEkar), while in the southern regions, it remained the same.

The time boundaries of the NCS are presented in Table 5.

“Spring” began earliest in the southern Barents Sea (SWbar, SEbar), and half a month later in the other areas of the study region. The duration of spring was the same in all the areas — two months. The longest summer (4 months) was observed in the southern Barents Sea (SWbar, SEbar), while in the other areas, summer was shorter and of equal duration (3 months). In most of the areas, autumn began in the second half of September; in the southern areas of the Barents Sea (SWbar, SEbar), it began in October. In the southwest of the region (SWbar), autumn was short (1.5 months), while in the other areas it was longer (2 months). Winter began in the second half of November, and in the SEbar in December. In the northern regions (NWbar, Nbar/Nkar, NEkar) and in the southwest of the Kara Sea (SWkar), “winter” lasted 5 months, in the south of the Barents Sea: 4.5 months (SWbar) and 4 months (SEbar).

The identified temporal boundaries of the NCS refine the description of seasonal ice processes in the Barents and Kara Seas [25, 26]. The temporal boundaries of the NCS correspond to the ice regime characteristics of the study region, with ice extent extremes occurring 1–2 months later than SAT extremes. Thus, minimum SAT values in the study region were observed in January–March (see Table 2), and maximum ice extent was observed in March–April. Maximum SAT values were observed in July–August, and minimum ice extent was observed in September. Moreover, the directions of both increasing SAT and decreasing ice extent, and decreasing SAT and increasing ice extent, coincided. Thus, during relatively warm periods (May–September), the seasonal process of decreasing ice coverage begins in the southwest of the study region and, gradually encompassing other areas, moves northeast. During relatively cold periods (October–February), the seasonal process of increasing ice coverage begins in the northeast of the study region and gradually moves southwest.

Thus, the NCSs determined using the principle of joint analysis of air temperature changes and variability in six regions of the Barents and Kara Seas correspond to the physical and geographical conditions of the study region.

Discussion

The zoning of the Barents and Kara Seas and the determination of the duration of the NCS carried out in our work based on the characteristics of the SAT-SD curves are in good agreement with the climatic zoning of the Arctic carried out by other researchers.

For example, according to the zoning proposed by Prik, three regions were distinguished in the Barents and Kara Seas, as part of the Atlantic climatic region [6, 7]. The extreme northeastern Kara Sea was classified as part of the Siberian climatic region. In our study, the zoning was performed with a higher spatial resolution, and six distinct regions were identified.

In the previous study, the temporal boundaries of the NCS for the Barents Sea were established based on changes in atmospheric circulation patterns with an accuracy of one month: “winter” (November–April), “spring” (May–June), “summer” (July–August), and “autumn” (September–October) [11]. In our study, the Barents Sea was divided into four regions, and the NCS boundaries were determined with a higher temporal resolution and refined. For example, in the Barents Sea areas that we identified, “winter” began later and ended earlier, while “summer” began earlier and ended later. The duration of the transition seasons in these areas and in the Barents Sea as a whole was almost identical, lasting two months. It should be noted that the NCS time boundaries for the Barents Sea were established using data prior to 1990 (including MSs observations for the period

1936–1980), i.e., for the period that included the “cold 1960s”. Our study was conducted for the period 1991–2020, which reflects present-day sustained warming. This could explain the shorter “winter” and longer “summer” in our case compared to the previous study [11].

In the work of Korolkova, the temporary boundaries of the NCS and the zoning of the Arctic were determined primarily based on the analysis of the annual variability of SAT [4]. In our study, the MSs, whose data Korolkova used to identify the NCS in the western Barents Sea (2 MSs) and in the Kara Sea (1 MS), were assigned to the NWbar and SWkar regions. A comparison of the results shows that our estimates of the NCS temporal boundaries in these regions coincided with Korolkova’s estimates within the accuracy of determining the NCS boundaries (half a month). In addition to the annual variability of SAT, Korolkova also considered the annual variability of the frequency of overcast sky. In some cases, this indicator confirmed the temporary boundaries of the NCS identified based on SAT; in others, it did not, or data on the frequency of overcast sky were simply unavailable. Therefore, in working with SAT time series it seems appropriate to use not only the annual SAT cycle but also an additional characteristic—namely, the SD.

Among recent studies, the climatic regionalization performed by Johannessen and coauthors [12] is noteworthy. Using ERA-40 and Nansen SAT reanalyses, the authors identified six regions in the Northern Hemisphere from 40° to 90°N and analyzed changes in SAT for both the year and for calendar seasons.

Since transition from one type of climatic conditions to another occurs gradually, the boundaries of climatic regions and the duration of the NCS can be determined with a sufficient degree of approximation, based on explicit and implicit knowledge (expert methods). In climate zoning and defining NCS boundaries, various experts use both qualitative (strong/weak influence of cyclonic/anticyclonic circulation, the influence of warm/cold currents, ice cover/open water) and quantitative criteria (characteristics of the annual course of SAT and SD). In our study, zoning was conducted using qualitative (SAT-SD curve shapes) and quantitative (characteristics of the annual course of SAT and SD.) criteria. The NCSs for each region were identified through a comparative analysis of a complex indicator—the rate of change of SAT and SD values within each area and the absolute values of SAT and SD characteristic of different seasons within a given area.

Thus, the zoning of the Barents and Kara Seas that we carried out and the identified boundaries of the NCS not only do not contradict the results of previous studies, but also significantly complement and detail our understanding of the climate of the Western Arctic.

Conclusions

For the period of the present-day climate norm 1991–2020, based on the data of 31 MSs (Russian and Norwegian) located in the Barents and Kara Seas, as a result of a comprehensive analysis of changes (annual course) in the average monthly values of SAT and its variability (SD), zoning of the study region has been performed, and the time boundaries of the NCS for the zones have been identified.

1. To assess the changes and variability, the monthly average values of SAT and its SD were used as quantitative indicators. A new approach was applied: 31 closed curves of the annual cycle of the SAT-SD indicators were constructed on the SAT-SD plane, characterizing the annual and seasonal cycles of the thermal regime of the surface atmosphere. Based on qualitative (curve shape) and quantitative (maximum/minimum values, number and time of occurrence of the maxima/minima, annual amplitude of SAT and SD) features, 6 groups of SAT-SD curves were distinguished. Each group of curves

corresponds to the location of certain MSs, and, thus, the boundaries of 6 large climatic regions were determined. In the Barents Sea, there were three of them: northwest (NWbar), southwest (SWbar), southeast (SEbar). In the Kara Sea, two: southwest (SWkar) and northeast (NEkar). The northern part of the study region comprises one common area: the northern Barents and Kara Seas (Sbar/Skar). For each area, a typical closed SAT-SD curve was constructed using combined and averaged data, and quantitative estimates of SAT changes and variability were provided.

2. The NCSs were identified based on a combined analysis of SAT changes, the annual cycle of which in Polar Regions is determined by the radiation factor, and SAT variability (SD), the annual cycle of which reflects the features of atmospheric/oceanic circulation and the type of the underlying surface. By winter and summer seasons, we mean time periods during which the SAT and SD values change relatively slowly and within narrow ranges, while in transitional seasons (spring, autumn), these values change relatively rapidly and within wide ranges. To identify the temporal boundaries of the NCS, the modulus of the SAT-SD indicator movement velocity from month to month on the SAT-SD plane and the SAT and SD values themselves were used as quantitative indicators. “Winter” in most of the study region lasted 5 months (the second half of November — the first half of April), in the southern Barents Sea, “winter” began later and ended earlier, and lasted 4–4.5 months. Summer lasted three months in most of the study region (from the second half of June to the first half of September). In the southern Barents Sea, summer began earlier and ended later, lasting four months. The transition periods (spring/fall) lasted two months throughout the study region.

3. The zoning carried out in this work and the temporal boundaries of the NCS correspond to the physical and geographical conditions of the Barents and Kara Seas.

4. The use of calendar seasons allows a rough comparison of climate change patterns across different territories. However, when they are applied to specific regions with varying climatic conditions, it is difficult to expect that these seasons will accurately reflect the changes. For a more detailed study of regional climate, it is advisable to identify the NCS. This is currently relevant not only to the further development of Earth sciences but also to supporting economic activities, and to other activities in the Arctic. The proposed accuracy of defining the NCS’s temporal boundaries, half a month, appears sufficient for long-term development planning for Russia’s Arctic regions.

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

Funding. The work was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation grant No. 24-27-00112 “Modern changes in the Arctic climate and extreme weather fluctuations in the western sector of the Northern Sea Route”.

Acknowledgments. The authors express their sincere gratitude to the senior researcher of the Arctic and Antarctic Research Institute, PhD, P.N. Svyaschikov and the senior researcher of the Polar Geophysical Institute (Apatity) V.I. Demin for useful discussions of the contents of the paper and valuable comments.

Конфликт интересов. У авторов исследования нет конфликта интересов.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований № 24-27-00112 «Современные изменения арктического климата и экстремальные колебания погоды в западном секторе Северного морского пути».

Благодарности. Авторы выражают искреннюю признательность ст. науч. сотр. ААНИИ, канд. геогр. наук П.Н. Священникову и ст. науч. сотр. Полярного геофизического института (Апатиты) В.И. Демину за полезное обсуждение содержания статьи и ценные замечания.

REFERENCES

1. Lebedev A.N., Pisareva G.P. Climatic seasons of the USSR. *Trudy glavnoi geofizicheskoi observatorii = Proceedings of Main Geophysical Observatory*. 1956;62:67–84. (In Russ.).
2. Galakhov N.N. *Study of the structure of the climatic seasons of the year*. Moscow: Academy of Sciences USSR publ.; 1959. 183 p. (In Russ.).
3. Vize V.Iu. *The climate of the seas of the Russian Arctic*. Leningrad; Moscow: Glavsevmorput'; 1940. 124 p. (In Russ.).
4. Korol'kova E.D. Climatic seasons in the Arctic. *Trudy Arkticheskogo i antarkticheskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta = Bulletin of Arctic and Antarctic Research Institute*. 1965;273:26–33. (In Russ.).
5. Yakovlev B.A. *Climate of Murmansk region*. Murmansk: Kn. izd-vo; 1961. 180 p. (In Russ.).
6. Prik Z.M. Climatic zoning of Arctic. *Trudy Arkticheskogo i Antarkticheskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta = Bulletin of Arctic and Antarctic Research Institute*. 1971; 304:72–84. (In Russ.).
7. Prik Z.M. Climatic zoning. In: Tryoshnikov A.F. et al. (eds.) *Atlas Arktiki = Atlas of Arctic*. Moscow: Glavnoe upravlenie geodezii i kartografii = Main Directorate of Geodesy and Cartography; 1985. P.80 (In Russ.).
8. Przybylak R. *The Climate of the Arctic. Atmospheric and Oceanographic Sciences Library*. Switzerland: Springer International Publishing; 2016. 287 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-21696-6>
9. Mironov E.U. *Ledovye usloviya v Grenlandskom i Barentevom moryah i ih dolgosrochnyy prognoz = Ice conditions in the Greenland and Barents Seas and their long-term forecast*. St. Petersburg: AANII; 2004. 320 p. (In Russ.).
10. Karklin V.O., Yulin A.V., Sharatunova M.V., Mochnova L.P. Climate variability of the Kara sea ice massifs. *Problemy Arktiki i Antarktiki = Arctic and Antarctic Research*. 2017;(4):37–46. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2017-0-4-37-46>
11. Terziev F.S. et al. (eds.). *Gidrometeorologiya i gidrokhimiya morej SSSR. Tom 1. Barentsevo more. Vypusk 1. Gidrometeorologicheskie usloviya. = Hydrology and hydrochemistry of the seas of the USSR. Vol. 1. The Barents Sea. Issue 1. Hydrometeorological conditions*. Leningrad: Hydrometizdat; 1990. 280 p. (In Russ.).
12. Johannessen O., Kuzmina S., Bobylev L., Miles M. Surface air temperature variability and trends in the Arctic: New amplification assessment and regionalization. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*. 2016;68(1):1–12. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v68.28234>
13. Bokuchava D.D., Semenov V.A. Analysis of surface air temperature anomalies in the northern hemisphere in the 20th century using observational and reanalysis data. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya = Fundamental and applied climatology*. 2018;1:28–51. (In Russ.). <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2018-1-28-51>
14. Hanssen-Bauer I., Førland E.J., Hisdal H., Mayer S., Sandø A.B., Sorteberg A. (eds.) *Climate in Svalbard 2100 — a knowledge base for climate adaptation(NCCS report 1/2019)*. Norwegian Centre for Climate Services; 2019. 208 p. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.10183.75687>
15. Przybylak R., Wyszynski P. Air temperature changes in the Arctic in the period 1951–2015 in the light of observational and reanalysis data. *Theoretical and Applied Climatology*. 2020;139:75–94. <https://doi.org/10.1007/s00704-019-02952-3>
16. Isaksen K., Nordli Ø., Ivanov B., Koltzow M.A. Ø., Aaboe S., Gjeltén H.M., Mezghani A., Eastwood S., Førland E., Benestad R.E., Hanssen-Bauer I., Brækkan R., Sviashchennikov P., Demin V., Revina A., Karandasheva T. Exceptional warming over the Barents area. *Scientific Reports*. 2022;12(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-13568-5>

17. Hartmuth K., Papritz L., Boettcher M., Wernli H. Arctic seasonal variability and extremes, and the role of weather systems in a changing climate. *Geophysical Research Letters*. 2023; 50:e2022GL102349. <https://doi.org/10.1029/2022GL102349>
18. Popova V.V. Present-day changes in climate in the north of Eurasia as a manifestation of variation of the large-scale atmospheric circulation. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya = Fundamental and applied climatology*. 2018;1:84–111. (In Russ.). <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2018-1-84-111>
19. Semenov V.A. Structure of surface temperature variability in high latitudes of the Northern Hemisphere. In: Mokhov I.I., Semenov V.A. (eds.). *Klimat Arktiki: process i izmeneniya = Arctic Climate: Processes and Changes*. Moscow: Fizmatkniga; 2022. P.16–29. (In Russ.).
20. Ivanov B., Karandasheva T., Demin V., Revina A., Sviashchennikov P., Isaksen K., Førland E.J., Nordli Ø., Gjelten H.M. Assessment of long-term changes surface air temperature from the High Arctic archipelago Franz Joseph Land from 1929 to the present (2017). *Czech Polar Report*. 2021;11(1):114–133.<https://doi.org/10.5817/CPR2021-1-9>
21. Ivanov B.V., Karandasheva T.K., Demin V.I., Revina A.D. Features of climate change and variability in the Western sector of the Arctic: a case study of the Barents Sea region. *Turbulence, Dynamics of the Atmosphere and Climate: Book of Abstracts of the All-Russian Conference Dedicated to the Memory of A. M. Obukhov*. Moscow: Fizmatkniga; 2022. P. 69. (In Russ.).
22. Karandasheva T.K., Demin V.I., Ivanov B.V., Revina A.D. Air temperature changes in Barentsburg (Svalbard) in XX–XXI centuries. Justification for introducing a new climate standard. *Russian Arctic*. 2021;2(13):26–39. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2658-4255-2021-2-26-39>
23. Gruza G., Rankova E. *Observed and expected climate changes in Russia: air temperature*. Obninsk: FGBU “VNIIGMI-MCD”; 2012. 194 p. (In Russ.).
24. Karandasheva T.K., Ivanov B.V., Demin V.I., Revina A.D., Ilyushchenkova I.A., Antsiferova A.R. Current trends in surface air temperature changes in the Barents and Kara Seas region. *Russian Arctic*. 2024;6(3):55–64. (In Russ.).<https://doi.org/10.24412/2658-4255-2024-3-55-64>
25. Ashik I.M. (ed.) *Seas of the Russian Arctic in modern climatic conditions*. St. Petersburg: AANII; 2021. 360 p. (In Russ.).
26. Karandasheva T.K., Ivanov B.V., Revina A.D., Ilyushchenkova I.A. Ice extent trends in the Barents and Kara Seas during recent climate change. *Russian Arctic*. 2024;6(4):6–18. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2658-4255-2024-4-06-18>


Районирование региона Баренцева и Карского морей по изменениями изменчивости температуры приземного воздуха. Естественные климатические сезоны

Т.К. Карандашева¹, Б.В. Иванов^{1,2}, А.Д. Ревина[✉], И.А.Ильющенко¹

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

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

✉adrevina@aari.ru

 ТКС, 0000-0003-1859-4612; БВИ, 0000-0002-4493-9410; АДР, 0000-0001-8004-7228;
ИАИ, 0009-0006-9643-3063

Расширенный реферат

В связи с наблюдаемым устойчивым потеплением и разработкой перспективных программ развития арктических регионов крайне актуальными и востребованными являются исследования современного климата Арктики. Для периода современной климатической нормы 1991–2020 гг. по данным 31 метеорологической станции (МС), отражающим многообразие климатических условий региона Баренцева и Карского морей, дана количественная оценка изменений и изменчивости приземной температуры воздуха (ПТВ) как одного из главных индикаторов потепления климата. В качестве показателя изменений ПТВ используются ее среднемесячные значения, изменчивости — среднеквадратические отклонения (СКО) среднемесячных значений ПТВ. Годовой ход ПТВ (один максимум и минимум) обусловлен радиационным фактором. Годовой ход СКО (в северной части региона один максимум и минимум, в южной — два максимума и минимума) характеризует особенности циркуляции атмосферы/океана и состояния подстилающей поверхности. Применен новый подход: на плоскости ПТВ-СКО построена 31 замкнутая кривая годового хода ПТВ-СКО-показателей, характеризующая годовые и сезонные циклы термического режима приземной атмосферы. По качественным (форма кривой) и количественным (максимальные/минимальные значения ПТВ и СКО, количество и время наступления их максимумов/минимумов) признакам проведена типизация ПТВ-СКО-кривых и выделено 6 групп. Каждой группе соответствует местоположение определенных МС, таким образом, были установлены границы 6 климатических районов. Для каждого района по объединенным и осредненным данным построена типовая ПТВ-СКО-кривая и даны количественные оценки изменений и изменчивости ПТВ. Для каждого района при сравнительном анализе модуля скорости движения ПТВ-СКО-показателя и значениям ПТВ и СКО установлены временные границы естественных климатических сезонов (ЕКС). Под зимним и летним сезонами мы понимаем промежутки времени, в течение которых значения ПТВ и СКО изменяются относительно медленно и в узких диапазонах, а в переходные сезоны (весна, осень) указанные значения изменяются относительно быстро и в широких диапазонах. «Зима» на большей части исследуемого региона длится 5 месяцев (вторая половина ноября — первая половина апреля), на юге Баренцева моря она начинается позднее, заканчивается раньше и длится 4–4,5 месяца. «Лето» на большей части исследуемого региона длится 3 месяца (вторая половина июня — первая половина сентября), на юге Баренцева моря оно начинается раньше, заканчивается позднее и длится 4 месяца. Продолжительность переходных сезонов («весна»/«осень») во всем исследуемом регионе составляет 2 месяца. Районирование и определение продолжительности ЕКС уточняют общее представление о климате Западного сектора Арктики.

Ключевые слова: Баренцево море, Карское море, изменения и изменчивость температуры воздуха, естественные климатические сезоны, районирование

Для цитирования: Karandasheva T.K., Ivanov B.V., Revina A.D., Ilyushchenkova I.A. Zoning of the Barents and Kara Seas by surface air temperature changes and variability. Natural climatic seasons. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2025;71(4):428–444. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-4-428-444>

Поступила 05.08.2025

После переработки 07.11.2025

Принята 18.11.2025

ГИДРОЛОГИЯ СУШИ И ГИДРОХИМИЯ HYDROLOGY OF LAND AND HYDROCHEMISTRY

Оригинальная статья / Original paper

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-4-445-468>

УДК 551.577.3



Some aspects of the nutrient geochemistry of Novaya Zemlya rocks

Gennadii V. Borisenko¹✉, Elena V. Rakhimova^{2,3}, Ekaterina V. Koltovskaya¹,
Fedor A. Obrezchikov⁴, Alexey Yu. Miroshnikov⁵

¹ P.P. Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

² Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Sergo Ordzhonikidze
Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russia

³ IPNE LLC, Moscow, Russia

⁴ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

⁵ Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry,
Russian Academy of Sciences (IGEM RAS), Moscow, Russia

✉borisenko.gv@ocean.ru

ID GVB, 0000-0001-5446-7608; EVK, 0009-0002-3793-271X; AYM, 0000-0001-5060-2403

Abstract. The primary sources of nutrients in the Arctic are river runoff and remineralization processes. However, the local characteristics of coastal ecosystem functioning are strongly influenced by the supply of nutrients from glacial meltwater, particularly in regions where glacier-fed streams interact with the bedrock. In this study, we tested the hypothesis that rocks which form the bedrock of glacial streams, such as sandstones, siltstones, shales and carbonates, can serve as significant sources of nutrient elements (notably nitrogen and silicon) for coastal ecosystems. Laboratory experiments involving the exposure of representative rock samples to distilled water for up to 30 days demonstrated a measurable increase in nutrient concentrations. The observed leaching rates for nitrate nitrogen and dissolved silicon reached up to 7.9 micromoles per square meter per day and 30.7 micromoles per square meter per day, respectively, in the most reactive samples (these were sandstone from Stepovogo bay and siltstone from Blagopolychia bay). The results indicate that the release of nutrient elements from glacial bedrock, particularly during periods of enhanced meltwater runoff, can contribute significantly to the balance of nutrients and primary productivity of Arctic coastal ecosystems.

Keywords: Novaya Zemlya, Kara Sea, rocks, nutrients, stream runoff

For citation: Borisenko G.V., Rakhimova E.V., Koltovskaya E.V., Obrezchikov F.A., Miroshnikov A.Yu. Some aspects of the nutrient geochemistry of Novaya Zemlya rocks. *Arctic and Antarctic Research*. 2025;71(4):445–468. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-4-445-468>

Received 23.08.2025

Revised 13.10.2025

Accepted 21.10.2025

© Авторы, 2025

© Authors, 2025

Introduction

Novaya Zemlya is an archipelago located in the Russian sector of the Arctic between the Barents Sea and the Kara Sea. Due to the changing climate, significant changes have been taking place in the ecosystem of the Arctic seas in recent years: the area of long-term ice has been significantly reduced [1, 2], the ice age and thickness of the seasonal ice cover have been decreasing [3], and the influence of Atlantic water mass inflows has been increasing [4, 5]. According to [6], the retreat of outlet glaciers to the Novaya Zemlya archipelago has significantly accelerated in the last two decades, with a reduction in glacier area of 1,000 km² since the end of the 20th century, and a reduction in ice volume of 380 km³. Thus, it is evident that Novaya Zemlya serves as an indicator of climate changes in the Arctic. Climate change is leading to a fundamental restructuring of the hydrological and, consequently, biogeochemical conditions of Arctic ecosystems [7–9]. Glaciers play a particularly important role in global biogeochemical processes. As a result of physical and chemical weathering, they release significant amounts of dissolved substances and solid particles into coastal zones [10, 11]. According to existing studies [12–16], glacier retreat increases the concentrations of biogenic compounds, as well as organic matter, in rivers fed by glacial meltwater [17]. Parallel investigations in Tempelfjorden Bay (Svalbard Archipelago) [18] have shown that carbonate rocks composing the shoreline represent a significant source of not only nutrient elements but also heavy metals to the aquatic ecosystem. Research in northern Sweden (Karkevagge area) has demonstrated that metamorphic rocks, particularly crystalline schists, serve as a source of inorganic nitrogen for regional water bodies, including the rivers and lakes of Lapland [12].

During field investigations in the biohydrochemistry laboratory, IORAS, of streams in the bays studied, elevated concentrations of nitrate nitrogen and dissolved silica were detected compared to the average values for the Kara Sea. The mean nitrate concentrations in the streams during each study period significantly exceeded the mean values observed in the surface waters of the Kara Sea (0.5–1 µmol); a similar excess was also recorded for dissolved silica concentrations (the mean value for the Kara Sea is about 8 µmol). The data were previously published in the articles [19–21]. The averaged results for each bay are presented in Table A.1.

There is a lack of data on the lithology of Novaya Zemlya bays in the global scientific literature. The inaccessibility of the archipelago has so far prevented shedding light on the lithological structure, composition, and age of the archipelago's rocks. The absence of lithological data made it impossible to explain the peculiarities of the biogeochemical structure of the archipelago's bays. This became possible within the framework of the comprehensive program "Ecosystems of the Siberian Arctic Seas", which was launched in 2007 under the guidance of Academician M.V. Flint [22, 23].

The aim of this study is to describe the lithological and chemical features of rock samples forming the shores of the Novaya Zemlya Archipelago. Using experimental investigations of field material, we seek to determine the influence of the composition of the bedrock on the qualitative and quantitative characteristics of the fluxes of nutrient elements (nitrate nitrogen, dissolved silica). The patterns observed are used to explain the high concentrations of nutrient elements in Novaya Zemlya streams.

Material and methods

As shown in Figure 1, the study area is located in Novaya Zemlya.

The coastal zone of the Novaya Zemlya Archipelago and the surfaces of small islands represent a terraced plain, bounded by a coastal escarpment. As one moves inland from

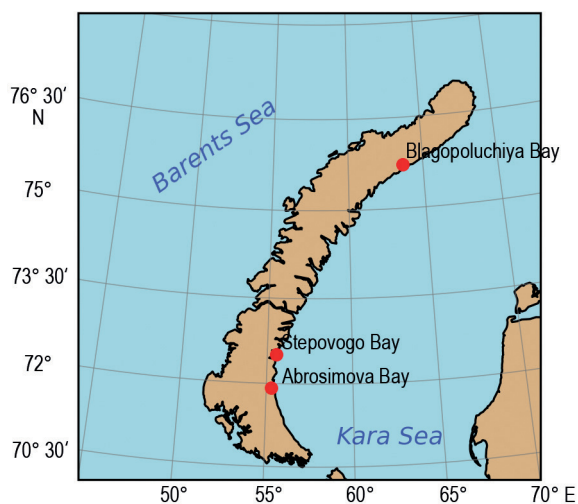


Fig. 1. Location of the study area on Novaya Zemlya Archipelago

Рис. 1. Местоположение района исследования на архипелаге Новая Земля



Fig. 2. A typical landscape on Novaya Zemlya. Photo by Gennady V. Borisenko

Рис. 2. Типичный ландшафт Новой Земли. Фото Г.В. Борисенко

the coast, the coastal plain transforms into a denudation plateau characterized by absolute elevations ranging from 200 to 500 meters above sea level.

The general topography of Novaya Zemlya is defined by the presence of a mountain ridge, which is divided by transverse through valleys into separate tectonic blocks. Most of the elevated relief elements are completely devoid of vegetation and represent a typical Arctic desert. The vegetation of the Arctic tundra is mainly localized in the coastal zone and river valleys [24].

A typical landscape of Novaya Zemlya is shown in Fig. 2. The ground is mostly covered by tundra vegetation—mosses, lichens, with patches of bare rock and gravel. Watercourses are usually fed by melting snow and ice, and their banks are often muddy, lined with stones and sparse vegetation.

In the coastal zone and marine inlets, the surface layer is mainly composed of sandy deposits underlain at a depth of 12–20 meters by clayey rocks. Granulometric analysis shows a predominance of fine and very fine sand fractions.

The primary material for this study consisted of a collection of rock samples obtained during expeditionary work in the water areas of three bays of the Novaya Zemlya Archipelago: Blagopoluchiya, Stepovogo and Abrosimova. The geological material was collected as part of the Kara Sea Expedition led by Academician M.V. Flint, within the research project “Ecosystems of the Russian Arctic” (research ongoing since 2007).

Field investigations were carried out in 2019–2020 during the RV Akademik Mstislav Keldysh expedition through specialized shore landings in the study area. The expedition included single-day routes to glacial formations for the purpose of collecting geological samples at predetermined coordinates.

The research methodology included the preparation of an experimental setup using a rock sample placed in a hermetically sealed vessel with a volume of 3.3 liters, filled with distilled water. During the experiment, the system temperature was kept constant at 4 °C as this temperature is typical of the natural conditions observed in Novaya Zemlya during the summer period. The measurements were performed according to the following scheme: regular monitoring of dissolved silicon and nitrate nitrogen concentrations was carried out at intervals of 3.5–7 days (0.5 weeks). At each sampling point, changes in the volume of the aqueous medium were recorded, and the accuracy of measurements was controlled, including corrections for losses during sampling. The addition of mercury chloride was necessary to preserve the samples and to prevent the influence of microbiological processes on the parameters studied. We are aware that HgCl_2 may also affect certain chemical reactions, for example, by interacting with specific components of the sample. The duration of the experiment was 30 days (5 weeks) from the start of sample exposure to the final measurement. All the procedures were conducted in accordance with standard hydrochemical analysis methods adopted in the laboratory.

The determination of nitrate nitrogen was performed no later than 12 hours after sampling. The colorimetric method for determining the mass concentration of nitrate nitrogen is based on the reduction of nitrates to nitrites in cadmium columns. Analyses were carried out onboard the research vessel laboratory within 12 hours of sample collection. For calibration, standard solutions (SS) with a nitrate ion concentration of 1 mg/cm³ were used. The measurement wavelength was 543 nm.

The determination of dissolved inorganic silicon (silicates) was carried out in accordance with [25]. For calibration, State Standard Samples (GSO 8212-2002) with a silicate ion concentration of 1 g/cm³ were used. The measurement wavelength was 810 nm.

For analysis, an X-ray fluorescence spectrometer PW 2400 (Philips Analytical, 1997) and SuperQ software (PANalytical, 2009) are used, as well as approved methodologies and state standard reference materials. Samples are dried, ground to a powder, pressed into pellets or subjected to induction fusion to obtain glass beads. The pellets/glass samples are analyzed in the spectrometer according to the manufacturer's recommendations and approved methodologies. The mass fractions of elements are determined based on the intensity of radiation. Calibration is performed using state standard reference materials. Data processing is carried out using SuperQ, and the results are expressed as mass percentages of oxides or elements. The value of 9.9 ppm is the detection limit for trace elements. The leading XRF expert is Anton Igorevich Yakushev, a certified expert in XRF and a research fellow at the Laboratory of Mineral Matter Analysis.

The determination of total nitrogen and carbon in the rock samples studied was performed using a modern CHNS-O analyzer ECS 4024, based on the Dumas method. The instrument possesses broad analytical capabilities, allowing the determination of CHNS-O concentrations in the range from 200 ppm to 100 % for sample masses from 10 µg to 100 mg. High measurement accuracy is ensured at less than 0.2 % relative to the certified standard, with an error not exceeding 0.1 % of the certified standard. The TCD detector is characterized by a low detection limit in the range of 1–5 µg. The elemental analysis standard of acetanilide had the following parameters: $\omega(\text{C})$ 71.09 %, $\omega(\text{H})$ 6.71 %, $\omega(\text{O})$ 11.84 %, $\omega(\text{N})$ 10.36 %. The combustion temperature was 960 °C.

The surface area of the rock samples was measured manually using ImageJ software. The measurement procedure involved outlining the sample boundaries on digital images and calculating the enclosed area in square millimeters, following established protocols for image-based morphometric analysis [26].

Results and discussion

The geological structure of the eastern coast of Novaya Zemlya includes rocks ranging from Late Cambrian in the northeast to Early Permian in the central and southern parts. It is characterized by the presence of the following main stratigraphic units [27–30].

In this analysis, four groups of rocks were identified: Carbonate, Sandstone, Shale, and Siltstone. Carbonate rocks are characterized by very high contents of calcium ($\text{CaO} \approx 39$ %) and strontium ($\text{Sr} \approx 693$ ppm), while having low concentrations of silica ($\text{SiO}_2 \approx 25$ %), alumina ($\text{Al}_2\text{O}_3 \approx 0.8$ %), and iron oxide ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \approx 2$ %). Sandstones display moderate levels of silica ($\text{SiO}_2 \approx 30$ %), alumina ($\text{Al}_2\text{O}_3 \approx 3.7$ %), and iron oxide ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \approx 3.4$ %), along with comparatively high barium ($\text{Ba} \approx 118$ ppm) and zinc ($\text{Zn} \approx 112$ ppm). Shales and siltstones are rich in alumina ($\text{Al}_2\text{O}_3 \approx 13$ %), iron oxide ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \approx 6$ %), potassium oxide (K_2O up to 3 %), and silica ($\text{SiO}_2 \approx 67$ –68 %), but contain very little calcium ($\text{CaO} < 0.5$ %) and strontium ($\text{Sr} \approx 60$ –68 ppm). In general, the main distinctions between these groups lie in the proportions of calcium, strontium, and silica, as well as the presence of clay-related components, which are most pronounced in shales and siltstones.

A complete summary of the major and trace element composition of all samples analyzed by X-ray fluorescence analysis (XRF), is provided in Appendix Tables A.2–A.7.

Blagopoluchiya Bay

A diverse assemblage of rocks was identified in Blagopoluchiya Bay. The area is dominated by polymictic (quartz, potassium-sodium feldspar, illite, plagioclase) siltstones and sandstones, which exhibit a variety of grain sizes — from fine- to coarse-grained —

and complex cleavage structures, including intergranular and aggregate types, with features such as slumping folds, wavy and parallel cleavage, and micromullions. Several sandstones and siltstones display significant carbonate content, either within the matrix or as replacement features, and some contain fragments of carbonate rocks and fossil remains. Layers of siliceous-clayey shale are also present, with certain varieties containing ferruginous concretions. Additionally, thin interlayers of clayey siltstone and occurrences of stylolite-like structures were observed. The presence of conformal and clayey cement, as well as evidence of secondary processes such as carbonatization and the filling of cracks with fine-crystalline quartz, further underscore the complex diagenetic history of these sedimentary formations. Overall, the lithology of Blagopoluchiya Bay reflects a dynamic depositional environment with significant mineralogical and textural heterogeneity.

The rock samples were collected from Devonian and Carboniferous deposits. The samples were presumably collected from the boundary and/or deposits of the Rogachevskaya and Milinskaya formations of the Lower Carboniferous C₁rg+ml (C₁t+s) from the limbs of the Ukromnaya Anticline (see Fig. 3).

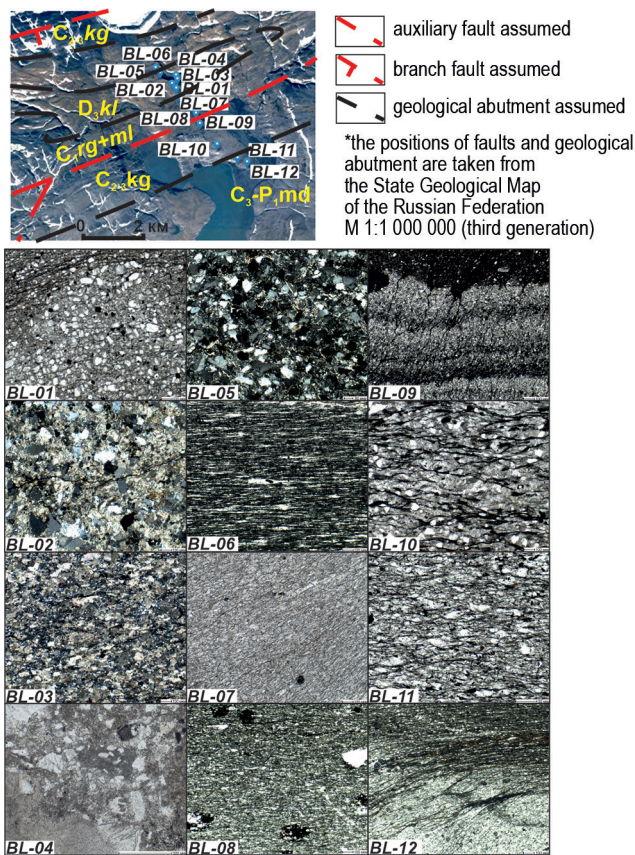


Fig. 3. Sampling locations and structural types of rocks in Blagopoluchiya Bay (see details below in Table 1)

Рис. 3. Места отбора проб и структурные типы пород в заливе Благополучия (подробности см. в таблице 1)

Table 1

Descriptions of rock samples of Novaya Zemlya bays in thin sections

Таблица 1

Описания образцов горных пород исследуемых заливов в тонких шлифах

Sample / Образец	Описание	Description
BL-01	Алевролит полимиктовый глинистый кливажированный (складка оползания, межагрегатный кливаж агрегатного типа грубоволнистый редкий в центральной части, на крыльях проникающий планетарный с наложенным постепенным кливажем плейчатости), николи //	Polymictic clayey cleavage siltstone (slumping fold, interaggregate cleavage of the aggregate type, coarsely wavy, rare in the central part, penetrating planetary on the wings with superimposed gradual cleavage of flatness); nicols //
BL-02	Песчаник полимиктовый тонко-мелкозернистый карбонатизированный со стилолитоподобным редким межзерновым кливажем, с тонкими прослоями алевролитов глинистых, николи х	Polymictic fine to close-grained carbonated sandstone with rare stylolite-like intergranular cleavage, with thin interlayers of clayey siltstone; nicols x
BL-03	Карбонатизированная порода, возможно по глинисто-кремнистому сланцу, николи х; вторая разновидность – глинисто-кремнистый сланец (на рисунке не представлен)	Carbonated rock, possibly after clayey-siliceous shale; nicols x; the second type is clay-siliceous shale (not shown in the figure)
BL-04	Песчаник полимиктовый разнозернистый с обломками карбонатных пород и остатков организмов, николи //	Polymictic inequigranular sandstone with fragments of carbonate rocks and remains of organisms; nicols //
BL-05	Песчаник полимиктовый тонкозернистый алевритовый с конформным и глинистым цементом с трещинами, выполненными мелкокристаллическим кварцем с наложенной карбонатизацией (кливаж межзерновой редкий грубый ветвящийся), николи х	Polymictic fine-grained silty sandstone with conformal cement and clayey cement with cracks filled with fine-crystalline quartz with superimposed carbonatization (intergranular cleavage is sparse, coarse, branching); nicols x
BL-06	Кремнисто-глинистый сланец, николи //	Siliceous-clayey shale; nicols //
BL-07	Карбонатная порода замещения, николи //	Carbonate replacement rock; nicols //
BL-08	Кремнисто-глинистый сланец с ожелезненными конкрециями, николи //	Siliceous-clayey shale with ferruginous concretions; nicols //
BL-09	Алевролит полимиктовый кливажированный (межзерновой кливаж проникающий частый параллельный, микромуллионы), николи //	Polymictic cleavage siltstone (intergranular cleavage is penetrating, frequent, parallel, micromullions); nicols //
BL-10	Песчаник полимиктовый алевритовый кливажированный (межзерновой кливаж грубоволнистый частый извилистый сопряженный), николи //	Polymictic silty cleavage sandstone (intergranular cleavage is coarsely wavy, frequent, sinuous, conjugate); nicols //

End of table 1

Окончание табл. 1

Sample / Образец	Описание	Description
BL-11	Алевролит полимиктовый кливажированный (межзерновой кливаж проникающий волнистый сопряженный), николи //	Polymictic cleavage siltstone (intergranular cleavage penetrating wavy conjugate); nicols //
BL-12	Алевролит полимиктовый кливажированный (межзерновой кливаж проникающий частый параллельный), николи //	Polymictic cleavage siltstone (intergranular cleavage penetrating in frequent parallel); nicols //
3C-01	Песчаник полимиктовый мелко-тонкозернистый с конформным цементом с хлоритом и кальцитом замещения слоеватый, николи //	Polymictic fine- to close-grained sandstone with conformal cement with chlorite and replacement calcite, layered, nicols //
3C-02	Алевролит полимиктовый глинистый с хлоритом и кальцитом замещения кливажированный (межзерновой кливаж агрегатного типа, проникающий, извилистый, резкий), николи //	Polymictic clayey siltstone with chlorite and replacement calcite, cleavage (intergranular cleavage of the aggregate type, penetrating, sinuous, sharp), nicols //
3C-03	Песчаник полимиктовый мелко-тонкозернистый с конформным цементом с хлоритом и кальцитом замещения слоеватый, николи х	Polymictic fine- to close-grained sandstone with conformal cement with chlorite and replacement calcite, layered, nicols x
3A-01	Песчаник полимиктовый средне-мелкозернистый с конформным цементом с хлоритом слоеватый, николи х	Medium-fine-grained polymictic sandstone with conformal cement with chlorite, layered, nicols x
3A-02	Песчаник полимиктовый тонко-мелкозернистый с конформным цементом с хлоритом и кальцитом замещения слоеватый, николи х	Fine-to-close-grained polymictic sandstone with conformal cement with chlorite and replacement calcite, layered, nicols x
3A-03	Песчаник полимиктовый тонко-мелкозернистый с конформным цементом с хлоритом и кальцитом замещения слоеватый, николи х	Fine-to-close-grained polymictic sandstone with conformal cement with conformal cement with chlorite and replacement calcite, layered, nicols x

Stepovogo Bay

The rock samples were collected from the deposits of the middle submember of the Belushskaya Formation, Lower Permian (P₁bl2, P₁u). The samples are represented by sandstones with interlayers of siltstones (see Fig. 4). The sandstones are polymictic (quartz, potassium-sodium feldspar, illite, plagioclase, fragments of effusive rocks and clay shales), fine- to very fine-grained, aleuritic, and clayey, with conformal cement containing chlorite and replacement calcite, and are layered. The siltstones are polymictic, clayey, with chlorite and replacement calcite. All varieties are cleaved to varying degrees. The cleavage is predominantly intergranular and aggregate-type; in siltstones, it is penetrative, sinuous, and sharp (see Fig. 4, sample 3C-02), while in sandstones it is coarsely wavy, frequent, and sinuous. Such deformation textures of elastic rocks develop under low- and medium-temperature conditions (up to 300–350 °C) [31].

