

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, № 2, 2025

ARCTIC AND ANTARCTIC RESEARCH

Volume 71, No. 2, 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

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

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

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

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

Радионых В.Ф., канд. геогр. наук, ААНИИ, Санкт-Петербург, Россия

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

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

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

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

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

Трошчев 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@aari.ru

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт.

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

Выходит ежеквартально. Подписной индекс издания в каталоге ООО «Урал-Пресс» 48657 (на полгода)

© 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

Vladimir F. Radionov, Cand. Sci., AARI, St. Petersburg, Russia

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

Kirill E. Sazonov, Dr. Sci., KSRC, St. Petersburg, 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 № ФС 77-73644 of September 7, 2018.

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

Contacts:

199397 Saint Petersburg, Bering str, 38, 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. Subscription index of the journal catalog "Ural-Press" 48657 (for half a year)

© SSC RF AARI, 2025 (founder and publisher)

© Roshydromet, 2025 (founder)

The Journal is not marked with the Information Product label

Содержание

МЕТЕОРОЛОГИЯ И КЛИМАТОЛОГИЯ

Оценка успешности ансамблевого долгосрочного метеорологического прогноза в Западной Арктике 108
И.А. Ильющенко, В.Ю. Цепелев

Антропогенный поток тепла, выделяемый в атмосферу и почву в течение отопительного периода зданиями северных городов РФ 123
В.А. Фролькис, И.А. Евсиков

ГЛЯЦИОЛОГИЯ И КРИОЛОГИЯ

Изменение продолжительности безледного периода в арктических морях с 1991 по 2023 год 147
В.С. Порубаев, Л.П. Мочнова

ГЕОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА

Crustal structure of the Bungee Oasis and Highjump Archipelago (East Antarctica) based on magnetic data acquired by using fixed-wing UAV 164
A.V. Golynsky, D.A. Golynsky, G.L. Leitchenkov, N.V. Borovkov, V.G. Antsev, F.G. Gutorov, A.E. Simakov

ЭКОЛОГИЯ, БИОЦЕНОЛОГИЯ И БИОГЕОГРАФИЯ

Орнитогенные почвы Берега Правды и архипелага Хасуэлл, Восточная Антарктида: морфологическое строение и биогеохимические особенности 184
И.И. Алексеев, Е.Н. Грек, А.А. Четверова

Гидробиоценозы малого арктического озера в условиях урбанизации 201
Е.С. Савосин, Я.А. Кучко, Д.С. Савосин

СТРАНИЦЫ ИСТОРИИ

Создание теории моделирования движения судов во льдах. К 70-летию первого в мире ледового опытового бассейна 215
К.Е. Сазонов

Активизация и диверсификация арктической политики: историографический обзор 234
Л.М. Медведева

Contents

METEOROLOGY AND CLIMATOLOGY

Assessing the success of ensemble long-term meteorological forecasting in the Western Arctic.....	108
<i>I.A. Ilyushchenkova, V.Yu. Tsepelev</i>	

Anthropogenic heat flux into the atmosphere and soil created by settlements located in the north of Russia.....	123
<i>V.A. Frolkis, I.A. Evsikov</i>	

GLACIOLOGY AND CRYOLOGY OF THE EARTH

Change in the duration of the ice-free period in the Arctic seas from 1991 to 2023.....	147
<i>V.S. Porubaev, L.P. Mochnova</i>	

GEOLOGY AND GEOPHYSICS

Crustal structure of the Bunger Oasis and Highjump Archipelago (East Antarctica) based on magnetic data acquired by using fixed-wing UAV.....	164
<i>A.V. Golynsky, D.A. Golynsky, G.L. Leitchenkov, N.V. Borovkov, V.G. Antsev, F.G. Gutorov, A.E. Simakov</i>	

ECOLOGY, BIOCENOLOGY AND BIOGEOGRAPHY

Ornithogenic soils of Pravda Coast and Haswell archipelago, East Antarctica: morphological composition and biogeochemical features.....	184
<i>I.I. Alekseev, E.N. Grek, A.A. Chetverova</i>	

Hydrobiocenoses of a small arctic lake under urbanization conditions.....	201
<i>E.S. Savosin, Ya.A. Kuchko, D.S. Savosin</i>	

PAGES OF HISTORY

Developing a theory of modeling ship motion in ice. For the 70th anniversary of the world's first experimental ice basin.....	215
<i>K.E. Sazonov</i>	

Activation and diversification of Arctic policy: a historiographical review.....	234
<i>L.M. Medvedeva</i>	

МЕТЕОРОЛОГИЯ И КЛИМАТОЛОГИЯ METEOROLOGY AND CLIMATOLOGY

Оригинальная статья / Original paper

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-2-108-122>

УДК 551.509.339



Оценка успешности ансамблевого долгосрочного метеорологического прогноза в Западной Арктике

И.А. Ильющенко¹✉, В.Ю. Цепелев^{1,2}

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

² Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

✉ ilyushenkova@aari.ru

ИД ИАИ, 0009-0006-9643-3063; ВЮЦ, 0000-0002-7386-7233

Аннотация. В статье приведен анализ применения ансамблевого подхода для составления долгосрочного метеорологического прогноза по Западной Арктике с заблаговременностью в один месяц. Прогноз среднемесячных полей давления на уровне моря и приземной температуры воздуха проводился по модели CFSv2. Представлены оценки успешности ретроспективных прогнозов за 2010–2018 гг. при помощи двух методов ансамблевого прогноза — метод среднего по всем членам ансамбля и метод прогноза по лучшему классу, выделенному из всего ансамблевого набора процедурой кластеризации. Рассмотрены четыре оценки успешности прогнозов: среднеквадратическая ошибка, коэффициент корреляции, коэффициент геометрического подобия между фактическим и прогностическим полями и среднеквадратическая мера мастерства. Для 2018 и 2024 гг. была дополнительно проанализирована успешность долгосрочного метеорологического прогноза по макроциркуляционному методу Вангенгейма–Гирса. Наиболее высокое качество прогнозов по методу лучшего класса отмечено в летний период, а среднеквадратическая ошибка прогнозов в это время минимальна. Прогноз по методу всех членов ансамбля предпочтительно использовать в зимний сезон.