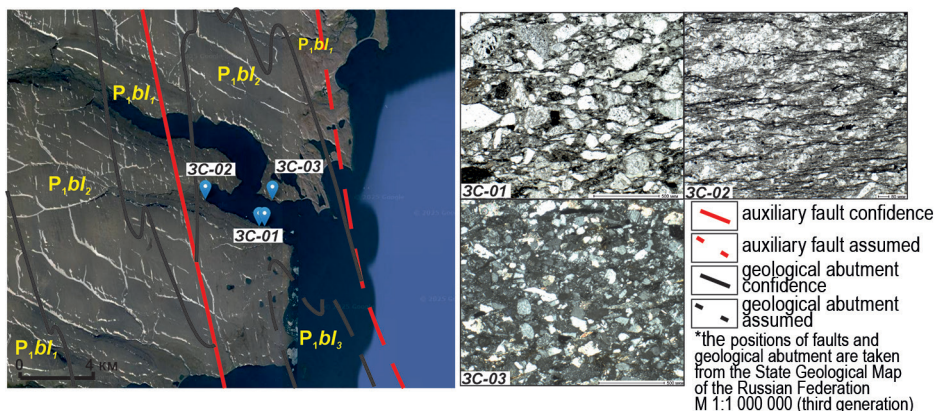


Fig. 4. Sampling location and structural types of rocks in Stepovogo Bay, see details in Table 1

Рис. 4. Место отбора проб и структурные типы пород в бухте Степового, подробности см. в таблице 1

Abrosimova Bay

The rock samples were collected from the deposits of the Belushskaya Formation, Lower Permian (P_{1bl} , P_{1u}), and are represented by sandstones with interlayers of siltstones (see Fig. 5). The sandstones are polymictic (quartz, potassium-sodium feldspar, illite, plagioclase, fragments of effusive rocks and clay shales), ranging from fine- to medium-grained, with conformal cement containing chlorite and replacement calcite, and exhibit bedding. The conformal nature of the boundaries is often traced by fine-grained clayey and carbonaceous material. Overall, these rocks are similar to those of Stepovogo Bay, but differ mainly in grain size.

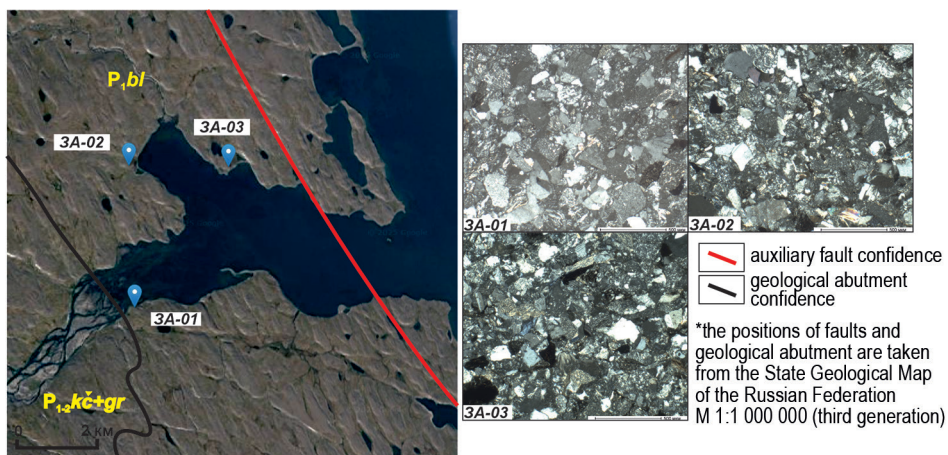


Fig. 5. Sampling location and structural types of rocks in Abrosimova Bay, see details in Table 1

Рис. 5. Место отбора проб и структурные типы пород в бухте Абросимова (подробности см. в таблице 1)

An unsupervised clustering algorithm implemented in Python was used to identify relationships between different rock samples, based on their elemental composition data. Prior to analysis, the data for each sample were normalized using the StandardScaler function. Hierarchical clustering was performed using Ward's method with the Euclidean distance metric, and the results were visualized as dendrograms. This approach made it possible to evaluate the relationships between the samples and to partially confirm the geological boundaries between them, although some uncertainty remains due to the inherent imprecision of these boundaries. In particular, in the dendrogram, sample BL-06 appears as a distinctly separate group alongside the 3A and 3C samples, further supporting the similarity between the 3C and 3A series (see Figs. 6, 7).

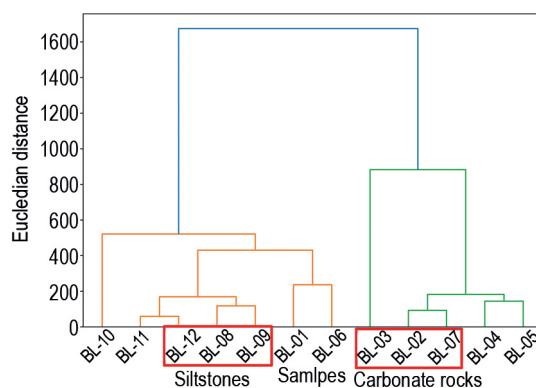


Fig. 6. Dendrogram of samples from Blagopoluchiya Bay; the clustering based on chemical composition corresponds to the age of the samples. Rock types outlined in red indicate those with the highest nutrient element release activity (see below)

Рис. 6. Дендрограмма образцов из залива Благополучия; кластеризация на основе химического состава соответствует возрасту образцов. Породы, выделенные красным цветом, обозначают те, которые обладают наибольшей активностью по высвобождению биогенов (см. ниже)

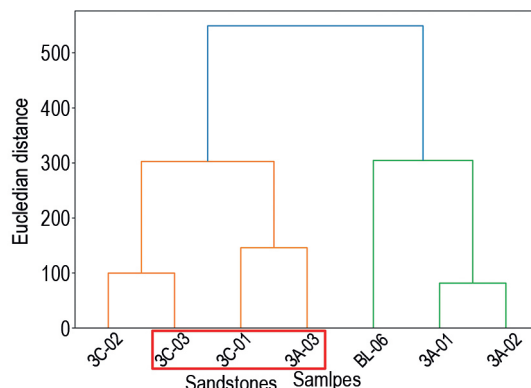


Fig. 7. Dendrogram of samples from Stepovogo Bay and Abrosimova; the clustering based on chemical composition corresponds to the type of the samples. Rock types outlined in red indicate those with the highest nutrient element release activity (see below)

Рис. 7. Дендрограмма образцов из заливов Степового и Абросимова; кластеризация на основе химического состава соответствует типу образцов. Породы, выделенные красным цветом, обозначают те, которые обладают наибольшей активностью по высвобождению биогенов (см. ниже)

Overall, the clustering generally reflects the grouping of the rocks to particular groups (such as sandstones, siltstones, and shales). However, in some cases, this clustering is disrupted, which can be attributed to the fact that rock types are, in general, quite similar in their chemical composition. Additionally, some of the samples are located at the boundaries between different geological ages, which may also contribute to the observed uncertainty in their classification.

C/N Ratio

In this study, the total nitrogen and carbon contents in the rock samples were analyzed (see Fig. 8).

The carbon-to-nitrogen (C/N) ratio is an important indicator in geochemical and ecological studies as it provides insights into the sources and potential reactivity of organic matter within rocks and sediments. In particular, the C/N ratio helps distinguish between organic carbon, which can serve as a nutrient source for microorganisms, and inorganic (carbonate) carbon, which is generally not bio-available. At moderate C/N ratios, where the carbon is not predominantly associated with carbonates, the presence of organic carbon indicates the potential for microbial activity and nutrient cycling within the rock or sediment. Organic carbon, when accessible, supports the growth and metabolism of microbial communities, influencing biogeochemical processes such as mineral weathering, nutrient release, and the overall productivity of the ecosystem. Therefore, analyzing C/N ratios allows the evaluation of the nutrient potential of the rocks and their capacity to support microbial life [32, 33].

Analysis of the content distribution showed that for nitrogen (N) concentrations of 0.02–0.06 %, the carbon content (C) varies from 0 to 2.44 %; for N concentrations of 0.00–0.01 %, the C content is 5.74–12.26 %. Thus, the observed values can be explained

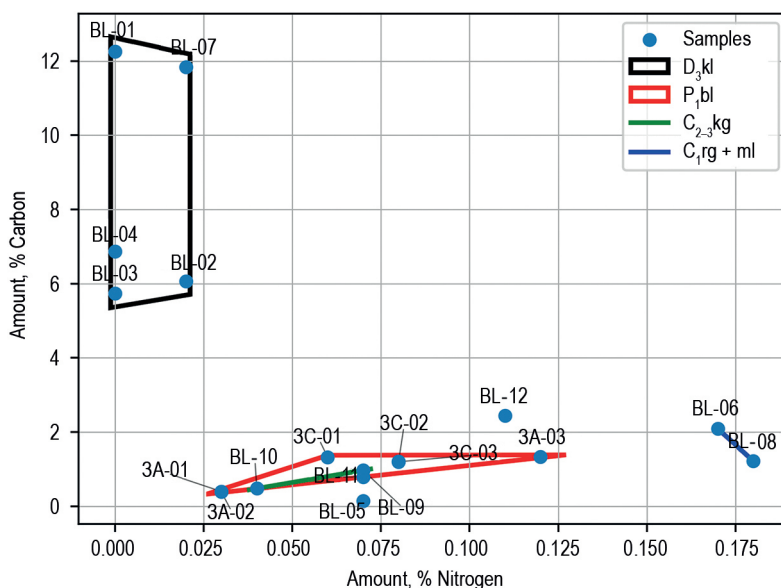


Fig. 8. Scatterplot of nitrogen versus carbon content in the rock samples

Рис. 8. Диаграмма рассеяния содержания азота по отношению к содержанию углерода в образцах пород

by the incorporation of carbon into the crystal lattice of carbonate minerals. In sample BL-01, the CaO content is 0.23 %, while those of Al_2O_3 and SiO_2 are high (10.84 and 71.34 %, respectively); carbon may also be incorporated into the mineral lattice.

Analysis of the nitrogen and carbon content data reveals notable differences among the samples studied. The shale samples BL-12 and BL-09 exhibit relatively elevated nitrogen contents (0.11 % and 0.07 %, respectively) and C/N ratios of 22.93 and 13.47. These values suggest the presence of organic matter that could serve as a nutrient source for microorganisms, as the C/N ratios fall within the range commonly associated with organic carbon of mixed origin [32, 34]. The moderate carbon content in these shales (BL-12: 2.44 % C, BL-09: 0.97 % C) further supports the potential for microbial activity.

In contrast, the carbonate samples BL-07 and BL-03 show a different pattern. BL-03 contains a high amount of carbon (5.74 %) but has undetectable nitrogen, resulting in a C/N ratio of zero. BL-07 also demonstrates high carbon content (11.84%) with extremely low nitrogen (0.02 %), yielding an anomalously high C/N ratio (640.55). These features are typical of carbonate rocks, where carbon is primarily present in inorganic (carbonate) form, which is not available as a nutrient for microorganisms [35]. The lack of nitrogen indicates a scarcity of organic matter in these samples.

The polymictic sandstone samples 3A-01 and 3A-03 display moderate nitrogen values (0.03 % and 0.12 %, respectively) and carbon contents (0.40 % and 1.33 %), with C/N ratios of 12.42 and 11.51. These ratios indicate the presence of organic matter that could potentially be bioavailable, supporting a moderate nutrient status for microbial communities in these rocks.

The plot (Fig. 8) presents the relationship between nitrogen and carbon content (in amount percent) for different rock samples, with the groups highlighted by colored contours. Most of the samples are clustered at low nitrogen concentrations (below 0.1 %) and show a wide range of carbon contents. The group delineated by the black contour (D_3kl) displays high carbon but very low nitrogen content, characteristic of carbonate rocks, which typically contain inorganic carbon and minimal organic nitrogen. In contrast, the red and green contours (P_{1bl} and $C_{2-3}kg$) enclose samples with low to moderate carbon and higher nitrogen values, suggesting a greater presence of organic matter, likely associated with siltstones and sandstones. Notably, samples BL-06 and BL-08 (connected by the blue line, $C_{1rg} + ml$) are distinct, exhibiting the highest nitrogen concentrations among all samples, which may reflect a significant contribution of organic-rich material or unique lithological characteristics. Overall, the plot highlights pronounced differences in carbon and nitrogen content among the lithological groups, corresponding to variations in their potential for nutrient release.

In summary, the shale samples (BL-12 and BL-09) and polymictic sandstones (3A-01, 3A-03) contain organic carbon and nitrogen in proportions favorable for microbial utilization, while the carbonate rocks (BL-07, BL-03) are dominated by inorganic carbon and lack significant nitrogen, making them much less favorable as nutrient sources for microorganisms.

See the results in Table A.8.

Experimental studies of the nutrient signal from rocks

A series of hydrochemical analyzes was conducted as part of the experimental investigation of the nutrient activity of the rocks studied. The experimental procedures are detailed in Materials and methods.

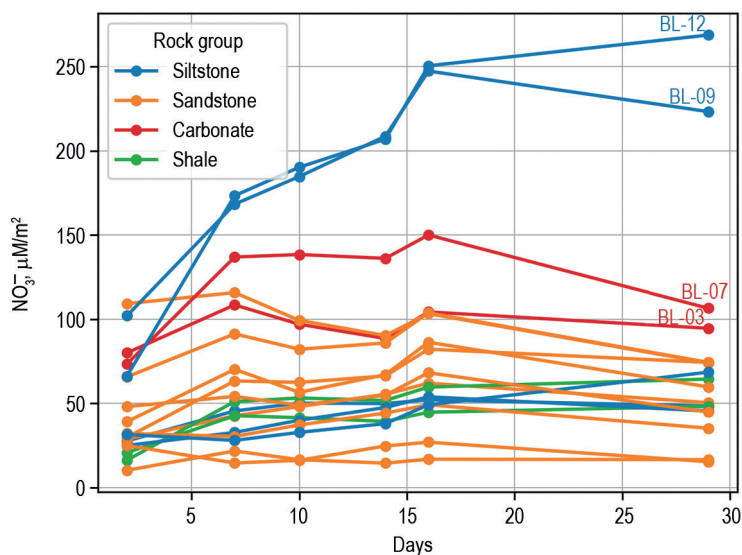


Fig. 9. Dynamics of dissolved nitrate nitrogen concentration in water for samples from the Novaya Zemlya bays: BL — Blagopoluchiya Bay series, 3C — Stepovoy Bay series, 3A — Abrosimova Bay series

Рис. 9. Динамика концентрации растворенного нитратного азота в воде для образцов из бухт Новой Земли: BL — серия залива Благополучия, 3C — серия залива Степового, 3A — серия залива Абросимова

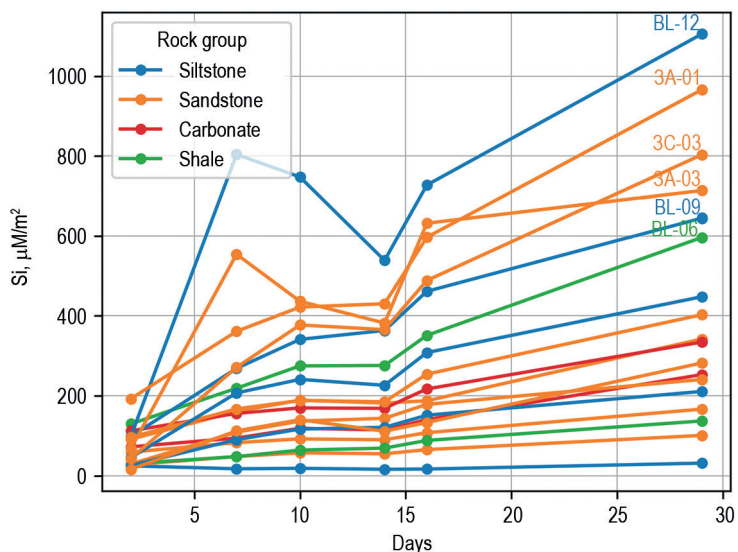


Fig. 10. Dynamics of dissolved silicon concentration in water for samples from the Novaya Zemlya bays: BL — Blagopoluchiya Bay series, 3C — Stepovoy Bay series, 3A — Abrosimova Bay series

Рис. 10. Динамика концентрации растворенного кремния в воде для образцов из заливов Новой Земли: BL — серия залива Благополучия, 3C — серия залива Степового, 3A — серия залива Абросимова

Changes in the concentrations of nutrient elements in water are shown in the following graphs. Since the samples differed in size, the data obtained were normalized to the premeasured area of the samples (see Materials and Methods). The graphs of nitrate nitrogen ($\mu\text{mol m}^{-2}$) and dissolved silicon ($\mu\text{mol m}^{-2}$) are presented in Figs. 9 and 10.

In general, samples in the BL series (Blagopoluchiya Bay) demonstrate higher concentrations and rates compared to the 3C (Stepovogo Bay) series. The 3C group shows a general trend toward low concentrations and slow growth. Notably, the highest nitrate nitrogen activity is observed in siltstone and carbonate rock samples. For dissolved silicon, the highest release rates are also observed in siltstone and siliceous-clayey shale samples.

At the end of the experiment, it was found that samples BL-01, BL-05, and BL-12 were covered with ochreous films of iron(III) oxide, and native mercury was detected in the columns during nitrate analysis. This may be related to the addition of mercury chloride at the beginning of the experiment to reduce microbiological activity. The addition of mercury chloride most likely led to the formation of hydrochloric acid solution and a series of chemical reactions, such as the decomposition of calcite upon the appearance of hydrochloric acid solution during the dissolution of mercury chloride in water; a decrease in pH and the oxidation of Fe^{2+} to Fe^{3+} at an alkaline barrier formed as an alkaline film on the surface of calcite crystals. As a result, samples BL-01, BL-05, and BL-12, which contain ferrous iron, became covered with ochreous films. The reduction of mercury to its native state was promoted by the reduction of organic matter, the content of which is apparently highest in samples BL-06 and BL-08.

Table 2

Mean output rates of nutrient elements from rock samples

Таблица 2

Средние скорости выноса биогенных элементов из образцов горных пород

Sample Name	Group	Mean Rate per Day (Si), $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$	Mean Rate per Day (NO_3^-), $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$	Mean Rate per Day (Si), $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$	Mean Rate per Day (NO_3^-), $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$
3A-03	Sandstone	30.65	4.61	0.86	0.29
3A-01	Sandstone	22.10	1.00	0.62	0.06
BL-09	Siltstone	18.62	7.89	0.52	0.49
BL-12	Siltstone	17.81	11.02	0.50	0.68
3C-03	Sandstone	16.64	0.65	0.47	0.04
BL-06	Shale	11.44	1.27	0.32	0.08
3C-02	Siltstone	9.95	1.20	0.28	0.07
BL-05	Sandstone	8.19	0.00	0.23	0.00
BL-10	Sandstone	7.66	2.91	0.22	0.18
3C-01	Sandstone	7.58	0.34	0.21	0.02
BL-07	Carbonate	5.87	1.94	0.16	0.12
BL-11	Siltstone	5.82	1.40	0.16	0.09
3A-02	Sandstone	3.81	0.74	0.11	0.05
BL-03	Carbonate	2.89	0.08	0.08	0.00
BL-08	Shale	2.89	2.19	0.08	0.14
BL-04	Sandstone	2.65	1.89	0.07	0.12
BL-02	Sandstone	1.58	1.82	0.04	0.11
BL-01	Siltstone	0.00	0.74	0.00	0.05

Table 2 presents the mean production rates of nutrient elements — specifically silicon (Si) and nitrate (NO_3^-) — from various rock samples grouped by lithology (sandstone, shale, carbonate). For each sample, the mean daily Si and NO_3^- release rates are reported in units of micromoles per square meter per day ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$).

The three samples with the highest mean rates of Si output are 3A-03 (Sandstone) with $30.65 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, 3A-01 (Sandstone) with $22.10 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, and BL-09 (Siltstone) with $18.62 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$. For nitrate (NO_3^-), the highest mean output rates were observed in BL-12 (Siltstone) with $11.02 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, BL-09 (Siltstone) with $7.89 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, and 3A-03 (Sandstone) with $4.61 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$. These samples show the highest nitrate release rates among all the rock samples analyzed.

The influence of nitrogen in rocks on local element cycles can be quite significant. It has been established that elevated nitrogen content in aquatic and soil environments is associated with the weathering of primary rocks. According to available data, the average nitrogen content in terrestrial rocks is 1.27 ± 1 mg N per kilogram [36]. The total nitrogen stock in sedimentary rocks is estimated at $7.5\cdot 10^{20}$ grams [37]. During rock weathering, nitrogen is released, increasing its availability to living organisms and affecting biogeochemical cycles.

Nitrogen is generally not measured in rocks due to the widely held assumption that nitrogen concentrations are insignificant and due to the lack of a universally accepted standard method for analyzing the form and concentration of nitrogen in mineral fractions of rocks and soils. As a result, the nitrogen biogeochemical cycle is rarely considered in a geological context. Nitrogen is present in kerogen (a stable organic substance in rocks), ammonium or nitrate salts. Sedimentary rocks, for example, serve as a long-term reservoir for about 20 % of global nitrogen, but their weathering rates and nitrogen content vary by orders of magnitude [38, 39].

Geological nitrogen has been shown to contribute to the saturation of nitrogen in ecosystems (more nitrogen than is required by biota), leading to elevated concentrations of nitrates in surface and groundwater [40, 41]. Geological nitrogen may be a significant source of nitrate for both groundwater and surface water [42, 41, 43]. The main source of nitrogen in silicate rocks is believed to be from sedimentary rocks [44]. Ammonium content in metamorphic micas in France ranges from 120 to 500 mg/kg in muscovite and from 300 to 1500 mg/kg in biotite [45].

A 30-day laboratory experiment showed that the weathering of local rocks in the West Fork of the Gallatin River watershed, Montana, releases significant amounts of nitrate, matching elevated levels of nitrate in area streams. Isotopic analysis suggests that mineral dissolution in rocks and soils is a key natural source of stream nitrogen in this region [46].

In comparison with previous studies, the current results demonstrate comparable values. For example, in the study [19], the flux of nutrient elements was estimated at $0.04\text{--}0.18 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ for nitrate nitrogen and $0.16\text{--}0.24 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ for silicon. None of the Novaya Zemlya rock samples in this study exhibited higher nutrient output rates than those reported for Svalbard rocks, which reached up to $0.64 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ for NO_3^- and approximately $2 \text{ mg m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ for Si.

Rocks 3A-01, 3A-03, BL-09 demonstrate a high level of nutrient element release due to several key features of their composition and structure. Firstly, their polymictic nature means they are composed of a wide variety of minerals and rock fragments, which broadens the spectrum of nutrient elements (such as Ca, Mg, Fe, and others) available for release.

Secondly, the presence of easily soluble cements—specifically chlorite and calcite—facilitates the rapid mobilization of these elements when the rocks undergo weathering or interact with water. Chlorite provides iron and magnesium (and sometimes manganese), while calcite is a source of calcium, all of which are essential nutrients.

In addition, the fine- to medium-grained texture of the sandstones and the fine-grained nature of the siltstone result in a high specific surface area, which accelerates chemical weathering and the release of elements. The layered structure and pronounced cleavage (particularly in the siltstone) enhance the permeability and porosity of these rocks, allowing water to circulate more freely and extract soluble components more efficiently. Features like micromullions further increase the contact surface, promoting even more intensive leaching.

Overall, the combination of diverse mineral composition, easily dissolvable biogenic minerals, high porosity and permeability, and a well-developed surface area explains why these rocks exhibit such high levels of nutrients release.

Sample BL-12 is a polymictic cleaved siltstone, with various stages of micromullion formation along cleavage zones. The polymictic composition includes quartz, feldspars, and micas, which release silicon during weathering. Cleavage and micromullions increase the contact area of rock with water, accelerating leaching. Micromullions form channels for fluid migration, transporting dissolved Si and N. Diagenetic processes, such as secondary cementation by carbonates or silica, contribute to the accumulation of nitrogen-containing compounds, which are released during weathering.

Organic matter present in shales and siltstones releases nitrogen in the form of ammonia or nitrates during decomposition. The high microporosity of clay matrices and cleavage fractures creates reservoirs for the accumulation of elements, which are rapidly released during hydrolysis. The geochemistry of iron, associated with redox conditions, activates nitrification/denitrification processes for nitrogen and the dissolution of silica.

The concentrations of nutrients in watercourses are influenced not only by the underlying bedrock of the catchment, but also by soil characteristics. However, little is known about the soils of Novaya Zemlya along the eastern coast. The soils of Blagopoluchiya Bay exhibit typical features of the High Arctic tundra, such as low fertility, weak profile development, predominance of mineral horizons, and a close relationship with microrelief and moisture conditions [47]. In contrast, the soils of Stepovoy and Abrosimov Bays are richer and contain higher amounts of organic carbon, which may result in higher levels of biological activity. The soils of the southern section are represented by lithosols, while those of the northern section are predominantly petrozems. In the soils of the southern section, the occurrence of rough-humus (AO) horizons is greater than that of gray-humus (AY) and humic-dark humus (AH) horizons [48]. Gray-humus horizons are found in both the northern and southern sections with similar frequency and exhibit a moderately developed, weakly fine-crumb or granular structure due to the high content of organic carbon (Corg: 5–7 %). This, in turn, can promote the mobilization of stored carbon and nitrogen. However, the underlying bedrock plays a major role in the formation of elevated concentrations of nutrients under conditions of poorly developed soil cover, as observed in Blagopoluchiya Bay.

Overall, the results of our study are consistent with the findings of [19]; the leaching rates we obtained are of the same order—on average, 5 micromoles of nitrogen and 10 of dissolved silicon (samples from Blagopoluchiya Bay were used). In [19], rocks from Svalbard were also studied, and their leaching rates were found to be three times higher

than those of the rocks from our study. Some differences may be attributed to the different experimental conditions—in the study 19, the experiments were conducted at a temperature of 20 °C, whereas in our study the temperature was 4 °C.

Conclusion

Climate change in the Arctic is accelerating, leading to increased temperatures, reduction in sea ice extent, and the rapid retreat of glaciers [1, 3, 6]. These processes are expected to result in greater glacial meltwater discharge and, consequently, increased fluxes of dissolved and particulate materials into adjacent marine and freshwater systems [11, 5].

Our study demonstrates that the bedrock of Novaya Zemlya can act as a significant source of nutrients, particularly nitrogen and silicon, which have the potential to alter the hydrochemical profiles of the surrounding water bodies. Experimental results indicate that certain rock types — especially those with polymictic composition and reactive mineral cements — exhibit enhanced release rates of nutrient elements under simulated weathering conditions.

Analysis of the nitrogen and carbon content in the samples studied reveals substantial variability. The highest nitrogen concentrations were observed in siltstone and polymictic sandstone samples (0.03–0.12 % N). These rocks also display moderate C/N ratios (11–13) and carbon contents ranging from 0.40 % to 1.33 %. Such values indicate the presence of bioavailable organic matter, which can serve as a nutrient source for microbial communities and promote biogeochemical cycling.

Sand- and siltstones demonstrate a high level of nutrient element release due to several key features of their composition and structure. Their polymictic nature means they are composed of a diverse assortment of minerals and rock fragments, broadening the spectrum of nutrient elements (such as Ca, Mg, Fe) available for release. Additionally, the presence of easily soluble cements—particularly chlorite and calcite—facilitates the rapid mobilization of these elements during weathering. Chlorite supplies iron and magnesium (and sometimes manganese), while calcite is a source of calcium, all of which are essential for ecosystem productivity.

The results of the experimental leaching tests further support these findings. Among all the samples analyzed, siltstones exhibit the highest mean output rates of nitrates. Specifically, the mean daily release rates for nitrate reach up to 8 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ day}^{-1}$.

It is important to note that the contribution of nutrients from bedrock to the coastal waters of the Arctic remains largely unquantified. However, such nutrient inputs can play a critical role in supporting primary production, particularly during the summer months when surface waters often experience a deficit of essential nutrients. In summary, projected climate-driven increases in glacier melt and runoff, combined with the nutrient-releasing potential of Novaya Zemlya rocks, are likely to significantly impact the biogeochemical characteristics of adjacent aquatic systems in the future.

Competing interests. The authors declare no competing interests.

Funding. This research was funded by the Russian Science Foundation, project No. 24-27-00079 “Influence of glacial runoff on hydrochemical structure and primary productivity of Novaya Zemlya bays”.

Acknowledgments. We thank the crew of the R/V Akademik Mstislav Keldysh for their assistance and hospitality, and the Laboratory of Biohydrochemistry for their support and for providing facilities.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 24-27-00079 «Влияние стока ледников на гидрохимическую структуру и первичную продуктивность заливов Новой Земли».

Благодарности. Авторы выражают благодарность экипажу НИС «Академик Мстислав Келдыш» за помощь и гостеприимство, а также Лаборатории биогидрохимии за поддержку и предоставленные возможности для проведения исследований.

REFERENCES

1. Vihma T. Effects of arctic sea ice decline on weather and climate: A review. *Surveys in Geophysics*. 2014;35:1175–1214. <https://doi.org/10.1007/s10712-014-9284-0>
2. Jenkins M., Dai A. The impact of sea-ice loss on arctic climate feedbacks and their role for arctic amplification. *Geophysical Research Letters*. 2021;48(15):e2021GL094599. <https://doi.org/10.1029/2021GL094599>
3. Bonnett N., Birchall S.J. Vulnerable communities: The need for local-scale climate change adaptation planning. *Climate Action*. 2020;873–882. https://doi.org/10.1007/978-3-319-71063-1_87-1
4. Dalpadado P., Arrigo K.R., Hjøllø S.S., Rey F., Ingvaldsen R.B., Sperfeld E., Van Dijken G.L., Stige L.C., Olsen A., Ottersen G. Productivity in the Barents Sea — response to recent climate variability. *PloS One*. 2014;9(5):e95273. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0095273>
5. Arrigo K.R., Van Dijken G.L. Continued increases in Arctic Ocean primary production. *Progress in Oceanography*. 2015;136:60–70. <https://doi.org/10.1016/j.pocan.2015.05.002>
6. Koryakin V.S. Glaciers of Novaya Zemlya in the 20th century and global warming. *Nature*. 2013;(1):42–48.
7. Franson S.E., Smith J.L., Johnson M. Arctic ecosystem response to climate change: hydrological and biogeochemical perspectives. *Polar Research*. 2015;34:201–214. <https://doi.org/10.3402/polar.v34.20115>
8. Pain A., Martin J., Martin E. Differences in the quantity and quality of organic matter exported from Greenlandic glacial and deglaciated watersheds. *Global Biogeochemical Cycles*. 2020;34:e2020GB006614. <https://doi.org/10.1029/2020GB006614>
9. McGovern S.T., Evans C.D., Dennis P., Walmsley C.A., Turner A., McDonald M.A. Increased inorganic nitrogen leaching from a mountain grassland ecosystem following grazing removal: a hangover of past intensive land-use? *Biogeochemistry*. 2014;119(1):125–138. <https://doi.org/10.1007/s10533-014-9952-7>
10. Nitishinsky M., Anderson L.G., Hölemann J.A. Inorganic carbon and nutrient fluxes on the arctic shelf. *Continental Shelf Research*. 2007;27(10–11):1584–1599. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2007.01.019>
11. Wadham J.L., Hawkings J., Telling J., Chandler D., Alcock J., O'Donnell E., Kaur P., Bagshaw E., Tranter M., Tedstone A., Nienow P. Sources, cycling and export of nitrogen on the Greenland Ice Sheet. *Biogeosciences*. 2016;13(22):6339–6352. <https://doi.org/10.5194/bg-13-6339-2016>
12. Dixon J.C., Campbell S.W., Durham B. Geologic nitrogen and climate change in the geochemical budget of Kärkevagge, Swedish Lapland. *Geomorphology*. 2012;167:70–76. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.03.011>
13. Bhatia M.P., Kujawinski E.B., Das S.B., Breier C.F., Henderson P.B., Charette M.A. Greenland meltwater as a significant and potentially bioavailable source of iron to the ocean. *Nature Geoscience*. 2013;6:274–278. <https://doi.org/10.1038/ngeo1746>
14. Hopwood M.J., Bacon S., Arendt K., Connelly D.P., Statham P.J. Glacial meltwater from Greenland is not likely to be an important source of Fe to the North Atlantic. *Biogeochemistry*. 2015;124(1):1–11.