Ключевые слова: атмосферная циркуляция, ансамблевый прогноз, долгосрочный прогноз погоды, Западная Арктика, оценка качества прогноза, приземная температура воздуха, давление на уровне моря, модель CFSv2

Для цитирования: Ильющенко И.А., Цепелев В.Ю. Оценка успешности ансамблевого долгосрочного метеорологического прогноза в Западной Арктике. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2025;71(2):108–122. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-2-108-122>

Поступила 25.11.2024

После переработки 21.02.2025

Принята 01.04.2025

© Авторы, 2025

© Authors, 2025

Assessing the success of ensemble long-term meteorological forecasting in the Western Arctic

Irina A. Ilyushchenkova[✉], Valerii Yu. Tsepelev^{1,2}

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

² Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Moscow, Russia

✉ilyushenkova@aari.ru

IAI, 0009-0006-9643-3063; VYT, 0000-0002-7386-7233

Abstract. The article presents quality assessments of using the ensemble approach to produce long-term meteorological forecast in the Western Arctic with a one-month advance. The assessment of retrospective forecasts' quality of the sea level pressure anomalies field and surface air temperature anomalies has been performed for 2010–2018. The ensemble forecast for the second month was made using two methods. The first method is the forecast of the mean field of meteorological parameters for all ensemble members. The second method is the forecast of the mean field made by the best class selected from all ensemble members by the clustering procedure. The best class was selected by comparing macrosynoptic process evolution of the first forecast month of each selected class with the actual observations. In the area considered, which is bounded by coordinates from 20° W to 100° E and from 60° N to 80° N, 108 retrospective forecasts were made. As an independent series, the forecast success for 2018 and 2024 was analyzed using two ensemble forecasting techniques and a synoptic-statistical method (the Wangenheim–Geers macro-circulation method). Three estimates of the forecast quality were obtained — the mean square error, the correlation coefficient between the forecast and actual fields of meteorological parameters, and the coefficient of geometric similarity of the forecast and actual fields of the meteorological parameter. The estimation of quality was made for two parameters — sea level pressure and surface air temperature. The highest quality of forecasts using the best class method is observed in the summer season, and the RMS error of forecasts is minimal at this time. The forecast by the method of all ensemble members is preferable in the winter season. The results show that, in general, the best-class ensemble forecasts are more accurate for forecasting the phase of pressure anomalies, while for forecasting the magnitude of temperature and pressure anomalies, it is preferable to use the forecasts for all ensemble members. For 2018 and 2024, both ensemble forecast methods showed higher forecast quality scores than the synoptic-statistical method.

Keywords: assessment of forecast quality, air temperature, atmospheric circulation, ensemble forecast, long-term weather forecast, surface air temperature, Western Arctic, sea level pressure, model CFSv2

For citation: Ilyushchenkova I.A., Tsepelev V.Yu. Assessing the success of ensemble long-term meteorological forecasting in the Western Arctic. *Arctic and Antarctic Research*. 2025;71(2):108–122. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-2-108-122>

Received 25.11.2024

Revised 21.02.2025

Accepted 01.04.2025

Введение

Начиная с 1930-х гг. в Арктическом и антарктическом научно-исследовательском институте в оперативном порядке разрабатываются долгосрочные прогнозы погоды с целью обеспечения безопасной и эффективной навигации по Северному морскому пути. Основы синоптико-статистического метода прогнозирования были заложены Г.Я. Вангенгеймом [1]. Хотя макроциркуляционный метод продолжает совершенствоваться и в настоящее время [2, 3], его дальнейшее развитие сдерживается ограниченной длиной ряда наблюдений и значительными климатическими изменениями

последних десятилетий, особенно заметными в Арктике [4]. В последние десятилетия в мировой практике происходит переход на методы численного моделирования атмосферных процессов для долгосрочного прогнозирования погодных процессов.

В настоящее время качество прогнозов атмосферной циркуляции, основанных на глобальных моделях атмосферы и океана, значительно улучшилось для сроков прогнозирования до двух недель. Однако проблема прогноза погоды на периоды более месяца все еще остается нерешенной [5]. Основными препятствиями для совершенствования численных моделей атмосферы остаются недостаточная плотность наблюдательной сети, ограниченное понимание физических процессов на различных временных и пространственных масштабах, дефицит вычислительных мощностей и несовершенство самих гидродинамических моделей. Ошибки в начальных и граничных условиях моделей нарастают в процессе их интегрирования. Уже через две недели результаты прогнозов становятся неприменимыми из-за превышения ими естественной изменчивости атмосферных процессов [6]. Атмосфера, будучи хаотической системой, чрезвычайно чувствительна к мелким возмущениям, что вызывает неопределенность детерминированных прогнозов [7].

Кроме того, на временных масштабах от месяца и более динамика атмосферы в большей степени определяется такими неадиабатическими источниками и стоками тепла, как океаны, снежный и ледяной покров, а также изменения притока солнечной радиации. Прогнозирование состояния этих источников и стоков тепла либо отсутствует, либо имеет недостаточное качество.

Для преодоления неопределенности прогнозов обычно используется ансамблевый подход. Для его реализации модель стартует от различных начальных условий, полученных путем внесения возмущений в данные наблюдений [8]. Ансамблевый прогноз дает множество равновероятных сценариев, представляющих диапазон возможных будущих состояний атмосферы. Истинное состояние атмосферы, как предполагается, находится в пределах дисперсии ансамбля. Исследования показывают, что усреднение по ансамблю улучшает прогнозы, хотя и приводит к сглаживанию экстремальных состояний и приближает результаты прогнозирования к климатической норме¹.

Задача выявления наиболее вероятного сценария из множества членов ансамбля остается актуальной. Для ее решения применяются нейронные сети, машинное обучение и методы классификации ансамблевых членов [9]. Также ведутся попытки объединить синоптико-статистические и гидродинамические методы прогнозирования для учета опыта синоптических школ [10, 11]. Однако выбор наиболее вероятного прогностического сценария из совокупности все еще остается нерешенной проблемой.

В настоящей статье представлены результаты оценки двух прогностических методов, применяемых к задаче прогноза погоды с заблаговременностью в два месяца для Западной Арктики. К ним относятся — метод прогноза поля метеопараметра, полученного по всему прогностическому ансамблю, и метод лучшего класса прогностического ансамбля [12]. Также в статье приведены примеры сравнения успешности прогнозов, разработанных ансамблевыми методами, с прогнозами, составленными синоптико-статистическим методом.

Основной целью проведенного исследования являлась оценка возможности применения ансамблевого подхода для долгосрочного прогноза полей аномалий давления

¹ Руководящие указания по системам ансамблевого прогнозирования и прогнозированию. Всемирная метеорологическая организация. Документ ВМО-№ 1091. М.; 2012. 24 с.

на уровне моря и приземной температуры воздуха в Западной Арктике. Авторами были протестированы две модификации ансамблевого метода: классический метод прогноза среднего по ансамблю и метод выбора лучшего класса прогностического ансамбля.

Материалы и методы

Для оценки качества ансамблевого прогноза в Западной Арктике использовались данные прогностической модели Climate Forecast System Ver. 2 (CFSv2), состоящие из 24 членов ансамбля [13]. За период с 2010 по 2018 г. авторами было рассмотрено 108 ретроспективных прогнозов среднемесячных аномалий приземной температуры воздуха и давления на уровне моря. Заблаговременность прогнозов составляла два месяца.

В качестве фактических данных, с которыми сравнивались прогнозы, рассматривались данные реанализа NCEP/NCAR Reanalysis 2, взятые в узлах регулярной сетки с шагом $2,5^\circ$ по широте и долготе [14].

Расчет оценок качества прогнозов производился для района Западной Арктики, ограниченного координатами от 20° з. д. до 100° в. д. и от 60° с. ш. до 80° с. ш. Выбор критериев для оценки качества прогнозов происходил с учетом рекомендаций ВМО^{2,3,4,5} и РД 52.27.284-91⁶. В качестве основных оценок качества прогнозов были использованы 4 критерия: среднеквадратическая ошибка прогноза, коэффициент корреляции между прогностическими и фактическим полями, коэффициент RO и мера мастерства.

Коэффициент RO отражает геометрическое подобие прогностического и фактического полей, является количественной оценкой качества прогноза знака аномалий метеорологических параметров. Прогноз в узле сетки считается оправдавшимся, если знак прогностической аномалии параметра совпадает со знаком аномалии в узле сетки фактического поля:

$$RO = \frac{n_+ - n_-}{N}, \quad (1)$$

где n_+ и n_- — число узлов регулярной сетки, где прогноз оправдался и не оправдался соответственно; N — общее число узлов регулярной сетки.

Мера мастерства определяет качество методического прогноза по сравнению со «стандартным». В качестве «стандартного» прогноза используется климатологический прогноз. Для идеальных прогнозов мера мастерства равна 1; если $MSSS = 0$, то качество методического прогноза находится на уровне «стандартного», а если $MSSS < 0$, то ниже «стандартного» прогноза. Рекомендации по использова-

² Наставление по Комплексной системе обработки и прогнозирования ВМО (Дополнение IV к Техническому регламенту ВМО). ВМО-№ 485. 2023.

³ WMO's Standardized Verification System for Long-range Forecasts. New Attachment II-9 to the Manual on the GDPS (WMO-№. 485). Volume I. 2002.

⁴ Guidance on Verification of Operational Seasonal Climate Forecasts. WMO-№ 1220. 2018.

⁵ Manual on the Global Data-processing and Forecasting System. Volume I — Global Aspects. WMO-№ 485. 2010.

⁶ РД52.27.284-91 Методические указания. Проведение производственных (оперативных) испытаний новых и усовершенствованных методов гидрометеорологических и гелиогеофизических прогнозов. Л.: Гидрометеоздат; 1991. 150 с.

нию меры мастерства приводятся в документе ВМО-№ 485 от 2023 г. Расчет меры мастерства осуществляется по формуле 2:

$$MSSS = 1 - \frac{\sum_j w_j MSE_j}{\sum_j w_j MSE_{c_j}}, \quad (2)$$

где MSE_j — среднеквадратическая ошибка методического прогноза; MSE_{c_j} — среднеквадратическая ошибка климатического прогноза; w_j — косинус широты ($\cos(\varphi_j)$), где φ_j — широта узла j широтно-долготной сетки.

При этом для прогноза, где исследуемый параметр имеет ту же амплитуду, что и наблюдения, $MSSS$ меньше нуля до тех пор, пока коэффициент корреляции между прогностическим и фактическим полем не достигнет значения $+0,5^7$. Поскольку для прогнозов погоды аномалий давления и температуры характерные коэффициенты корреляции, как правило, не превышают значения $0,35^8$, то полученные в работе оценки являются отрицательными.

Авторами также была проведена оценка статистической значимости результатов расчетов. Так как размер сетки сравниваемых данных составляет 49×9 узел (все-го 441), то при использовании доверительных интервалов 95 % все значения коэффициентов корреляции выше значений $+0,1$ или ниже $-0,1$ являются достоверными.

Метод выбора лучшего класса ансамбля предполагает классификацию всех членов ансамбля по полям приземной температуры и давления на уровне моря и выбор того класса, который максимально близок к фактически наблюдаемому состоянию атмосферы. Подробно алгоритм выбора лучшего класса прогностического ансамбля (сценария развития макропроцесса) приведен в работе В.Ю. Цепелева [12].

В настоящем исследовании авторами были составлены ретроспективные прогнозы полей аномалий давления и температуры с заблаговременностью два месяца. Далее к прогностическому ансамблю была применена процедура классификации по данным первого прогностического месяца. На следующем этапе проведено сравнение полей реанализа приземной температуры воздуха и давления на уровне моря первого месяца прогноза с прогностическими полями каждого из полученных классов ансамбля. В качестве прогноза на второй месяц был использован тот прогностический класс, поля аномалий давления и температуры которого имеют максимальную степень сходства с полями реанализа [12].

Анализ и результаты исследования

Для исследуемого района составлены прогнозы полей приземного давления и приземной температуры воздуха с заблаговременностью 2 месяца. На графиках рис. 1, 2, 3, в табл. 1 и 2 представлены следующие оценки качества ретроспективных ансамблевых прогнозов: RO — коэффициент геометрического подобия; $CORR$ — коэффициент корреляции; $RMSE$ — среднеквадратическая ошибка прогноза и $MSSS$ — мера мастерства.

Следует отметить, что оценки качества прогнозов, представленные на графиках и в таблицах, принимают низкие значения. Эти значения характерны для оценок

⁷ Guidance on Verification of Operational Seasonal Climate Forecasts. WMO-No 1220. 2018.

⁸ Manual on the Global Data-processing and Forecasting System. Volume I — Global Aspects. WMO-№ 485. 2010.

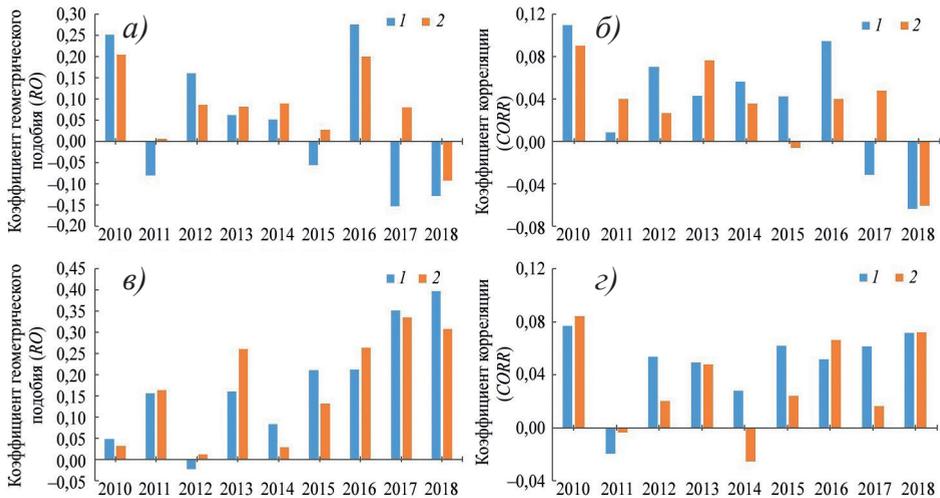


Рис. 1. Среднегодовые оценки качества RO и $CORR$ за период с 2010 по 2018 г. для двух типов прогнозов полей аномалий давления на уровне моря (a и $б$ соответственно) и аномалий приземной температуры воздуха ($в$ и $г$ соответственно) для района от 60° до 80° с. ш. и от 20° з. д. до 100° в. д.