15. Dixon J.C., Thorn C.E., Darmody R.G., Campbell S.W. Weathering rinds and rock coatings from an Arctic alpine environment, northern Scandinavia. *Geological Society of America Bulletin*. 2002;114(2):226–238. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(2002\)114<0226:WRARCF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(2002)114<0226:WRARCF>2.0.CO;2)
16. Hawkings J., Wadham J., Tranter M., Lawson E., Sole A., Cowton T., Tedstone A., Bartholomew I., Nienow P., Chandler D., Telling J. The effect of warming climate on nutrient and solute export from the Greenland Ice Sheet. *Geochemical Perspectives Letters*. 2015;1(1):94–104. <https://doi.org/10.7185/geochemlet.1510>
17. Musilova M., Tranter M., Bamber J.L., Takeuchi N., Anesio A.M. Microbially driven export of labile organic carbon from the Greenland ice sheet. *Nature Geoscience*. 2017;10:360–365. <https://doi.org/10.1038/ngeo2920>
18. Pogojeva M., Polukhin A., Makkaveev P., Staalstrøm A., Berezina A., Yakushev E. Arctic inshore biogeochemical regime influenced by coastal runoff and glacial melting (case study for the Templefjord, Spitsbergen). *Geosciences*. 2022;12(1):44. <https://doi.org/10.3390/geosciences12010044>
19. Polukhin A., Makkaveev P., Miroshnikov A., Borisenko G., Khlebopashev P. Leaching of inorganic carbon and nutrients from rocks of the Arctic archipelagos (Novaya Zemlya and Svalbard). *Russian Journal of Earth Sciences*. 2021;21(4):2. <https://doi.org/10.2205/2021ES000758>
20. Borisenko G.V. *Hydrochemical features of the watercourses of Novaya Zemlya (Kara coast) and their influence on the hydrochemical regime of the bays of the archipelago. Synopsis of the dissertation for the degree of candidate of geographical sciences*. M.: P.P. Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences; 2024.
21. Makkaveev P.N., Polukhin A.A., Khlebopashev P.V. The surface runoff of nutrients from the coasts of Blagopoluchiya bay of the Novaya Zemlya Archipelago. *Oceanology*. 2013;53(5):539–546. <https://doi.org/10.1134/S000143701305010X>
22. Flint M.V. Cruise 54th of the research vessel Akademik Mstislav Keldysh in the Kara Sea. *Oceanology*. 2010;50(5):637. <https://doi.org/10.1134/S0001437010050012>
23. Flint M.V., Poyarkov S.G. Comprehensive research on the Kara Sea ecosystem (128th cruise of research vessel Professor Shtokman). *Oceanology*. 2015;55(4):657. <https://doi.org/10.1134/S0001437015040074>
24. Bolshiyarov D.Yu. River systems of Novaya Zemlya: features of morphology, regime, and runoff. *Izvestiya of the Russian Geographical Society*. 2006;138(3):11–19.
25. Grasshoff K., Kremling K., Ehrhardt M. *Methods of seawater analysis*. Weinheim: John Wiley & Sons; 2007. 632 p.
26. Mukhanov V.S., Litvinyuk D.A., Sakhon E.G., Bagaev A.V., Veerasingam S., Venkatachalapathy R. A new method for analyzing microplastic particle size distribution in marine environmental samples. *Ecologica Montenegrina*. 2019;23:77–86. <https://doi.org/10.37828/em.2019.23.10>
27. Korago E.A., Kovaleva G.N., Schekoldin R.A., Il'in V.F., Gusev E.A., Krylov A.A., Gorbunov D.A. Geological structure of the Novaya Zemlya archipelago (West Russian Arctic) and peculiarities of the tectonics of the Eurasian Arctic. *Geotectonics*. 2022;56(2):123–156. <https://doi.org/10.1134/S0016852122020030>
28. Petrov O.V., Sobolev N.N., Koren T.N., Vasiliev V.E., Petrov E.O., Larssen G.B., Smelror M. Palaeozoic and early Mesozoic evolution of the East Barents and Kara seas sedimentary basins. *Norwegian Journal of Geology*. 2008;88(4):227–234.
29. Ustritsky V.I., Tugarova M.A. Unique Permian and Triassic section penetrated by the Admiralteyskaya-1 well (Barents Sea). *Oil and Gas Geology. Theory and Practice*. 2013;8(2):1.
30. Matveev V.P., Tarasenko A.B. A retrospective model of sedimentation of black shale and carbonate formations of the Late Devonian–Early Carboniferous on Severny Island, Novaya Zemlya Archipelago. In: Maslov A.V. (ed.) *Sedimentary Complexes of the Urals and Adjacent Arctic and Antarctic Research*. 2025;71(4):445–468

- Regions and their Mineralogy*. Ekaterinburg: Institute of Geology and Geochemistry UB RAS; 2016. P. 169–172.
31. Kirmasov A.B. *Fundamentals of Structural Analysis*. M.: Nauchny Mir; 2011. 368 p.
 32. Meyers P.A. Preservation of elemental and isotopic source identification of sedimentary organic matter. *Chemical geology*. 1994;114(3-4):289–302. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)90059-0](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)90059-0)
 33. Falkowski P.G., Fenchel T., Delong E.F. The microbial engines that drive Earth's biogeochemical cycles. *Science*. 2008;320(5879):1034–1039. <https://doi.org/10.1126/science.1153213>
 34. Schlesinger W.H., Bernhardt E.S. *Biogeochemistry: An analysis of global change*. 3rd edition. San Diego, CA: Academic Press; 2013. 688 p.
 35. Hedges J.I., Stern J.H. Carbon and nitrogen determinations of carbonate-containing solids. *Limnology and Oceanography*. 1986;29(3):657–663. <https://doi.org/10.4319/lo.1984.29.3.0657>
 36. Allègre C., Manhès G., Lewin É. Chemical composition of the earth and the volatility control on planetary genetics. *Earth and Planetary Science Letters*. 2001;185(1–2):49–69. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(00\)00359-9](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(00)00359-9)
 37. Sweeney B.W. Bioenergetic and developmental response of a mayfly to thermal variation 1. *Limnology and Oceanography*. 1978;23(3):461–477. <https://doi.org/10.4319/lo.1978.23.3.0461>
 38. Freeze R.A., Cherry J.A. *Groundwater*. Prentice Hall Inc.: Englewood Cliffs, NJ; 1979. 624 p.
 39. Holloway J.M., Dahlgren R.A. Nitrogen in rock: Occurrences and biogeochemical implications. *Global Biogeochemical Cycles*. 2002;16(4):1118. <https://doi.org/10.1029/2002GB001862>
 40. Dahlgren R.A. Soil acidification and nitrogen saturation from weathering of ammonium-bearing rock. *Nature*. 1994;368(6474):838–841. <https://doi.org/10.1038/368838a0>
 41. Holloway J.M., Dahlgren R.A., Hansen B., Casey W.H. Contribution of bedrock nitrogen to high nitrate concentrations in stream water. *Nature*. 1998;395(6704):785–788. <https://doi.org/10.1038/27360>
 42. Morford J.L., Emerson S., Breckel E.J., Kim S.H. Geochemistry of redox-sensitive trace metals in sediments of the equatorial Pacific Ocean. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2011;75(3):858–875. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2010.11.008>
 43. Deas M., Laird J., Tanaka S., Dahlgren R. A. Geologically-derived nitrogen and phosphorus as a source of riverine nutrients. *Earth Critical Zone*. 2024;1(1):100003. <https://doi.org/10.1016/j.ecz.2024.100003>
 44. Newton R., Bottrell S. Stable isotopes of carbon and sulphur as indicators of environmental change: past and present. *Journal of the Geological Society*. 2007;164(4): 691–708.
 45. Duit W., Jansen J.B.H., van Breemen A., Bos A. Ammonium micas in metamorphic rocks as exemplified by Dome de l'Agout (France). *American Journal of Science*. 1986;286(9):702–732. <https://doi.org/10.2475/ajs.286.9.702>
 46. Wymore A.S., Fazekas H.M., McDowell W.H. Quantifying the frequency of synchronous carbon and nitrogen export to the river network. *Biogeochemistry*. 2012;152(1):1–12. <https://doi.org/10.1007/s10533-020-00741-z>
 47. Nikitin D.A., Lysak L.V., Badmadashiev D.V., Kholod S.S., Mergelov N.S., Dolgikh A.V., Goryachkin S.V. Biological activity of soils in the north of the Novaya Zemlya Archipelago: Effect of the largest glacial sheet in Russia. *Eurasian Soil Science*. 2021;54:1496–1516. <https://doi.org/10.1134/S1064229321130066>
 48. Laverov N.P., Velichkin V.I., Miroshnikov A.Yu., Krupskaya V.V., Asadulin E.E., Semenov I.N., Usacheva A.A., Zakusin S.V., Terskaya E.V. Geochemical structure and radiation status of the coastal landscapes of the Kara Sea bays of Novaya Zemlya. *Doklady Akademii Nauk = Proceedings of the Russian Academy of Sciences*. 2016;467:342–342. <https://doi.org/10.1134/S1028334X16030193>

Некоторые аспекты геохимии питательных элементов пород Новой Земли

Г.В. Борисенко^{1✉}, Е.В. Рахимова^{2,3}, Е.В. Колтовская¹,
Ф.А. Обрезчиков⁴, А.Ю. Мирошников⁵

¹ Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук, Москва, Россия

² ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе», Москва, Россия

³ ООО «ИПНЭ», Москва, Россия

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

⁵ Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук (ИГЕМ РАН), Москва, Россия

✉borisenko.gv@ocean.ru

 ГВБ, 0000-0001-5446-7608; EBK, 0009-0002-3793-271X; АЮМ, 0000-0001-5060-2403

Расширенный реферат

В статье представлены результаты исследования геохимических особенностей горных пород архипелага Новая Земля и их вклада в формирование питательного режима прибрежных арктических экосистем. В условиях ускоренного таяния ледников, вызванного климатическими изменениями, все большее значение приобретает роль талых вод, выщелачивающих биогенные элементы из коренных пород. Авторы проверяют гипотезу о том, что осадочные породы (песчаники, алевролиты, сланцы и карбонаты), формирующие берега ледниковых потоков, могут служить источником азота и кремния для прибрежных вод.

В ходе полевых работ в 2019–2020 гг. в заливах Благополучия, Степового и Абросимова были собраны образцы пород, относящихся к девонским, карбоновым и пермским отложениям. В лабораторных условиях (температура 4 °С, дистиллированная вода, 30 дней) оценивалась скорость вымывания нитратного азота и растворенного кремния. Наибольшие скорости выноса зафиксированы для алевролитов и песчаников: до 7,9 мкмоль·м⁻²·сут⁻¹ по азоту и 30,7 мкмоль·м⁻²·сут⁻¹ по кремнию.

Анализ элементного состава (методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии) и содержания общего азота и углерода (методом Дюма) показал, что наиболее активные в плане высвобождения биогенов породы характеризуются:

- полимиктовым составом (разнообразие минералов — кварц, полевые шпаты, слюды, обломки эффузивов и сланцев);
- наличием легкорастворимых цементирующих минералов (хлорит, кальцит);
- высокой удельной поверхностью и развитой трещиноватостью (кливаж, микромуллионы), способствующей интенсивному выщелачиванию;
- умеренным содержанием органического вещества с C/N-отношением 11–23, указывающим на биодоступность азота.

Установлено, что концентрации нитратов и кремния в ручьях Новой Земли превышают фоновые значения для акватории Карского моря, что подтверждает значимость литогенного источника питательных элементов. В условиях слабо развитого почвенного покрова (особенно в заливе Благополучия) именно коренные породы играют ключевую роль в формировании гидрохимического состава речного стока.

Полученные данные свидетельствуют о том, что в условиях усиления ледникового стока из-за потепления климата вынос биогенов из пород Новой Земли может существенно влиять на первичную продуктивность прибрежных арктических экосистем, особенно в летний период, когда поверхностные воды испытывают дефицит питательных веществ.

Ключевые слова: Новая Земля, Карское море, горные породы, биогенные элементы, сток ручья
Для цитирования: Borisenko G.V., Rakhimova E.V., Koltovskaya E.V., Obrezchikov F.A., Miroshnikov A.Yu. Some aspects of the nutrient geochemistry of Novaya Zemlya rocks. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2025;71(4):445–468. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-4-445-468>

Поступила 23.08.2025 После переработки 13.10.2025 Принята 21.10.2025

Appendix A. Chemical Data Tables

Table A.1

Summary of nitrate (NO₃⁻) and dissolved silicon (Si) concentrations in streams of the Novaya Zemlya bays (all concentrations in μM)

Таблица А.1

Сводные данные по концентрациям нитратов (NO₃⁻) и растворенного кремния (Si) в ручьях заливов Новой Земли (все концентрации приведены в мкМ)

Bay	Year	NO ₃ ⁻ Range, Mean (μM)	Si Range, Mean (μM)	Sampling Date
Blagopoluchia	2007	1.12–8.82, 2.93	28–36, 32.6	13–15.09
	2013	3–4.48, 3.7	6–42, 29	13–16.09
	2014	3–8, 5.25	7–27, 14.4	29–31.08
	2016	0.6–10.8, 6.5	2.9–36.74, 27.5	31.07–02.08
	2017	1–11, 5.46	2–46, 26	25–26.09
	2018	0.14–11.2, 3.27	10–46, 19.3	09–11.09
	2020	2.5–5.19, 3.5	1.6–6.93, 3.1	07–10.09
Abrosimova	2014	1.4–11.4, 6.13	6.76–14.05, 10.8	06.09
	2015	12.7–13.7, 12.5	16–37.8, 24.2	03.10
	2016	5–16, 9.5	12–41, 26.5	15.08
	2019	2.2–8.7, 4.9	16–28, 21.6	24.07
Stepovogo	2013	0–9, 3.4	15–80, 40	19.09
	2014	1.75–38, 6.63	1.75–38, 24	04.09
	2015	2–10, 8.81	6.72–39, 22	02.10
	2019	3–5.4, 4.12	23.4–33.5, 28	26.07

Table A.2

Major oxide composition (%) of rock samples from Blagopoluchiya Bay

Таблица А.2

Содержание основных оксидов (%) в образцах горных пород из залива Благополучия

Sample	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	LOI
BL-01	71.34	0.63	10.84	5.53	0.010	1.67	0.23	2.22	1.44	0.08	1.51	4.36
BL-02	17.54	0.27	3.61	4.47	0.146	4.75	36.60	0.88	0.34	0.11	1.70	29.49
BL-03	48.25	0.06	0.87	3.19	0.076	2.24	23.63	0.09	0.04	0.06	0.39	20.95
BL-04	29.56	0.26	2.28	2.69	0.099	3.54	34.01	0.76	0.12	0.10	0.44	26.05
BL-05	0.27	0.02	0.29	0.24	0.035	0.57	54.48	0.06	0.03	0.04	0.02	43.90
BL-06	74.21	0.77	11.58	2.84	0.014	0.58	0.47	1.86	2.10	0.04	0.18	5.17
BL-07	1.35	0.07	0.72	0.80	0.083	0.33	53.76	0.09	0.05	0.04	0.02	42.65

Окончание таблицы А.2

Sample	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	LOI
BL-08	62.61	0.94	14.19	9.15	0.213	2.48	0.53	1.17	2.57	0.10	0.03	5.79
BL-09	65.01	1.00	16.53	5.14	0.030	2.06	0.17	0.80	4.20	0.07	0.02	4.76
BL-10	72.65	0.61	8.54	6.08	0.112	2.35	3.12	0.68	1.32	0.11	0.04	4.18
BL-11	63.65	1.03	15.36	6.56	0.030	3.30	0.14	0.91	3.55	0.08	0.02	5.15
BL-12	68.06	0.90	13.17	5.54	0.032	3.06	0.24	0.87	2.92	0.12	0.05	4.83

Table A.3

Trace element concentrations (ppm) in rock samples from Blagopoluchiya Bay

Таблица А.3

Концентрации микроэлементов (ppm) в образцах горных пород
из залива Благополучия

Sample	Cr	V	Co	Ni	Cu	Zn	Rb	Sr	Zr	Ba	Cl
BL-01	106	117	21	32	24	34	56	159	205	264	87
BL-02	42	42	9.9	30	9.9	18	17	348	27	61	209
BL-03	12	12	9.9	11	9.9	27	9.9	1054	9.9	24	9.9
BL-04	33	29	9.9	9.9	9.9	19	9.9	466	35	34	119
BL-05	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	25	9.9	349	9.9	27	70
BL-06	164	286	9.9	30	17	19	89	69	181	342	9.9
BL-07	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	21	9.9	332	9.9	19	195
BL-08	148	240	9.9	59	25	61	109	49	195	538	9.9
BL-09	127	263	11	54	15	23	160	34	222	462	43
BL-10	71	119	21	43	16	386	50	43	183	348	9.9
BL-11	115	216	13	56	18	28	146	35	205	593	81
BL-12	119	182	9.9	54	9.9	28	110	43	202	591	56

Table A.4

Major oxide composition (%) of rock samples from Stepovogo Bay

Таблица А.4

Содержание основных оксидов (%) в образцах горных пород из залива Степового

Sample	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	LOI
3C-01	61.06	0.86	14.77	6.97	0.107	4.34	1.64	3.19	1.32	0.191	0.08	5.21
3C-02	59.39	0.90	15.86	7.60	0.090	4.49	0.95	2.81	1.90	0.193	0.19	5.34
3C-03	58.85	1.03	15.95	8.03	0.098	4.90	0.54	2.88	1.96	0.181	0.02	5.27

Table A.5

Trace element concentrations (ppm) in rock samples from Stepovogo Bay

Таблица А.5

Концентрации микроэлементов (ppm) в образцах горных пород из залива Степового

Sample	Cr	V	Ni	Cu	Zn	Rb	Sr	Zr	Ba	Pb	As	Cl
3C-01	301	172	104	58	104	37	165	179	415	18	15	50
3C-02	239	187	108	78	139	53	124	186	702	18	9	54
3C-03	291	198	106	89	120	49	111	195	632	15	4.9	92

Table A.6

Major oxide composition (%) of rock samples from Abrosimova Bay

Таблица А.6

Содержание основных оксидов (%) в образцах горных пород из залива Абросимова

Sample	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	LOI
3A-01	68.73	0.69	12.45	6.11	0.060	3.74	0.57	3.10	0.98	0.157	<0.01	3.23
3A-02	67.33	0.76	12.47	6.44	0.074	3.71	1.17	3.06	0.98	0.174	0.01	3.61
3A-03	58.16	1.02	15.90	9.07	0.121	4.56	0.31	2.44	2.07	0.203	<0.01	5.88

Table A.7

Trace element concentrations (ppm) in rock samples from Abrosimova Bay

Таблица А.7

Концентрации микроэлементов (ppm) в образцах горных пород из залива Абросимова

Sample	Cr	V	Ni	Cu	Zn	Rb	Sr	Zr	Ba	Pb	As	Cl
3A-01	287	154	87	35	85	28	122	148	241	11	4.9	78
3A-02	356	173	91	35	86	30	143	153	270	10	8	65
3A-03	282	209	116	124	148	53	92	201	498	28	4.9	52

Table A.8

Nitrogen and Carbon Content in Samples

Таблица А.8

Содержание азота и углерода в образцах

Sample name	mg N	Amount% N	C/N Ratio	mg C	Amount% C
BL-01	0	0	0.00	5.336	12.26
BL-02	0.006	0.02	400.15	2.515	6.06
BL-03	0	0	0.00	3.004	5.74
BL-04	0	0	0.00	2.843	6.87
BL-05	0.033	0.07	2.16	0.071	0.15
BL-06	0.073	0.17	12.09	0.881	2.09
BL-07	0.008	0.02	640.55	5.391	11.84
BL-08	0.121	0.18	6.66	0.807	1.22
BL-09	0.038	0.07	13.47	0.513	0.97
BL-10	0.021	0.04	10.65	0.220	0.48
BL-11	0.039	0.07	11.93	0.463	0.79
BL-12	0.054	0.11	22.93	1.244	2.44
3C-01	0.032	0.06	23.03	0.726	1.32
3C-02	0.045	0.08	15.61	0.706	1.21
3C-03	0.043	0.08	15.97	0.684	1.20
3A-01	0.016	0.03	12.42	0.194	0.40
3A-02	0.022	0.03	11.97	0.259	0.39
3A-03	0.058	0.12	11.51	0.670	1.33

Оригинальная статья / Original paper

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-4-469-488>

УДК 556



Водный баланс вскрывающихся озер оазиса Холмы Ларсеманн

М.Р. Кузнецова^{1✉}, Г.В. Пряхина², Е.С. Зелепукина³

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

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

³ Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, Россия

✉ mrkuznecova@aari.ru

МРК, 0000-0002-6910-7530; ГВП, 0000-0003-3684-4638; ЕСЗ, 0000-0002-3492-3300

Аннотация. Статья посвящена количественной оценке элементов водного баланса озер антарктических оазисов. Расчеты баланса выполнены для 9 водоемов оазиса Холмы Ларсеманн за декабрь и за январь в сезоны 2019/20 и 2021/22 гг. Выявлены особенности структуры водного баланса для озер. В приходной части баланса сточных и бессточных озер преобладает талый приток, проточных озер — русловой приток. В расходной части баланса большинства озер преобладает русловой отток, для бессточных водоемов — испарение. Сопоставление полученных количественных соотношений элементов водного баланса с классификацией Б.Б. Богословского позволило отнести вскрывающиеся озера антарктических оазисов к испаряюще-приточному и стоково-приточному типам. При этом принадлежность озера к тому или иному типу в течение теплого периода года может изменяться, что обычно приурочено к прорывам. Выявленные особенности могут быть полезны при анализе уровенных наблюдений на озерах антарктических оазисов или выполнении гидрологических расчетов.

Ключевые слова: тип проточности, талый приток, испарение, озера Антарктиды

Для цитирования: Кузнецова М.Р., Пряхина Г.В., Зелепукина Е.С. Водный баланс вскрывающихся озер оазиса Холмы Ларсеманн. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2025;71(4):469–488. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-4-469-488>

Поступила 19.06.2025

После переработки 13.10.2025

Принята 21.10.2025

Water balance of lakes opening up from the ice in the Larsemann Hills

Mariia R. Kuznetsova^{1✉}, Galina V. Pryakhina², Elena S. Zelepukina³

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

² Saint Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

³ Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications, St. Petersburg, Russia

✉ mrkuznecova@aari.ru

MRK, 0000-0002-6910-7530; GVP, 0000-0003-3684-4638; ESZ, 0000-0002-3492-3300

© Авторы, 2025

© Authors, 2025

Abstract. The water balance method has not been widely used in the study of Antarctic oasis lakes, therefore the structure of their water balance is not determined to date. The paper is aimed at the quantitative estimation of water balance elements and identifying the features of the water balance structure for lakes with different types of level regime, using as an example 9 lakes of the Larsemann Hills. The raw data include field work materials of the Russian Antarctic Expedition, meteorological data from the Progress station and satellite images Landsat 8-9. The water balance calculations were carried out for December-January 2019/20 and 2021/22. The study quantitatively confirmed the predominance of meltwater inflow in the feeding of open and closed lakes, while in the incoming balance part of flowage lakes from 40 % to 70 % is occupied by channel inflow. Channel outflow predominates (more than 95 %) in the outcoming balance part of most open and flowage lakes, whereas for closed lakes evaporation from the water surface predominates. It has been established that changes in the water balance structure are caused by those in the flowage types of water bodies, which also lead to a change in the types/subtypes of the water level regime. Based on the identified quantitative relationships of water balance elements, seasonally ice-covered lakes were classified into two categories: evaporating-inflowing and runoff-inflowing lakes (according to the classification by B.B. Bogoslovskiy). The identified features of the water balance structure can be useful for the analysis of observed water level data or for hydrological calculations.

Keywords: flowage type, meltwater inflow, evaporation, Antarctic lakes

For citation: Kuznetsova M.R., Pryakhina G.V., Zelepukina E.S. Water balance of lakes opening up from the ice in the Larsemann Hills. *Arctic and Antarctic Research*. 2025;71(4):469–488. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-4-469-488>

Received 19.06.2025

Revised 13.10.2025

Accepted 21.10.2025

Введение

Метод водного баланса является одним из классических подходов, используемых при изучении гидрологического режима водоемов, однако при изучении озер оазисов Антарктиды этот подход широкого распространения не получил. Сложность его применения в изучении озер антарктического региона во многом обусловлена дефицитом данных фактических измерений/наблюдений, необходимых для расчетов.

В ряде работ в общих чертах (без количественных оценок) обсуждаются связанные с водным балансом аспекты: в монографиях проанализированы условия питания и стока водоемов на примерах озер оазисов Бангера, Ширмахера, Молодежный [1–3], в статье [4] — основные источники поступлений и потерь воды озер оазиса Вестфолль; в работе [5] — связь поступлений/потерь воды с ходом уровня для малых бессточных озер оазиса Бангера; в научно-техническом отчете¹ — для озера Лоу (Холмы Ларсеманн). В литературе наиболее часто встречаются количественные оценки только одного элемента баланса: например, талого притока² [6, 7], руслового оттока [7], сублимации льда [8], испарения с поверхности озер [9]. Более полные водно-балансовые оценки редки: для озера Фигурное (оазис Бангера)³; для озера Унтер-Зее (оазис Унтер-Зее) [10], для озер Рейд, Скандретт, Прогресс, Степед и Лоу (Холмы Ларсеманн) [11, 12], для озера Зуб (оазис Ширмахера) [12, 13]. Детальные водно-балансовые исследования, включающие описание структуры баланса, выполнены только для озер долины Тейлор (Сухие долины Мак-Мердо) [8, 14, 15].

¹ Научно-технический отчет, т. 2: отчет о выполнении научных программ. Антарктика; 2016. 492 с. Госфонд ФГБУ «ААНИИ». Инв. № О-3932.

² Отчет по проекту 2.2.3.2 «Дать оценку строения, режима и эволюции ледников краевой зоны Антарктики и Субантарктики» направления 5 подпрограммы «Изучение и исследование Антарктиды» ФЦП «Мировой океан» Программа: Исследование абляции и жидкого ледникового стока Антарктики (ст. Новолазаревская). 51 РАЭ. Антарктида, Земля Королевы Мод, 2005–2006. 38 с. Госфонд ФГБУ «ААНИИ». Инв. № О-3594.

³ Научно-технический отчет об исследовании бассейна озера Фигурного в оазисе Бангера (Восточная Антарктида) (в 2 частях). Ленинград, 1988. 120 с. Госфонд ФГБУ «ААНИИ». Инв. № О-3032.

Таким образом, немногочисленные водно-балансовые расчеты для озер антарктических оазисов, представленные в литературе, относятся к разным объектам, районам, годам и, как правило, не содержат процентных соотношений элементов баланса (за исключением работы для озер Сухих долин [15]), хотя понимание структуры и ее особенностей полезно при анализе данных наблюдений, разработке гидрологических моделей, оценках водопотребления станциями и др.

Целью настоящей статьи является количественная оценка элементов водного баланса озер антарктических оазисов и выявление особенностей его структуры на примере водоемов оазиса Холмы Ларсеманн.

Материалы и методы

Район работ и объекты исследования.

Оазис Холмы Ларсеманн расположен в Восточной Антарктиде на берегу залива Прюдс моря Содружества. Это свободная от сплошного ледникового покрова холмистая территория (перепады высот до 100–120 м), представленная несколькими полуостровами и группой островов, где расположено порядка 150 водоемов, при-

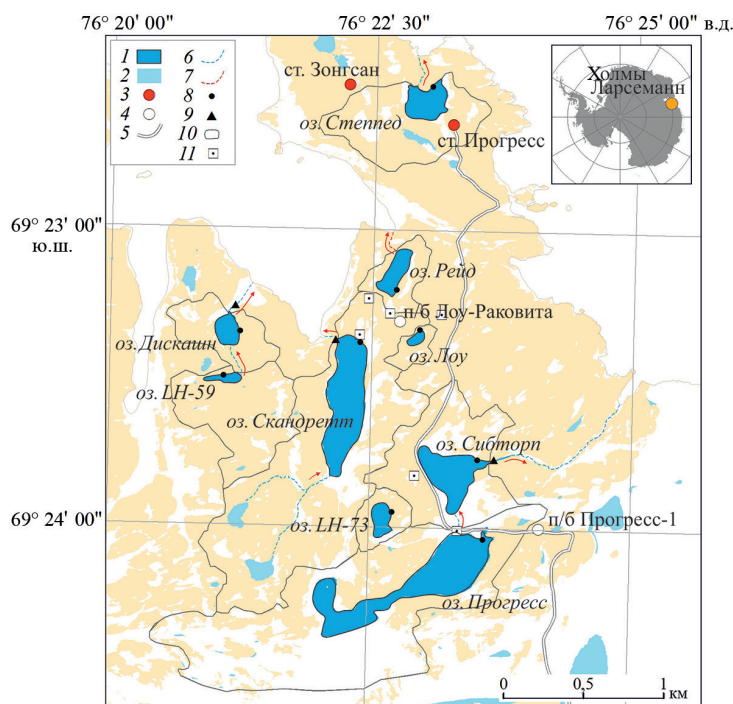


Рис. 1. Район работ.

1 — исследуемые озера; 2 — прочие озера; 3 — станции; 4 — полевые базы; 5 — трассы; 6 — ручьи, вытекающие из озер; 7 — фильтрация из озера Рейд; 8 — водомерные посты; 9 — створы измерения расходов воды; 10 — границы водосборов (по [17]); 11 — точки измерения плотности снега. На врезке — расположение оазиса Холмы Ларсеманн. Красными стрелками показано направление оттока озерных вод

Fig. 1. Study area.
1 — lakes studied; 2 — other lakes; 3 — polar station; 4 — field bases; 5 — roads; 6 — streams flowing from the lakes; 7 — filtration from Reid Lake; 8 — gauge station; 9 — points discharge measurements; 10 — boundaries of catchments (according to [17]); 11 — points of snow density measurements. In the inset — location of the Larsemann Hills. Direction of lake water outflow shown by the red arrows

уроченных к понижениям рельефа; температура воздуха в тёплый период (декабрь–февраль) года составляет до +4 °С, зимой опускается до –18 °С, осадки (среднегодовое значение 250 мм) выпадают преимущественно в твёрдом виде [16, 17].

В качестве объектов исследования были выбраны 9 озёр оазиса Холмы Ларсеманн (рис. 1), расположенных в восточной части п-ова Брокнес. Выбор конкретных водоемов обусловлен наличием необходимых для расчетов данных наблюдений. Эти водоемы различаются по своим морфометрическим характеристикам: наиболее крупные — Прогресс (средняя глубина 8,9 м, максимальная 42,5 м, площадь 203,6 тыс. м² [18]) и Скандретт (средняя глубина 9,4 м, максимальная 17,6 м, площадь 157,9 тыс. м² [19]); остальные озера (согласно публикациям [11, 16, 19] и собственным материалам) имеют средние глубины менее 3 м, максимальные — менее 5–8 м при площадях от 9 тыс. м² до 81 тыс. м². В тёплый период года озера вскрываются полностью или частично, температура воды достигает до +4 и +7–8 °С; вода в озерах пресная, хотя некоторые относятся к солоноватым [11, 16]. В тёплый период года из некоторых озёр формируется отток, могут образовываться каскады (например, озера LH-59 — Дискашн, Прогресс — Сибторп).

Материалы

Основными исходными данными стали материалы сезонных⁴ полевых работ Российской антарктической экспедиции (РАЭ) в оазисе Холмы Ларсеманн в 2019/20 (65-я РАЭ) и 2021/22 гг. (67-я РАЭ). Материалы получены при личном участии М.Р. Кузнецовой. Основной объём гидрологических наблюдений в сезон 2019/20 г. выполнен 05.12.2019 — 05.03.2020, в сезон 2021/22 г. — в период 07.12.2021 — 18.02.2022. Измерения расходов проводились 10.12.2019 — 08.02.2020 и 20.12.2021 — 16.01.2022. В статье использованы данные, относящиеся к декабрю и январю каждого из сезонов (табл. 1).

Таблица 1

Характеристика полевых данных

Table 1

Characteristics of field data

Тип данных	Количество измерений		Способ измерения, приборы
	Сезон 2019/20	Сезон 2021/22	
Уровень воды (см)	324	267	Отсчет по водомерной рейке ГР-104 на водомерных постах свайного типа
Температура воды (°С)	175	147	Измерения у водомерных постов мультимонитором Ultrapen (Myron Compay, США)
Площадь льда (% акватории)	132	93	Визуальные оценки наблюдателем
Расход воды (м ³ /с)	26	6	Промеры глубин — водомерная рейка ГР-104, измерение скоростей течения — поверхностные поплавки, реке — гидрометрическая вертушка ГР-21М; для ручья из оз. LH-59 — объемный способ определения расхода воды

⁴ Экспедиционные работы, которые длятся менее года.

Уровни воды измерялись на водомерных постах свайного типа. Расположение постов указано на рис. 1. Измерение уровня производилось водомерной рейкой ГР-104 посредством установки ее на сваю и снятия по рейке отсчета. Измерения (с точностью 0,5 см) производились 1 раз в сутки с интервалами 1–4 суток; выбранная дискретность измерений во многом связана с логистическими условиями (пересеченная местность, невозможность подъезда транспорта к каждому посту для экономии времени, необходимость выполнения иных работ).

К измерениям уровня были приурочены измерения *температуры воды и наблюдения за площадью льда* на озерах. Измерения температуры выполняли у водомерных постов в приповерхностном слое воды. Использован мультимонитор Ultrapen (Myron Compary, США), точность измерений 0,1 °С.

Площади льда на водоемах оценивали визуально, в процентах от всей площади акватории. Озера хорошо просматриваются с прилегающих холмов, через которые проходит маршрут наблюдателя между постами. Кроме того, последующее сопоставление результатов визуальных наблюдений в сезон 2019/20 г. с площадями, определенными по аэрофотоснимкам, значительных расхождений не выявило.

Расходы воды ручьев определяли по данным гидрометрических работ на водотоках. Промеры глубин производили с помощью водомерной рейки, вброд, предварительно натянув над выбранным для измерений створом размеченный трос; ширина водотоков составляла 0,5–3,0 м. Измерения скоростей течения из-за небольших (до 0,1–0,2 м) глубин производили преимущественно поверхностными поплавками, а на ручьях из озер Сибторп и Скандретт в сезон 2019/20 г. в нескольких случаях — гидрометрической вертушкой ГР-21М (измерения выполнялись на одном горизонте). Измерения расходов сравнительно немногочисленны. Отчасти это связано с тем, что при проведении экспедиционных исследований гидрометрические работы оказались скорее сопутствующим, нежели приоритетным видом работ. В ряде случаев возникали сложности, препятствующие выполнению измерений: так, водоток из озера Прогресс спустя несколько дней после прорыва обмелел до 1–2 см, так что выполнять измерения скорости течения стало невозможным. Водоток из озера Дискашн находился в прорывном канале со снежно-ледовыми стенками высотой 1,5–2 м и грунтовым дном; на безопасно доступном для посещения наблюдателем участке русло водотока меандрировало, уходя под нависающие снежно-ледовые стенки, поэтому выполнять измерения было невозможно. На ручье из озера LH-59, расположенном в завалуненном ущелье, оценить расход получилось объемным способом (по времени наполнения емкости), когда во второй половине января 2020 г. после стаивания снега стало возможным подобраться к пригодному для измерений участку; в сезон 2021/22 г. доступ в ущелье к этому месту был снова прегражден. Выполнить гидрометрические работы на участке оттока из озера Степпед не удалось из-за отсутствия выраженного русла вследствие антропогенного преобразования.

Для определения площадей снежников в сезон 2019/20 г. использовались *аэрофотоснимки*, выполненные с помощью беспилотного летательного аппарата самолетного типа сотрудниками 65-й РАЭ С.Д. Григорьевой и Э.Р. Киньябаевой. Разрешение снимков составляет 5 см/пикс. Даты, к которым были приурочены аэрофотосъемки (15.11.2019, 27–28.12.2020, 6–7.02.2020), были во многом обусловлены погодными условиями (выбраны ясные дни с хорошей видимостью), а также логистическими обстоятельствами. В сезон 2021/22 г. использовались *спутниковые*

снимки Landsat 8-9⁵, скачанные с платформы LandViewer. Были выбраны снимки, наиболее приближенные по датам к первым числам месяцев (01.12.2021, 02.01.2022, 04.02.2022), но при этом не перекрытые облаками, чтобы объекты и их водосборы были однозначно видны.

Измерения плотности снега выполнены в 6 точках, расположенных на водосборах различных озер Рейд, Скандретт, Сибторп, Лоу и Прогресс (см. рис. 1). Координаты определены спутниковым приемоиндикатором GARMIN-64; определение плотности выполнялось послойно, весовым методом [20]; точность взвешивания электронными весами составляла 0,01 г.

Метеорологические данные (количество осадков, парциальное давление водяного пара, скорость ветра, солнечная радиация, средняя суточная температура воздуха, общая и нижняя облачность) были взяты по станции Прогресс; данные были получены в фондах ФГБУ «ААНИИ».

Методы

Расчет баланса проводился по месяцам — за декабрь и за январь. В настоящей статье для вскрывающихся ото льда озер антарктического оазиса использовалось уравнение водного баланса в следующем виде:

$$P_{\text{акв}} + Q_{\text{т}}^{+} + Q_{\text{р}}^{+} - Q_{\text{р}}^{-} - E - Q_{\text{вх}}^{-} \pm n = \frac{\Delta W}{\Delta T}, \quad (1)$$

где $P_{\text{акв}}$ — осадки, выпадающие на акваторию, м³; $Q_{\text{т}}^{+}$ — суммарный приток талых вод (склоновый приток и подповерхностный приток), м³; $Q_{\text{р}}^{+}$ — русловый приток, м³; $Q_{\text{р}}^{-}$ — русловый отток, м³; E — испарение с водной поверхности, м³; $Q_{\text{вх}}^{-}$ — забор воды на водохозяйственные нужды, м³; n — невязка, м³; ΔW — изменения объема озера, м³; ΔT — расчетный период, месяц.

Объем осадков, выпадающих на свободную ото льда акваторию ($P_{\text{акв}}$):

$$P_{\text{акв}} = P \cdot F_{\text{акв}},$$

где P — слой осадков, мм; $F_{\text{акв}}$ — средняя за период площадь озера, свободная ото льда, м². Слой осадков взят по метеостанции Прогресс, свободная ото льда площадь определена по данным полевых наблюдений.

Величина талого притока ($Q_{\text{т}}^{+}$) оценена по формуле:

$$Q_{\text{т}}^{+} = F_{\text{сн}} \cdot h_{\text{в}},$$

где $F_{\text{сн}}$ — площадь снежников, средняя за расчетный период, м²; $h_{\text{в}}$ — слой водоотдачи за расчетный период, мм.

$F_{\text{сн}}$ определена как среднее арифметическое из величин площадей на начало и конец расчетного периода. Площади снежников на начало каждого месяца за сезон 2019/20 г. были определены по аэрофотоснимкам территории, за сезон 2021/22 г. — по спутниковым снимкам: снимки загружали в программу ArcGIS, где было выполнено визуальное дешифрирование, снежники оконтуривались вручную; использованные снимки не были перекрыты облаками, на местности отсутствует растительность, так что граница между светлым снегом и коричневыми скалами определялась однозначно — поэтому дополнительных действий по изменению качества снимков не выполнялось.

⁵ LandViewer. Сервис спутниковых снимков. URL: <https://oes.com/landviewer/> (дата доступа: 15.05.2025). Разрешение снимков: 30 м/пикс.

Слой водоотдачи h_v за расчетный период определен по следующей схеме: рассчитаны суточные слои таяния, затем пересчитаны в слои водоотдачи, затем просуммированы по месяцам.

Определение слоя таяния выполнялось по методу П.П. Кузьмина [21], формула в основе имеет уравнение теплового баланса:

$$h_c = 0,125[(Q' + q)_0 (1 - A)(1 - 0,20 N_0 - 0,47 N_n) - 1440 \varepsilon \sigma (T_n)^4 + 1440(0,62 + 0,05\sqrt{e_2})(1 + 0,12 N_0 + 0,12 N_n)(\varepsilon \sigma (T_a)^4)] + (a_c \gamma u_{10}),$$

где h_c — слой таяния, мм; $(Q' + q)_0$ — суточная сумма суммарной солнечной радиации при безоблачном небе, кал/см²; A — альbedo, доли от единицы; N_0 — общая облачность, доли от единицы; N_n — нижняя облачность, доли от единицы; ε — относительная поглощательная способность длинноволновой радиации деятельным слоем снега; σ — постоянная Стефана–Больцмана, $8,26 \cdot 10^{(-11)}$ кал/(см²·мин·град.); T_n — температура поверхности снега, К; T_a — температура воздуха, К; u_{10} — скорость ветра на высоте 10 м, м/с; e_2 — абсолютная влажность воздуха на высоте 2 м, мбар; a_c — коэффициент, мм/(сут·град·м·с); γ — коэффициент.

Суточная сумма суммарной солнечной радиации, величина общей и нижней облачности, температура воздуха, абсолютная влажность воздуха, скорость ветра взяты по данным метеостанции Прогресс.

Альbedo определено расчетным способом [22]:

$$A = A_0 + K \exp(-fr),$$

где A_0 — наименьшее возможное значение альbedo, доли от единицы; A_{\max} — наибольшее возможное значение альbedo, доли от единицы; f — номер дня с момента последнего снегопада; r — коэффициент рецессии; K — константа.

Наименьшее возможное значение альbedo принято равным для фирна 0,4, для снега 0,5; наибольшее возможное значение альbedo принято равным для фирна 0,5, для снега 0,85 [22]. Коэффициент рецессии $r = 0,04$ при $T_n < 0$ °C, $r = 0,08$ при $T_n > 0$ °C. Величина константы K определена по формуле:

$$K = A_{\max} - A_0.$$

Относительная поглощательная способность ε принята равной 0,96 для альbedo более 0,8 и равной 0,98 для альbedo менее 0,8 [23]. Температура поверхности снега определена по номограмме [21] с использованием значений температуры воздуха и величины облачности.

Коэффициент a_c определяется по формуле:

$$a_c = 0,878 \frac{1 + 0,547 u_{10}}{u_{10}}.$$

Коэффициент γ вычислялся по формуле:

$$\gamma = (t_2 - t_n) + 1,75 (e_2 - e_n),$$

где t_2 — температура воздуха на высоте 2 м, °C; t_n — температура поверхности снега, °C; e_2 — абсолютная влажность воздуха на высоте 2 м, мбар; e_n — максимальная упругость водяного пара у поверхности, мбар.

Температура воздуха и абсолютная влажность воздуха на высоте 2 м взяты по метеостанции Прогресс. Температура испаряющей поверхности соответствует температуре поверхности снега, определенной по номограмме П.П. Кузьмина [21].