Типы прогнозов отмечены цифрами и цветом: 1 — оценка по всему ансамблю для второго месяца прогноза, 2 — оценка по лучшему классу ансамбля

Fig. 1. Average annual quality estimates RO and $CORR$ for the period from 2010 to 2018 for two types of forecasts of sea level pressure anomalies (a and $б$, accordingly) and surface air temperature anomalies ($в$ and $г$, accordingly) for the area from 60° to 80° N and from 20° W to 100° E.

The forecast types are indicated by numbers and colors: 1 — estimation of ensemble method quality for the second month, 2 — estimation of selected ensemble class quality

всех прогнозов с заблаговременностью от месяца и более, что показано в документе WMO-No. 1246⁹, где представлена таблица с характерными значениями оценок качества прогноза аномалий приземной температуры воздуха в Средиземноморском регионе по шести моделям. В таблице показано, что значения оценок качества прогнозов в виде коэффициентов корреляции не превышают величины $+0,34$. Исходя из того, что с увеличением широты падает качество прогнозов, представленные авторами результаты оценок качества прогнозов для Арктического бассейна являются характерными результатами для современных гидродинамических моделей.

Оценка качества прогноза полей аномалий давления по параметру RO (см. рис. 1а) положительна и значима в 2010, 2012, 2016 гг. с характерными значениями $+0,15 \dots + 0,27$ и отрицательна в 2017 и 2018 гг. с характерными значениями $-0,12 \dots -0,15$. При этом прогнозы по всему ансамблю показали лучшую успешность в 3 годах из 9 (2010, 2012 и 2016), а прогнозы по лучшему классу ансамбля в 6 оставшихся годах.

Оценка качества прогноза полей аномалий приземной температуры воздуха по параметру RO (см. рис. 1в), наоборот, растет со значений $+0,05$ в 2010 г. до значений $+0,39$ в 2018 г. Прогнозы по всему ансамблю показали лучшую успешность в 5 годах из 9 (2010, 2014, 2015, 2017, 2018), а прогнозы по лучшему классу ансамбля в остальных.

⁹ Guidance on Operational Practices for Objective Seasonal Forecasting. WMO-No. 1246. 2020.

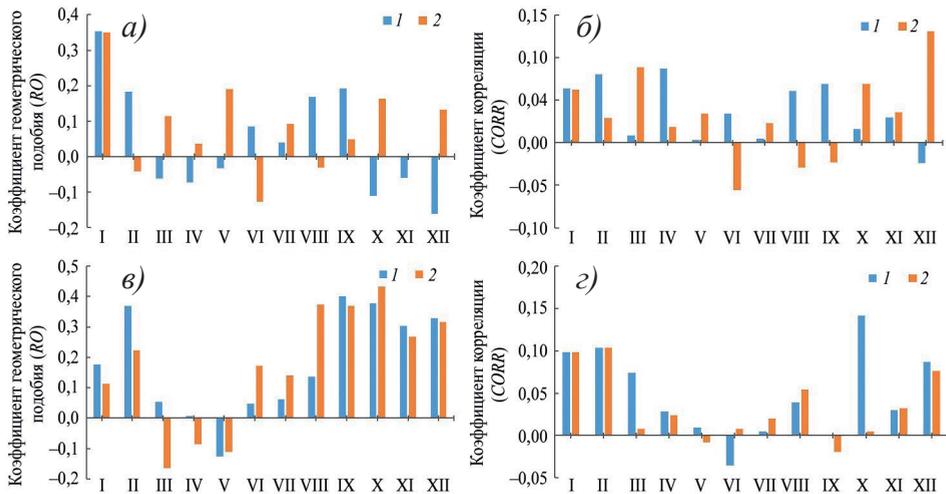


Рис. 2. Среднемесячные оценки качества RO и $CORR$ за период с 2010 по 2018 г. для двух типов прогнозов полей аномалий давления на уровне моря (a и $б$ соответственно) и аномалий приземной температуры воздуха ($в$ и $г$ соответственно) для района от 60° до 80° с. ш. и от 20° з. д. до 100° в. д.

Типы прогнозов отмечены цифрами и цветом: 1 — оценка по всему ансамблю для второго месяца прогноза, 2 — оценка по лучшему классу ансамбля

Fig. 2. Average monthly quality estimates RO and $CORR$ for the period from 2010 to 2018 for two types of forecasts of sea level pressure anomalies (a and $б$ accordingly) and surface air temperature anomalies ($в$ and $г$ accordingly) for the area from 60° to 80° N and from 20° W to 100° E.

The forecast types are indicated by numbers and colors: 1 — estimation of ensemble method quality for the second month, 2 — estimation of selected ensemble class quality

Оценки качества прогнозов по коэффициенту корреляции как для полей аномалий давления, так и приземной температуры (см. рис. 1б и рис. 1г) показывают относительно более высокую успешность для метода прогнозов по всем членам ансамбля для 5 лет из 9. При этом среднегодовые оценки качества прогноза полей аномалий давления ниже уровня 95 % значимости за исключением 2010 г. (+0,11) и опускаются к отрицательным значениям в 2018 г. (–0,06). Для прогноза полей аномалий температуры среднегодовые оценки качества прогноза также статистически незначимы и находятся в диапазоне от +0,02 до +0,08. В отдельные месяцы параметры RO и $CORR$ как для полей аномалий давления, так и температуры достигают значений +0,3 ... +0,4.

Оценки $RMSE$ прогнозов аномалий давления и температуры для метода прогноза по всему ансамблю ниже, чем для метода прогноза по выбранному классу для всех рассматриваемых лет (см. рис. 3а и рис. 3б).

Для понимания внутригодового распределения оценок качества прогнозов по двум методикам построены графики оценок для каждого месяца (см. рис. 2).

Значения оценки RO (см. рис. 2а) статистически значимы и положительны для прогнозов аномалий давления по выбранному классу в январе, марте, мае, октябре и декабре. Отрицательные значения для RO наблюдаются в июне. Оценка RO для прогнозов по всем членам ансамбля положительна и статистически значима в январе, феврале, августе и сентябре и отрицательна в октябре и декабре. Успешность

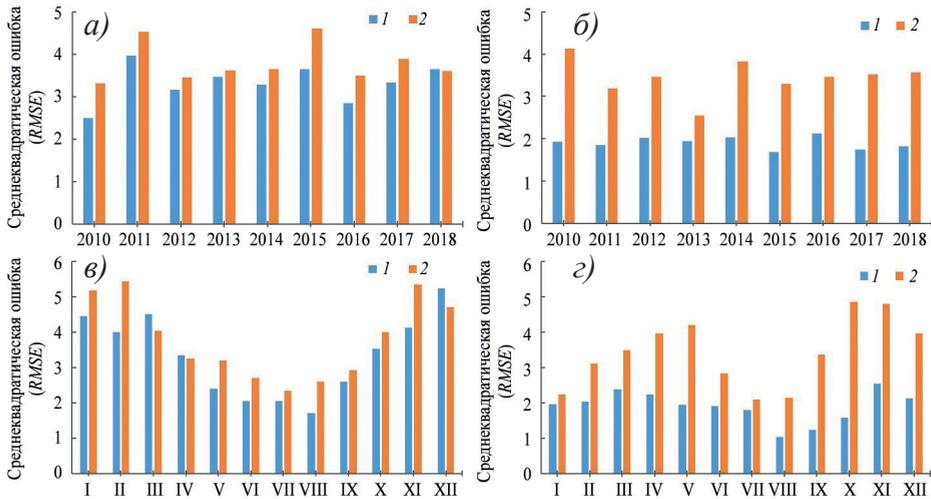


Рис. 3. Среднегодовые и среднемесячные оценки качества $RMSS$ за период с 2010 по 2018 г. для двух типов прогнозов полей аномалий давления на уровне моря (a и $в$ соответственно) и аномалий приземной температуры воздуха ($б$ и $з$ соответственно) для района от 60° до 80° с. ш. и от 20° з. д. до 100° в. д.

Типы прогнозов отмечены цифрами и цветом: 1 — оценка по всему ансамблю для второго месяца прогноза, 2 — оценка по лучшему классу ансамбля

Fig. 3. Average annual and monthly quality estimates $RMSS$ for the period from 2010 to 2018 for two types of forecasts of sea level pressure anomalies (a and $в$ accordingly) and surface air temperature anomalies ($б$ and $з$ accordingly) for the area from 60° to 80° N and from 20° W to 100° E.

The forecast types are indicated by numbers and colors: 1 — estimation of ensemble method quality for the second month, 2 — estimation of selected ensemble class quality

прогнозов аномалий давления по параметру RO по выбранному классу выше, чем прогнозов по всем членам ансамбля, в марте, мае, июле, октябре и декабре. В январе оценки RO для обоих методов практически одинаковы и достигают значения $+0,35$. В свою очередь оценки RO для прогнозов по всем членам ансамбля выше, чем для прогнозов по выбранному классу, в феврале, июне, августе и сентябре.

Коэффициент корреляции (см. рис. 2б) между прогностическими и фактическими полями не превышает значения $+0,13$ для обоих методов. При этом качество прогнозов по выбранному классу выше, чем для прогнозов по всем членам ансамбля в шести календарных месяцах — марте, мае, июле, октябре, ноябре и декабре. Качество прогнозов по всем членам ансамбля максимально в феврале, апреле, июне, августе и сентябре, а в январе оценки коэффициента корреляции для обоих методов практически одинаковы и не превышают величины $+0,07$.

Для всех календарных месяцев, кроме февраля и октября, среднеквадратическая ошибка прогнозов аномалий давления по выбранному классу выше, чем для прогнозов по всем членам ансамбля (см. рис. 4в). Для прогнозов аномалий температуры среднеквадратическая ошибка прогнозов аномалий давления по выбранному классу выше, чем для прогнозов по всем членам ансамбля (см. рис. 4з) в марте, апреле и декабре. Для обеих методик минимальная ошибка отмечается с мая по август, когда $RMSE$ находится в диапазоне $3,86$ – $5,30$.

Таблица 1

Оценки качества *MSSS* с 2010 по 2018 г. для полей аномалий давления на уровне моря для района от 60° до 80° с. ш. и от 20° з. д. до 100° в. д.

Table 1

Quality estimates *MSSS* for the period from 2010 to 2018 for sea level pressure anomalies for the area from 60° to 80° N and from 20° W to 100° E

Месяц	Год																	
	2010		2011		2012		2013		2014		2015		2016		2017		2018	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
I	-	-	-1	-1	0	-1	-1	1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	0
II	1	1	0	-1	0	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	0	-1	-1	-1	0	1
III	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	-1	1	
IV	1	-1	-1	-1	-1	0	-1	0	-1	-1	0	-1	0	-1	0	-1	-1	-1
V	0	-1	-1	-1	0	1	-1	0	-1	-1	1	-1	-1	0	-1	-1	0	-1
VI	-1	-1	0	-1	1	-1	1	-1	1	0	0	-1	-1	0	-1	-1	-1	-1
VII	-1	-1	0	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	0	-1	-1	-1	-1	1	0
VIII	0	-1	1	-1	0	-1	1	1	0	-1	0	-1	0	-1	0	-1	-1	-1
IX	1	0	-1	-1	-1	0	1	-1	-1	-1	1	1	0	-1	1	1	-1	-1
X	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	0	-1	1	1	-1	-1	-1	-1
XI	-1	-1	-1	-1	-1	0	-1	-1	0	1	-1	-1	1	1	-1	-1	0	0
XII	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1

Примечание. Типы прогнозов отмечены цифрами: 1 — оценка по всему ансамблю для второго месяца прогноза, 2 — оценка по лучшему классу ансамбля

Note. The forecast types are indicated by numbers: 1 — estimation of ensemble method quality for the second month, 2 — estimation of selected ensemble class quality

При анализе оценок качества аномалий приземной температуры воздуха отмечено, что значения *RO* положительны для всех, кроме трех весенних, месяцев, как для прогнозов по выбранному классу, так и для прогнозов по всем членам ансамбля (см. рис. 2в). С ноября по апрель и в сентябре успешность прогнозов по всем членам ансамбля превосходит успешность прогнозов по выбранному классу. Только с мая по август и октябрю успешность прогнозов по выбранному классу выше, чем успешность прогнозов по всем членам ансамбля на величину от 0,1 до 0,2. Максимальная успешность прогноза знака аномалии температуры воздуха выявлена с августа по октябрь, а значение коэффициента *RO* составило от +0,38 до +0,43.

Коэффициент корреляции (см. рис. 2з) между прогностическими и фактическими полями аномалий приземной температуры низок и не превышает значение +0,14. Для прогнозов по выбранному классу он выше, чем для прогнозов по всем членам ансамбля в июле, августе и ноябре, а в зимние месяцы с декабря по февраль коэффициенты корреляции по обоим методам примерно равны и колеблются от +0,08 до +0,1. Максимальное качество прогнозов величины аномалий температуры воздуха отмечено в октябре для методики прогнозов по всем членам ансамбля. Значение коэффициента корреляции составило 0,14.