Максимальная упругость водяного пара у поверхности рассчитана по формуле Магнуса [24]:

$$e_{\text{н}} = E_0 10^{\left[\frac{a-t}{b+t} \right]}, \quad (2)$$

где E_0 — давление насыщенного пара при $t = 0$ °С, мбар; a , b — коэффициенты давления пара надо льдом; t — температура испаряющей поверхности, °С. При этом $E_0 = 6,107$ мбар; $a = 9,5$; $b = 265,5$. К полученной величине $e_{\text{н}}$ введены поправки Э. Ольдекопа [24].

Слой водоотдачи $h_{\text{в}}$ определен по стандартной методике⁶:

$$h_{\text{в}} = h_{\text{вг}} - h_{\text{в}(g-1)} = [z_g - \gamma_g (1 - z_g)]x - [z_{g-1} - \gamma_{g-1} (1 - z_{g-1})]x, \\ h_{\text{в}} = 0 \text{ при } z_g \leq z_0,$$

где $h_{\text{в}}$ — величина водоотдачи за последующие сутки, мм; $h_{\text{в}(g-1)}$ — величина водоотдачи за предыдущие сутки, мм; x — запас воды в снеге на начало снеготаяния, мм; z_g — относительное стаявание снега за последующие сутки, мм; z_{g-1} — относительное стаявание снега за предыдущие сутки, мм; z_0 — относительная убыль снега, мм; γ_g — влагоемкость за последующие сутки; γ_{g-1} — влагоемкость за предыдущие сутки; g — номер суток.

Запас воды в снеге x на начало снеготаяния принят равным суммарному слою таяния за весь расчетный период. Относительное стаявание снега определялось по формуле:

$$z_g = \frac{\sum_1^g (h_c)}{x},$$

где h_c — суточный слой таяния, мм.

Влагоемкость определена по формуле:

$$\gamma_g = (\gamma_{\text{max}} - 0,06) \exp((-4)z_g) + 0,06,$$

где γ_{max} — максимальная влагоемкость, рассчитываемая следующим образом:

$$\gamma_{\text{max}} = \exp(-4\rho_{\text{сн}}) - 0,04,$$

где $\rho_{\text{сн}}$ — плотность снега на начало снеготаяния, $\text{м}^3/\text{с}$; по данным измерений равна 0,35.

$$z_0 = 0,34 \gamma_{\text{max}} + 0,059$$

Русловой приток ($Q_{\text{р}}^+$) определялся по формуле:

$$Q_{\text{р}}^+ = QT + Q_{\text{пав}}^-,$$

где Q — расход воды ручья, $\text{м}^3/\text{с}$; T — продолжительность расчетного периода, с; $Q_{\text{пав}}^-$ — объем прорывного паводка, м^3 .

Расходы воды известны по данным гидрометрических работ на водотоках. Объем паводка оценивался через изменение уровня воды озера:

$$Q_{\text{па}}^{\text{в-}} = (H_2 - H_1)(F_{\text{акв2}} + F_{\text{акв1}})0,5,$$

где H_1 — уровень воды до прорыва, м; H_2 — уровень воды после прорыва, м; $F_{\text{акв1}}$ — площадь озера до прорыва, м^2 ; $F_{\text{акв2}}$ — площадь озера после прорыва, м^2 .

⁶ Жидиков А. П., Нечаева Н. С. Методические указания по разработке схем краткосрочных прогнозов расходов воды рек и притока воды в водохранилища в период половодья на основе моделей талого стока (на примере бассейна р. Волги) / Под ред. канд. техн. наук В. А. Бельчикова. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 72 с.

Уровни воды озер до и после прорывов известны по данным измерений на водомерных постах. Площади озер при разных уровнях определялись следующим образом: по аэрофотоснимкам сезона 2019/20 г., имеющим высокое разрешение, были определены площади озер при соответствующих 27–28.12.2020 и 6–7.02.2020 уровнях воды (абсолютных высотных отметках водной поверхности), дополнительно использовались литературные материалы о соответствии площадей и отметок водной поверхности озер. По полученным данным (уровень воды — соответствующая ему площадь) путем интерполяции определялись площади при уровнях воды в другие даты и в сезон 2021/22 г.

Русловой отток (Q_p^-) определялся аналогично русловому притоку.

Объем испарения с водной поверхности (E) определен следующим образом:

$$E = 0,001 F_{\text{акв}} h_E,$$

где $F_{\text{акв}}$ — средняя за период площадь озера, свободная ото льда, м²; h_E — слой испарения с воды за расчетный период (1 месяц), мм.

Расчет слоя испарения выполнен по формуле ГГИ⁷:

$$h_E = 0,14(e_0 - e_2)(1 + 0,72u_2),$$

где e_0 — дефицит влажности у поверхности воды, мбар; e_2 — дефицит влажности воздуха, мбар; u_2 — скорость ветра на высоте 2 м, м/с.

Дефицит влажности воздуха у поверхности воды рассчитан по формуле Магнуса (2) при $a = 7,63$; $b = 241,9$, за температуру испаряющей поверхности была принята температура поверхности воды. Для каждого водоема использована средняя за расчетный период измеренная на водомерных постах температура воды.

Дефицит влажности воздуха на высоте 2 м и скорость ветра (также средние за месяц величины) взяты по данным метеостанции Прогресс. Скорость ветра стандартно измеряется на высоте 10 м (u_{10}), поэтому выполнен пересчет на высоту 2 м (u_2) [25]:

$$u_2 = u_{10} \left(\frac{2}{10} \right)^{0,2}.$$

Величина *забора воды на водохозяйственные нужды* ($Q_{\text{вх}}^-$) была оценена со слов сотрудников станции Прогресс: порядка 2,5 м³/сут в рабочие дни и 3,5 м³/сут в выходные.

Подстановка в уравнение (1) рассчитанных величин элементов баланса дает рассчитанную величину изменения объема воды в озере ($\Delta W_{\text{расч}}$):

$$\Delta W_{\text{расч}} = P_{\text{акв}} + Q_{\text{г}}^+ + Q_{\text{п}}^+ - Q_{\text{п}}^- - E - Q_{\text{вх}}^-.$$

Фактическое ($\Delta W_{\text{факт}}$) изменение объема озера за расчетный период определялось через измеренные уровни воды:

$$\Delta W_{\text{факт}} = (H_2 - H_1) \frac{(F_{\text{акв2}} + F_{\text{акв1}})}{2},$$

где H_1 — уровень воды на начало расчетного периода, м; H_2 — уровень воды на конец расчетного периода, м; $F_{\text{акв1}}$ — площадь водоема на начало расчетного периода, м²; $F_{\text{акв2}}$ — площадь водоема на конец расчетного периода, м².

⁷ Указания по расчету испарения с поверхности водоемов. Глав. упр. гидрометеорол. службы при Совете Министров СССР. М-во энергетики и электрификации СССР. М-во мелиорации и водного хоз-ва СССР. Л.: Гидрометеиздат; 1969. 84 с.

Невязка (n , м^3), включающая погрешности рассчитанных и величины неучтенных элементов, характеризует погрешность расчета водного баланса [26]; она представляет собой разницу между расчетным ($\Delta W_{\text{расч}}$) изменением объема воды озера и фактическим ($\Delta W_{\text{факт}}$):

$$n = \Delta W_{\text{факт}} - \Delta W_{\text{расч}}.$$

Для возможности сопоставления величин невязок водного баланса озер, имеющих различные морфометрические характеристики, невязка была переведена из объемов в сантиметры ($d\text{УВ}$ в табл. 2); в качестве порогового значения принята величина $d\text{УВ}$, равная 10 см.

Определение структуры водного баланса выполнялось после количественной оценки величин каждого из элементов. При невозможности оценить по данным измерений величины руслового притока/оттока и фильтрации ($Q_{\text{ф}}$) они оценивались как остаточные элементы баланса. Определение структуры баланса заключалось в определении доли (%) каждого элемента в составе приходной и расходной частей баланса.

Полученные результаты сопоставлялись с опубликованными в литературе результатами водно-балансовых оценок для других озер оазисов, с характером точности озер, а также с классификацией озер Б.Б. Богословского [27] по типам водного баланса.

Результаты и обсуждение

Гидрометеорологические условия и режим озер

По данным метеостанции Прогресс и гидрологических наблюдений за декабрь–январь 2019/20 и 2021/22 гг. средняя суточная температура воздуха варьировала в интервале от -3 до $+4$ °C; средняя величина за расчетные периоды в 2019/20 г. $+0,7$ °C, в 2021/22 г. $+0,1$ °C. Средние суточные скорости ветра в 2019/20 г. изменялись в более широком диапазоне от 1 до 9,2 м/с, в 2021/22 г. — в диапазоне от 0,8 до 18,5 м/с. Количество осадков в летние периоды было невелико: 8,1 мм водного эквивалента (в. э.) в 2019/20 г. и 5 мм в 2021/22 г. Суммы осадков за предшествующий период года (март–ноябрь) составили 159 и 298 мм в. э. соответственно.

Площади снежников на водосборах озер в оба сезона сопоставимы: сумма средних площадей снежников (без учета водосбора озера Прогресс, включающего участок ледника) за декабрь в 2019 г. составила порядка 1056 тыс. м^2 , а в 2021 г. — 1089 тыс. м^2 ; в январе 2020 г. величина составляла 616 тыс. м^2 , а в январе 2022 г. — 642 тыс. м^2 .

В оба сезона озера начинали вскрываться ото льда в начале декабря с формирования закраин вдоль берегов; полностью озера очищались ото льда к началу-середине января. На водоемах, где присутствовали участки многолетнего льда (табл. 2), сокращение площадей льда продолжалось и в феврале. Средние за месяцы величины температуры воды варьируются от $+2$ до $+9$ °C.

Ход уровней воды озер различался, во многом коррелируя с характером точности (см. табл. 2). Для озер Лоу, ЛН-73 и Рейд оба сезона был характерен рост уровня воды в пределах первых 15–20 см; водоемы не имели руслового оттока, для озера Рейд в январе 2020 г. было зафиксировано высачивание воды через грунтовый борт котловины. Уровень воды озер Скандретт и Степпед колебался в пределах первых сантиметров, что обеспечивалось наличием незатрудненного поверхностного оттока. Озера ЛН-59 и Дискашн представляют собой каскад прорывных озер, под-

Таблица 2

Характеристики исследуемых озер

Table 2

Characteristics of the lakes studied

Озеро	Площадь многолетнего льда*, тыс. м ²	Наличие и краткая характеристика руслового притока/оттока	
		2019/20 г.	2021/22 г.
Лоу	0	Нет / Нет	Нет / Нет
Рейд	0	Нет / Да (фильтрация с января 2020 г., в океан)	Нет / Нет
ЛН-73	0	Нет / Нет	Нет / Нет
Сибторп	12,3	Да (из оз. Прогресс с 06.01.2020) / Да (в океан)	Нет / Да (с 13.01.2022, в океан)
Степед	0	Нет / Да (в океан)	Нет / Да (в океан)
ЛН-59	0	Нет /	Нет /
Дискашн	0	Да (с 19.12.2019, в оз. Дискашн) Да (с 19.12.2019, из оз. ЛН-59) / Да (с 19.12.2019, в океан)	Да (с 22.12.2021, в оз. Дискашн) Да (с 22.12.2021, из оз. ЛН-59) / Да (с 26.12.2021, в океан)
Прогресс	71,0	Нет / Да (с 06.01.2019, в оз. Сибторп)	Нет / Нет
Скандретт	55,2	Да / Да (в океан)	Да / Да (в океан)

Примечание. * — по аэрофотоснимкам за 06–07.02.2020.

Note. * — based on aerial photographs taken on 06–07.02.2020.

пруженных естественными плотинами-снежниками; в оба рассматриваемых сезона первым прорывалось озеро ЛН-59, затем — озеро Дискашн; амплитуды падений уровня в результате сброса вод при прорывах достигали от 29 до 86 см. Озеро Прогресс в сезон 2019/20 г. прорвалось (снижение уровня на 39 см), сброшенные воды поступили в расположенное ниже и на тот момент сточное озеро Сибторп, вызвав кратковременный подъем уровня в последнем. В сезон 2021/22 г. озеро Прогресс оставалось бессточным, но был зафиксирован собственный прорыв озера Сибторп (падение уровня на 44 см).

Особенности гидрологического режима озер обуславливают состав элементов баланса. Все рассматриваемые озера вскрываются ото льда, что обеспечивает наличие в балансе испарения с водной поверхности и выпадающих на акваторию осадков. Различный характер проточности определяет некоторые различия в составе элементов баланса: отток является обязательным элементом баланса для сточных или проточных озер, из которых происходит истечение воды, но отсутствует в случае бессточного водоема; русловой приток входит в баланс озер, только если в них поступает приток из других водоемов. Поэтому при анализе результатов было рассмотрено влияние характера проточности на структуру баланса озер (процентные соотношения элементов приходной и расходной частей).

Результаты водно-балансовых расчетов

Всего для 9 озер за два летних периода было получено 36 результатов расчета водного баланса (табл. 3). Примерно половина результатов характеризуется низкими величинами невязки, которые при пересчете в уровни воды составляют менее 10 см. Для озер Лоу, Рейд, ЛН-73 и Сибторп величины невязок в целом невелики, при пере-

Таблица 3
Примеры результатов количественных оценок водного баланса озер оазиса Холмы Ларсеманн за месяцы

Table 3
Examples of the results of quantitative water balance assessments of lakes in the Larsemann Hills oasis by month

Озеро	Летний период	Месяц	$P_{\text{авг}}, \text{ м}^3 \cdot 10^{-3}$	$Q^+, \text{ м}^3 \cdot 10^{-3}$	$Q^+_{\text{рас}}, \text{ м}^3 \cdot 10^{-3}$	$Q^+_{\text{рас}}, \text{ м}^3 \cdot 10^{-3}$	$Q^+_{\text{рас}}, \text{ м}^3 \cdot 10^{-3}$	$Q^+_{\text{рас}}, \text{ м}^3 \cdot 10^{-3}$	$E, \text{ м}^3 \cdot 10^{-3}$	$\Delta W_{\text{рас}}, \text{ м}^3 \cdot 10^{-3}$	$\Delta W_{\text{факт}}, \text{ м}^3 \cdot 10^{-3}$	$n, \text{ м}^3 \cdot 10^{-3}$	$dUB, \text{ см}$	Причина большой ($dUB > 10 \text{ см}$) невязки
Люу	2019/20	ХП	0,01	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,6	0,6	0,0	0	–
		I	0,03	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8	–0,4	0,5	0,8	9	–
		ХП	0,01	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,7	1,2	0,5	6	–
Рейд	2019/20	I	0,01	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8	–0,6	0,0	0,6	6	–
		ХП	0,08	3,2	0,0	0,0	0,0	0,0	1,3	2,0	2,4	0,4	1	–
		I	0,12	2,5	0,0	0,0	0,0	0,0	2,9	–0,3	0,7	1,7	3	–
ЛН–73	2021/22	ХП	0,05	5,8	0,0	0,0	0,0	0,0	1,1	4,7	7,1	2,3	7	–
		I	0,04	1,3	0,0	0,0	0,0	0,0	3,6	–2,3	0,7	3,0	8	–
		ХП	0,01	2,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	2,1	2,8	0,8	3	–
Сибторп	2021/22	I	0,08	2,4	0,0	0,0	0,0	0,0	1,6	0,9	4,6	3,7	12	Занижен талый приток
		ХП	0,02	4,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	4,5	3,3	–1,2	–4	–
		I	0,03	1,9	0,0	0,0	0,0	0,0	1,9	0,0	3,0	3,0	10	–
Степпед	2019/20	ХП	0,12	56,8	0,0	0,0	0,0	0,0	1,6	5,3	4,7	–0,6	–1	–
		I	0,17	74,5	241,2	0,0	0,0	309,3	4,5	2,1	1,3	–0,7	–1	–
		ХП	0,10	36,5	0,0	0,0	0,0	0,0	2,9	33,7	13,1	–20,6	–23	Завышен талый приток
Степпед	2019/20	I	0,07	23,0	0,0	0,0	0,0	59,0	6,5	–42,4	–35,8	6,6	7	–
		ХП	0,11	15,7	0,0	0,1	0,1	0,0	1,4	14,3	2,2	–12,0	–27	Не учтен русловой отток
		I	0,15	12,2	0,0	0,1	0,1	0,0	4,0	8,2	–0,1	–8,3	–19	Не учтен русловой отток
Степпед	2021/22	ХП	0,12	18,0	0,0	0,1	0,1	0,0	3,5	14,6	7,1	–7,5	–17	Не учтен русловой отток
		I	0,04	7,8	0,0	0,1	0,1	0,0	4,5	3,3	0,0	–3,3	–7	–

LN-59	2019/20	XII	0,02	12,3	0,0	0,0	9,9	0,2	2,3	-0,9	-3,1	-33	Занижен русловой отток
	2021/22	I	0,03	12,2	0,0	0,0	11,3	0,7	0,2	-0,1	-0,3	-3	–
		XII	0,02	12,3	0,0	0,0	0,0	0,3	12,0	-1,9	-13,9	-148	Не учтен русловой отток
		I	0,01	5,3	0,0	0,0	0,0	1,1	4,3	-0,1	-4,4	-46	Не учтен русловой отток
Дискаши	2019/20	XII	0,03	10,7	9,9	0,0	18,8	0,4	1,4	0,6	-0,8	-5	–
	2021/22	I	0,08	15,3	11,3	0,0	26,8	1,9	-2,1	0,2	2,3	15	Не учтены русловой приток, русловой отток
		XII	0,03	10,0	0,0	0,0	24,6	0,6	-15,1	1,0	16,1	106	
		I	0,02	5,3	0,0	0,0	24,1	1,6	-20,3	-0,2	20,2	132	
Прогресс	2019/20	XII	0,05	106,4	0,0	0,0	0,0	0,6	105,8	68,4	-37,4	-18	Завышен талый приток
	2021/22	I	0,28	215,4	0,0	0,0	241,2	6,4	-31,9	-54,0	-22,1	-11	Завышен талый приток
		XII	0,04	116,3	0,0	0,0	0,0	0,6	115,7	27,9	-87,8	-43	Завышен талый приток
		I	0,07	90,4	0,0	0,0	0,0	6,3	84,1	58,8	-25,3	-12	Завышен талый приток
Скандретт	2019/20	XII	0,01	54,8	0,0	0,0	53,6	0,2	1,0	4,1	3,1	2	–
	2021/22	I	0,31	73,3	0,0	0,0	157,2	5,4	-89,1	-1,7	87,4	55	Занижен талый приток
		XII	0,04	58,7	0,0	0,0	83,0	0,8	-25,1	4,7	29,8	19	Занижен талый приток
		I	0,04	33,1	0,0	0,0	72,3	3,4	-42,7	-1,6	41,1	26	Занижен талый приток

счете в уровни воды они составляют первые сантиметры. Однако для озера Сибторп в декабре 2021 г. невязка составляет 20,6 тыс. м³ (или 23 см), что может объясняться завышением талого притока. Большие невязки водного баланса озёр Степед, ЛН-59, Дискашн объясняются недоучтенным русловым оттоком/притоком из-за недостатка данных полевых измерений. Как уже было указано выше, на вытекающем из озера Степед ручье гидрометрические работы не проводились, а определения расходов воды на ручьях озёр Дискашн и ЛН-59 были единичными, что дало значительную погрешность при оценке величин руслового стока. При оценке элементов водного баланса озера Прогресс оказалась завышенной величина талого притока: водосборная территория этого озера включает участок ледника (см. рис. 1), в пределах которого граница водосбора сложно определяема. Большие величины невязок водного баланса озера Скандретт с равной вероятностью могут быть вызваны как занижением величины талого притока, так и завышением величины руслового оттока. Отметим, что и в других работах, содержащих примеры расчета водного баланса озёр оазисов [например, 11–13] величины невязок тоже нередко оказывались значительными, в том числе из-за недостатка тех или иных входных данных.

Результаты оценки структуры водного баланса

Полученные для озёр оазиса Холмы Ларсеманн процентные соотношения элементов приходной и элементов расходной частей водного баланса отражают его структуру. Анализ показал, что водоемы с одинаковой структурой водного баланса относятся к одинаковым типам проточности. Результаты расчетов для озёр с одинаковыми типами проточности были осреднены; это позволило выявить структуру водного баланса, характерную для каждого типа проточности (табл. 4).

В структуре баланса *бессточных озёр* более 95 % приходной части составляет талый приток, расходная часть включает только испарение с водной поверхности.

В приходной части баланса *сточных озёр* преобладает талый приток (более 95 %). Соотношение элементов расходной части баланса может различаться: для постоянно сточных озёр с поверхностным оттоком и периодически сточных прорывающихся водоемов преобладает русловый отток (более 95 %); для периодически сточных водоемов, когда отток осуществляется путем фильтрации через грунт, основным элементом (более 80 %) расходной части является испарение.

Приходная часть баланса *проточных озёр* различается в зависимости от характера проточности: для постоянно проточных озёр и для периодически проточных прорывных озёр примерно равные доли составляют талый и русловый приток (40–60 %); для периодически проточных водоемов, через которые проходит прорывной паводок, будет явно преобладать русловый приток (около 75 %), тогда как доля талого притока составляет порядка 25 %. В расходной части баланса проточных озёр во всех случаях преобладает русловый отток (более 95 %).

Наименьшие доли (первые проценты) в структуре водного баланса вскрывающихся ото льда антарктических озёр, независимо от характера проточности, составляют выпадающие на акваторию осадки и вода, изымаемая на нужды станции.

Полученные выводы о структуре водного баланса не противоречат результатам водно-балансовых оценок, полученных другими авторами. Структура баланса озёр Лоу, Скандретт и Степед в 2019/20 и 2021/22 гг. соответствует структуре за январь–февраль 2014 г. [11]: в балансе бессточного озера Лоу в приходной части преобладает талый приток, в расходной — испарение с водной поверхности; в структуре баланса

Таблица 4
Table 4

Структура водного баланса озер различных типов проточности
Water balance structure of lakes with different flowage types

Характер проточности	Тип водного баланса*	Приходная часть, (W ⁺), %					Расходная часть, (W ⁻), %					Примеры озер для различных периодов			
		P _{ав}	Q _г ⁺	Q _{рус} ⁺	Q _ф ⁻	Q _{ак} ⁻	Q _{рус} ⁻	E	2019/20		2021/22		I	XII	I
									XII	Лоу, ЛН-73, Рейд, Прогресс	Лоу, ЛН-73, Рейд, Прогресс, Сибторп	Лоу, ЛН-73, Рейд, Прогресс, Сибторп			
Бессточные	И-П-1 ¹	2,0	98,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100,0		Лоу, ЛН-73			Лоу, ЛН-73, Рейд, Прогресс		Лоу, ЛН-73, Рейд, Прогресс
Сточные, постоянно	С-П-1 ²	0,2	99,8	0,0	0,0	0,0	91,0	9,0		Сибторп	ЛН-59			ЛН-59	
	С-П-2 ³	1,0	99,0	0,0	0,0	1,0	66,0	33,0		Степед	Степед		Степед	Степед	
Сточные, периодически	С-П-1	0,2	99,8	0,0	0,0	0,0	96,0	4,0		ЛН-59	Прогресс		ЛН-59	Сибторп	
	И-П-1	4,0	96,0	0,0	18,0	0,0	0,0	82,0			Рейд				
Проточные, постоянно	С-П-1	0,1	60,4	39,5	0,0	0,0	95,0	5,0		Скандретг	Скандретг, Дискашн		Скандретг	Скандретг, Дискашн	
	С-П-1	0,1	43,4	56,5	0,0	0,0	98,0	2,0		Дискашн			Дискашн		
Проточные, периодически	С-П-1	0,1	23,6	76,3	0,0	0,0	99,0	1,0			Сибторп				

Примечание. * — тип водного баланса по Б.Б. Богословскому [27]; ¹ — И-П-1 испаряюще-приточный 1-го подтипа; ² — С-П-1 стоково-приточный 1-го подтипа; ³ — С-П-2 стоково-приточный 2-го подтипа.
Note. * — type of water balance according to B.B. Bogoslovsky [27]; ¹ — И-П-1 evaporative-supply 1st subtype; ² — С-П-1 1st sub-type flow-out flow-in; ³ — С-П-2 2nd sub-type flow-out.

постоянно проточного озера Скандретт и постоянно сточного Степпед основным положительным элементом баланса является приток талых вод, а отрицательным элементом — русловой отток. Структура водного баланса постоянно проточных водоемов подтверждается на примере озера Зуб (оазис Ширмахера) в январе–феврале 2018 г. [13]. Для постоянно сточного в январе–апреле 1988 г. озера Фигурное (оазис Бангера) структура баланса иная⁸: в расходной части преобладает испарение с водной поверхности вместо руслового оттока, что, на наш взгляд, может быть связано с завышением объемов испарения или снижением руслового оттока в осенний период.

Сопоставление структуры баланса бессточных озёр оазиса Холмы Ларсеманн со структурой баланса бессточных озёр Сухих долин [15] и озера Унтер-Зее [10] выявило отличие как по составу элементов баланса, так и по структуре, вызванное особым ледовым режимом: эти водоемы полностью перекрыты многолетним льдом и не вскрываются даже в теплый период года, поэтому для нескрывающихся озёр основным расходным элементом является сублимация с поверхности озерного льда.

Анализ структуры водного баланса, выявление преобладающих элементов в расходной части (испарения с водной поверхности и руслового оттока) и в приходной части (приток с водосбора и выпадающих на акваторию осадков) позволило определить положение антарктических водоемов в универсальной классификации озёр Б.Б. Богословского [27]: вскрывающиеся ото льда озера относятся к *испаряюще-проточному* и к *стоково-проточному* типам (см. табл. 4). Более детальный анализ процентных соотношений элементов приходной и расходной части водного баланса вскрывающихся ото льда озёр Холмов Ларсеманн показал, что бессточные водоемы относятся к *испаряюще-проточным 1-го подтипа* (приток более 75 %, испарение более 75 %), проточные водоемы — к *стоково-проточным 1-го подтипа* (приток более 75 %, отток более 75 %); большинство рассмотренных сточных озёр относятся к *стоково-проточным 1-го подтипа*, в отдельных случаях — или к *стоково-проточным 2-го подтипа* (приток более 75 %, отток 50–75 %), или к *испаряюще-проточным 1-го подтипа*.

Так как единственным расходным элементом водного баланса озёр, не вскрывающихся ото льда, является сублимация со льда, что не предусмотрено в классификации Б.Б. Богословского, то, возможно, их следовало бы отнести в отдельный тип, например *сублимационный*.

Структура баланса одного и того же озера может значительно отличаться в разные годы, кроме того, может изменяться и внутри одного теплого периода. Так, за рассматриваемые сезоны неизменной оставалась структура баланса лишь 4 из 9 озёр (Лоу, ЛН-73, Степпед, Скандретт). Изменения в структуре баланса озера Рейд в январе 2020 г. были вызваны формированием фильтрационного оттока, что достоверно известно по данным полевых наблюдений.

В остальных случаях причинами были прорывы водоемов (каскады озёр ЛН-59 — Дискашн и Прогресс — Сибторп). Ярким примером является озеро Сибторп (рис. 2). Например, в сезон 2019/20 г. в декабре в приходной части баланса преобладал талый приток, а в январе — русловой приток, в расходной части баланса изменений не происходило (круговые диаграммы на рис. 2а). В декабре 2019 г.

⁸ Научно-технический отчет об исследовании бассейна озера Фигурного в оазисе Бангера (Восточная Антарктида) (в 2-х частях). Ленинград; 1988. 120 с. Госфонд ФГБУ «АНИИ». Инв. № О-3032.

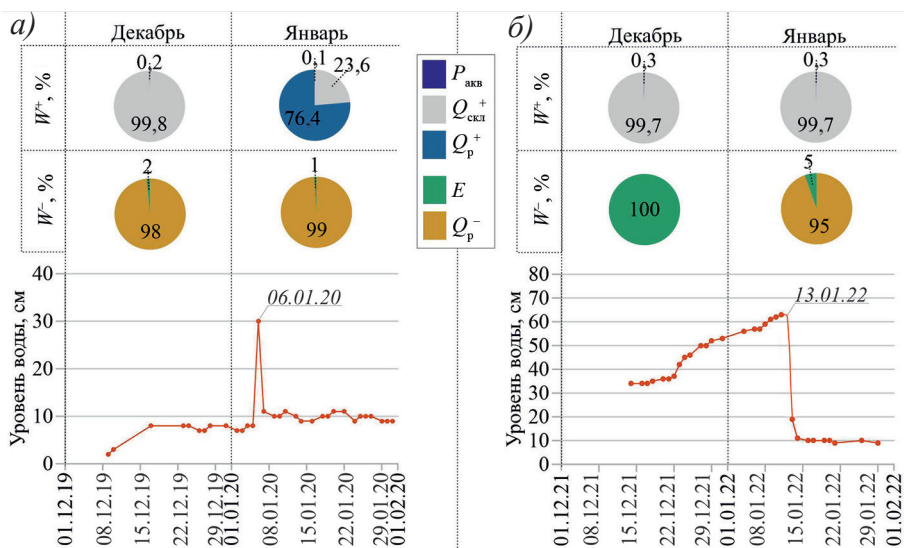


Рис. 2. Структура водного баланса и ход уровня воды озера Сибторп: а — 2019/20 г., б — 2021/22 г.

Круговые диаграммы отображают соотношения элементов приходной (W^+) и расходной (W^-) частей баланса по месяцам

Fig. 2. Water balance structure and water level changes of Lake Sibthorpe: а — 2019/20, б — 2021/22.

The pie charts show the ratio of elements of incoming (W^+) and outgoing (W^-) water balance parts by month

озеро Сибторп было сточным (отток воды не был затруднен), при этом русловой приток из расположенного выше озера Прогресс отсутствовал, т. к. путь перетока был перекрыт снежником. Прорыв озера Прогресс произошел 6.01.2020, при этом сброшенный объем воды поступил в озеро Сибторп, вызвав кратковременный подъем уровня (прохождение прорывного паводка), по сформировавшемуся прорывному каналу постоянно стал поступать русловой приток.

В сезон 2021/22 г. ситуация была иная: в приходной части баланса оба месяца преобладал талый (склоновый) приток, но потери воды в декабре полностью осуществлялись путем испарения с воды, а в январе на 95 % — путем руслового оттока (круговые диаграммы на рис. 2б). Это обусловлено следующим: в декабре озеро было бессточным — отток воды был перекрыт сформировавшейся за зиму плотиной-снежником, приток из озера Прогресс отсутствовал. Собственный прорыв озера произошел лишь 13.01.2022, озеро Сибторп стало сточным, на графике хода уровня прорыв отразился как резкое амплитудное снижение уровня.

Закключение

Выполненные количественные оценки для 9 вскрывающихся озер оазиса Холмы Ларсеманн за декабрь–январь 2019/20 и 2021/22 гг. дополняют немногочисленные сведения о водном балансе озер антарктических оазисов. Невязки балансов озер Лоу, Рейд, ЛН-73 и Сибторп в основном невелики; в остальных случаях отмечался недоучет руслового притока/оттока, вызванный ограниченным объемом данных гидрометрических работ.

Тем не менее полученные данные позволили определить и количественно подтвердить структуру водного баланса, а также показать ее связь с характером проточности. В приходной части баланса бессточных и сточных озёр (более 95 %) преобладает талый (склоновый) приток, тогда как в приходной части баланса проточных водоемов значительную долю занимает также русловой приток (40–75 %). В расходной части баланса большинства сточных и проточных озёр преобладает русловой отток (от 66 до 90 % и более), а единственным элементом расходной части баланса бессточных озёр является испарение с водной поверхности. Сопоставление структуры баланса с классификацией Б.Б. Богословского показало ее применимость для вскрывающихся ото льда антарктических озёр (относятся к испаряюще-приточному и стоково-приточному типам).

Выявленные особенности структуры баланса могут быть полезны при анализе данных уровенных наблюдений или выполнении гидрологических расчетов. Характерной особенностью озёр оазисов является смена принадлежности к тому или иному типу в течение теплого периода года из-за изменений структуры водного баланса, обычно приуроченных к прорывам. Для возможности учета подобных изменений необходимо уменьшать расчетный шаг — вплоть до суточного — ввиду скоротечности прорывов. Водно-балансовые расчеты требуют обширного комплекса полевых данных, поэтому при планировании аналогичных исследований следует обратить внимание на организацию полевых работ, в т. ч. — работ на водотоках, учитывая и природные особенности последних. Иным направлением может стать развитие теоретических (расчетных) методов определения величин элементов баланса.

Конфликт интересов. Конфликт интересов отсутствует.

Финансирование. Полевые работы выполнены за счет средств субсидии на финансовое обеспечение выполнения государственного задания по проведению 65-й и 67-й Российской антарктической экспедиции.

Благодарности. Авторы благодарят Российскую антарктическую экспедицию за возможность участия в полевых работах, а также своих коллег С.Д. Григорьеву и Э.Р. Киньябаеву за помощь в проведении полевых работ.

Вклад авторов. Все авторы участвовали в написании и обсуждении текста статьи; М.Р. Кузнецова также участвовала в сезонных полевых работах 65-й и 67-й РАЭ.

Competing interests. Authors have not conflict of interest.

Funding. The field work was carried out with funding from the subsidy for the financial support of the state assignment to conduct the work on the 65th and 67th Russian Antarctic Expedition.

Acknowledgments. The authors are grateful to the Russian Antarctic expedition for the opportunity to participate in field work, and also to colleagues, particularly to S.D. Grigorieva and E.R. Kiniabaeva, for assistance in the fieldwork.

Authors contribution. All the authors participated in writing and discussing the manuscript, M.R. Kuznetsova also participated in the seasonal fieldwork during the 65th and 67th RAE.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Симонов И.М. *Оазисы Восточной Антарктиды*. Л.: Гидрометеиздат; 1971. 176 с.
2. Короткевич Е.С. *Полярные пустыни*. Л.: Гидрометеиздат; 1972. 420 с.
3. Александров М.В. *Ландшафтная структура и картирование оазисов Земли Эндерби*. Л.: Гидрометеиздат; 1985. 152 с.
4. Gibson J.A.E. The meromictic lakes and stratified marine basins of the Vestfold Hills, East Antarctica. *Antarctic Science*. 1999;11(2):175–192. <https://doi.org/10.1017/S0954102099000243>

5. Клоков В.Д., Веркулич С.Р. Особенности гидрологического режима водоемов оазиса Бангера. *Информационный бюллетень Российской антарктической экспедиции*. 1994;118:60–68.
6. Федорова И.В., Анисимов М.А., Саватюгин Л.М., Азарова Н.С. Изменение гидрографической сети оазиса Ширмахера (Восточная Антарктида) в условиях дегляциации. *Лед и снег*. 2010;111(3):63–69.
Fedorova I.V., Anisimov M.A., Savatyugin L.M., Azarova N.S. Changes in the hydrographic network of the Schirmacher oasis (East Antarctica) under deglaciation. *Led i Sneg = Ice and Snow*. 2010;111(3):63–69. (In Russ.).
7. Шаров А.Н., Толстиков А.В. Экологические проблемы озер Восточной Антарктиды. *Региональная экология*. 2018;53(3):5–14. <https://doi.org/10.30694/1026-5600-2018-3-5-14>
Sharov A.N., Tolstikov A.V. Ecological problems of the lakes of East Antarctica. *Regionalnaya Ecologia*. 2018;53(3):5–14. (In Russ.). <https://doi.org/10.30694/1026-5600-2018-3-5-14>
8. Dugan H.A. *Geophysics, Water Balance, and History of Thick Perennial Ice Covers on Antarctic Lakes*. Chicago: University of Illinois at Chicago; 2014. 109 p.
9. Shevnina E., Vihma T., Potes M., Naakka T. Summertime evaporation over two lakes in the Schirmacher oasis, East Antarctica. *EGUsphere [preprint]*. 2025. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-1964>
10. Faucher B., Lacelle D., Marsh N.B., Jasperse L., Clark I.D., Andersen D.T. Glacial lake outburst floods enhance benthic microbial productivity in perennially ice-covered Lake Untersee (East Antarctica). *Communications Earth & Environment*. 2021;211(2):12. <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00280-x>
11. Shevnina E., Kourzeneva E. Thermal regime and components of water balance of lakes in Antarctica at the Fildes peninsula and the Larsemann Hills. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*. 2017;69(1):1–24. <https://doi.org/10.1080/16000870.2017.1317202>
12. Shevnina E., Kourzeneva E., Nuruzzama M. Water balance and thermal regime of lakes in Antarctic oases. In: Kanao M., Toyokuni G., Yamamoto M. yuki (eds.). *Antarctica a key to global change*. IntechOpen; 2018. Available at: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.75265> (accessed 20.08 2025).
13. Dhote P.R., Thakur P.K., Shevnina E., Kaushik S., Verma A., Ray Y., Aggarwal S.P. Meteorological parameters and water balance components of Priyadarshini Lake at the Schirmacher Oasis, East Antarctica. *Polar Science*. 2021;100763(30):1–10. <https://doi.org/10.1016/j.polar.2021.100763>
14. Matsumoto G.I. Environmental geochemical and biological features of Antarctic oases. *Memoirs of National Institute of Polar Research. Special Issue*. 1998;52:230–250.
15. Cross J.M., Fountain A.G., Hoffman M.J., Obryk M.K. Physical controls on the hydrology of perennially ice-covered lakes, Taylor Valley, Antarctica (1996–2013). *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. 2022;127:1–20. <https://doi.org/10.1029/2022JF006833>
16. Gillieson D., Burgess J., Spate A., Cochrane A. *An atlas of the lakes of the Larsemann Hills, Princess Elizabeth Land, Antarctica. ANARE Research Notes 74*. Antarctic Division, Dept. of the Arts, Sport, the Environment, Tourism and Territories: Kingston, Tasmania; 1990. 173 p.
17. Кузнецова М.Р., Прякина Г.В., Григорьева С.Д., Киньябаева Э.Р. Факторы формирования поверхностного притока к озерам антарктического оазиса Холмы Ларсеманн. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2021;67(3):293–309. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-3-293-309>
Kuznetsova M.R., Priakhina G.V., Grigoreva S.D., Kiniabaeva E.R. Formation factors of surface inflow to antarctic lakes of the Larsemann Hills oasis. *Problemy Arktiki i Antarktiki = Arctic and Antarctic Research*. 2021;67(3):293–309. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-3-293-309>.