RMSE прогнозов полей аномалий давления по методу выбранного класса меньше, чем для *RMSE* прогнозов по методу всех членов ансамбля только в марте, апреле и декабре (см. рис. 3в), а для прогнозов полей аномалий температуры воздуха *RMSE* рассчитанное по методу выбранного класса всегда меньше, чем по методу всех членов ансамбля (см. рис. 3з). При этом разница в значениях *RMSE* для двух методов минимальна для прогнозов аномалий давления в апреле, июле и сентябре,

Таблица 2

Оценки качества *MSSS* с 2010 по 2018 г. для аномалий приземной температуры воздуха для района от 60° до 80° с. ш. и от 20° з. д. до 100° в. д.

Table 2

Quality estimates *MSSS* for the period from 2010 to 2018 for surface air temperature anomalies for the area from 60° to 80° N and from 20° W to 100° E

Месяц	Год																	
	2010		2011		2012		2013		2014		2015		2016		2017		2018	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
I	-	-	-1	-1	0	0	-1	-1	-1	1	0	-1	1	1	0	-1	1	1
II	1	1	1	1	0	-1	-1	1	1	-1	0	-1	1	0	0	-1	0	1
III	-1	-1	-1	-1	0	-1	1	-1	-1	-1	-1	0	-1	-1	-1	0	-1	
IV	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
V	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
VI	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
VII	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
VIII	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
IX	-1	-1	0	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
X	0	-1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	-1	1	-1	1	-1	-1
XI	-1	-1	-1	1	-1	-1	0	-1	-1	-1	0	-1	-1	0	-1	-1	-1	-1
XII	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	0	0	-1	1	1	-1	-1	1	0	1	-1

Примечание. Типы прогнозов отмечены цифрами: 1 — оценка по всему ансамблю для второго месяца прогноза, 2 — оценка по лучшему классу ансамбля

Note. The forecast types are indicated by numbers: 1 — estimation of ensemble method quality for the second month, 2 — estimation of selected ensemble class quality

а прогнозов аномалий температуры в январе и июле. Максимальные значения *RMSE* по обоим методам наблюдаются в холодный период года, а минимальные в летний период. Минимум *RMSE* в прогнозах давления и температуры наблюдается в июле и августе. А максимум в октябре, ноябре и декабре, а для прогнозов аномалий давления дополнительно в январе и феврале.

Результаты оценок прогнозов полей аномалий давления по параметру мера мастерства (*MSSS*) представлены в таблице (табл. 1). Для прогнозов по выбранному классу полей аномалий давления на уровне моря положительные значения меры мастерства наблюдаются от двух случаев и более с сентября по март, а для прогнозов по всем членам ансамбля дополнительно в июне и августе.

Произведен анализ оценок качества прогнозов полей аномалий приземной температуры по параметру мера мастерства (табл. 2). Для прогнозов по выбранному классу положительные значения меры мастерства встречаются только в зимние месяцы, а для прогнозов по всем членам ансамбля дополнительно и в осенний период.

Анализ оценок качества прогнозов тестового периода

Для проверки полученных выводов о качестве прогнозов по методу среднего по ансамблю и методу лучшего класса ансамбля и сравнения их на ограниченном независимом материале с синоптико-статистическими прогнозами на месяц по Западной Арктике были взяты прогнозы за 2018 и 2024 гг. К сожалению, имеющийся ряд синоптико-статистических прогнозов ограничен только двумя годами и является недостаточным для репрезентативных выводов. В этой связи полученные результаты сравнения прогнозов носят иллюстративный характер.

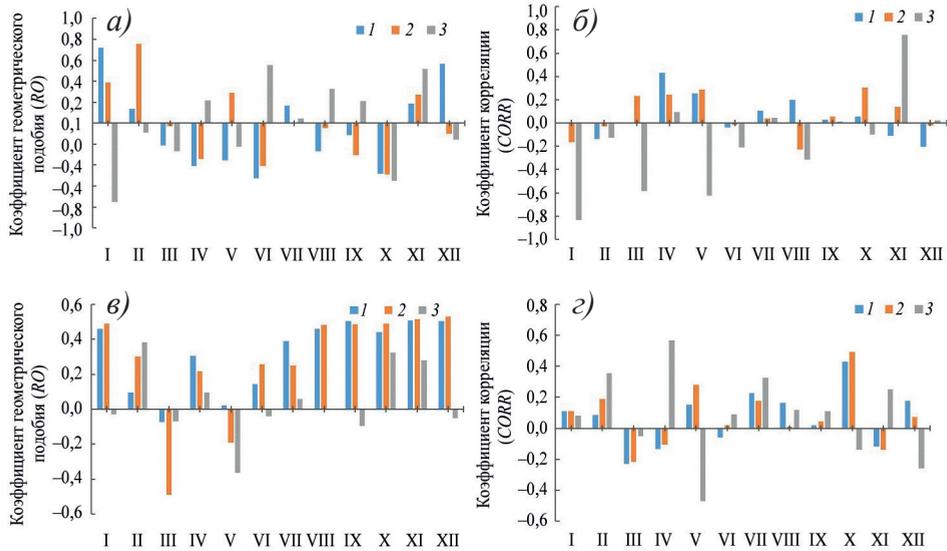


Рис. 4. Среднемесячные оценки качества RO и $CORR$ за 2018 и 2024 гг. для трех типов прогнозов полей аномалий давления на уровне моря (a и $б$ соответственно) и аномалий приземной температуры воздуха ($в$ и $з$ соответственно) для района от 60° до 80° с. ш. и от 20° з. д. до 100° в. д. Типы прогнозов отмечены цифрами и цветом: 1 — оценка по всему ансамблю для второго месяца прогноза, 2 — оценка по лучшему классу ансамбля, 3 — оценка по синоптико-статистическому методу

Fig. 4. Average monthly quality estimates RO and $CORR$ for 2018 and 2024 for three types forecasts of sea level pressure anomalies (a and $б$ accordingly) and surface air temperature anomalies ($в$ and $з$ accordingly) for the area from 60° N to 80° N and from 20° W to 100° E.

The forecast types are indicated by numbers and colors: 1 — estimation of ensemble method quality for the second month, 2 — estimation of selected ensemble class quality, 3 — estimation of synoptic-statistical method quality.

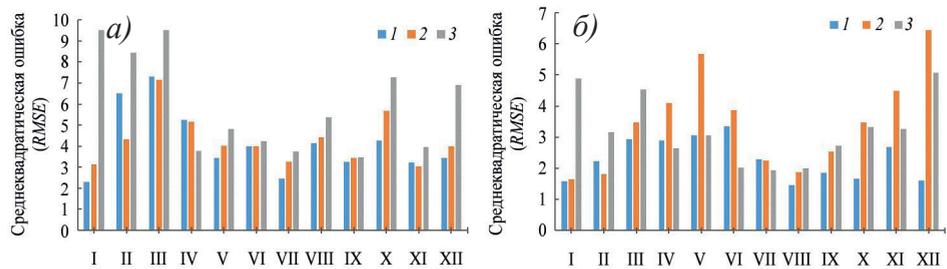


Рис. 5. Среднемесячные оценки качества $RMSE$ за 2018 и 2024 гг. для трех типов прогнозов полей аномалий давления на уровне моря (a) и аномалий приземной температуры воздуха ($б$) для района от 60° до 80° с. ш. и от 20° з. д. до 100° в. д.

Типы прогнозов отмечены цифрами и цветом: 1 — оценка по всему ансамблю для второго месяца прогноза, 2 — оценка по лучшему классу ансамбля, 3 — оценка по синоптико-статистическому методу

Fig. 5. Average monthly quality estimates $RMSE$ for 2018 and 2024 for three types forecasts of sea level pressure anomalies (a) and surface air temperature anomalies ($б$) for the area from 60° N to 80° N and from 20° W to 100° E.

The forecast types are indicated by numbers and colors: 1 — estimation of ensemble method quality for the second month, 2 — estimation of selected ensemble class quality, 3 — estimation of synoptic-statistical method quality

Синоптико-статистический метод долгосрочного прогноза Вангенгейма–Гирса разрабатывается в оперативном порядке в лаборатории долгосрочных метеорологических прогнозов ГНЦ РФ «ААНИИ».

Анализ оценок качества проводился для двух метеорологических параметров — аномалии давления на уровне моря и аномалии приземной температуры воздуха. На рис. 5 представлен график изменения следующих оценок качества изучаемых прогнозов — коэффициентов RO , $CORR$ и $RMSE$, осредненных по календарным месяцам.

Анализ полученных оценок качества для прогнозов полей аномалий давления на уровне моря показал, что прогнозы по методу лучшего класса RO выходят на первое место в феврале и мае (см. рис. 4а), а по синоптико-статистическому методу — в апреле, июне, августе, сентябре и ноябре. Метод прогноза по всем членам ансамбля наиболее успешен по оценке RO в январе, июле и декабре. Оценка по коэффициенту корреляции для синоптико-статистических прогнозов показала наихудшие значения из трех методов, кроме ноября, где он вышел на первое место (см. рис. 4б). В январе, феврале и мае зафиксировано наилучшее качество прогнозов по методу лучшего класса ансамбля, а прогнозы по всем членам ансамбля показали наилучшее качество из трех методов в апреле, июле и августе. Среднеквадратическая ошибка прогнозов по выбранному классу минимальна среди трех методов в мае и октябре (см. рис. 5а), а по синоптико-статистическому методу в апреле, июне, сентябре и ноябре. Минимальные значения среднеквадратической ошибки для метода прогноза по всем членам ансамбля отмечаются в январе и июле.

Анализ оценок качества прогнозов полей аномалий приземной температуры воздуха показал, что оценка RO имеет наибольшую величину из трех методов для метода лучшего класса ансамбля в мае, июне, августе и с октября по декабрь (см. рис. 4в). В остальные месяцы, за исключением апреля, максимальные оценки RO наблюдаются для прогнозов, составленных по всем членам ансамбля. В апреле более успешен синоптико-статистический метод прогнозов. Коэффициент корреляции для прогнозов по синоптико-статистическому методу имеет лучшую успешность в феврале, сентябре и ноябре (см. рис. 4г). Прогнозы по всем членам ансамбля наиболее успешны в январе, июле, августе и декабре. Прогнозы, составленные по лучшему классу ансамбля, являются лучшими в мае и октябре.

В апреле, июне и с августа по декабрь среднеквадратическая ошибка прогнозов по методу лучшего класса ансамбля максимальна из трех методов, а минимальное ее значение отмечается в сентябре (см. рис. 5б). Среднеквадратическая ошибка прогнозов, составленных по всем членам ансамбля, является минимальной из трех методов в декабре, январе и с августа по октябрь. Синоптико-статистический метод показывает наименьшую среднеквадратическую ошибку в феврале, апреле, июне, июле и ноябре.

Полученные для двух лет выводы не противоречат выводам, полученным из анализа ретроспективных прогнозов. Синоптико-статистический метод для этих двух лет не показывает абсолютного преимущества, поэтому совместное его использование с ансамблевыми методами может повысить общую успешность прогнозов. В дальнейшем планируется провести сравнение оценок качества всех трех методов на текущем материале в оперативном режиме.

Обсуждение результатов и выводы

Авторы исследования провели оценку качества прогнозов, составленных по двум разным методам ансамблевого долгосрочного прогноза. Анализ оценок качества прогнозов за период с 2010 по 2018 г. позволяет сделать следующие выводы.

1. Прогноз полей аномалий приземной температуры воздуха.

1.1. Метод прогноза по лучшему классу прогностического ансамбля показывает лучшие оценки качества по данным параметра RO , отражающего совпадение фактических и прогностических полей аномалий по фазе, чем оценки RO для прогнозов, осредненных по всем членам ансамбля, в месяцы теплого периода с мая по август. Метод прогноза по всем классам ансамбля показывает лучшую оправданность по RO в холодный период года с ноября по апрель. При этом максимальных значений от +0,38 до +0,43 параметр RO достигает в осенний, переходный период года с августа по октябрь.

1.2. Коэффициенты корреляции принимают значения, не превышающие величины +0,14. При этом прогнозы по всем членам ансамбля имеют лучшее качество в 50 % случаев, а прогнозы по лучшему классу ансамбля доминируют в июле, августе и октябре, то есть в летний и осенний периоды года.

1.3. Оценка $RMSE$ по выбранному классу выше, чем для прогнозов по всем членам ансамбля, только в марте, апреле и декабре. При этом максимальные $RMSE$ наблюдаются во второй половине осени — в октябре, ноябре и декабре, а минимальные в теплый период — в июле и августе.

2. Прогноз полей аномалий давления на уровне моря.

2.1. Успешность прогнозов аномалий давления по параметру RO по методу выбранного класса максимальна в марте, мае, июле, октябре и декабре. Оценки RO для прогнозов по всем членам ансамбля выше, чем для прогнозов по выбранному классу, в феврале, июне, августе и сентябре.

2.2. Коэффициенты корреляции принимают значения, не превышающие величины +0,13, по обоим методам. При этом качество прогнозов по выбранному классу выше, чем для прогнозов по всем членам ансамбля, в марте, мае, июле, октябре, ноябре и декабре, а по методу всех членов ансамбля — в феврале, апреле, июне, августе и сентябре.