18. Grigoreva S.D., Kuznetsova M.R., Kiniabaeva E.R. New data on Progress Lake (Larsemann Hills, East Antarctica): Recently discovered subglacial part of the basin. *Polar Science*. 2023;100925(38):1–8. <https://doi.org/10.1016/j.polar.2023.100925>
19. Пряхина Г.В., Боронина А.С., Попов С.В., Четверова А.А. Гидрологические исследования прорывных озёр антарктических оазисов. *Метеорология и гидрология*. 2020;2:94–102.
Pryakhina G.V., Boronina A.S., Popov S.V., Chetverova A.A. Hydrological studies of lake outbursts in the Antarctic oases. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2020;45(2):118–123.
20. Казаков Н.А., Генсировский Ю.В., Жируев С.П. Литолого-стратиграфические комплексы снежного покрова. *Криосфера Земли*. 2018;22(1):72–93. [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2018-1\(72-93\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2018-1(72-93))
Kazakov N.A., Gensiorovskii Yu.V., Zhiruev S.P. Snow lithostratigraphic complexes. *Kriosfera Zemli = Earth's Cryosphere*. 2018;22(1):72–93. (In Russ.). [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2018-1\(72-93\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2018-1(72-93))
21. Кузьмин П.П. *Процессы стаивания снежного покрова*. Л.: Гидрометеониздат; 1961. 345 с.
22. Rohrer M.B., Braun L.N. Long-term records of snow cover water equivalent in the Swiss Alps. *Nordic Hydrology*. 1994;25:65–78.
23. Красе М.С., Мерзликин В.Г. *Радиационная теплофизика снега и льда*. Л.: Гидрометеониздат; 1990. 264 с.
24. Хромов С. П., Петросянц М. А. *Метеорология и климатология*. М.: Изд-во МГУ; 2006. 582 с.
25. Заварина М.В. *Расчетные скорости ветра на высотах нижнего слоя атмосферы*. Л.: Гидрометеониздат; 1971. 162 с.
26. Георгиевский В.Ю. (ред.) *Водный баланс озера Ханка и его изменения под влиянием природных и антропогенных факторов*. СПб.: Государственный гидрологический институт; 2022. 272 с.
27. Богословский Б.Б. *Озероведение*. М.: Изд-во МГУ; 1960. 332 с.

ГЕОМОРФОЛОГИЯ И ЭВОЛЮЦИОННАЯ ГЕОГРАФИЯ GEOMORPHOLOGY AND EVOLUTIONARY GEOGRAPHY

Оригинальная статья / Original paper

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-4-489-499>

УДК 551.89



О закономерностях изменения глобального уровня моря в позднем четвертичном периоде

А.А. Екайкин^{1,2✉}, Н.Д. Дятлова³

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

² Институт географии РАН, Москва, Россия

³ Высшая школа экономики, Москва, Россия

✉ ekaykin@aari.ru

ААЕ, 0000-0001-9819-2802

Аннотация. Исследование посвящено анализу некоторых закономерностей изменения среднего глобального уровня Мирового океана в позднем четвертичном периоде (последние 800 тыс. лет). В качестве фактического материала были использованы недавно опубликованные наиболее детальные и надежные сводные ряды уровня моря и средней глобальной приземной температуры за интересующий нас интервал времени. В масштабе 100-тысячелетнего цикла между двумя параметрами наблюдается простая линейная зависимость (ниже температура — ниже уровень моря), однако при более детальном рассмотрении выявляются необычные особенности: 1) максимумы и минимумы уровня моря запаздывают относительно максимумов и минимумов температуры на, соответственно, $4,7 \pm 1,1$ и $7,8 \pm 2,1$ тыс. лет; 2) минимальные стояния океана наблюдаются при приблизительно одинаковых аномалиях глобальной температуры ($-4,7 \pm 0,2$ °C относительно доиндустриального уровня), при этом никакой корреляции с самим значением уровня моря не наблюдается. Аналогична и ситуация с максимальными стояниями океана. Согласно нашей гипотезе, кажущееся запаздывание уровня моря объясняется тем фактом, что максимальные (минимальные) уровни океана связаны не с температурой как таковой, а с накопленной суммой положительных (отрицательных) аномалий температуры за предшествующий теплый (холодный) период. Иными словами, ряд уровня моря является функцией интегрально-разностной кривой (ИРК) температуры. Для иллюстрации этой гипотезы мы построили ИРК температуры для интервала 460–360 тыс. л. н., которая удовлетворительно объясняет основные тенденции изменения уровня моря во время морских изотопных стадий 12 и 11.

Ключевые слова: плейстоцен, уровень моря, оледенение, глобальная температура, интегрально-разностные кривые

Для цитирования: Екайкин А.А., Дятлова Н.Д. О закономерностях изменения глобального уровня моря в позднем четвертичном периоде. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2025;71(4):489–499. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-4-489-499>

Поступила 25.08.2025

После переработки 20.11.2025

Принята 24.11.2025

© Авторы, 2025

© Authors, 2025

On the global sea level change during the Late Quaternary

Alexey A. Ekaykin^{1,2✉}, Natalia D. Dyatlova³

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

² Institute of Geography RAS, Moscow, Russia

³ Higher School of Economics, Moscow, Russia

✉ekaykin@aari.ru

 AAE, 0000-0001-9819-2802

Abstract. The study is aimed at identifying the most general patterns of changes in the average global sea level in the Late Quaternary (the last 800 thousand years). The factual material used included recently published most detailed and reliable stacked series of the Global Sea Level (GSL) and Global Mean Surface Temperature (GMST) for the given time interval. On the scale of a 100-ka cycle, a simple linear relationship is observed between the two parameters (lower temperature – lower sea level), but upon closer examination, unusual features are revealed: 1) sea level maxima and minima are delayed relative to temperature maxima and minima by 4.7 ± 1.1 and 7.8 ± 2.1 thousand years, respectively; 2) ocean low stands are observed at approximately the same GMST anomalies (-4.7 ± 0.2 °C relative to the pre-industrial), while there is no correlation with the sea level value itself. The situation with the ocean high stands is similar. According to our hypothesis, the apparent delay in the sea level is explained by the fact that the maximum (minimum) ocean levels are not related to temperature *per se*, but to the accumulated sum of positive (negative) temperature anomalies over the previous warm (cold) period. In other words, the sea level series is a function of the integral-difference curve (IDC) of temperature. To illustrate this hypothesis, we have constructed a temperature IDC for the time interval between 460 and 360 thousand years ago, which satisfactorily explains the main trends in sea level change during marine isotope stages 12 and 11.

Keywords: Pleistocene, sea level, glaciation, global temperature, integral-difference curves

For citation: Ekaykin A.A., Dyatlova N.D. On the global sea level change during the Late Quaternary. *Arctic and Antarctic Research*. 2025;71(4):489–499. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-4-489-499>

Received 25.08.2025

Revised 20.11.2025

Accepted 24.11.2025

Введение

Рост уровня моря является одним из наиболее зримых и очевидных проявлений современных климатических изменений. Между 2006 и 2018 гг. уровень океана рос со скоростью 3,6 мм/год, причем 44 % этой величины обеспечивается таянием ледников и ледниковых щитов, а 56 % — тепловым расширением воды и изменением объема вод суши [1]. В предстоящие десятилетия рост уровня моря будет идти с ускорением, и прогнозы итогового повышения подъема уровня океана к концу XXI в. имеют очень большой разброс — от 28–55 см при низких выбросах парниковых газов (ПГ) до 63–110 см при высоких выбросах [2]. Одной из основных причин этой неопределенности прогнозов является недостаточное понимание будущего поведения Антарктического ледникового щита, который может быть подвержен динамически нестабильным процессам, способным относительно быстро (в пределах первых сотен лет) разрушить значительную часть ледника [1].

В этом контексте внимание исследователей привлекают палеогеографические данные, поскольку известно, что во время некоторых прошлых неоплейстоценовых межледниковий уровень моря был существенно выше, чем в голоцене. В качестве примера можно привести оптимум 5-й морской изотопной стадии (МИС) около 130–125 тыс. л. н. (рис. 1), когда уровень моря поднимался на 6–9 м выше со-

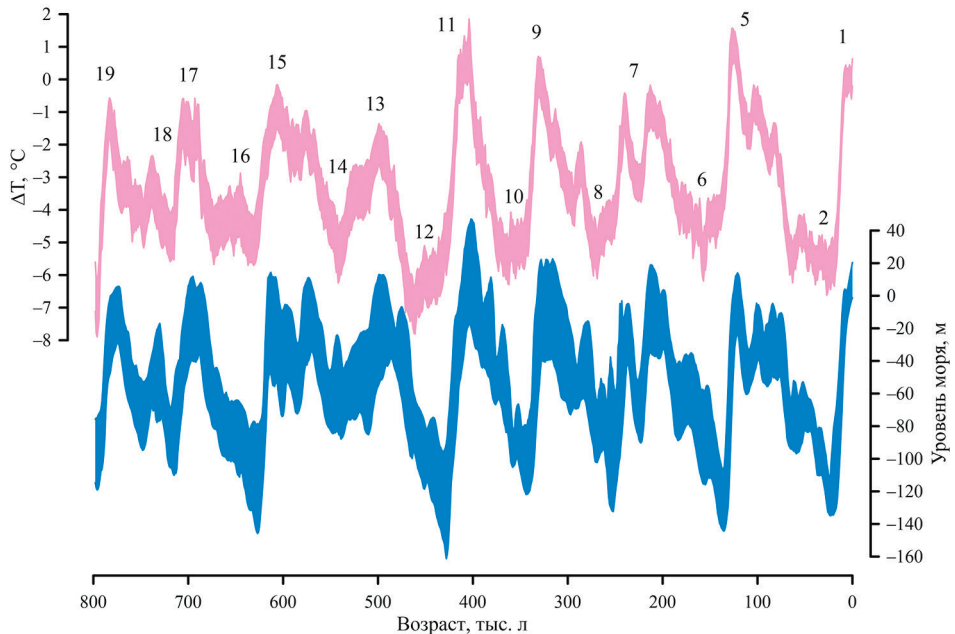


Рис. 1. Ряды уровня моря и средней глобальной приземной температуры воздуха в позднем четвертичном периоде (последние 800 тыс. лет) по данным [9] и [10]. Цифрами обозначены номера морских изотопных стадий, заливкой — пределы погрешности значений (доверительные интервалы). Температура представлена в виде отклонения от среднего значения за 2000 лет, предшествующих началу индустриального периода

Fig. 1. The time-series of the global mean sea level and global mean surface air temperature in the Late Quaternary (the last 800 ka) based on data from [9] and [10]. The numbers denote Marine Isotope Stages, the shading is the error limits (confident intervals). The temperature is presented as a deviation from the average value over the 2,000 years preceding the beginning of the industrial period

временного [3] при том, что средняя глобальная температура воздуха была выше доиндустриальной лишь на $0,7 \pm 0,6$ °C, а уровень CO₂ в атмосфере был на уровне доиндустриальных значений [4].

В данной работе мы используем недавно опубликованные наиболее надежные реконструкции средней глобальной приземной температуры воздуха и среднего уровня океана для позднего четвертичного периода (неоплейстоцен и голоцен, последние 800 тыс. лет) для того, чтобы исследовать основные закономерности изменения уровня Мирового океана в рамках ледниково-межледниковых циклов.

Материалы и методы

Одним из основных источников информации об уровне моря и глобальной температуре являются морские донные осадки. Изотопный состав кислорода ($\delta^{18}\text{O}$) раковин фораминифер в этих осадках зависит от двух параметров — от температуры и изотопного состава морской воды. Первый параметр определяет коэффициент фракционирования при образовании морских карбонатов [5], а второй — объем воды в океане, в свою очередь связанный с объемом континентального льда [6]. Чем больше льда (обедненного тяжелыми изотопами кислорода) — тем больше концентрация кислорода 18 в морской воде. Разделить эти два фактора можно с помощью

дополнительных палеотемпературных индикаторов — например, по соотношению Mg/Ca в раковинах фораминифер в донных осадках [7]. Определение возраста слоев в индивидуальных кернх морских донных осадков выполняется с помощью различных методов, включающих радиоизотопное датирование, использование хроностратиграфических маркеров и т. д. [6]. При построении сводных рядов индивидуальные ряды совмещаются друг с другом с помощью методов графической корреляции [8].

Наиболее надежный и полный сводный ряд уровня моря опубликован в работе [9] и охватывает последние 798 тыс. лет с разрешением 1 тыс. лет. Ряд построен по 7 отдельным временным сериям, выполненным разными методами (по изотопному составу планктонных и бентосных видов фораминифер в морских донных осадках, по другим независимым прокси-данным (морским кораллам), по модели объема континентального льда и др.). Для выделения общего сигнала был использован метод главных компонент, и для построения сводного ряда индивидуальные ряды были приведены к общей хроностратиграфической шкале LR04 [8].

Ряд температуры за тот же период времени опубликован в работе [10], его разрешение также составляет 1 тыс. лет. По данным кернов морских донных осадков реконструируется температура поверхности океана, по которой с помощью моделей общей циркуляции атмосферы рассчитывается средняя глобальная приземная температура воздуха.

Погрешность датировки палеоклиматических рядов по морским донным осадкам довольно велика и достигает 4 тыс. лет [9, 10]. Однако это не оказывает существенного влияния на выводы данной работы, поскольку оба ряда (уровень моря и температура) построены с использованием одной и той же хроностратиграфической шкалы LR04 и относительная погрешность датировки между двумя рядами минимальна.

Ряд уровня моря по [9] и ряд температуры по [10] представлены на рис. 1. Погрешности значений рядов, показанные на рисунке, взяты из цитируемых работ.

Уже после того, как данная статья была подана в редакцию, был опубликован новый сводный ряд глобального уровня Мирового океана, охватывающий последние 4,5 млн лет [11]. Однако в своей наиболее молодой части (неоплейстоцен и голоцен, последние 800 тыс. лет) этот ряд мало отличается от предыдущего сводного [9], поэтому выводы данной работы не зависят от того, какие ряды будут использованы в расчетах.

В данной работе к указанным рядам были применены такие статистические методы, как расчет парной линейной корреляции, выражаемой коэффициентом корреляции Пирсона, а также линейной регрессии, выражаемой угловым коэффициентом линейного уравнения, связывающего два исследуемых параметра. Значимость коэффициента корреляции оценивается с помощью критерия Стьюдента и выражается p -значением, которое представляет собой вероятность того, что нулевая гипотеза об отсутствии корреляции между изучаемыми параметрами является верной.

В работе также рассчитываются интегрально-разностные кривые (ИРК) изучаемых характеристик. В общем виде ИРК представляет собой сумму аномалий значений ряда: $\sum (x_i - x_{кр})$, где $x_{кр}$ — некое критическое значение параметра.

Результаты и обсуждение

Прежде всего привлекает внимание относительно большая погрешность значений. Для ряда температуры она составляет $\pm 0,65$ °C, для ряда уровня моря ± 23 метра (доверительные интервалы).

Несмотря на эти погрешности, связь между двумя параметрами очевидна: в холодные эпохи уровень моря ниже за счет разрастания ледяных щитов (в основном в Северном полушарии) и увеличения плотности воды, а в межледниковья он выше. Этот вывод подтверждается и коэффициентом корреляции между двумя рядами, который равен $0,77 \pm 0,02$ ($p < 0,0001$), рис. 2. Линейная регрессия показывает, что при увеличении глобальной температуры на 1°C средний глобальный уровень моря растет почти на 15 м.

При более пристальном рассмотрении выясняется, что эта зависимость сложнее, чем кажется на первый взгляд. Так, на нисходящей фазе климатического цикла (при похолодании) уровень моря, как правило, заметно выше, чем на восходящей фазе (при переходе от максимума оледенения к межледниковью) при тех же значениях температуры, а экстремумы уровня моря не синхронны экстремумам температуры (рис. 2). Уровень моря во время теплых фаз МИС 1, МИС 5, МИС 7 и МИС 9 приблизительно одинаков (в пределах погрешности значений), при том что температура этих межледниковий существенно различается (рис. 1).

Максимальный уровень моря (+18,5 м) наблюдался во время МИС 11, хотя максимальная температура этой теплой стадии несущественно отличается от температуры МИС 5 (рис. 1). Наконец, уровень моря во время холодной стадии МИС 16 существенно ниже, чем во время МИС 10, при том что МИС 16 была теплее (рис. 1).

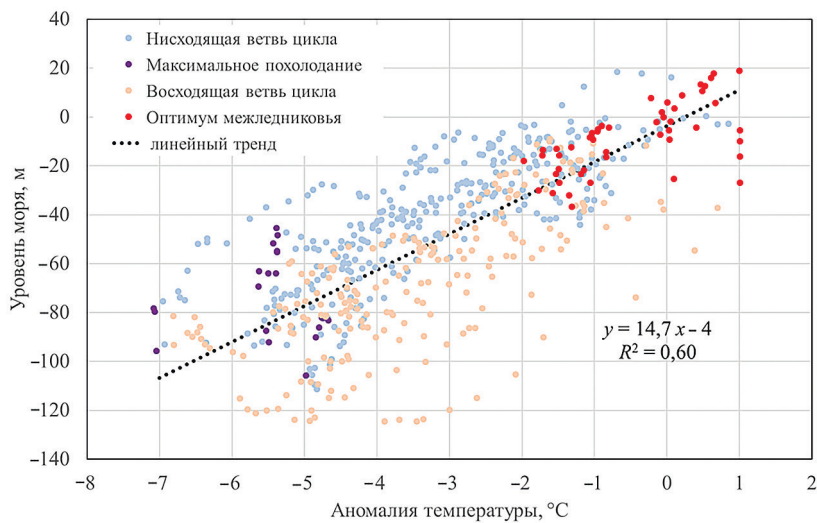


Рис. 2. Поле корреляции между уровнем моря и аномалией приземной температуры для позднего четвертичного периода.

Цветом обозначены различные фазы климатического цикла: нисходящая ветвь (похолодание) — светло-голубой, максимальное понижение температуры — синий, восходящая ветвь — светло-оранжевый, оптимумы межледниковий — красный. Пунктирная линия и уравнение относятся ко всей совокупности точек поля корреляции

Fig. 2. The correlation field between the sea level and surface temperature anomaly for the Late Quaternary.

The color denotes different phases of climatic cycles: light blue is downward part (cooling), blue is maximum of cooling, light orange is upward part (warming), red is interglacial optimum

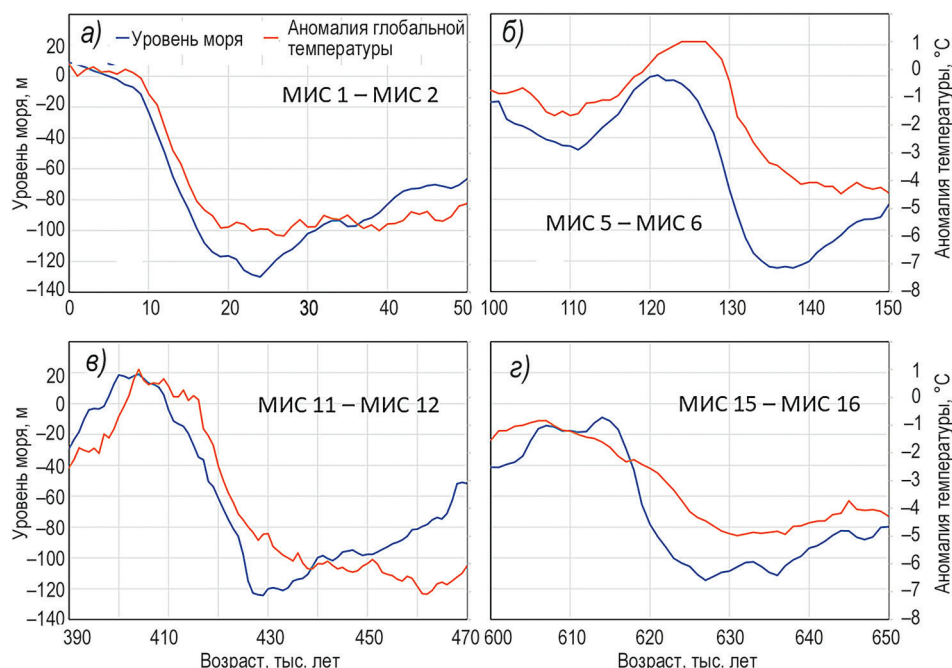


Рис. 3. Сопоставление хода уровня моря и температуры во время некоторых переходов от холодных к теплым стадиям: а) от максимума последнего оледенения (МИС 2) к голоцену (МИС 1); б) от предпоследнего ледникового максимума (МИС 6) к предыдущему межледниковью (МИС 5); в) от МИС 12 к МИС 11 и г) от МИС 16 к МИС 15. Шкала времени направлена справа налево

Fig. 3. Comparison of the sea level and temperature during several climatic transitions: а) from the Last Glacial Maximum (MIS 2) to Holocene (MIS 1); б) from the Previous Glacial Maximum (MIS 6) to the Penultimate Interglacial (MIS 5); в) from MIS 12 to MIS 11 and г) from MIS 16 to MIS 15. The time on the X axis goes from right to left

При более детальном рассмотрении некоторых из наиболее ярких климатических событий позднего четвертичного периода (рис. 3) видно, что экстремумы уровня моря имеют тенденцию к запаздыванию относительно экстремумов температуры, при этом минимумы уровня моря запаздывают относительно минимума температуры в среднем на $7,8 \pm 2,1$ тыс. лет (от 0 до 18 тыс. лет), а максимумы — на $4,7 \pm 1,1$ тыс. лет (от 0 до 9 тыс. лет).

Впрочем, для минимальных уровней моря время запаздывания определить не просто, поскольку во время наиболее холодных стадий цикла температура часто долго держится на одном уровне и точку экстремума бывает определить сложно (рис. 3а и 3б).

Рассмотрим ситуацию с другой стороны: определим, при каких температурах имеют место максимумы и минимумы уровня моря (рис. 4а и 4б).

Выясняется, что независимо от того, какова была минимальная температура воздуха во время холодных стадий, минимальные уровни моря практически всегда наблюдаются при очень схожих значениях температуры, $-4,7 \pm 0,2$ °C (обозначим ее как t° , поскольку это температура, при которой происходит переход от снижения уровня моря к его росту). Погрешность этого значения существенно меньше погрешности значений температурного ряда, которая, как указано выше, составляет

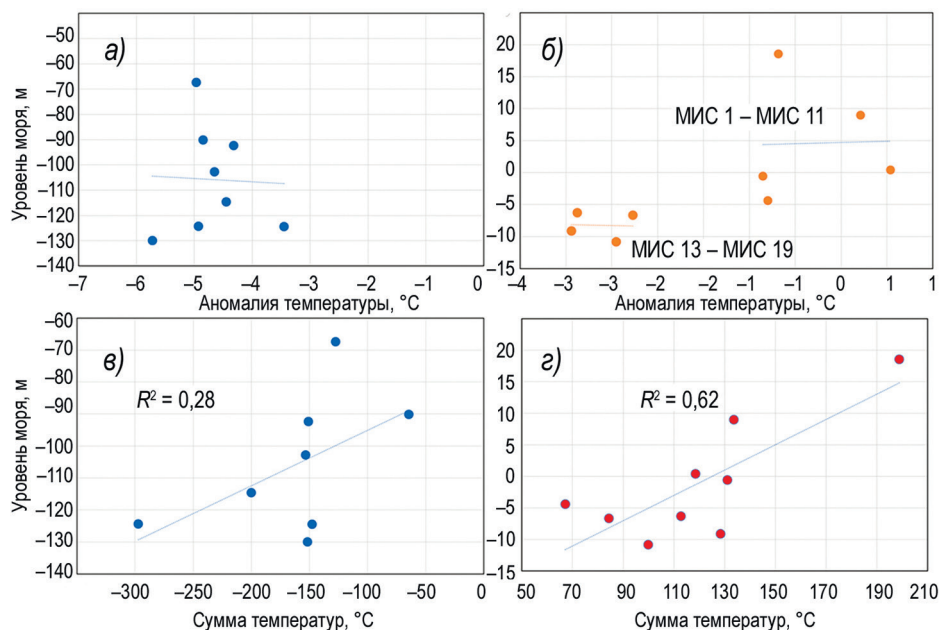


Рис. 4. Температура во время минимумов (а) и максимумов (б) уровня моря в неоплейстоцене; в) и г) — минимальные (в) и максимальные (г) значения уровня моря как функция накопленных сумм температурных аномалий во время предшествующих холодных (в) и теплых (г) стадий Fig. 4. The temperature during minima (а) and maxima (б) of the sea level in the Late Quaternary. в) and г) are the minimal (в) and maximal (г) values of the sea level as a function of accumulated sums of temperature anomalies during the preceding cold (в) and warm (г) stages

0,65 °C — иными словами, с учетом погрешности температура $t^{\circ+}$, при которой имеют место минимальные уровни океана, одинакова. Сами же значения уровня моря при этом могут меняться в широких пределах, от -67 до -130 м, не обнаруживая никакой корреляции с температурой. В качестве примера можно привести МИС 12, которая была экстремально холодной, но при этом уровень моря был примерно такой же, как во время МИС 2 и МИС 6 (рис. 3).

Схожая картина наблюдается и для максимумов уровня моря (рис. 4б), но при этом точки четко разбиваются на 2 кластера, соответствующих более древним (МИС 13 — МИС 19, 800–500 тыс. л. н.) и более молодым (МИС 1 — МИС 11, 400–0 тыс. л. н.) межледниковьям. Внутри этих кластеров корреляции не наблюдаются, но для древних межледниковий характерен более низкий уровень моря (от -11 до -6 м) при значениях температуры (обозначим ее $t^{\circ+}$) $-2,6 \pm 0,2$ °C, а для молодых межледниковий — более высокий уровень моря (от -4 до +19 м) при значениях $t^{\circ+}$, равных $-0,3 \pm 0,3$ °C.

Необходимо отметить, что довольно сложно объяснить наблюдаемое запаздывание уровня моря относительно температуры. Безусловно, ледниковые щиты — самый инерционный компонент земной системы, с отставанием реагирующий на изменения климата, но едва ли время запаздывания может достигать 10–18 тыс. лет. Кроме того, в этом случае непросто обосновать тот факт, что время запаздывания так сильно различается для разных климатических циклов. Наконец, эта концепция не объясняет постоянство значений $t^{\circ+}$ и $t^{\circ+}$ для разных циклов.

В качестве рабочей гипотезы предположим, что существуют критические значения температур ($t^{\circ+}$ и $t^{\circ*}$), выше (ниже) которых ледниковый щит теряет (накапливает) массу независимо от того, какой тренд температуры наблюдается в этот период. В этом случае максимальный (минимальный) уровень моря должен быть функцией длительности предшествующей теплой (холодной) стадии. Проверка этой гипотезы показала, что минимальный уровень моря обнаруживает слабую отрицательную корреляцию с длиной предшествующего холодного периода ($r = -0,41 \pm 0,37$), но эта корреляция не значима. Для максимального уровня моря корреляция с длительностью предшествующей теплой стадии составляет $0,59 \pm 0,30$ ($p = 0,1$).

Далее, можно предположить, что имеет значение не только длительность холодных и теплых периодов, но и сопутствующие им температуры. Действительно, чем выше температура в теплую эпоху — тем интенсивнее тает лед и тем выше уровень моря при одной и той же длине теплой стадии; аналогично, чем ниже температура, тем ниже ожидаемый уровень моря в конце холодной стадии. В этом случае минимальный уровень моря является функцией накопленной суммы температур во время предшествующего холодного периода, а максимальный уровень моря является функцией накопленной суммы температур во время предшествующего теплого периода. Поскольку максимальные аномалии температуры межледниковий могут быть как выше, так и ниже нуля, то для расчета накопленной суммы мы использовали не сами значения температур, а положительные разности ($t^{\circ}_{\max} - t^{\circ}$), где t°_{\max} — референсная температура, значение которой должно быть выше самого высокого значения ряда температур за 800 тыс. лет ($+1,01$ °C). Корреляция минимальных значений уровня моря с накопленной суммой температур составляет $0,53 \pm 0,35$ ($p = 0,18$) (рис. 4б), а корреляция максимальных значений уровня с накопленной суммой ($t^{\circ}_{\max} - t^{\circ}$) равна $0,79 \pm 0,23$ ($p = 0,02$) (рис. 4з). Таким образом, можно с большой долей вероятности утверждать, что максимальные уровни моря во время межледниковий действительно зависят от накопленной суммы температур, тогда как для минимумов связь не так очевидна. Плохая корреляция минимальных значений уровня с суммой температур может объясняться сложностью в определении начальной точки холодной стадии. Другим объяснением может служить существование физического предела роста объема ледниковых щитов, например, при достижении ими края континентального шельфа и т. д. — в этом случае дальнейшее накопление экстремально низких температур не приведет к дополнительному снижению уровня моря.

Таким образом, можно сформулировать, что уровень моря является функцией интегрально-разностной кривой (ИРК) температуры воздуха. Для иллюстрации этого вывода в качестве примера построим ИРК температуры для стадий МИС 12 — МИС 11 и сравним ее с уровнем моря.

Во время холодной стадии МИС 12 рост температуры начинается 461 тыс. л. н. при аномалии температуры $-7,1$ °C (рис. 5) — это одно из самых низких значений температуры Земли на протяжении всего неоплейстоцена (рис. 1). Снижение уровня моря продолжается после этого еще на протяжении примерно 30 тыс. лет до тех пор, пока температура не достигнет значения $t^{\circ+}$ ($-4,9$ °C), и в этот момент снижение уровня сменяется резким ростом.

ИРК для этого участка строится по формуле $\sum(t^{\circ} - t^{\circ+})k$, где k — масштабирующий коэффициент для перевода накопленной суммы температур в уровень моря. По мере приближения к $t^{\circ+}$ разность температур уменьшается, что и обуславливает уменьшение скорости понижения уровня моря.

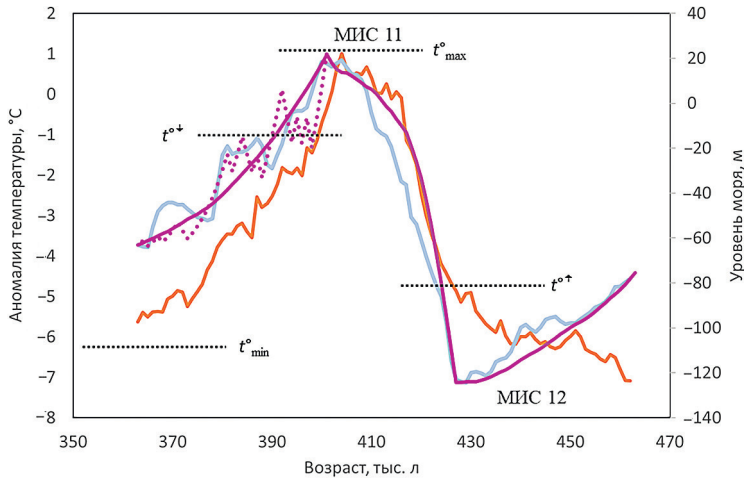


Рис. 5. Уровень моря (голубой) и температура (красный) во время МИС 12 и МИС 11. Фиолетовые линии — интегрально-разностные кривые (ИРК) температуры. $t^{\circ+}$ и $t^{\circ+}$ — температуры, при которых имеют место, соответственно, максимум и минимум уровня моря. t°_{\min} и t°_{\max} — вспомогательные температуры, используемые для расчета ИРК. Шкала времени направлена справа налево

Fig. 5. The sea level (blue) and temperature (red) during MIS 12 and MIS 11. The magenta lines are the integral-difference curves (IDC) of the temperature. $t^{\circ+}$ and $t^{\circ+}$ are the temperatures corresponding to, relatively, maximal and minimal sea levels. t°_{\min} and t°_{\max} are the auxiliary temperatures used to calculate the IDC. The time on the X axis goes from right to left

Следующий этап — резкий переход от ледниковых условий к межледниковым, который длится на протяжении 10 тыс. лет. Начиная с 416 тыс. л. н. скорость потепления резко замедляется, а 404 тыс. л. н. температура достигает максимума на отметке $+1,0^{\circ}\text{C}$. На протяжении всего этого периода уровень моря растет (хотя скорость роста замедляется 407 тыс. л. н.), и рост продолжается и при снижении температуры, пока последняя не достигнет значения $t^{\circ+}$ ($-0,35^{\circ}\text{C}$) около 401 тыс. л. н. На протяжении этого этапа ИРК рассчитывается по формуле $\sum(t^{\circ}_{\max} - t^{\circ})k$. Значение t°_{\max} ($+1,1^{\circ}\text{C}$) выступает в качестве настроечного параметра и подбирается таким образом, чтобы ИРК максимально близко воспроизвела кривую уровня моря. Отметим, впрочем, что t°_{\max} оказалась практически равна действительной максимальной температуре во время МИС 11.

На заключительном этапе температура и уровень моря снижаются в сторону минимальных значений МИС 10, которые остаются за пределами данного эксперимента. На фоне общего похолодания наблюдаются относительно короткопериодные колебания температуры, которые проявляются и в ряде уровня моря. ИРК рассчитывается по формуле $\sum(t^{\circ}_{\min} - t^{\circ})k$, где t°_{\min} — очередной настроечный параметр. Его значение равно $-6,2^{\circ}\text{C}$, что близко минимальной температуре МИС 10 ($-5,64^{\circ}\text{C}$), которая имела место 362 тыс. л. н. При такой схеме построения ИРК модель не может воспроизвести мелкомасштабные колебания уровня моря, но если разность $(t^{\circ}_{\min} - t^{\circ})$ брать с тем знаком, который соответствует знаку тренда температуры (минус для похолодания и плюс для потепления), то ИРК в какой-то степени воспроизводит и эти колебания (пунктирная линия на рис. 5).

Если бы мы продолжили эксперимент дальше, то для заключительной стадии МИС 10 мы бы использовали ту же схему расчета ИРК, что и для стадии МИС 12 ($\Sigma(t^\circ - t^{\circ*})k$), для МИС 9 — ту же схему, что и для МИС 11, и т. д.

Выводы

Таким образом, кажущееся «запаздывание» уровня моря относительно температуры может быть объяснено тем, что объем льда является функцией интегрально-разностной кривой средней глобальной приземной температуры воздуха. Минимальные и максимальные уровни океана связаны с накопленной суммой температур во время предшествующих холодных и теплых стадий. Именно этим объясняется аномально высокий уровень океана во время МИС 11, которая была необычайно длинной и при этом довольно теплой. В разгар холодных эпох наблюдается снижение уровня моря даже при росте температуры, если значения последней ниже критической отметки $t^{\circ*}$. Аналогично, в оптимумы межледниковий уровень моря растет даже при похолодании, если температура выше критического значения $t^{\circ*}$. Следует учесть, что эта схема выражает лишь общую концепцию, которая не учитывает различия в динамике отдельных ледяных щитов (Скандинавского, Лаврентийского, Гренландского, Антарктического).

Отметим, что выводы этой работы с большой осторожностью следует переносить на современную ситуацию, поскольку разрешение использованных рядов (1 тыс. лет) не позволяет исследовать события длиной в десятки и сотни лет.

Тем не менее если для уровня моря действительно важна накопленная сумма температур, то даже нынешнее потепление, которое уже почти достигло $+1,5^\circ\text{C}$ относительно доиндустриального уровня (а к концу века может достичь $3\text{--}4^\circ\text{C}$), все еще оставляет человечеству время для принятия мер по снижению выбросов ПГ, изъятию ПГ из атмосферы и снижению глобальной температуры ниже критического порога.

С другой стороны, даже выполнение условий Парижского соглашения 2015 г. (ограничение потепления отметкой $+1,5^\circ\text{C}$) в долгосрочной перспективе не обеспечит решения проблем, связанных с ростом уровня моря, из-за огромной чувствительности этого параметра к глобальной температуре, которая составляет почти $15\text{ м} / 1^\circ\text{C}$ (рис. 2). Если эта чувствительность будет актуальна для земной системы и в будущем, то повышение температуры на $1,5^\circ\text{C}$ спустя несколько тысяч лет обернется ростом уровня моря на 22 м.

Еще одно обстоятельство заключается в том, что нынешняя скорость роста температуры (порядка $1,5^\circ\text{C} / 100\text{ лет}$ с дальнейшим ускорением) беспрецедентна для позднего четвертичного периода, и как этот факт влияет на чувствительность уровня моря к температуре — неизвестно.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие конфликта интересов.

Благодарности. Авторы благодарны трем рецензентам за ценные замечания, которые позволили существенно улучшить работу.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 25-17-00172.

Competing interests. The authors declare no competing interests.

Acknowledgements. The authors thank three reviewers whose valuable comments allowed us to significantly improve the manuscript.

Funding. This study was supported by Russian Science Foundation grant 25-17-00172.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Fricker H.A., Galton-Fenzi B.K., Walker C.C., Freer B.I.D., Padman L., DeConto R. Antarctica in 2025: Drivers of deep uncertainty in projected ice loss. *Science*. 2025;387: 601–609. <https://doi.org/10.1126/science.adt9619>
2. IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte V., 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 University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA; 2021. P. 3–32. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.001>
3. Iizuka M., Seki O., Wilson D.J., Suganuma Y., Horikawa K., Van de Flierdt T., Ikehara M., Itaki T., Irino T., Yamamoto M., Hirabayashi M., Matsuzaki H., Sugisaki S. Multiple episodes of ice loss from the Wilkes Subglacial Basin during the Last Interglacial. *Nature Communications*. 2023;14(2129):1–10. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-37325-y>
4. Noble T.L., Rohling E.J., Aitken A.R.A., Bostock H.C., Chase Z., Gomez N., Jong L.M., King M.A., Mackintosh A.N., McCormack F.S., McKay R.M., Menviel L., Phipps S.J., Weber M.E., Fogwill C.J., Gayen B., Golledge N.R., Gwyther D.E., Hogg A.M., Martos Y.M., Pena-Molino B., Roberts J., Van de Flierdt T., Williams T. The sensitivity of the Antarctic Ice Sheet to a changing climate: past, present, and future. *Reviews of Geophysics*. 2020;58:e2019RG000663. <https://doi.org/10.1029/2019RG000663>
5. Hoefs J. *Stable Isotope Geochemistry*. Berlin: Springer; 2004. 244 p.
6. Ramstein G., Landais A., Bouttes N., Sepulchre P., Govin A. (eds.) *Paleoclimatology*. Springer Int. Publ.; 2021. 478 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-24982-3>
7. Westerhold T., Marwan N., Drury A.J., Liebrand D., Agnini C., Anagnostou E., Barnet J.S.K., Bohaty S.M., Vleeschouwer D.D., Florindo F., Frederichs T., Hodel D.A., Holbourn A.E., Kroon D., Lauretano V., Littler K., Lourens L.J., Lyle M., Pälike H., Röhl U., Tian J., Wilkens R.H., Wilson P.A., Zachos J.C. An astronomically dated record of Earth's climate and its predictability over the last 66 million years. *Science*. 2020;369:1383–1387. <https://doi.org/10.1126/science.aba6853>
8. Lisiecki L.E., Raymo M.E. A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}O$ records. *Paleoceanography*. 2005;20:PA1003. <https://doi.org/10.1029/2004PA001071>
9. Spratt R.M., Lisiecki L.E. A Late Pleistocene sea level stack. *Clim. Past*. 2016;12:1079–1092. <https://doi.org/10.5194/cp-12-1079-2016>
10. Clark P.U., Shakun J.D., Rosenthal Y., Köhler P., Bartlein P.J. Global and regional temperature change over the past 4.5 million years. *Science*. 2024;383:884–890. <https://doi.org/10.1126/science.adi1908>
11. Clark P.U., Shakun J.D., Rosenthal Y., Pollard D., Hostetler S.W., Köhler P., Bartlein P.J., Gregory J.M., Zhu C., Schrag D.P., Liu Z., Pislak N.G. Global mean sea level over the past 4.5 million years. *Science*. 2025;390:1–10. <https://doi.org/10.1126/science.adv8389>

ЛЕДОТЕХНИКА ICE TECHNOLOGY

Оригинальная статья / Original paper

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-4-500-512>

УДК 551.467 + 623.746.-519



Основные критерии применимости платформы БПЛА в целях ближней ледовой разведки и оперативного ледово-информационного обеспечения морских операций

С.С. Сероветников✉, Л.А. Старцев, В.Т. Соколов, Т.А. Алексеева
ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт,
Санкт-Петербург, Россия

✉ sssu@aari.ru

ID ЛАС, 0009-0001-2250-3042; ВТС, 0000-0002-7569-5164; ТАА, 0000-0002-1575-8784

Аннотация. Современное развитие методов дистанционного зондирования Земли позволило совершить огромный прорыв в сфере ледово-информационного обеспечения морских операций в арктических и других замерзающих морях. Судоводители теперь регулярно получают оперативные спутниковые данные, ледовые карты и ледовые прогнозы. Однако, несмотря на это, во время проведения некоторых морских операций возникают ситуации, когда спутниковая информация либо имеет недостаточное разрешение, либо не поступает на борт судна оперативно. В случае застревания судов в тяжелых ледовых условиях или, например, выбора ледовой станции для научных работ необходима ледовая разведка непосредственно с борта судна. Если на судне имеется вертолет, то такие задачи решаются с его помощью, однако безопаснее и экономически целесообразнее для этого использовать беспилотные летательные аппараты (БПЛА).

В статье представлен материал, объединяющий в себе многолетний опыт оперативного ледово-информационного обеспечения морских операций, авиационной ледовой разведки, проведения специальных судовых наблюдений за ключевыми характеристиками морского льда, а также опыт эксплуатации различных беспилотных систем в условиях высоких широт сотрудниками Арктического и антарктического научно-исследовательского института. Целью работы является структуризация летно-эксплуатационных характеристик БПЛА как платформы, пригодной к применению в оперативном ледово-информационном обеспечении ледового плавания судов. Основная задача статьи — четко очертить специфику применения и технические требования к беспилотным системам, как применяемым в настоящее время, так и вновь разрабатываемым, что в свою очередь позволит широкому кругу специалистов избежать ошибок на уровне

© Авторы, 2025

© Authors, 2025

планирования применения комплексов БПЛА, а также при разработке и проектировании летательных аппаратов. Для решения поставленной задачи в статье подробно описаны особенности ближней ледовой разведки с борта ледокола, тактика ледовой разведки, предельно допустимые метеорологические условия эксплуатации БПЛА, рассмотрены вопросы о способах возвращения БПЛА на судно и необходимом техническом оснащении аппарата.

Ключевые слова: морской лед, ледовое плавание, ледовая разведка, БПЛА, оптимальный маршрут

Для цитирования: Сероветников С.С., Старцев Л.А., Соколов В.Т., Алексеева Т.А. Основные критерии применимости платформы БПЛА в целях ближней ледовой разведки и оперативного ледово-информационного обеспечения морских операций. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2025;71(4):500–512. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-4-500-512>

Поступила 06.08.2025

После переработки 10.11.2025

Принята 17.11.2025

Key criteria of UAV applicability in medium range ice reconnaissance and ice information service of maritime operations

Sergey S. Serovetnikov✉, Leonid A. Startsev,
Vladimir T. Sokolov, Tatyana A. Alekseeva

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

✉sssu@aari.ru

 LAS, 0009-0001-2250-3042; VTS, 0000-0002-7569-5164; TAA, 0000-0002-1575-8784

Abstract. The modern development of Earth remote sensing methods has enabled scientists to make the huge breakthrough in the field of sea ice information support of maritime operations in the arctic and other freezing seas.

Nowadays ship navigation teams regularly receive near the real time satellite data, ice maps and ice forecasts. Nevertheless, the situations when satellite information has either insufficient resolution or is not transmitted aboard on time are not rare. In the case of ship stuck in the heavy ice conditions or when choosing an ice station for scientific work it is necessary to perform the ice reconnaissance directly from the ship. Such tasks can be solved with the use of a helicopter, nevertheless it is safe and cheaper to use unmanned aerial vehicles (UAV).

The article provides material that combines longstanding experience of conducting an operational sea-ice information support for maritime operations, of aerial ice reconnaissance, special ship-based observations of the sea ice key characteristics as well as experience of operating various unmanned aerial systems in high-latitude conditions by the scientists of the Arctic and Antarctic Research Institute. This paper aims to structure the flight and operational characteristics of the unmanned vehicle (UAV), as a platform useable for operational sea-ice information support of ship navigation in ice. The main objective of the article is to clearly outline the specifics of application and technical requirements for unmanned systems, both currently used and newly developed, which in turn will allow a wide range of professionals to avoid errors at the stage of planning the use of UAV systems, as well as during aircraft development and design. To solve this task the article highlights key criteria of medium range ice reconnaissance from the icebreaker, ice reconnaissance techniques, maximum parameters of meteorological conditions for UAV usage, the ways of UAV returns on the ship, and necessary equipment details.

Keywords: sea ice, ice navigation, ice reconnaissance, UAV, optimal route of navigation

For citation: Serovetnikov S.S., Startsev L.A., Sokolov V.T., Alekseeva T.A. Key criteria of UAV applicability in medium range ice reconnaissance and ice information service of maritime operations. *Arctic and Antarctic Research*. 2025;71(4):500–512. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-4-500-512>

Received 06.08.2025

Revised 10.11.2025

Accepted 17.11.2025

Введение

Бурное развитие методов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в конце 70-х годов прошлого века сулило невероятные перспективы качественного улучшения методов ледово-информационного обеспечения морских операций в Арктике и прилегающих замерзающих морях [1, 2]. Разработки спутниковых систем мониторинга в различных диапазонах, ускоряющийся рост их разрешающей способности, появление современных алгоритмов дешифровки и соответствующих счетных мощностей, а также создание моделей прогнозирования ледовых условий в целом создали некоторый ореол всемогущества ДЗЗ-ориентированной технологии. В 1995 г. была полностью ликвидирована отрасль ледовой авиаразведки [3].

Устойчивый рост объемов грузоперевозок на трассе Северного морского пути (СМП) [4] и общее развитие арктической инфраструктуры очень быстро показали как достоинства ДЗЗ-ориентированной системы специального гидрометеорологического обеспечения (СГМО) морских операций, так и критические недостатки. Широкий охват, высокая оперативность и многодиапазонность — несомненный плюс спутниковой технологии. К сожалению, реальная разрешающая способность (150–200 м на пиксель), сезонная и метеорологическая зависимость спутниковых данных не позволяют осуществлять оперативный контроль на локальных (малых) участках оживленных трасс СМП [5].

Сокращение количества пунктов получения натурных данных о ключевых параметрах морского льда, являющихся опорными при дешифровке и верификации данных ДЗЗ, а также используемых для валидации результатов моделирования, привело к необходимости восстановления системы специальных ледовых наблюдений на судах, осуществляющих ледовое плавание [6]. Такие наблюдения позволяют собирать высокодетализированные данные и, используя их как опорные при дешифровке данных ДЗЗ, значительно увеличивать разрешающую способность СГМО для локальных участков маршрута следования судов.

К сожалению, ледовые наблюдения невозможно проводить в при- и загоризонтной области относительно непосредственного судна, а значит, невозможно точно выстраивать избирательный маршрут судна на основе оперативных опорных данных. Избирательное движение судна во льдах, в направлении генерального курса, целиком и полностью основывается на профессиональном опыте капитана и вахтенной службы судна.

Идея о применении БПЛА для осуществления ледовой разведки ближней (до 80 миль) зоны далеко не нова и является в значительной мере перспективной для повышения качества оперативного ледово-информационного обеспечения морских операций [7–10]. Общее развитие технологий и доступность беспилотных систем в настоящее время вполне позволяют осуществлять такие работы.

В нашей стране на фоне государственного финансирования развития Арктики непрерывно появляются многочисленные проекты систем и комплексов беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), разрабатываемых для обеспечения ледовой авиаразведки. Все эти проекты без исключения страдают (кроме прочих) одним недостатком, а именно — отсутствием четкого понимания специфики производства ледовых наблюдений, фактических условий применения, эксплуатационно-технических требований и тактики применения в реальных условиях. В результате существующие на рынке и вновь разрабатываемые системы непригодны для ледово-информационного обеспечения морских операций.

На общемировом уровне ситуация с применением БПЛА в целях ледовой разведки характеризуется только обсуждением перспектив применения и редкими экспериментами. Данный факт объясняется наличием классической, пилотируемой ледовой авиаразведки у стран, осуществляющих морские операции в замерзающих морях и Северном Ледовитом океане (в составе служб береговой охраны США, Канады, Норвегии).

Целью работы является структуризация летно-эксплуатационных характеристик беспилотного летательного аппарата как платформы, пригодной к применению в оперативном ледово-информационном обеспечении ледового плавания судов.

Основная задача статьи — четко очертить специфику применения и технические требования к беспилотным системам, как применяемым в настоящее время, так и вновь разрабатываемым, что в свою очередь позволит широкому кругу специалистов избежать ошибок на уровне планирования применения комплексов БПЛА, а также при разработке и проектировании летательных аппаратов.

Ближняя зона ледовой разведки

В качестве базового перспективного носителя БПЛА будем рассматривать ледокол. Ледокольный флот обеспечивает основные транспортные, спасательные и специфические операции в ледовых условиях, что предполагает максимальную ледово-информационную обеспеченность на борту. Несомненно, носителем БПЛА может быть и другое судно ледового класса, но ледокол в этом качестве является наиболее универсальным примером.

Фактически ледокол может идти в одном из трех режимов: автономное следование, в составе каравана судов и в режиме буксировки судна вплотную (в т. ч. в составе каравана). Скоростной режим в среднем варьируется в пределах 7–12 узлов (морских миль в час), что определяется фактической ледовой обстановкой, ограничением скорости движения каравана, ограничением нагрузки на буксируемое судно и текущим техническим состоянием. Маршрут движения ледокола имеет некоторую степень избирательности в пределах направления генерального курса. Фактически ледокол движется во льдах не по прямой линии, а выбирает маршрут с более легкими ледовыми условиями. Избирательность движения максимальна в автономном движении и минимальна при буксировке. Четвертый режим — оковка — мы не рассматриваем, т. к. это специфическая операция и прием или выпуск БПЛА в этот момент вряд ли возможен.

В качестве штатного навигационного оборудования ледокол обеспечен комплексом РЛС, зачастую дополненным ледовой приставкой, позволяющей оценивать сплошенность и торосистость льда на расстоянии до 6 миль, далее отраженный сигнал РЛС становится нечитаемым в связи с угловой затененностью торосистыми образованиями.

Передняя кромка ближней зоны ледовой разведки определяется расстоянием от движущегося ледокола до предела видимости ледовых условий по РЛС, скоростью движения ледокола и минимальным временем заблаговременности получения информации о ледовой обстановке впереди. Как показывает практика, передняя кромка ближней зоны ледовой разведки находится на расстоянии 10 миль от судна-носителя в пригоризонтной области. Информация, оперативно получаемая с такого удаления, позволяет планировать избирательность движения в направлении генерального курса.

Дальняя кромка ближней зоны ледовой разведки определяется техническими характеристиками БПЛА, фактическими ледовыми условиями и тактикой проведения текущей морской операции. Оценочное расстояние до дальней кромки ближней зоны ледовой разведки 80 миль (загоризонтная область).

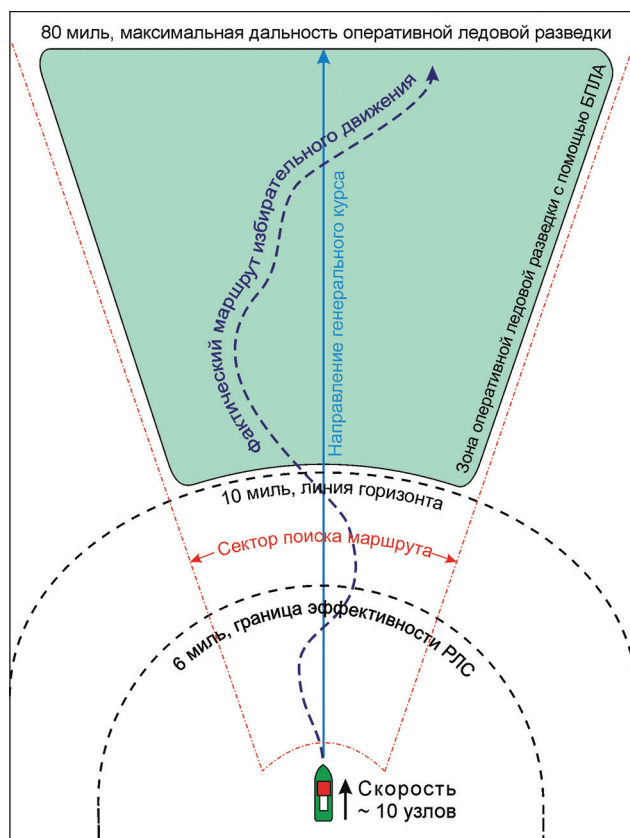


Рис. 1. Схема ближней зоны ледовой разведки, типовой сценарий
 Fig. 1. The scheme of the near zone of ice reconnaissance, typical model

Важным параметром ближней зоны ледовой разведки является поисковый сектор, который в типичных условиях может составлять до $\pm 30^\circ$ от направления генерального курса (рис. 1).

Из вышеописанного нетрудно составить основное техническое требование к платформе БПЛА в качестве ледового разведчика: время свободного барражирования не менее 8 часов на удалении до 80 миль от движущегося носителя, а также способность поддерживать оперативный двухсторонний обмен данными с носителем.

Так как в качестве носителя используется ледокол, не имеющий специальных штатных средств для размещения БПЛА, логично сделать вывод, что тип используемого комплекса должен быть мобилен, компактен и не должен требовать значительного вмешательства в палубные конструкции и оборудование судна.

Технически данным требованиям может соответствовать БПЛА самолетного типа с двигателем внутреннего сгорания (ДВС), массой до 30 кг и массой полезной нагрузки до 4–5 кг.

Электрические и гибридные модели не подходят по дальности, времени действия и энерговооруженности.

Тактика ледовой разведки

Крайне важно отметить факт избыточности проведения непрерывной ледовой разведки в ближней зоне с использованием сменяющихся на маршруте БПЛА. В случае, если движение осуществляется по участку оживленного судоходства, как правило, ледовая обстановка уточняется по данным ранее прошедших маршрутов и встречных судов и является понятной судоводителю.

В условиях обеспеченности судоводителя актуальными спутниковыми снимками видимого диапазона, не перекрытыми облачностью, радиолокационными снимками с высоким уровнем контрастности, не искаженным процессами таяния льда и снега, а также ледовыми картами высокого разрешения — применение БПЛА также является избыточным.

В случаях недообеспеченности спутниковой информацией, низкой информативности спутниковой информации, движения по маршруту низкой интенсивности судоходства в редко посещаемых зонах, движения в зонах, характеризующихся опасными ледяными образованиями, движения в период активной динамической перестройки структуры ледяного массива и т. п. актуальность ледовой разведки ближней зоны существенно повышается и зачастую становится определяющей.

Как показывает практика, наибольшая востребованность ледовой разведки ближней зоны возникает в весенний и осенний периоды [11].

Общая тактика применения БПЛА сводится к своевременной отправке беспилотного разведчика в сектор поиска оптимального маршрута, ледовая информация о котором недостаточна или отсутствует. Вышедший в сектор поиска БПЛА осуществляет обследование назначенного района, оперативно поставив информацию на борт носителя. При необходимости полетное задание БПЛА необходимо менять непосредственно в полете для сокращения и перенаправления сектора поиска на основе поступающих оперативных данных.

Размеры исследуемой зоны, вариативность маршрута и необходимая длительность проведения разведки формируют минимально достаточный параметр длительности эффективного барражирования БПЛА — 7–8 часов, что позволит судноносителю пройти до 80–100 миль с высокой степенью избирательности движения, а значит, и оптимальной эффективностью. В зависимости от фактических ледовых условий, барражирующий БПЛА, выработавший топливный ресурс, возвращается на борт носителя или сменяется на другой в зоне разведки.

Особо важным фактором ледовой авиаразведки является высотный профиль полета. Классическая авиаразведка проводится на высотах 150–250 м, что позволяет получать четкую информацию о структуре ледяного массива, торосистости, сплошности и наличии разрывов и разводий [3]. Также необходимо учитывать фактор типичной для высоких широт нижней границы облачности (НГО), составляющей 200–300 м. Подразумевается не столько непрерывный облачный покров, сколько отдельные чередующиеся образования и полосы тумана.

В то же самое время поддержание устойчивого канала связи при работе в загоризонтной области требует подъема БПЛА на высоту прямой видимости.

Высотный профиль БПЛА при проведении ледовой разведки напоминает серию снижений на малые высоты с последующим выходом на эшелон связи, передачей информации, уточнением/получением нового полетного задания (рис. 2). Частично данный аспект можно нивелировать применением бортовой РЛ-станции на БПЛА, но на этом вопросе отдельно остановимся далее.

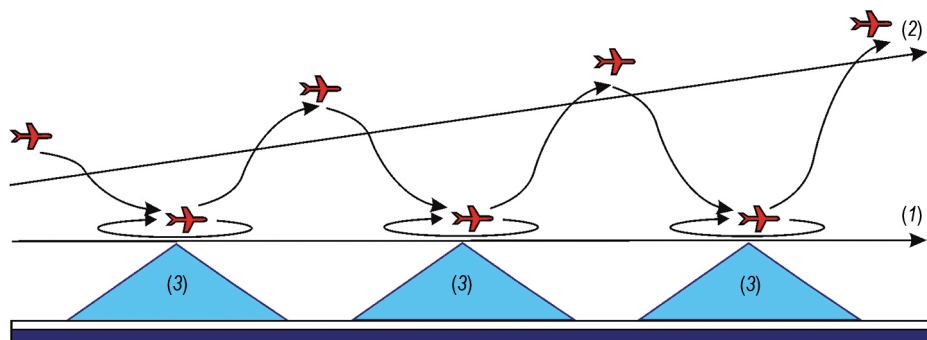


Рис. 2. Упрощенная схема высотного профиля полета БПЛА при осуществлении ледовой разведки загоризонтной области: (1) — фактическая высота проведения ледовой разведки; (2) — нижняя граница зоны эффективного обмена данными; (3) — области ледовой разведки, выполняемой согласно текущим полетным заданиям

Fig. 2. Simplified scheme of the altitude profile of UAV flight during ice reconnaissance of the over-horizon zone: (1) — actual altitude of the ice reconnaissance; (2) — the low edge of the effective data transmission zone; (3) — the area of the ice reconnaissance conducted according to the estimated flight tasks

Необходимость многократно менять высоту во время ледовой разведки накладывает дополнительные требования по топливу и времени барражирования. Указанное ранее значение 7–8 часов установлено с учетом этих требований и практической эффективности ледовой разведки.

Для обеспечения сменяемости БПЛА в зоне ледовой разведки минимальный комплект комплекса должен состоять из 2 единиц (аварийность не учтена).

Метеорологические условия

В целом типовые метеорологические условия при проведении ледовой разведки ближней зоны можно охарактеризовать как критические или предельно допустимые. Тем не менее опыт проведения ледовых разведок с помощью вертолета Ми-8 и опытных БПЛА (в экспедициях ААНИИ 2013–2025 гг.) однозначно показывает, что метеорологический коридор применимости БПЛА гораздо шире, чем у тяжелой пилотируемой машины.

Общие типовые параметры метеорологического коридора применимости для БПЛА: температура воздуха в приповерхностном слое до -25°C , температура воздуха на высоте эшелона связи до -40°C , скорость ветра 7–15 м/с, порывы ветра до 20 м/с, влажность воздуха 30–95 %.

Особое внимание необходимо уделить метеорологическим эффектам, проявляющимся при использовании специфического высотного профиля полета. Многократное пересечение нижней границы облачности (НГО) и выход в приповерхностный слой, характеризующий повышенной влажностью, неизбежно приводит к оледенению БПЛА.

Полеты всех известных типов БПЛА рассматриваемого класса осуществляются с использованием барометрического высотомера, интегрированного в автопилот. В целях удешевления и экономии массы используются не термокомпенсированные датчики. Общая длительность полета, многократное изменение высоты и значительные величины барической тенденции за 3 и 6 часов в условиях высоких широт

приводят к быстрой потере точности высотной привязки автопилота и высокой вероятности потери БПЛА на очередном снижении.

Эксплуатация ДВС с сухим картером, типичных для данного класса БПЛА, требует поддержания топливно-масляной смеси в особом температурном режиме, исключающем образование ледяных кристаллов в топливе и его температурной сепарации на отдельные фракции.

Электронное оборудование БПЛА требует особой защиты от резко отрицательных температур и от солевых взвесей в приповерхностном слое.

Специфические условия применения формируют ряд требований к платформе БПЛА: температурный диапазон применения до -40°C , система пассивной и активной борьбы с оледенением, автоматическая система коррекции высотомера, защищенность от солевых взвесей, устойчивое автопилотирование при скоростях ветра до 20 м/с.

Не менее важной является необходимость оснащения БПЛА комплектом метеорологических датчиков, позволяющих оперативно контролировать критические параметры среды, использовать их данные для автоматической корректировки плана полета и оперативно предоставлять эту информацию на носитель.

Возвращение на судно-носитель

В отличие от отработанной и эффективной технологии катапультного запуска краеугольным камнем применимости БПЛА с судна-носителя является процесс посадки на носитель. Для начала рассмотрим особенности судна-носителя. Первым затруднением является необходимость совершения посадки БПЛА без остановки судна, т. е. ледоколу в составе каравана или при буксировке судна вплотную крайне нежелательно менять режим движения. Допустимо частичное снижение хода, но и оно не всегда возможно. Более того, невозможен выход судна на оптимальный курсовой угол относительно ветра для приема БПЛА.

На первый взгляд логичным было бы применение в таких условиях БПЛА, способного совершать вертикальную посадку. К сожалению, в условиях реального движения ледокола, случайного направления ветра относительно его курса, значительных турбулентных завихрений, вызываемых бортом и надстройками, вертикальная посадка технически невозможна. БПЛА для совершения вертикальной посадки необходимо погасить горизонтальную скорость и на некоторое время перейти в режим висения, в этот момент аппарат крайне чувствителен к минимальным воздушным потокам, которые в реальных условиях являются критическими.

По этой же причине штатные парашютные способы посадки, используемые на БПЛА рассматриваемого класса, несостоятельны и непригодны к применению. В том числе и вариант парашютной посадки на лед вдоль борта с последующим подбором неприємлем, ввиду фактически редкого наличия гладкого прочного льда в районе движения ледокола, пригодного для высадки техника (и необходимости остановки).

Совершить посадку в таких условиях можно, только сохраняя значительную горизонтальную скорость, тяговооруженность и возможность активного маневрирования для ухода на второй заход.

Решением вопроса является сетчатый кинетический приемник мобильного исполнения, легко монтируемый и ориентируемый на свободных участках палубы или надстроек ледокола при условии обеспечения свободного от помех просвета (окна пролета БПЛА). Задача такого приемника сводится к устойчивому приему БПЛА,

неразрушающему гашению кинетической энергии и исключению накопления потенциальной энергии и возможности обратного выброса. Дополнительно кинетический приемник должен обеспечивать защиту БПЛА от контакта с элементами палубного оборудования носителя на финальном этапе торможения.

Осведомленный читатель резонно может заметить, что на большинстве крупных ледоколов имеется взлетно-посадочная площадка (ВПП) для приема вертолета, являющаяся удобным местом размещения кинетического приемника БПЛА. В данном случае вновь возникают эксплуатационные нюансы и ограничения. Если на площадке находится вертолет, то подход БПЛА к площадке запрещен по соображениям безопасности, если площадка пуста, но задействована бортовая аппаратура обеспечения полетов вертолета, ВПП закрыта для любых других задач. В качестве дополнительного примера приведем особенность эксплуатации ВПП ледоколов проекта 22220 (головной «Арктика»): в случае буксировки судна вплотную выход на ВПП строго запрещен по соображениям безопасности, при этом в режиме буксировки вплотную такие ледоколы проводят значительную часть ходового времени.

Исходя из вышеописанного, к комплексу БПЛА ледовой разведки ближней зоны выдвигается требование наличия штатного мобильного устройства приема БПЛА с высокими кинетическими параметрами. Сам же БПЛА должен быть оснащен системой First Person View (FPV), позволяющей на финальном этапе полета осуществлять точное наведение на кинетический приемник. Вариант автоматической посадки БПЛА на движущееся судно в рассматриваемых условиях на существующем уровне технического развития невозможен.

Ледовая информация и бортовое оборудование БПЛА

Процесс ледовой разведки в ближней зоне фактически сводится к выносу специальных ледовых наблюдений с борта судна¹ в загоризонтную область с функциональными ограничениями, обусловленными техническими возможностями БПЛА.

Основным потребителем результатов ледовой разведки является судоводитель, что определяет первое требование к оперативной ледовой информации: все поступающие данные должны иметь интуитивно понятный, человекочитаемый вид и не нуждаться в постобработке. Для снижения нагрузки на оператора БПЛА полетные данные и данные дополнительных регистрирующих систем должны представляться в виде отдельного потока и обеспечивать максимальную информированность оператора.

Вся обработка данных должна производиться непосредственно на борту БПЛА, для чего необходимо счетно-вычислительное устройство в качестве ядра системы сбора информации.

Для обеспечения устойчивого двухстороннего канала обмена данными БПЛА должен иметь соответствующую систему связи, обеспечивающую 1,5-кратное перекрытие типовой дальности проведения работ (~120 миль).

В различные сезоны методы наблюдения ключевых характеристик морского льда несколько отличаются, в связи с чем БПЛА должен иметь полезную нагрузку модульного типа, различные комбинации которой могут использоваться применительно к текущим условиям и задачам.

¹ Производство специальных судовых ледовых наблюдений: Методическое пособие. Т. А. Алексеева (ред.). СПб.: ААНИИ; 2025. 46 с.

Основные характеристики ледяного покрова, необходимые для оперативного планирования избирательного маршрута движения:

- общая сплоченность ледяного покрова;
- частная сплоченность отдельных видов льда;
- торосистость;
- нарушения сплошности (разрывы, разводья и полыньи);
- опасные ледовые явления (сжатия, ледяные реки);
- опасные ледяные образования (айсберги, стамухи).

Все вышеуказанные параметры относительно легко идентифицируются на отдельных оптических изображениях и их сериях при условии достаточной видимости и разрешения снимков. Принимая во внимание ранее описанный высотный профиль полета и метеорологические аспекты применимости, приходим к заключению о необходимости применения 3 независимых камер:

- управляемая камера кругового обзора среднего разрешения для площадных оценок с максимально возможных по условиям видимости и разрешения высот 0,3–1,5 км;
- АФС-камера высокого разрешения и с возможностью съемки в условиях недостаточной освещенности для получения детализированных снимков и коротких фотопланов с типовых высот 150–300 м;
- ИК-камера среднего разрешения для получения плановых снимков разрывов и разводей в темное время суток с типовых высот 150–300 м.

Снимки, получаемые при каждом виде съемки, должны иметь пространственно-временную привязку, указатель масштаба снимка в метрах, указатель на географический север, указатель направления на судно-носитель и — в случае обзорных фотопланов — пометку генерального курса судна.

Несомненно, более удобным инструментом для ледовой разведки является компактная РЛС, размещенная на борту БПЛА. Способность проводить наблюдения сквозь облачный слой в широком диапазоне высот, отсутствие зависимости от освещенности делают такой инструмент выгодным с точки зрения упрощения конфигурации полетного задания.

В настоящее время известна перспективная РЛС бокового обзора, пригодная для установки на БПЛА рассматриваемого класса. РЛС находится в стадии первичных летных испытаний и имеет на данный момент некоторые критические недостатки, обнуляющие ее применимость в оперативной ледовой разведке. Основным недостатком является отсутствие преобразования результатов съемки в человекочитаемый вид. Фактически РЛС передает недешифрованный сигнал, нуждающийся в сложной постобработке, чем, с одной стороны, снижает пропускную способность канала передачи данных БПЛА–носитель, а с другой стороны, не обеспечивает необходимую ледово-информационную оперативность. Все же существует определенная надежда на доведение разработчиком этого РЛ-комплекса до состояния уверенной применимости.

Бортовая РЛ-система на платформе БПЛА является высоко перспективным и крайне востребованным элементом ледовой разведки.

Дополнительно необходимо отметить сезонную применимость данных РЛ-наблюдений, этот аспект касается любых РЛ-систем. В начале сезона активного таяния морских льдов, в результате появления на поверхности льда большого количества снежниц (луж талой воды) и масс напитанного водой снега контрастность снимков РЛ-диапазона снижается до неприемлемого для уверенной дешифровки уровня.

Возможным является применение в составе оборудования БПЛА лидарных сканеров, но и их применимость имеет схожие с РЛ-технологией сезонные затруднения ввиду значительного рассеяния лазерного пучка на мокрых поверхностях и частичной зависимости от метеоусловий. Прямая зависимость разрешения сканирования от скорости перемещения делает лидарные системы лишь ограниченно пригодными.

В качестве предварительного итога можно заключить, что в настоящее время проводить эффективную ледовую разведку ближней зоны возможно в светлое время суток и в условиях ограниченной освещенности, но для применения в ночное время БПЛА пока недостаточно оснащены технически.

Тем не менее разработка и внедрение в серию комплексов БПЛА, сочетающих в себе вышеописанные специфические характеристики, значительно расширит навигационные возможности при проведении большинства морских операций в ледовых условиях, позволит повысить безопасность ледового плавания и, что важно, экономическую эффективность.

Основные направления применения

На первый взгляд рассматриваемый комплекс БПЛА имеет узкоспециализированное назначение и может быть востребован в ограниченном количестве в отрасли арктического судоходства, но в реальности это не соответствует действительности.

Мобильный беспилотный комплекс, сочетающий в себе уникальные околокритические характеристики применимости в условиях Заполярья и замерзающих морей, может использоваться для оперативного решения широкого спектра задач в различных отраслях.

В качестве примера приведем типовые сценарии расширенного применения БПЛА в области организации судоходства (см. таблицу).

Таблица

Типовые сценарии применения БПЛА

Table

Typical scenarios of UAV application

БПЛА — судно	БПЛА — акватория	БПЛА — платформа
<p>Длительное (до 8 часов) оперативное освещение ледовой обстановки в при-и загоризонтной области маршрута следования судна, поиск опасных ледяных образований:</p> <ul style="list-style-type: none"> – оценка сплоченности, – оценка торосистости, – оценка областей сжатия, – поиск маршрута, – разведка маршрута, – контроль опасных ледяных образований и явлений 	<p>Регулярное освещение ледовой обстановки в пределах заданной акватории с использованием мобильного пункта базирования на берегу:</p> <ul style="list-style-type: none"> – оценка сплоченности, – оценка торосистости, – слежение за каналом, – разведка маршрутов, – оценка областей сжатия, – контроль опасных ледяных образований и явлений. 	<p>Оперативное освещение ледовой обстановки в пределах ближней зоны морской платформы поиск опасных объектов</p> <ul style="list-style-type: none"> – контроль опасных ледяных образований и явлений, – оценка сплоченности, – оценка торосистости, – поиск оптимального маршрута подхода.

Заключение

Как показывает практика, работы по проектированию и разработке беспилотных систем для арктических условий активно ведутся как крупными производителями, так и небольшими коллективами. В результате с завидной регулярностью появляются

как ограниченно пригодные к специфическим условиям проекты, так и проекты, не выдерживающие критики.

В качестве основной причины неудач авторы данной статьи усматривают неполную осведомленность конструкторских групп и потенциальных заказчиков работ в массиве специфических требований и ограничений применимости БПЛА в реальных условиях Заполярья.

В данной работе четко очерчены основные пункты специфики применения БПЛА для оперативной ледовой разведки и специфические технические требования к беспилотным системам, выработанные на основе имеющегося опыта проведения различного вида работ в Арктической зоне.

ААНИИ является интересантом успешного завершения разработок беспилотных комплексов арктического исполнения и со своей стороны готов предоставить техническую и методическую поддержку в рамках совместных научно-технических проектов.

Конфликт интересов. У авторов исследования нет конфликта интересов.

Финансирование. Данная работа была поддержана Российским научным фондом, грант № 23-17-00161.

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

Funding. We thank the Russian Science Foundation [grant number 23-17-00161] for the financial support of our studies.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Cavalieri D.J., Gloersen P., Campbell W.J. Determination of sea ice parameters with the NIMBUS 7 SMMR. *J. Geophys. Res.* 1984;89:5355–5369.
2. Johannessen O.M., Alexandrov V.Y., Frolov I.Y., Sandven S., Miles M., Bobylev L.P., Pettersson L.H., Smirnov V.G., Mironov E.U., Babich N.G. (eds.). *Polar seas oceanography, remote sensing of sea ice in the Northern Sea Route: studies and applications*. Chichester, UK: Praxis Springer Ltd; 2007. 472 p.
3. Дерюгин К.К., Карелин Д.Б. *Ледовые наблюдения на морях*. Л.: Гидрометиздат; 1954. 168 с.
4. Гурлев И.В., Макоско А.А., Малыгин И.Г. Анализ состояния и развития транспортной системы Северного морского пути. *Арктика: экология и экономика*. 2022;12(2):258–270. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2022-2-258-270>
Gurlev I.V., Makosko, A.A., Malygin, I.G. Analysis of the state and development of the transport system of the Northern Sea Route. *Arktika: ekologiya i ekonomika = Arctic: Ecology and Economy*. 2022;12(2):258–270. (In Russ). <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2022-2-258-270>
5. Афанасьева Е.В., Сероветников С.С., Алексеева Т.А., Гришин Е.А., Солодовник А.А., Филиппов Н.А. Применение данных судового телевизионного комплекса в оперативном гидрометеорологическом обеспечении морской деятельности на примере картирования толщины ледяного покрова в Арктике. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2022;68(2):96–117. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-2-96-117>
Afanasyeva E.V., Serovetnikov S.S., Alekseeva T.A., Grishin E.A., Solodovnik A.A., Filippov N.A. Mapping the thickness of sea ice in the Arctic as an example of using data from a ship-based television complex for operational hydrometeorological support of maritime activities. *Problemy Arktiki i Antarktiki = Arctic and Antarctic Research*. 2022; 68(2):96–117. (In Russ). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-2-96-117>
6. Сероветников С.С., Миронов Е.У., Алексеева Т.А., Афанасьева Е.В., Ковчин М.И., Распределенная система оперативных судовых инструментальных наблюдений за ледовыми и метеорологическими параметрами в Арктическом бассейне и замерзающих морях. *Морское оборудование и технологии*. 2021;3(28):90–102.

- Serovetnikov S.S., Mironov E.U., Alekseeva T.A., Afanas'eva E.V., Kovchin M.I. Distributed system of operational ship instrumental observations of ice and meteorological parameters in the Arctic basin and freezing seas. *Morskoe oborudovanie i tehnologii = Marine equipment and technology*. 2021;3(28):90–102. (In Russ.).
7. Crowe W., Davis K.D., la Cour-Harbo A., Vihma T., Lesenkov S., Eppli R., Weatherhead E.C., Liu P., Raustein M., Abrahamsson M., Johansen K.-S., Marshall D. *Enabling Science use of Unmanned Aircraft Systems for Arctic Environmental Monitoring, Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP)*. Oslo: Narayana Press; 2012. 30 p.
 8. Andrade F.A.A., Storvold R., Johansen T.A. Autonomous UAV surveillance of a ship's path with MPC for maritime situational awareness. *2017 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*. Miami, FL, USA; 2017. P. 633–639. [https://doi.org/ 10.1109/ICUAS.2017.7991361](https://doi.org/10.1109/ICUAS.2017.7991361)
 9. Бибиков М.Ю., Никитин В.А., Смирнов В.В. Дронная разведка оперативно-ледовой обстановки при движении по Северному морскому пути. *Международный журнал гуманитарных и естественных наук*. 2023;5-1(80):43–49.
Bibikov M.Yu., Nikitin V.A., Smirnov V.V., Ground reconnaissance of the operational-ice situation when moving along the Northern Sea Route. *International Journal of Humanities and Natural Sciences*. 2023;5-1(80):43–49. (In Russ.).
 10. Бузин И.В., Онищенко Д.А. К вопросу применимости и эффективности отдельных элементов системы управления ледовой обстановкой при реализации проектов освоения арктического шельфа. *Арктика: экология и экономика*. 2024;14(2):205–216. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2024-2-205-216>
Buzin I.V., Onishchenko D.A. Issues of applicability and effectiveness of individual elements of the ice management system in the implementation of Arctic shelf development projects. *Arctic: Ecology and Economy*. 2024;14(2):205–216. (In Russ.). [https://doi.org/ 10.25283/2223-4594-2024-2-205-216](https://doi.org/10.25283/2223-4594-2024-2-205-216)
 11. 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;7:5–20. <https://doi.org/10.24411/2658-4255-2019-10071>
Afanasyeva E.V., Alekseeva T.A., Sokolova J.V., Demchev D.M., Chufarova M.S., Bychenkov Yu.D., Devyataev O.S. AARI methodology for sea ice charts composition, *Russian Arctic*. 2019;7:5–20. (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/2658-4255-2019-10071>

СТРАНИЦЫ ИСТОРИИ PAGES OF HISTORY

Оригинальная статья / Original paper

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-4-513-538>

УДК 551.508.8(091)



Первые автоматические метеорологические станции для Арктики

М.А. Емелина✉, В.Ю. Замятин

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

✉maemelina@aari.ru

MAE, 0000-0002-8280-3901; ВЮЗ, 0000-0003-0700-8198

Аннотация. Статья посвящена первым проектам автоматических станций (АМС) для изучения метеорологических условий труднодоступных районов Арктики. Рассматривается история создания П.А. Молчановым опытных образцов АМС, которые испытывались на Памире и в Арктике (на полярных станциях Бухта Тихая и Тикси). Разработка станций прослеживается в связи с планированием исследовательских работ в Арктике по пятилеткам. Приводятся сведения об обсуждениях вопросов использования АМС на заседаниях Ученого совета Всесоюзного арктического института. Описываются основные конструктивные особенности и результаты опытной эксплуатации автоматических метеостанций. Впервые в научный оборот вводятся архивные материалы о проектах и опытных экземплярах станций типа АМ, которые были созданы инженерами ленинградского завода «Метприбор» в середине 1930-х гг. Несмотря на то, что установки не стали серийными, история их создания показывает, как выстраивалась работа, какие цели и задачи ставились перед конструкторами и полярными исследователями, какими средствами они решались. Материал подготовлен на основании документов государственных архивов Санкт-Петербурга, научных фондов ААНИИ и с широким привлечением публикаций 1930-х гг.

Ключевые слова: автоматическая метеостанция, радиометеостанция, радиозонд, исследования атмосферы, П.А. Молчанов, Арктика, Бухта Тихая, Тикси, Всесоюзный арктический институт

Для цитирования: Емелина М.А., Замятин В.Ю. Первые автоматические метеорологические станции для Арктики. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2025;71(4):513–538. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-4-513-538>.

Поступила 28.08.2025

После переработки 09.10.2025

Принята 14.10.2025

© Авторы, 2025

© Authors, 2025

First automatic meteorological stations for the Arctic

Margarita A. Emelina✉, Vladimir Yu. Zamyatin

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

✉maemelina@aari.ru

 MAE, 0000-0002-8280-3901; VYZ, 0000-0003-0700-8198

Abstract. The article examines the history of opening first automatic meteorological stations (AMS) for the Arctic in the Soviet Union in the 1930s, which measured meteorological parameters and transmitted them by radio. The idea of opening the stations belongs to the aerologist P.A. Molchanov. He invented the world's first radiosonde for studying the atmosphere and in 1927 patented its conceptual scheme. In 1928, he proposed using a similar method of transmitting weather data over a distance by radio in the design of a ground-based AMS. Prototypes of the Molchanov AMS system were manufactured and tested as part of the work of the 2nd International Polar Year in the Pamirs and the Tikhaya Bay polar station (Franz Josef Land) in 1933–1934 and were the first in the world. This demonstrated the fundamental possibility of such devices operating in high-altitude and Arctic conditions, despite major testing problems. In 1935–1937, an improved AMS prototype was put into trial operation at the Tiksi polar station. P.A. Molchanov also worked on the creation of a drifting AMS, although these plans could not be realized. To date it has been a practically unknown fact that automatic weather stations were developed in the design department of the Leningrad State Factory of Meteorological Instruments “Metpribor”. Several samples of stationary and parachute AMS were made there in 1934–1936. The documents preserved in the collection of the Arctic and Antarctic Research Institute (AARI) and the state archives of St. Petersburg, periodicals, research literature and a number of other sources made it possible to reconstruct the history of developing and improving the design of the first AMS in our country. Much of the information is provided for the first time.

Keywords: Automatic weather station, radiometric station, radiosonde, atmospheric research, P.A. Molchanov, Arctic, Tikhaya Bay, Tiksi, The Arctic Institute of the USSR

For citation: Emelina M.A., Zamyatin V.Yu. First automatic meteorological stations for the Arctic. *Arctic and Antarctic Research*. 2025;71(4):513–538. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-4-513-538>

Received 28.08.2025

Revised 09.10.2025

Accepted 14.10.2025

Введение

Идеологом автоматизации метеорологических наблюдений в Советском Союзе являлся Павел Александрович Молчанов, с 1919 г. — руководитель Аэрологической обсерватории в Слуцке (ныне — Павловск). В 1923 г. он высказал соображения об использовании радио при исследовании свободной атмосферы и начал разрабатывать прибор, позднее получивший название гребенчатый радиозонд системы Молчанова. Именно этот конструктивный вариант являлся первым советским радиозондом, как неоднократно подчеркивал ученый в своих статьях и книгах, а основные особенности его устройства были намечены уже в 1923–1924 гг. [1, с. 10]. Работа над прибором заняла достаточно длительное время. Пока шла дальнейшая разработка гребенчатого радиозонда, П.А. Молчанов предложил еще одну схему прибора — с записью радиосигналов на хронографе, которую он называл универсальной (сам прибор именовался «радиометеорографом» или «радиозондом с часовым механизмом», позднее — «хронометрическим радиозондом»), и в 1927 г. получил на нее патент. В том же году он выступил с докладом о принципе работы хронометрического радиозонда на Международной конференции в Лейпциге, которая была посвящена исследованию высоких

слоев атмосферы. Первый экземпляр такого прибора был изготовлен в мастерских Аэрологической обсерватории весной 1928 г., а продемонстрирован в июне на Втором конгрессе общества «Аэроарктик» [2, с. 8–9]. Важно отметить, что часовой механизм позволял прибору работать точнее, но вместе с тем усложнял и делал более дорогим его изготовление. Поэтому П.А. Молчанов не считал универсальную конструкцию лучшей, продолжал дорабатывать схему гребенчатого радиозонда. Необходимо отметить, что разработка радиозондов в 1920-е гг. велась и в других странах, в частности во Франции (Р. Бюро) и Германии (П. Дуккерт) [3, с. 272; 4, с. 1]. Принцип действия и конструкция прибора, предложенная советским ученым, оказались все же более подходящими для практики, радиозонды Молчанова активно использовались на полярных станциях. Те же технические решения послужили основой и для первых советских автоматических метеостанций.

Одним из перспективных способов исследования Арктики с середины 1920-х гг. считалось использование летательного аппарата легче воздуха — дирижабля, во время экспедиции на котором можно преодолеть за непродолжительное время значительные расстояния и осуществить широкий спектр наблюдений. В 1924 г. в Германии было создано Международное общество по исследованию Арктики при помощи воздушного корабля «Аэроарктик» (Internationale Studiengesellschaft zur Erforschung der Arktis mit Luftfahrzeugen). Советский Союз присоединился к участию в организации в декабре 1926 г. Тогда в Ленинграде по постановлению Комиссии Совета народных комиссаров (СНК) СССР по содействию работам Академии наук СССР при Институте по изучению Севера (ныне — ААНИИ) была организована советская группа общества. Одним из ее членов стал П.А. Молчанов. 20 мая 1927 г. он вошел в президиум группы¹.

18–23 июня 1928 г. в Ленинграде состоялся Второй конгресс общества «Аэроарктик». В конференции приняли участие ученые Германии, Дании, Италии, Норвегии, СССР, Финляндии и Эстонии. Были выработаны план и научная программа полета на дирижабле над арктическими территориями. На конгрессе широко обсуждались возможности будущих исследований. П.А. Молчанов говорил о необходимости изучения строения атмосферы и размещения холодных воздушных масс в полярных областях. Ученый в своем выступлении предложил использовать радиозонд во время будущего полета дирижабля для исследования распределения метеорологических элементов по высоте и подробно рассказал о конструкции такого прибора. При описании радиотелеграфной связи между летящим зондом и дирижаблем, которая необходима для передачи полученных данных, он указывал, что радиосвязь способна упростить решение еще одной важной задачи — организации получения постоянных сведений с какой-либо точки Арктики о состоянии метеорологических элементов (давления, температуры, влажности и ветра). Для этого, правда, предстояло решить две проблемы: обеспечить прибор энергией и долго работающим часовым механизмом. Возможный вариант решения ученый видел в использовании силы ветра, поэтому предлагал установить небольшой ветряной двигатель для завода часовых механизмов и питания аккумуляторов. Изготовление такой автоматической метеорологической станции потребовало бы «конструкторской работы», но, как подчеркивал П.А. Молчанов, «перспективы применения такой установки... велики, не только в деле ис-

¹ Центральный государственный архив научно-технической документации Санкт-Петербурга (далее — ЦГАНТД СПб). Ф. Р-369. Оп. 1-1. Д. 45. Л. 67.

следования Арктики, но и для других практических вещей», поэтому «опыты в этом направлении, несомненно, представляют большой интерес» [5, с. 58–59]. Таким образом, можно считать, что в выступлении впервые озвучена идея о целесообразности создания автоматической метеостанции (АМС) для Арктики.

В резолюцию конференции, принятую единогласно, было внесено предложение проф. Л. Вейкмана: «Общество “Аэроарктика” с живым интересом ознакомилось с работами проф. Молчанова в области исследования верхних слоев атмосферы. Общество признает эти работы существенно важными, особенно для арктических аэрологических исследований, и просит Советское правительство оказать поддержку этим исследованиям» [6, с. 10].

В данной статье рассматриваются первые шаги по созданию в СССР автоматических метеостанций — от представления идеи устройства на международном конгрессе общества «Аэроарктик», проходившем в Ленинграде в июне 1928 г., до работы опытных образцов в 1930-х гг. в Арктике.

Начало разработки идеи АМС

К сожалению, материалы, связанные с работами проф. П.А. Молчанова, сохранились лишь фрагментарно. Это во многом объясняется тем, что в годы Великой Отечественной войны Слущк был оккупирован немецкими войсками и не весь архив Аэрологической лаборатории (тогда уже института) был эвакуирован. При привлечении других источников нередко приходится уточнять информацию, которая в них приводится. Так, в дни работы конгресса «Аэроарктик» в газете «Известия» была опубликована заметка, в которой указывалось, что профессор П.А. Молчанов продемонстрировал собравшимся изобретенную им «автоматическую полярную станцию на льду», которую изготовили в лаборатории Электротехнического института им. В.И. Ленина². Было бы ошибочным считать это известие сообщением об АМС — так корреспондент представил читателям новость о хронометрическом радиозонде. Конструктивное оформление радиоаппаратуры выполнил видный специалист в области радиотехники проф. И.Г. Фрейман и продемонстрировал ее во время конгресса [7, с. 629]. К воздушной полярной экспедиции на дирижабле предполагалось изготовить серию таких приборов. Только после создания и успешного использования радиозондов можно было приступить к конструкции более сложного устройства АМС, сочетающей в себе ряд метеорологических приборов.

По настоянию ряда представителей общества «Аэроарктик» было принято решение разместить заказ на изготовление хронометрических радиозондов (25 ед.) в немецкой фирме «Аскания». П.А. Молчанов, фотопортрет которого представлен на рис. 1, настаивал на изготовлении части приборов — гребенчатых радиозондов — в мастерских Аэрологической обсерватории в Слущке. Поэтому заказ немецкой стороне был уменьшен до пяти единиц.

П.А. Молчанов продолжал совершенствовать конструкцию гребенчатого радиозонда. Особенно интенсивно работа над ним стала продвигаться с середины 1929 г., так как она получила финансовую поддержку правительственной комиссии³. При этом активизации работ по созданию наземной АМС для Арктики не происходило.

² Известия. 1928. 23 июня. № 144. С. 1.

³ Молчанов П.А. Полярный полет дирижабля «Граф Цеппелин». Аэрометеорологические исследования во время полета // Известия. 1931. 19 сент. № 259. С. 3.



Рис. 1. П.А. Молчанов в рабочем кабинете. 1936 г. [8, с. 75]

Fig. 1. P.A. Molchanov in his study. 1936 [8, p. 75]

Деятельность П.А. Молчанова развивалась в общем направлении исследовательских работ в Арктике. Направления освоения северных окраин страны и изучения морских акваторий и архипелагов были выработаны в 1928–1929 гг. правительственной Арктической комиссией (учреждена 31.07.1928) под руководством заместителя председателя Реввоенсовета СССР С.С. Каменева. Комиссия занималась организационной и финансовой проработкой пятилетнего плана научно-исследовательской работы в Арктике. Ее деятельность привела к созданию «пятилетки Арктики» — директивы, на основе которой «построены производственные частные планы отдельных государственных, общественных, научных учреждений и организаций, ведущих в настоящее время работу по освоению и исследованию арктических владений СССР» [9, с. 116]. Ее главный автор — академик А.Е. Ферсман — выделил пять основных направлений: создание полярных станций, использование ледоколов, развитие арктического воздухоплавания — полетов на дирижаблях и самолетах, изучение Северной Земли⁴.

Хотя обсуждение плана шло более девяти месяцев, в общих чертах он был намечен уже к осени 1928 г. При подготовке к заседанию 12 сентября 1928 г. при Главной геофизической обсерватории (ГГО) по вопросу о выработке плана геофизической службы на Севере была составлена записка. В документе отмечалось: «Исследование Арктики путем стационарных наблюдений, преимущественно геофизических, диктуется как требованиями науки, так и соображениями экономического и политического характера. Все метеорологи теперь согласны в том, что без освещения Арктики сетью постоянно действующих метеорологических станций дальнейшее нормальное развитие практической метеорологии невозможно»⁵.

⁴ Санкт-Петербургский филиал архива Российской академии наук. Ф. 75. Оп. 1. Д. 181. Л. 23–25; Д. 188. Л. 8, 10–13 об., 73.

⁵ Там же. Ф. 47. Оп. 1. Д. 475. Л. 29.

Вместе с тем А.Е. Ферсман в одной из публикаций отмечал: «...необходимо, однако, более широкое исследование и, в первую очередь, более широкое осведомление о метеорологических условиях Арктики. В этом отношении представляет совершенно исключительный интерес изобретенный директором Служки геофизической обсерватории Молчановым прибор, который в течение года работает автоматически, приводимый в действие специальным ветряком. Такой прибор может быть завезен летом в какой-либо недоступный для жилья пункт, оставлен там на год, в течение которого он автоматически через радио будет оповещать об основных элементах погоды. Это замечательное изобретение до сих пор еще не нашло себе полного осуществления, и надо надеяться, что к будущему году прибор будет отстроен и поставлен в одном из районов Полярного океана»⁶.

Первые итоги развертывания сети С.С. Каменев высоко оценил в статье «Новые методы работы», которую опубликовал в октябре 1929 г. в «Известиях»: «... век “авантюристических походов в Арктику” теперь должен отойти в вечность. Арктику теперь уже “открывать” не приходится, ибо она достаточно открыта. Ее надо освоить. <...> Мнение, что метеорология Арктики является “ключом” для понимания и предвидения метеорологических явлений Союза, как будто сейчас получило общее признание. Экспедиции этого года подошли к овладению “ключом” с двух сторон. Со стороны Земли Франца-Иосифа и Врангеля. На обоих островах созданы метеорологические и радиостанции. На них посажены ученые метеорологи и организовано постоянное наблюдение. Достаточно ли сделано? Конечно, недостаточно. “Ключ” еще не будет в наших руках»⁷. Арктическая комиссия также рекомендовала использование радиозонда П.А. Молчанова для изучения верхних слоев атмосферы [10, с. 149].

Во 2-й половине 1920-х гг. ученые разных стран обратились к идее проведения в 1932–1933 гг. Второго Международного полярного года (2-го МПГ). Первое обсуждение задач будущих исследований состоялось и в Советском Союзе. В мае 1929 г. в ГГО под председательством В.Ю. Визе (представитель СССР в Международной комиссии по полярной метеорологии) провели заседание делегатов заинтересованных учреждений, на котором наметили вопросы для желательного обсуждения на предстоящей встрече участников комиссии в рамках рассмотрения идеи проведения 2-го МПГ. Было выработано 12 пунктов. Один из них был связан с АМС: «Признается в высшей степени желательным приступить к испытанию предложенной П.А. Молчановым автоматической метеорологической станции, которая, в случае успешных результатов, могла бы в значительной мере облегчить задачу международного полярного года» [11, с. 44].

В конце 1929 г. Отдел научных учреждений при СНК СССР выделил средства для завершения разработки радиозонда системы Молчанова, а также на конструирование АМС [2, с. 10]. 30 января 1930 г. в Служке состоялись первые успешные испытания гребенчатого радиозонда Молчанова — малогабаритного и легкого автомата кратковременного действия, который передает данные о состоянии атмосферы в течение нескольких часов. Этот первый в мире прибор открыл новую страницу в исследовании свободной атмосферы [12, с. 97–98]. В 1930 г. его конструкция

⁶ Ферсман А.Е. Как мы будем исследовать Арктику // Вечерняя Москва. 1928. 22 нояб. № 271. С. 3.

⁷ Каменев С. Новые методы работы // Известия. 1929. 11 окт. № 235. С. 4.

постоянно улучшалась, состоялось 11 успешных запусков радиозондов, случались и неудачи. В январе 1931 г., в период полярной ночи, была организована экспедиция в село Полярное в районе Мурманска, где 12–16 января были осуществлены первые запуски радиозондов в Арктике. В небо поднялись девять приборов. Работу небольшой экспедиционной группы возглавил П.А. Молчанов.

Радиозонды применялись для исследования верхних слоев атмосферы в ходе состоявшегося летом 1931 г. полета дирижабля «Граф Цеппелин». Состоялись запуски приборов двух типов. В одной из публикаций П.А. Молчанов пояснял: «Первый из них был мною предложен в 1917 г. и принят для полярного полета цеппелина еще на международном конгрессе под председательством Ф. Нансена в Ленинграде в 1928 г.; прибор был построен фирмой “Аскания”, причем детали конструкции разработал д-р Хекк под руководством проф. Вайкмана. Второй прибор, несколько более простой конструкции, построен в Аэрологической обсерватории в Слуцке и применяется нами уже с 1930 г.» [13, с. 222–223]. В Арктике с дирижабля выпущено было четыре радиозонда, из которых три немецких (с часовым механизмом), один — советский (гребенчатый). Все они дали удовлетворительные результаты, т. е. передали радиосигналы о состоянии температуры, максимальная высота подъема составила около 17 км. Но П.А. Молчанов отмечал сложности приема сигналов, неудовлетворительное состояние оболочек; над устранением этих недостатков велись работы в последующие годы [14, с. 29]. Успешное применение радиозондов позволяло вплотную приступить к завершению разработки конструкции АМС — более сложного устройства, действие которого основывалось на том же принципе.

Во 2-й половине сентября 1931 г. в Инсбруке состоялась 2-я сессия Международной комиссии по проведению 2-го МПГ. Здесь поднимался вопрос о возможности применения АМС в предстоящем Полярном году. С докладом выступил проф. Л. Вейкман, который отметил, что подобные станции разрабатываются в СССР проф. П.А. Молчановым для полярных и горных условий, а также в Германии — для морских наблюдений [8, с. 48–49].

Отметим, что в том же сентябре 1931 г. советские газеты сообщали о плане проведения «арктической экспедиции без людей». Идея прорабатывалась во Всесоюзном арктическом институте (ВАИ, так именовался с 1930 г. Институт по изучению Севера). Предполагалось, что будет построен небольшой крепкий бот, на котором укрепят несколько усовершенствованных приборов системы проф. П.А. Молчанова и отправят в свободное плавание в одном из районов Берингова пролива с таким расчетом, чтобы он двигался с запада на восток. Метеорологические приборы, установленные на боте, должны будут в течение года автоматически регистрировать направление и скорость ветра, давление воздуха и т. д. Подробный план экспедиции предстояло выработать к весне 1932 г.⁸ Эта информация была опубликована и в журнале ГГО⁹. В планах экспедиций ВАИ на 1931–1932 гг. сведения о данном проекте найти не удалось. В этих сообщениях прессы отразилась информация о годовом самописце — еще одном устройстве, над которым П.А. Молчанов работал параллельно с созданием АМС.

⁸ Вечерняя Москва. 1931. 14 сент. № 219. С. 1; Известия. 1931. 15 сент. № 255. С. 1.

⁹ Метеорологический вестник. 1931. № 9–12. С. 141.

АМС в планах на 2-ю пятилетку

В 1932 г. при планировании работы ВАИ на 2-ю пятилетку (1933–1937 гг.) в рамках международного сотрудничества предусматривалась организация «автоматической полярной экспедиции для изучения Центрального Арктического бассейна». Проект был масштабным и включал в себя экспедицию к полюсу на ледоколе «Красин» с двумя самолетами на борту, экспедицию через полюс на дирижабле, во время которой организовывались бы «особая партия на плавучем льду» на год для выполнения всесторонних исследований, а также партия «без участия людей», «снаряженная специальными инструментами, в особенности радиозондами»¹⁰. Здесь речь уже шла не только о годовом самописце: дрейфующая АМС в Полярном бассейне упоминалась в документах планового отдела ВАИ. Начало работы станций (их количество не указывалось) намечалось на 1933 г., продолжительность — до 1935 г.¹¹ Как известно, ни одна из этих идей реализована не была.

Составление планов на 2-ю пятилетку в разных учреждениях Советского Союза началось в апреле 1932 г. после выхода постановления СНК СССР от 25 марта об организации данных работ. В ВАИ предложения готовились в подразделениях и затем обсуждались и уточнялись на заседаниях Президиума Ученого совета под председательством директора ВАИ О.Ю. Шмидта. Сохранившиеся документы позволяют понять, какое место при планировании будущих исследований Арктики отводилось АМС, конструкция которой еще создавалась. На заседании 18 мая утвердили дополнения к первоначальному плану. В документе указывалось на необходимость «предусмотреть организацию» автоматических дрейфующих станций, а также поручалось В.Ю. Визе, заместителю директора, составить план работы полярных станций; руководство работами по подготовке общего документа возложили на другого заместителя — Р.Л. Самойловича, а его «монтажку» — на ученого секретаря Н.Ф. Попова¹².

В.Ю. Визе в подготовленном им документе не только затронул вопрос развития сети полярных станций, но и подробно изложил проект «стационарного изучения Полярного бассейна». Он намечал два пути: 1) устройство АМС «на принципе, предложенном проф. П.А. Молчановым»; 2) организацию при помощи мощного дирижабля дрейфующей станции на льдах. Календарный план создания АМС выглядел следующим образом: 1) 1933 г. — разработка проекта и опыты в Ленинграде; 2) 1934 г. — установка экспериментальной «неподвижной станции» на Новой Земле или на Земле Франца-Иосифа; 3) 1935 г. — устройство «опытной дрейфующей автоматической станции и пуск ее на севере Карского моря»; 4) 1936 г. — организация такой же, как в 1935 г., АМС к северу от Новосибирских островов; 5) 1937 г. — размещение дрейфующей АМС в центральной части Полярного бассейна. Дрейфующая станция, «обслуживаемая людьми», должна была организовываться несколько позднее и соотноситься с планом дирижаблестроения¹³.

На заседании 23 июня обсуждался «смонтированный» ученым секретарем «чрезвычайно конкретно, детально и в очень ясной и удобозримой форме» план, в него вносились уточнения. Некоторые поправки были связаны с будущим АМС.

¹⁰ ЦГАНТД СПб. Ф. Р-369. Оп. 1-1. Д. 80. Л. 145.

¹¹ Там же. Д. 65. Л. 1

¹² Там же. Д. 68. Л. 49, 50.

¹³ Там же. Д. 80. Л. 84, 85.

Так, «генеральная экспедиция в Центральный полярный бассейн на ледоколе “Красин”» была утверждена к проведению «за счет специального ассигнования правительства», с этим предложением необходимо было обратиться к руководству страны после окончания рейса ледокольного парохода «А. Сибиряков». Капиталовложения по статье автоматических станций (300 тыс. руб.) следовало перенести с 1933 на 1935 г.¹⁴

3 июля состоялась сессия Ученого совета ВАИ с участием представителей разных учреждений, занимающихся исследованиями и работами в Арктике. Общее обсуждение было направлено на «увязку» планов организаций и выработку общего направления изучения полярного региона во 2-й пятилетке. В своем докладе о плане ВАИ Р.Л. Самойлович рассказал о многих исследованиях и задачах, которые касаются арктических «пределов нашего Союза», вкратце остановился и на «большой комплексной экспедиции» в Полярный бассейн на ледоколе с самолетами, упомянул о трансарктическом перелете и об автоматических станциях, которые «при помощи особых регистрирующих аппаратов» будут способны осуществить метеорологические наблюдения в центре Арктики¹⁵. О внимании к будущим АМС в Гидрометеорологическом институте упомянул в своем выступлении и его представитель А.В. Соколов.

В опубликованной в том же 1932 г. книге, посвященной 2-му МПГ, заместитель директора ВАИ В.Ю. Визе писал об АМС, но при этом рассуждал об оборудовании станции другим типом передатчика: «По-видимому, на выдвинутом П.А. Молчановым принципе в будущем представится возможность устраивать автоматические станции и на льдах Полярного бассейна, куда станции можно будет завозить на самолетах или дирижаблях. В отличие от радиозонда и горной станции (действовали на коротких волнах. — *Авт.*), автоматическая станция на дрейфующих льдах должна будет иметь длинноволновую радиоустановку, так как радиопеленгование на коротких волнах невозможно. Пеленгование же автоматической станции, находящейся на движущихся льдах, необходимо для определения ее местоположения, ибо наблюдения, произведенные в неизвестном месте, цены не имеют. Снабжение автоматической станции длинноволновой радиоустановкой, конечно, весьма осложняет вопрос устройства такой станции, но эта задача не является неразрешимой» [15, с. 52]. В целом в книге об АМС, как о радиозондах, сказано немного; основное внимание уделяется развертыванию сети полярных станций, которые необходимы для развития арктического мореплавания, воздушных трасс (полетов на самолетах и дирижаблях), трансарктических перелетов, а также должны стать опорными пунктами освоения и культурными центрами Арктики.

Первые АМС системы Молчанова

Создание первых образцов АМС относится к 1933 г. Их испытания проходили по программам 2-го МПГ в 1933–1934 гг. В печати планы на 1933 г. в отношении станций озвучивались весьма оптимистично: «В этом году подобного рода автоматические метеостанции будут испытаны: одна — на Памире, другая — на Эльбурсе и третья — на земле им. Визе (имеется в виду о. Визе в Карском море. — *Авт.*). Механизм этих воздушных станций рассчитан так, что лампы радиопередатчика автоматически сменяют друг друга, когда какая-нибудь выйдет из строя. Механизм не

¹⁴ ЦГАНТД СПб. Ф. Р-369. Оп. 1-1. Д. 68. Л. 66 об., 67.

¹⁵ Там же. Л. 75 об.–76.

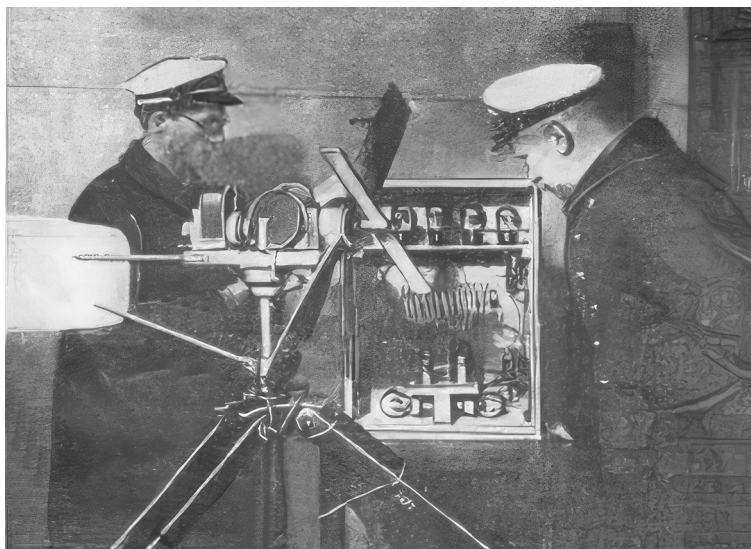


Рис. 2. Специалисты ВАИ принимают экземпляр АМС для Арктики в мастерской НИАИ. Фото А.Я. Сэккэ. Из журнала «Радиофронт», 1933 г., № 11

Fig. 2. Scientists of the Arctic Institute receive a copy of the AMS for the Arctic in the workshop of the Scientific Research Aero Institute. Photo by A.J. Sekke. "Radiofront", 1933, No. 11

боится холода. Единственное слабое место — пропеллер, который может оледенеть. Изобретательская мысль проявила большую смелость: шар решено сделать зрячим! Шар должен видеть и виденное передавать на базу. Фантазия? Отнюдь нет. И проф. Молчанов сообщает, что автоматическая станция, снабженная фотоэлементом, точно даст знать, когда шар будет над белыми льдами или темной водой!»¹⁶.

Журналист, вероятно, побывал на весенней сессии Ученого совета ВАИ, где 20 мая с большим докладом об аэрологических исследованиях в Арктике выступал проф. П.А. Молчанов. В своем сообщении он рассказал об АМС упрощенного типа для Памира и, возможно, для о. Визе, а также о продолжении работ по более сложным АМС (которые смогут собирать данные еще и о давлении, влажности, видимости района). Он перечислил сложности, с которыми столкнулись ученые при создании первых АМС: получение энергии, обеспечение долгого времени работы, предотвращение обледенения пропеллера, передача сигналов станцией и прием сигналов от нее, пеленгование АМС. Ученый констатировал, что уже есть детальные чертежи устройства, найдены пути решения многих вопросов, но, конечно, необходима будет доработка АМС после изготовления и опытной работы первых образцов. В прениях он также упомянул, что средств на разработку станции не было; имелось предложение от Международного комитета 2-го МПГ о выделении финансирования, но получить его оказалось невозможным¹⁷. Геолог Н.Н. Урванцев затронул вопрос о защите АМС от белых медведей, которые способны повредить станцию. П.А. Молчанов вынужден был согласиться с тем, что эта проблема еще ждет своего разрешения. В итоговом слове директор ВАИ

¹⁶ Э. Ф. Зондируем Арктику // Вечерняя Москва. 1933. 31 мая. № 123. С. 3.

¹⁷ ЦГАНТД СПб. Ф. Р-369. Оп. 1-1. Д. 86. Л. 180 об.—181, 184.

Р.Л. Самойлович подчеркнул важность разработки конструкции АМС для Арктики и предложил вынести постановление о выделении необходимых ассигнований для «постройки такой станции к будущему году»¹⁸. На практике это получилось быстрее.

Два опытных экземпляра АМС изготовили в мастерской Научно-исследовательского аэро-института (НИАИ) в Ленинграде уже весной — летом 1933 г: один — для Памира, второй — для Арктики¹⁹. Мастерская института была выбрана неслучайно: Павел Александрович работал в НИАИ по совместительству с момента его создания в 1930 г. На рис. 2 показано, как станцию принимают специалисты ВАИ.

Испытания опытной АМС на Памире в 1933–1934 гг.

Кроме основных работ в советском секторе Арктики, программа 2-го МПГ предусматривала исследование «белых пятен» высокогорных оледенений, находившихся далеко от арктических районов. В Советском Союзе к ним относили ледники Памира, Тянь-Шаня, Кавказа, Северного Урала и Алтая. Во все эти области также решили отправить экспедиции 2-го МПГ. Для нас интерес представляют работы на Памире, т. к. именно там испытывалась АМС. Исследования по программе 2-го МПГ выполнялись в рамках Таджикской комплексной экспедиции (начальник — известный ученый и государственный деятель Николай Петрович Горбунов), основной задачей которой являлось изучение природных богатств и производительных сил Таджикистана. В 1932 г. отряды экспедиции вели геологические исследования, наблюдения по гляциологии, гидрологии и метеорологии на Памире, основали несколько высокогорных метеорологических станций, а также гидро-гляциометеорологическую обсерваторию на леднике Федченко на высоте 4300 м над уровнем моря (высочайшую в мире). Ее создание стало значимым мероприятием экспедиции. Работы по плану 2-го МПГ продолжились в 1933 г. и были шире, в частности, предусматривалась установка на перевале хребта Академии наук АМС, «которые дополняли бы наблюдения обсерватории». Правительство СССР (организатором экспедиции являлся СНК СССР) поручило экспедиции совершить восхождение на пик Сталина и «установить эти приборы на возможно большей высоте» [16, с. 14].

В конце августа — начале сентября 1933 г. отряд экспедиции, в составе которого была группа альпинистов, под руководством Н.П. Горбунова в сложнейших условиях совершил восхождение и 3 сентября покорил пик (7495 м). Перед этим (30 августа) на площадке, где был разбит лагерь, участники отряда установили автоматическую радиометеостанцию. Во время спуска 7 сентября было найдено подходящее место для постановки другого автоматического прибора конструкции П.А. Молчанова — годового самописца. Драматические подробности восхождения были описаны корреспондентом М.Д. Роммом, также принимавшим участие в подъеме [17]. В печати о покорении вершины сообщалось следующим образом: «На имя Комитета второго международного полярного года и Гидрокомитета получена телеграмма: “На пике Сталина установлена автоматическая метеорологическая станция системы проф. Молчанова на высоте 6.850 метров и сложный годовой самопишущий прибор на высоте 5.600 метров. Горбунов”. Это высочайшая и первая в мире автоматическая метеорологическая станция»²⁰.

¹⁸ ЦГАНТД СПб. Ф. Р-369. Оп. 1-1. Д. 86. Л. 184 об.

¹⁹ Советская автоматическая радиостанция // Радиофронт. 1933. № 11. С. 11.

²⁰ Вечерняя Москва. 1933. 17 сент. № 214. С. 1.

В отчете о работах Таджико-Памирской экспедиции отмечалось, что установка приборов позволила создать «густую, хотя бы и временную сеть наблюдений с двумя постоянно работающими станциями» и одной «автоматической станцией и самописцем», что являлось «первыми в мире работами такого рода» [16, с. 412]. Следует отметить, что в литературе установка этих приборов на Памире ошибочно трактуется как постройка двух автоматических радиометеостанций [12, с. 104; 17, с. 19]. На самом деле здесь и в Арктике, как это будет показано ниже, установили по одному экземпляру АМС и годового самописца.

Сведения о результатах работы АМС в упомянутом отчете о Таджико-Памирской экспедиции не приводятся. И, по всей видимости, она проработала недолго. П.А. Молчанов на сессии Ученого совета ВАИ 23 декабря 1933 г. указывал, что станция «имела ряд недостатков», но «первый опыт изготовления» был «вполне оправдан»²¹.

В 1934 г. в Таджикистан отправили новую экспедицию. Один из ее отрядов (начальник — альпинист А.Ф. Гетье, радиоинженер В.Г. Маслаев и др.) совершил восхождение на пик Сталина — предстояло заменить приборы первой метеостанции и на одной из вершин установить новую АМС, которая «будет не только записывать атмосферные явления, но и “рассказывать о погоде” по радио при помощи особых сигналов»²². В газетах сообщалось о выполнении задачи: «Наши рюкзаки помимо альпинистского снаряжения и запаса провианта содержали в себе и части автоматических метеостанций. С тяжелой поклажей за плечами мы взбирались по крутым и скользким склонам. <...> Пробившись через снег и бураны, мы установили радиостанции одну на Заалайском хребте на скалистой вершине высотой в 5.300 метров, другую — на верховьях ледника Федченко на вершине Дервазского хребта высотой в 5.200 метров. Станции включены в работу. Центральный меткомитет теперь ежедневно получает сводки о погоде с вершин Памира»²³.

По-видимому, корреспонденты по-своему интерпретировали известия об автоматических метеостанциях. Можно предположить, что речь шла об обслуживании годового самописца и ремонте автоматической радиометстанции, установленных в 1933 г., также выполнялась их переустановка. П.А. Молчанов в одной из статей указывал, что в горах АМС пришлось разобрать, а «после сборки в походных условиях она отказалась работать»²⁴. Том «Трудов» экспедиции за 1934 г. повествует, главным образом, о геологических изысканиях, о работе высокогорного отряда в книге не упоминается [18].

Опытная работа АМС в Бухте Тихой в 1933–1934 гг.

Судьба АМС, которую отправили в обсерваторию Бухта Тихая на о. Гукера (Земля Франца-Иосифа), тоже была непростой. В 1933–1934 гг. здесь работала пятая смена зимовщиков под руководством Антона Наумовича Мотненко. Полярники и грузы прибыли к месту зимовки в сентябре 1933 г. на ледокольном пароходе «Таймыр». Установить АМС и годовой самописец системы Молчанова, оценить

²¹ ЦГАНТД СПб. Ф. Р-369. Оп. 1-1. Д. 87. Л. 94.

²² «Рассказ о погоде» с пика Сталина // Вечерняя Москва. 1934. 21 мая. № 115. С. 3; Из Москвы выезжает высокогорный отряд Таджико-Памирской экспедиции // Известия. 1934. 27 июля. № 173. С. 4.

²³ Штурм крыши мира // Вечерняя Москва. 1934. 15 нояб. № 262. С. 2.

²⁴ Автоматические метстанции. Метеорологический вестник. 1935. № 3–4. С. 77.

первый опыт работы устройств в Арктике предстояло старшему аэрологу Сергею Ильичу Соколову и аэрологу В.К. Чаплину. В характеристике С.И. Соколова указывалось, что он, высококвалифицированный специалист и «один из ближайших помощников проф. Молчанова», проявил «исключительное упорство» и «сумел перевыполнить задания по работам, впервые проводимым в условиях Арктики»²⁵. Шар-пилотные наблюдения и запуски радиозондов (41 выпуск) в Тихой широко проводились в предыдущую смену 1932–1933 гг. С.И. Соколов со своим помощником выпустили 48 радиозондов (из 50 по плану), а также осуществили 303 запуска шаров-пилотов (в т. ч. 112 в течение полярной ночи)²⁶.

Зимовка оказалась сложной. Вахта началась с эпидемии гриппа, при этом состояние всех больных (13 человек из 20 участников смены, в т.ч. аэрологи) было крайне тяжелым: ни один из них не мог сидеть, все страдали от отеков, боли в ногах и кожных высыпаний, озноба, часто жаловались на головные боли. Болезнь мешала заболевшим выполнять свои обязанности в течение 2–3 месяцев; к счастью, все выжили. Личностные взаимоотношения тоже складывались непросто, что было связано с жестким стилем начальника зимовки А.М. Мотненко, который требовал неукоснительного соблюдения всех правил распорядка, бдительно осуществлял партийное руководство [19, с. 98–101]. Эти обстоятельства сказались и на результатах научных наблюдений. В своем отчете А.Н. Мотненко указывал: «Аэрологу Соколову пришлось неоднократно получать телеграммы от проф. Молчанова с укорами за медленные темпы работы, как раз в то время, когда Соколов боролся между жизнью и смертью. При первой же возможности Соколов лихорадочной деятельностью сумел свою программу не только выполнить, но и перевыполнить»²⁷.

Устройство опытного образца АМС системы Молчанова, испытывавшегося в Тихой, подробно описывалось С.И. Соколовым в отчете о зимовке и в статье, опубликованной в журнале «Советская Арктика». Сам Павел Александрович говорил о том, что эта станция, в отличие от первой, памирской, «была значительно более совершенна»²⁸. Станция состояла из трех частей: 1) основной блок: электрический генератор, приводимый в действие небольшим деревянным двухлопастным пропеллером, который одновременно являлся приемником скорости ветра, и датчик температуры (биметаллическая пластина); 2) металлический ящик с помещенным в нем коротковолновым ламповым радиопередатчиком мощностью 1 Вт; 3) антенно-мачтовое устройство: две мачты — деревянные столбы (высотой 6 м), на которых подвешены антенна и противовес. Для увеличения срока автономной работы АМС только две из четырех пар радиоламп передатчика задействовались одновременно. При средней скорости ветра пара работающих ламп менялась через каждые полчаса. Это должно было обеспечить непрерывность работы в течение года. Сами приборы станции были помещены в кожух, которому придали обтекаемую форму, способную защитить механизмы от проникновения осадков. Позади кожуха крепилось хвостовое оперение, устанавливающее станцию пропеллером против ветра [20, с. 31]. Схема устройства АМС в бухте Тихой представлена на рис. 3. Можно предположить, что

²⁵ Фонды ААНИИ. Д. О-405. Л. 18.

²⁶ Там же. Д. 1771. Л. 14, 18.

²⁷ Там же. Л. 5.

²⁸ ЦГАНТД СПб. Ф. Р-369. Оп. 1-1. Д. 87. Л. 94.

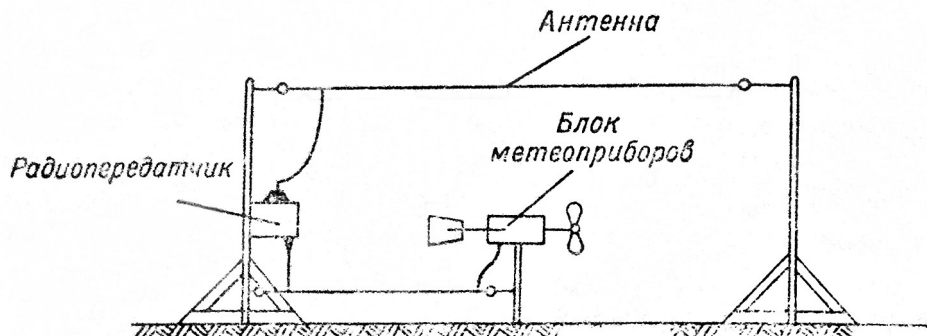


Рис. 3. Схема AMS системы Молчанова [21, с. 10]

Fig. 3. The scheme of the Molchanov AMS system [21, p. 10]

конструкция станции заметно отличалась антенно-мачтовым устройством от AMS на Памире, где установить 6-метровые мачты было проблематично.

Скорость ветра и температура воздуха для передачи кодировались время-импульсным методом, направление — кодово-импульсным. Станция начинала работать при скорости ветра около 7 м/с [12, с. 103–104].

Работы по установке AMS в Тихой начали 11 ноября 1933 г. При распаковке станции оказалось, что все металлические части за время морского перехода сильно окислились, а один из контактов распаялся. Затем прошел месяц, когда в период активной фазы болезни зимовщиков большинство работ в обсерватории были прерваны. После 15 декабря жизнь стала приходить в норму, в том числе продолжилась наладка AMS — помимо чистки и смазки понадобилось срезать выдающийся из корпуса и задерживающий вращение шестеренки винт. 20 числа AMS была установлена на площадке крыши дома № 1 (большой жилой дом, в котором также располагались столовая (кают-компания) и кухня). Затем еще два дня ушло на настройку радиопередатчика, разместившегося в доме. 22 декабря AMS начала работать. Выяснилось, что ее сигналы даже при выключении передатчика создают помехи для приборов в радиорубке. Настройка радиопередатчика продолжилась, к ней привлекли магнитолога М.А. Чистова и геофизика Н.С. Хутина. Оказалось, что принимаемые сигналы неразборчивы, поэтому установку разобрали. Осмотр показал, что внутрь кожуха AMS забился снег, некоторые контакты нарушились, несколько проводничков нуждались в спайке. Все эти недочеты не позволяли станции работать²⁹. После устранения дефектов AMS собрали и установили (10 февраля), 15 февраля 1934 г. начался прием сигналов. С.И. Соколов записал в отчете: «15 минут приема достаточно, чтобы определить скорость ветра и направление его по 16 румбам и положение контакта температуры»³⁰. Последовала тарировка станции, которую в марте планировалось перенести на плато.

Однако 12 марта (в паспорте станции указана дата 20 марта) сигнал в условиях сильного ветра (25 м/с) начал подаваться непрерывно. У AMS скрутило спираль и сорвало тормоза, был поврежден пропеллер, а также замкнуло проводку. Станцию

²⁹ Фонды ААНИИ. Д. 1771. Л. 32–33.

³⁰ Там же. Л. 34.



Рис. 4. Работы по установке АМС на плато близ полярной станции Бухта Тихая. 12 июня 1934 г.: а) установка блока метеоприборов АМС; б) монтаж радиопередатчика АМС. Фото М.А. Чистова. Фонды ААНИИ

Fig. 4. The installation of AMS on the plateau near the Tikhaya Bay polar station. June 12, 1934: а) installation of the AMS weather instrument; б) installation of the AMS radio transmitter. Photo by M.A. Chistov. AARI Funds

снова пришлось снять и разобрать. Внутри также оказался снег, попавший под кожух. 8 апреля станция возобновила работу, но это продолжалось недолго — после трех серий опять начался непрерывный сигнал. В течение двух месяцев С.И. Соколов пытался обнаружить дефект и исправить его. Только снятие «изолировочной массы» при очередной разборке показало, что пространство между проводниками заполнила вода. После просушки аэролог залил проводники парафином, затем снова собрал и установил станцию — она наконец работала удовлетворительно³¹.

Таким образом, перенести АМС на плато и продолжить испытания на удалении от приемного устройства оказалось возможным только в начале лета — почти на три месяца позже, чем планировалось. В первых числах июня на плато С.И. Соколов и В.К. Чаплин, проявивший «не свойственную ему активность» (собрал и выковал недостающие скобы, разыскал нужные гвозди, помог механику изготовить хомутик для верхушки мачты), установили мачту и столб для укрепления передатчика, натянули антенну и противовес. 12 июня они при помощи каюра Б.Ф. Синева и гидрометеоролога С.К. Безбородова установили там же деревянный брус со штырем для основания прибора, АМС, передатчик³². В отчете о работе специалистов Бухты Тихой по аэрологии за 1929–1934 гг. сохранились фотографии процесса установки АМС, они представлены на рис. 4.

К сожалению, хотя АМС работала, прием сигналов был неудовлетворительным из-за низкого напряжения тока от генератора при слабых ветрах и плохой настройки передатчика, а также попадания воды в автоматический переключатель станции. С.И. Соколов вынужден был констатировать слабость достигнутых результатов, неоправданность надежд на прибор. Причины сложившейся ситуации он выделил две: 1) неопытность в установке такой станции, усиленная «абсолютной невозможностью даже беглого ознакомления с прибором в процессе его приемки»; 2) ряд

³¹ Фонды ААНИИ. Д. 1771. Л. 35; Д. 3316. Л. 23 об.

³² Там же. Л. 36.

технических несовершенств и неполадок, на устранение которых уходило много времени. Завершался отчет практическими рекомендациями (13 пунктов) для тех, кому «выпадет честь создать подобные станции, по идее и простоте конструкции должныствующие, безусловно, выполнить предъявляемые требования»³³. Следует добавить, что исследователю действительно приходилось много трудиться над тем, чтобы добиться работоспособности станции. Подобные операции ему приходилось осуществлять и с настройкой годового самописца, который также изготовили в мастерской НИАИ и передали экспедиции непосредственно перед стартом.

Других сведений о работе АМС в 1933–1934 гг. в отчете не приводится. Не сообщается и о ее судьбе. Так как упомянуто о неудовлетворительной работе станции летом 1934 г., можно сделать вывод о том, что далее она была прекращена. Устройство, возможно, вывезли на Большую землю, но могли и оставить в Тихой, учитывая все его повреждения. В отчете аэрологов следующей смены (старший аэролог В.В. Теплень) говорилось о «более расширенной программе» 1934–1935 гг., внедрении новых методов и перестройке всей работы, так как «была слишком неудовлетворительная организация дела прошлой зимовкой», при этом об АМС не упоминалось³⁴. В печати тем не менее сообщалось о том, что автоматическая станция с Земли Франца-Иосифа «бесперебойно передает по радио сведения о температуре воздуха, скорости и направлении ветра», а в мастерских НИАИ изготавливается усовершенствованная АМС, которую установят для испытаний в аэропорту Ленинграда, чтобы пилоты, приближаясь к воздушной гавани, получали оперативные данные³⁵. О новой АМС писали и в журнале «Климат и погода»: «В настоящее время закончена проектированием и сдана в производство аналогичная станция, передающая по радио скорость и направление ветра, температуру, влажность, давление и температуру зачерненного термометра, выставленную наружу (для характеристики состояния облачности). <...> Станция назначается для обслуживания воздушных линий»³⁶. При изготовлении новых образцов АМС учитывались сообщения С.И. Соколова о работе станции в Тихой. Стоимость усовершенствованных станций возросла с 8 тыс. руб. до 12 тыс. руб.³⁷

О завершении работы над этой новой АМС, которая даже «может быть использована для сигнализации об угрозе наводнений», сообщалось в начале следующего года³⁸. П.А. Молчанов пояснял, что в мастерских НИАИ создаются два типа станций — большая АМС «для обслуживания воздушных линий», которая способна передавать метеоданные и сведения об уровне воды, и АМС для Арктики (усовершенствованные экземпляры № 3 и № 4)³⁹. Ученый также указывал, что вопрос о передаче данных по радио вполне разрешен, а станции, подобные его АМС для аэропорта, создаются и в других организациях. Арктическая АМС (станция в Тихой), отмечал он в другой публикации, работала «удовлетворительно и может быть использована для метеорологической службы в полярных условиях» [22, с. 89].

³³ Фонды ААНИИ. Д. 1771. Л. 37–38.

³⁴ Там же. Д. 1774. Л. 58.

³⁵ Автоматические станции по изучению атмосферы // Радиофронт. 1934. № 9–10. С. 2.

³⁶ Почтовый ящик // Климат и погода. 1934. № 1 (52).

³⁷ ЦГАНТД СПб. Ф. Р-369. Оп. 1-1. Д. 126. Л. 147.

³⁸ Автоматическая метеорологическая станция // Наука и техника. 1935. № 2. С. 12.

³⁹ Автоматические метстанции // Метеорологический вестник. 1935. № 3–4. С. 77–78.

В апреле 1935 г. в Ленинграде прошла юбилейная сессия Ученого совета ВАИ, приуроченная к 15-летию института. На ней 17 апреля с докладом об АМС выступил С.И. Соколов. Он сказал, что станция «показала себя с удовлетворительной стороны», но приходилось «вести все время непрерывную борьбу» с неполадками, поэтому «прием сигналов производился в сравнительно короткие промежутки времени»; данные по ветру АМС показывала хорошо, а «изменения температуры мы определить не могли»; удалось «проследить работу станции при условиях оледенения», а дальность слышимости передатчика АМС была оценена лишь примерно — в 100–150 км⁴⁰. В тезисы доклада было вынесено три положения: 1) основная конструктивная особенность АМС и самописца — обеспечение непрерывной годовой работы в труднодоступных местностях Арктики; 2) техническое решение опытных образцов не обеспечило защиту внутренних элементов, поэтому приборы «не вполне отвечали поставленным требованиям»; 3) необходимо устранить технические недостатки приборов и увеличить радиус действия АМС до 200 км⁴¹. Председатель заседания заместитель директора ВАИ В.Ю. Визе отмечал, что «не подлежит сомнению», идея П.А. Молчанова использовать АМС для изучения Арктики «принесет громадную пользу», несмотря на первые неудачи: «Тот, первый опыт, о котором мы слышали, далеко не бесполезен, потому что он сразу же указал на целый ряд недостатков, которые при конструировании следующего прибора будут приняты во внимание»⁴². В итоговую резолюцию внесли постановление: «Несмотря на неудовлетворительные результаты испытания автоматической станции первой опытной установки на ЗФИ, сессия считает необходимым продолжать работу по конструированию автоматических радиометеостанций, обратив особое внимание на увеличение ее радиуса действия, а также на необходимость испытания ее в условиях средних широт»⁴³. При этом говорилось о необходимости предварительных испытаний сконструированных приборов в Слуцке — т. е. до того, как они будут направлены в Арктику или на Памир, как это произошло с первыми образцами. В это время автоматические станции начинают именоваться автоматическими радиометеостанциями (АРМС), в документах четче прослеживается различие между этими приборами и годовыми самописцами.

Позже в печати появилась обстоятельная статья С.И. Соколова о работе АМС в Тихой. В этой публикации станция в целом получила весьма хорошую оценку. Исследователь охарактеризовал устройство, его принцип действия, упомянул о недостатках и сложностях, но не описывал их слишком подробно, как это было, например, в его отчете или в докладе на сессии. Он подчеркивал положительные моменты. Так, он отмечал, что «сличение данных приема ветра» с показаниями метеорологических установок «дало полное совпадение», «чувствительность приемника температуры» станции «была рассчитана на возможность определять изменения температуры с точностью около одного градуса», «обледенение ни разу не остановило работу станции», а опыт «указал, во-первых, на необходимость ряда технических улучшений, во-вторых — на возможность применения установок подобного типа для облегчения изучения метеорологического режима Арктики» [20, с. 33].

⁴⁰ ЦГАНТД СПб. Ф. Р-369. Оп. 1-1. Д. 126. Л. 143–144.

⁴¹ Там же. Д. 127. Л. 88.

⁴² Там же. Д. 126. Л. 147 и об.

⁴³ Там же. Л. 168.

АМС конструкции завода «Метприбор»

В 1934–1936 гг. несколько типов АМС, предназначенных для измерения и передачи по радио основных метеорологических элементов (температуры, влажности, давления воздуха, скорости ветра), разработали и изготовили на Ленинградском государственном заводе метеорологических приборов «Метприбор», который с 1931 г. подчинялся ВОТИ — Всесоюзному объединению точной индустрии ВСНХ (с 1932 г. — Наркомат тяжелой промышленности) СССР. Они получили индекс «АМ» — «автоматическая метеостанция». Их конструкция признавалась более надежной по сравнению с приборами П.А. Молчанова, но и она не обеспечивала длительной работы станции [12, с. 165].

Станция стационарного типа обозначалась в документах по-разному: АМ-1, АМС-1 или АРМС-1. Она разрабатывалась специалистами конструкторского бюро завода под руководством ведущего инженера А.М. Неусыпина. Радиоаппаратура создавалась в Центральной военно-индустриальной радиолaborатории им. М.В. Фрунзе (ЦВИРЛ) в г. Горьком. Радиопередатчик типа «Барс» конструкции завода им. С. Орджоникидзе имел диапазон 50–75 м, мощность — 2–3 Вт. Два аккумулятора типа З-СТ-IV на 60 А и 6 В каждый гарантировали 20-дневную работу станции без подзарядки, а при температуре минус 55 °С и полном безветрии по расчетным данным АМ-1 была обеспечена питанием на 5 суток. Она должна была работать без обслуживающего персонала в течение 12 мес., передавать ежедневно 6 сводок длительностью по 3 мин, иметь дальность действия до 500 км. Мачты станции имели высоту 2,5 м⁴⁴.

В прессе заметка об этой станции появилась уже осенью 1934 г.: «Завод “Метприбор” к VII Съезду Советов выпускает метеорологическую станцию, автоматически передающую по радио о силе и направлении ветра, а также о давлении и температуре воздуха. Станция оборудуется специальными приборами, которые одновременно с радиосигналами записывают все показания приборов на ленту. Автоматическая метеорологическая радиостанция может быть применена для работы в Арктике, в высокогорных районах и в отдаленных местностях»⁴⁵. В январе следующего года сообщалось о готовности станции и указывалось, что ее «приборы, поставленные за несколько километров, в определенные часы, автоматически, позывными сигналами вызовут метеоролога-наблюдателя к радиоприемнику и трехкратно повторят ему свои показания»⁴⁶.

К лету 1936 г. проектирование этой станции было закончено, все заводские испытания проведены. Изготовленные четыре экземпляра АМ-1 передали заинтересованным организациям: в НИИ специальных служб Главного управления Гражданского воздушного флота (1 шт.), в Центральное управление Единой гидрометеорологической службы СССР (2 шт.), в Арктикснаб (1 шт.)⁴⁷. В июне в разных районах Подмосковья проводились полевые испытания слышимости АМ-1, которые показали возможность круглосуточного приема радиосигналов станции на расстоянии 200 и 300 км.

⁴⁴ Центральный государственный архив Санкт-Петербурга (далее — ЦГА СПб). Ф. Р-1572. Оп. 7. Д. 75. Л. 29, 32, 34.

⁴⁵ Автоматическая радиостанция // Правда. 1934. 27 окт. № 297. С. 3.

⁴⁶ Метеоролог-автомат // Известия. 1935. 26 янв. № 21. С. 6.

⁴⁷ ЦГА СПб. Ф. Р-1572. Оп. 7. Д. 75. Л. 32.

Но на большем расстоянии (500 км) прием почти заглушался сигналами от других радиопередатчиков⁴⁸. Далее в 1936 г. планировалось осуществлять длительные эксплуатационные испытания АМ-1.

Станция парашютного типа АМ-2 / АМС-2 / АРМС-2 предназначалась для передачи метеосводок «с недоступных территорий». Ее заказчиком являлся Научно-технический институт РККА. Опытный образец станции изготовили к июню 1936 г. Радиоаппаратуру для нее также сконструировали в ЦВИРЛе: передатчик типа «Скорпион» завода им. С. Орджоникидзе мощностью 0,5 Вт в антенне, которая представляет собой горизонтальный ус длиной 15 м. Станция должна была передавать сводки через коротковолновую радию каждые 4 часа. Помимо традиционных метеоданных имелся еще один параметр, о котором сообщала АМ-2, — положение станции относительно магнитного меридиана. Поэтому она оборудовалась компасом, который располагался в отдельном футляре и крепился на карданном подвесе внутри или снаружи амортизированного кожуха общего блока. Питание станции производилось двумя аккумуляторами напряжением по 12 В. АМ-2 сбрасывали с самолета, при этом раскрывался парашют станции; после приземления откреплялся шпагат, фиксирующий антенну, которая, соответственно, разворачивалась. Перед сбросом станцию обязательно надлежало проверить и подготовить к работе. Для этого следовало снять кожух, убедиться визуально в комплектности приборов, произвести подключение к автометеочасти электропроводов от всех отдельных агрегатов. Затем нужно было привести станцию в действие нажатием кнопки на передней стенке автометеочасти, после чего она начинала автоматически включаться каждые 15 мин — так наступал режим проверки ее работоспособности. После окончания тестового периода следовало снять с кнопки арретир для начала обычной работы (включения раз в 4 часа) и завести часовой механизм для установки времени передачи⁴⁹. Таким образом, данный тип станции имел в своем устройстве хронограф, а для начала ее работы был необходим специалист, который бы привел ее в действие перед сбросом.

Испытаниям АМ-2 предшествовали опытные сбросы с самолета Р-5 макета станции, подвешенного под воздушной машиной. Парашют укладывался в брезентовый мешок, который привязывали веревкой длиной 15 м к самолету. Во время падения станция собственной тяжестью вытягивала из мешка парашют, и он раскрывался. Семь сбросов показали, что сложная задача, поставленная перед конструкторами, вполне разрешена, станция приземляется в большинстве случаев вертикально, парашют не волочит ее по земле, антенна разворачивается. Затем специалистами Научно-технического института РККА и завода «Метприбор» проводились испытания образца прибора (20 сбросов), который был больше по своим размерам, чем макет. В начале июня 1936 г. последовали заводские испытания с метеоприборами. В целом они были положительными, т. к. станция после сброса начинала свою работу. По результатам испытаний сразу же вносились улучшения в конструкцию и крепления отдельных узлов. Проверка слышимости сигналов в июне–июле того же года дала лишь удовлетворительные результаты: на 200 км — с помехами, на 300 км — хорошая на всех волнах, на 500 км — не было слышно⁵⁰.

⁴⁸ ЦГА СПб. Ф. Р-1572. Оп. 7. Д. 75. Л. 65.

⁴⁹ Там же. Д. 74. Л. 2, 4, 11, 17, 28–29, 44.

⁵⁰ Там же. Л. 42, 43, 44 и об., 65–70.



Рис. 5. Крепление ящика с «Кометой» в нижней части самолета перед проведением испытаний по сбрасыванию станции. Сентябрь 1936 г. Рассекречено. ЦГА СПб

Fig. 5. Fixing the box with the “Comet” in the lower part of the aircraft before conducting tests on dropping the station. September 1936. Declassified document. Central State Archive of Saint Petersburg

Совет Труда и Обороны 15 июля 1936 г. издал постановление за № ОК-166сс, в котором говорилось о важности создания парашютной АРМС. В августе работы по «телемеханическим объектам» и АМ-2 были засекречены, станции присваивалось название «Комета»⁵¹. В это же время были составлены тактико-технические требования к уничтожению парашюта в момент приземления. Требовалось, чтобы парашют автоматически отцепился и уничтожился без участия человека, не оставляя демаскирующих следов, за счет пропитывания его ткани особым составом. Договор на опытный заказ «Метприбор» заключил с Экспериментальным парашютно-десантным бюро Главного управления авиационной промышленности⁵². Необходимо добавить, что была доработана конструкция по сбрасыванию прибора. Образец «Кометы» помещался в фанерный ящик-кассету, установленный на самолете Р-5 снизу между шасси на подфюзеляжных балках. Это показано на рис. 5. В ящике он крепился на замки с предохранителем, соединенные с тросами, один из которых шел к бомбосбрасывателю, другой — в кабину летчика-наблюдателя.

Во второй половине сентября 1936 г. начались государственные испытания «Кометы». Было осуществлено 10 сбросов станции с самолета Р-5, стоящего на земле. Затем состоялись шесть полетов, в ходе первого из которых сбрасывания не произошло из-за заклинивания корпуса станции в ящике, во втором — по метеоусловиям. Следующие три попытки показали хорошие результаты, при этом во время пятого полета осуществили сброс станции со всеми приборами с высоты 300 м. «Комета» принимала на земле правильное положение, как показано на рис. 6. Но 9 октября во время очередного испытания на дальность действия «Комета» разбилась, т. к. из-за удара кольцом троса по предохранителю станция отделилась от парашюта.

⁵¹ ЦГА СПб. Ф. Р-1572. Оп. 7. Д. 74. Л. 84, 106.

⁵² Там же. Л. 61 и об., 86.



Рис. 6. «Комета» после одного из удачных сбросов. Сентябрь 1936 г. Рассекречено. ЦГА СПб
Fig. 6. “Comet” after one of the successful drops. September 1936. Declassified document. Central State Archive of Saint Petersburg

Вся аппаратура получила серьезные повреждения и не подлежала восстановлению⁵³. Так как до утраты станции ее испытания были успешны, а значимость не вызывала сомнений, то было решено изготовить новый образец «Кометы» к концу ноября. Его готовность на 1-е число месяца составляла 60 %⁵⁴. Архивное дело не содержит других документов, повествующих о дальнейшей судьбе станции, но можно предположить, что это устройство не пошло в серию.

Третий тип станции АМ — агентурную станцию АМС-3 / АРМС-3 для автоматической передачи метеосводок — предстояло разработать к концу 1936 г. Она также предназначалась для военных и должна была работать без обслуживающего персонала в течение месяца и ежедневно передавать четыре сводки продолжительностью 4 мин каждая. Ее транспортировку и развертывание должен был выполнить один человек, который не обязательно мог являлся специалистом-метеорологом. Дальность действия АРМС-3 — не менее 300 км, диапазон передатчика — 30–50 м, метеусловия работы — любые при температурах от плюс 40 до минус 50 °C⁵⁵. Конструкция этого типа станции разрабатывалась позже первых двух — к маю 1936 г. была выработана только ее общая схема и в ЦВИРЛ направлен проект ТТХ на радиочасть. Исходя из имеющихся архивных документов, можно предположить, что работы над АМ-3 прекратились, поскольку в начале сентября завод получил заказ на разработку чертежей полевой аэродромной/походной метеорологической станции для аэродромов к 1 октября, изготовление ее образца — к 1 ноября, а в контрольных на НИР и ОКР на 1937 г. АМ-3 не фигурировала в отличие от упомянутой походной метеостанции⁵⁶.

В 1936 г. на «Метприборе» могла начаться работа над АМ для Арктики: 26 июля директор завода М.И. Савченко получил распоряжение ВОТИ приступить к проектированию и изготовлению образца станции для использования ее в полярных

⁵³ ЦГА СПб. Ф. Р-1572. Оп. 7. Д. 74. Л. 99–105.

⁵⁴ Там же. Л. 96, 108.

⁵⁵ Там же. Д. 75. Л. 32 об., 37.

⁵⁶ Там же. Л. 62, 63.

условиях. Предполагалось, что она должна иметь большой радиус действия. Дальнейшие переговоры об АРМС руководству завода следовало вести с Полярным управлением ГУСМП⁵⁷. Однако его начальник И.А. Копусов 23 октября того же года сообщил, что «ассигнований на автоматические метеостанции в 1936 г. не отпущено, при получении кредитов вы будете поставлены в известность»⁵⁸. 29 октября М.И. Савченко известил об этом ВОТИ и констатировал, что выполнение приказа № 9с задерживается и в связи с отсутствием данных об объеме и характере работ. Фактически в «Метприборе» не получили даже принципиального согласия на заказ⁵⁹. В 1937 г. новых обсуждений АМ для Арктики не последовало.

Испытания АМС системы Молчанова в Тикси в 1935–1937 гг.

В 1935–1937 гг. продолжались испытания АМС системы П.А. Молчанова в Арктике — опытный образец станции, изготовленный к лету 1935 г., был отправлен на полярную станцию Тикси. Перед полярниками (коллектив увеличивался с 20 до 60 человек) ставились важные и масштабные задачи: строительство мощного радиузла, который должен был связать Восточную Арктику с Западной, а также с центром страны, организация полярной геофизической обсерватории и обновление метеорологической станции, организация опытного тепличного и парникового хозяйства⁶⁰. 24 июля пароход «Товарищ Сталин» покинул порт Мурманск и 21 августа доставил участников смены, приборы и другое имущество на станцию. Начальником зимовки был М.Ф. Лебедев, научным руководителем — старший геофизик С.В. Шимановский, старшим аэрологом — С.В. Реполовский, аэрологом — Т.С. Шимановская.

В документах АМС именовалась по-разному: «автоматическая станция», «АЭРМС», «АЭРОМЕС». Подробных и детальных описаний ее установки и работы в документах станции не содержится, имеются только общие выводы. Станцию испытывали при средней скорости ветра 6–10 м/с, она начала работу, но вскоре испортилась температурная коробка. В первую пургу 18–20 декабря 1935 г. (ветер — 20 м/с) АМС была разрушена: оторвалось хвостовое оперение, сломался пропеллер. С.В. Реполовский и механик Руковишников отремонтировали станцию. При этом механик внес конструктивные изменения: он изготовил пропеллер с подкрылками из тонкого алюминия, которые облегчали его движение и автоматически убирались при нормальной скорости хода. Но настроить станцию не удалось, т. к. оказалось, что повреждения от пурги получили и внутренние элементы. В отчете начальника зимовки за 1936 г. было дано заключение: «АЭРОМЕС сист. Молчанова в ее настоящем виде для работы в Арктике непригодна. <...> Наш вывод — АЭРОМЕС построена весьма небрежно, качество материалов очень низкое, устойчивость для арктических условий совершенно недостаточна»⁶¹.

Тем не менее испытания АМС продолжились в 1936 г. и в период зимовки 1936–1937 гг. Станция неоднократно ремонтировалась, а летом 1937 г. была проградуирована. Длину волны выбрали около 60 м, при этом устойчивая работа АМС

⁵⁷ ЦГА СПб. Ф. Р-1572. Оп. 7. Д. 75. Л. 57, 58.

⁵⁸ Там же. Л. 75.

⁵⁹ Там же. Л. 76.

⁶⁰ Фонды ААНИИ. ОПС-М, Г, АЭ, АКТ Тикси. № 1659. Л. 3.

⁶¹ Там же. Л. 14–15.

начиналась при ветре 8–9 м/с. Станцию решили перенести на о. Бруснева в бухте Тикси в 5 км к востоку от поселка. Установка АМС была осуществлена 10 августа. Однако станция проработала недолго. 12–15 числа дул устойчивый ветер с силой в 19–20 м/с, и АМС перестало быть слышно. При посещении острова 20 числа выяснилось, что станция исправна, проблема, видимо, была в слабости передатчика. В последующие дни и месяцы погодные условия также отличались сильными ветрами, но добраться до острова возможности не было.

Только 14 декабря для осмотра АМС на Бруснев на собачьей упряжке отправились С.В. Шимановский с каюром Золотарёвым. Оказалось, что станция сильно повреждена: хвостовое оперение оторвано, винт вращался свободно, не приводя в действие динамо-машину, коробка приемных частей фиксировалась одним полуотвернутым болтом, стальная установочная труба погнута, фрагменты передающей радиостанции сорваны, под кожухом основного блока набит снег. АМС сняли и перевезли на полярную станцию Тикси. Здесь при детальном осмотре было установлено, что прибор «совершенно выведен из строя, его конструкция в условиях отсутствия надзора, т. е. как автоматической станции, не пригодна». Основным недостатком прибора признавалось «соединение в один агрегат силовой установки и приемных частей давления, температуры и направления ветра». Вибрации, которые испытывала станция при сильном ветре (больше 15 м/с), приводили к ее поломке, таким образом, к полярным условиям она была «вообще не пригодна»⁶². С.В. Шимановский полагал, что АМС следует направить в Москву (в Полярное управление ГУСМП), что, по всей видимости, и было сделано.

Таким образом, опыт второй проверки АМС системы Молчанова в Арктике оказался неудачным. Сказались общие конструктивные недостатки, которые, несмотря на усовершенствования после испытаний в Бухте Тихой, не были преодолены. Сохранялась негерметичность кожуха основного блока, проблемы с прочностью и радиопередачей.

Дрейфующая АМС системы Молчанова

П.А. Молчанов продолжал работу над усовершенствованием конструкции станции, а также работал над созданием дрейфующей АМС. Его статья была опубликована в одной из центральных газет: «В настоящее время разработан новый проект еще более совершенной станции с системой сигналов, построенной таким образом, что на станции приема особый прибор автоматически вычерчивает кривые измеряемых станцией метеорологических элементов: температуры, давления, влажности, скорости и направления ветра. Ведутся также опыты по конструированию такого элемента автоматической станции, который смог бы регистрировать и передавать данные о солнечном сиянии. На основании этих данных можно делать заключения о наличии или отсутствии в момент передачи облачности. Одновременно, по данным температуры и влажности, можно определить высоту облачности. <...> На одной из сессий Арктического института в Ленинграде автор сделал доклад о возможности установки автоматической радиометеостанции на боте, который, будучи введен в ледяные поля, мог бы дрейфовать с ними в беспредельных пространствах Арктики. <...> ...По своей дешевизне и простоте они могут служить существенным дополнением к работе станции на Северном полюсе»⁶³.

⁶² Фонды ААНИИ. ОПС-М, Г, АЭ, АКТ Тикси. № 1659. Л. 44–45.

⁶³ Молчанов П. Дрейфующая автоматическая метеостанция // Вечерняя Москва. 1937. 14 дек. № 284. С. 3.

Разработка дрейфующей АМС велась по заданию Главсевморпути. В планах ВАИ на 2-ю пятилетку, как указывалось выше, постановка первой дрейфующей АМС планировалась на 1937 г. Летом 1937 г. газеты сообщали о том, что это может быть осуществлено «в будущем году»⁶⁴, т. е. в период 3-й пятилетки. А затем такие станции намечалось «пустить в дрейф в 1940 и 1941 гг.»⁶⁵. Данные о погоде в центре Арктики, которые собрали участники дрейфующей станции «Северный полюс» под руководством И.Д. Папанина в 1937 — начале 1938 гг., убеждали П.А. Молчанова в том, что благодаря дрейфующим АМС, которые будут работать от постоянных сильных ветров, могут быть получены дополнительные ценные сведения⁶⁶. В одной из статей ученый добавлял, что данные от дрейфующих АМС могут собираться береговыми станциями или дрейфующими ботами с наблюдателями и мощными радиопередающими установками⁶⁷. Последнее предположение было слишком смелым, не соответствовало действительности, ведь работа над дрейфующими судами в то время не велась. Об организации «дрейфующих автоматических метеостанций по всему Полярному бассейну» упоминал в перечне «повседневных вопросов, которые призвана решить наша авиация» летчик, Герой Советского Союза И.Т. Спирин в программной статье на страницах «Известий»⁶⁸.

Летом 1938 г. после неудачной навигации 1937 г. деятельность Главсевморпути и планы на 3-ю пятилетку подверглись серьезной корректировке. Задачи становились более практическими, управлению и организациям, которые в него входили, предстояло в первую очередь сосредоточиться на изучении Северного морского пути и создании местной топливной базы. Поэтому в плане АНИИ на 3-ю пятилетку среди экспедиций «проблемного характера» остались воздушная экспедиция в район Полюса относительной недоступности (1940 г.), высокоширотные рейсы линейных ледоколов совместно с ботом и в сопровождении воздушной разведки в заврангелевский район (1941 г.) и в северные районы морей Карского и Лаптевых (1942 г.)⁶⁹.

Заключение

Несмотря на то, что первые попытки создания АМС для Арктики оказались неудачными, польза, которую сулила автоматизация метеорологических наблюдений, могла быть значительной, что уже продемонстрировала успешная эксплуатация радиозондов. Требовалось разработать новую конструкцию подобного устройства, т. к. технические решения, предложенные П.А. Молчановым и инженерами конструкторского бюро завода «Метприбор», не являлись удачными. Поэтому были изготовлены только опытные образцы первых типов АМС, которые, даже после внесения улучшений в конструкцию, не были запущены в серийное производство. Следующий этап разработки в СССР таких станций связан с объявленным в 1938 г. ВАИ кон-

⁶⁴ Дрейфующие автоматические полярные станции // Правда. 1937. 30 июля. № 208. С. 6.

⁶⁵ Михайлов А. Третья пятилетка Арктики // Вечерняя Москва. 1937. 27 июня. № 145. С. 2.

⁶⁶ Молчанов П. Метео с полюса // Вечерняя Москва. 1938. 23 февр. № 44. С. 2; Молчанов П. Триумф нашей родины // Красная звезда. 1938. 20 февр. № 41. С. 2.

⁶⁷ Молчанов П. Блестящая победа советских ученых // Рабочая Москва. 1938. 16 марта. № 61. С. 3.

⁶⁸ Спирин И. Крылья нашей родины // Известия. 1938. 30 июля. № 176. С. 4.

⁶⁹ ЦГАНТД СПб. Ф. Р-369. Оп. 1-1. Д. 238. Л. 1, 4, 10.

курсом на автоматический радиобуй, предназначенный для определения дрейфа льда. В институт было направлено всего несколько проектов. Поэтому срок подачи рационализаторских предложений продлили, рассматривались они уже в столице специальной комиссией при Главсевморпути. Это привело к организации в 1939 г. в Арктическом научно-исследовательском институте (Ленинград) и Институте теоретической геофизики Академии наук СССР (Москва) лабораторий автоматических радиометеорологических станций. Целью настоящего исследования не является описание дальнейших разработок АМС в нашей стране — это тема отдельной статьи. Здесь же мы ограничиваемся предысторией — важной для понимания поиска технических и научных решений, которые выбрали советские ученые и конструкторы в 1940-е гг., что привело к серийному выпуску в СССР автоматических радиометростанций (в том числе дрейфующих).

Конфликт интересов. Авторы не имеют конфликта интересов.

Финансирование. Исследования выполнены в рамках НИТР 2.6 Росгидромета на 2025–2029 гг. «Развитие и модернизация технологий ведения Единого государственного фонда данных о состоянии окружающей среды, ее загрязнении в условиях импортозамещения».

Competing interests. The authors have no conflict of interest.

Funding. The research was carried out within the framework of the Scientific and Technical Project 2.6 of Roshydromet for 2025–2029 “Development and modernization of technologies for maintaining the Unified State Database on the condition of the environment and its pollution in the context of import substitution”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Молчанов П.А. Радио в исследовании атмосферы. *Наука и жизнь*. 1938;3:10–15.
2. Селезнёва Е.С. Первый радиозонд. *Труды Главной геофизической обсерватории*. 1956;56(118):7–18.
3. Первые эксперименты по радиозондированию во Франции. *Бюллетень ВМО*. 1981;30,3:270, 272.
4. Väisälä V. Eine neue Radiosonde. *Commentationes physico-mathematicae*. 1935;8(14):1–12.
5. Молчанов П.А. Задачи и методы исследования атмосферы в области Арктики. В кн.: *П.В. Виттенбург (ред.). Труды Второй полярной конференции: Ленинград, 18–23 июня 1928 года*. Л.: Группа СССР «Аэроарктик»; 1930. С. 51–60.
6. Отчет второй конференции Международного общества изучения Полярных стран при помощи воздухоплавательных аппаратов. В кн.: *П.В. Виттенбург (ред.). Труды Второй полярной конференции: Ленинград, 18–23 июня 1928 года*. Л.: Группа СССР «Аэроарктик»; 1930. С. 1–13.
7. Рынин Н.А. Методы освоения стратосферы. В кн.: *Труды Всесоюзной конференции по изучению стратосферы, 31 марта — 6 апреля 1934 года*. Л.; М.: Академия наук СССР; 1935. С. 621–686.
8. Селезнёва Е.И., Тудоровская Е.А. *П.А. Молчанов — выдающийся советский аэролог*. М.: Гидрометеиздат; 1958. 103 с.
9. Орлов А. Арктическая комиссия. *Советский Север*. 1930;2:112–116.
10. Булатов В.Н. Арктическая комиссия. *Вопросы истории*. 1992;8–9:148–150.
11. Визе В.Ю. Международный полярный год 1932–1933. *Известия Главной Геофизической обсерватории*. 1929;2:43–44.

12. Маклаков А.Ф., Евремычев В.И., Хоменко Я.Н. *Очерки развития отечественного гидрометеорологического приборостроения*. Л.: Гидрометеониздат; 1976. 240 с.
13. Молчанов П. Первый научно-исследовательский полет дирижабля «Граф Цепелин» в Арктику. *Природа*. 1932;3:215–236.
14. Молчанов П.А. Современные представления о строении стратосферы. В кн.: *Труды Всесоюзной конференции по изучению стратосферы, 31 марта — 6 апреля 1934 года*. Л.; М.: Издательство Академии наук СССР; 1935. С. 11–38.
15. Визе В.Ю. *Международный полярный год*. Л.: Всесоюзный арктический институт; 1932. 74 с.
16. *Таджико-Памирская экспедиция 1933 г.* Л.: ОНТИ — Госхимтехиздат; 1934. 522 с.
17. Ромм М.Д. *Штурм пика Сталина*. М.: Советский писатель; 1936. 291 с.
18. *Таджикско-Памирская экспедиция 1934 г.* М., Л.: Академия наук СССР; 1935. 504 с.
19. Киселёв Д.В. *Бухта Тихая: 30 лет нетихой жизни*. СПб.: Буквально; 2021. 270 с.
20. Соколов С.И. Автоматическая радио-метеорологическая станция системы проф. П.А. Молчанова. *Советская Арктика*. 1935;3:31–33.
21. Горелейченко А.В. *АТМС передает погоду*. Л.: Гидрометеониздат; 1972. 145 с.
22. Молчанов П. Аэрологические исследования на полярных станциях за зимовку 1933/34 года. *Бюллетень Арктического института СССР*. 1935;3/4:88–89.

Подписано в печать 01.12.2025
Формат 70×100 1/16
Тираж 85

Печать цифровая
Печ. л. 10,375
Заказ №

ООО «Тверская фабрика печати»,
170006, Россия, г. Тверь, Беляковский переулок, д. 46, пом. 25.

Signed to print 01.12.2025
Format 70×100 1/16
Edition 85

Digital Printing
P. s. 10,375
Order No

LLC “Tver Printing Factory”,
170006, Russia, Tver, Belyakovsky lane, 46, office 25.