2.3. Оценка $RMSE$ для всех календарных месяцев, кроме февраля и октября, по методу выбранного класса выше, чем для прогнозов по всем членам ансамбля. При этом максимальные $RMSE$ наблюдаются в холодный период — в октябре, ноябре, декабре, январе и феврале, а минимальные в теплый период — в июле и августе.

3. Оценка качества прогноза полей аномалий приземной температуры воздуха по параметру RO , наоборот, растет со значений +0,05 в 2010 г. до значений +0,39 в 2018 г. Прогнозы по всему ансамблю показали лучшую успешность в 5 годах из 9 (2010, 2014, 2015, 2017, 2018).

4. Оценки качества прогнозов по коэффициенту корреляции как для полей аномалий давления, так и приземной температуры показывают относительно более высокую успешность для метода прогнозов по всем членам ансамбля для 5 лет из 9.

Для подтверждения выводов, полученных за период 2010–2018 гг., необходимо провести дополнительные исследования на независимом прогностическом материале.

Исходя из анализа полученных оценок качества прогнозов по Западной Арктике можно предварительно выработать несколько рекомендаций.

1. По совокупности оценок, прогноз по методу лучшего класса прогностического ансамбля предпочтительней использовать в теплый период года, а по всем

членам ансамбля — в холодный период, как для прогноза полей аномалий давления, так и температуры.

2. В теплый период года среднеквадратические ошибки прогноза полей аномалий давления и температуры минимальны, а в холодный период года максимальны по обоим методам, что также дает преимущество методу прогноза по лучшим классам ансамбля в теплый период года.

3. Качество прогноза полей знака аномалии температуры максимально в осенний период с августа по октябрь.

4. Для получения выводов о преимуществе того или иного метода — ансамблевого прогноза или синоптико-статистического — необходимо провести дополнительные исследования.

Конфликт интересов. У авторов исследования нет конфликта интересов.

Финансирование. Исследование выполнено в рамках НИТР 5.1 Росгидромета на 2025–2029 гг. «Развитие моделей, методов и технологий мониторинга и прогнозирования состояния атмосферы, океана, морского ледяного покрова, ледников и вечной мерзлоты, процессов взаимодействия льда с природными объектами и инженерными сооружениями для Арктики».

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

Funding. The research was carried out within the framework of the scientific research and technology works 5.1 of Roshydromet for 2025–2029 “Development of models, methods and technologies for monitoring and forecasting the state of the atmosphere, ocean, sea ice cover, glaciers and permafrost (cryosphere), processes of ice interaction with natural objects and engineering structures for the Arctic”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Вангенгейм Г.Я. Основы макроциркуляционного метода долгосрочных метеорологических прогнозов для Арктики. *Труды ААНИИ*. 1952;34. 314 с.
2. Иванов В.В., Алексеенков Г.А., Коржиков А.Я. О совершенствовании макроциркуляционного метода долгосрочного метеорологического прогноза в Карском море. *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*. 2018;4(370):105–121.
Ivanov V.V., Alekseyenkov G.A., Korzhikov A.Ya. On improvement of the microcirculation method for long-range weather forecasting in the Kara Sea. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy = Hydrometeorological research and forecasting*. 2018;4(370):105–121. (In Russ.).
3. Иванов В.В., Алексеенков Г.А. Метод долгосрочных метеорологических прогнозов и их уточнение с заблаговременностью от одного до трех месяцев по акватории морей Российской Арктики и результаты испытаний. *Результаты испытаний новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов*. 2020;47:79–94.
Ivanov V.V., Alekseyenkov G.A. The method of long-term meteorological forecasts and their refinement with a lead time of one to three months in the waters of the seas of the Russian Arctic and the test results. *Rezultaty' ispytaniy novy'x i usovershenstvovanny'x tekhnologij, modelej i metodov gidrometeorologicheskix prognozov = Test results of new and improved technologies, models and methods of hydrometeorological forecasts*. 2020;47:79–94. (In Russ.).
4. Латонин М.М., Башмачников И.Л., Бобылёв Л.П. Явление арктического усиления и его движущие механизмы. *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2020;13(3):3–19. <https://doi.org/10.7868/S2073667320030016>
Latonin M.M., Bashmachnikov I.L., Bobylev L.P. The Arctic amplification phenomenon and its driving mechanisms. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika = Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2020;13(3):3–19. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S2073667320030016>

5. Bauer P., Thorpe A., Brunet G. The quiet revolution of numerical weather prediction. *Nature*. 2015;525(7567):47–55. <https://doi.org/10.1038/nature14956>
6. Мирвис В.М., Мелешко В.П. Современное состояние и перспективы развития метеорологических прогнозов на месяц и сезон. *Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова*. 2008;558:3–40.
Mirvis V.M., Meleshko V.P. Current status and further development of monthly and seasonal weather prediction. *Trudy Glavnoj geofizicheskoy observatorii im. A.I. Voejkova = Proceedings of Voeikov Main Geophysical Observatory*. 2008;558:3–40. (In Russ.).
7. Mailier P.J. Can we trust long-range weather forecasts? In: A. Troccoli (Ed). *Management of weather and climate risk in the energy industry*. Dordrecht: Springer Netherlands; 2010. P. 227–239. https://doi.org/10.1007/978-90-481-3692-6_15
8. Palmer T.N., Molteni F., Mureau R., Buizza R., Chapelet P., Tribbia J. Ensemble predictions. *Technical Memorandum ECMWF*. 1992;1–46.
9. Chen L., Han B., Wang X., Zhao J., Yang W., Yang Z. Machine learning methods in weather and climate applications: a survey. *Applied Sciences*. 2023;13:12019. <https://doi.org/10.3390/app132112019>
10. Вильфанд Р.М., Мартазинова В.Ф., Цепелев В.Ю., Хан В.М., Мироничева Н.П., Елисеев Г.В., Иванова Е.К., Тищенко В.А., Уткузова Д.Н. Комплексирование синоптико-статистических и гидродинамических прогнозов температуры воздуха на месяц. *Метеорология и гидрология*. 2017;42(8):5–17.
Vil'fand R.M., Martazinova V.F., Tsepelev V.Yu., Xan V.M., Mironicheva N.P., Eliseev G.V., Ivanova E.K., Tishhenko V.A., Utkuzova D.N. Integration of synoptic and hydrodynamic monthly air temperature forecasts. *Meteorologiya i gidrologiya = Russian Meteorology and Hydrology*. 2017;42(8):485–493. <https://doi.org/10.3103/S1068373917080015>
11. Yun W.T., Stefanova L., Krishnamurti T.N. Improvement of the multimodel superensemble technique for seasonal forecasts. *Journal of Climate*. 2003;16(22):3834–3840. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2003\)016<3834:IOTMST>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2003)016<3834:IOTMST>2.0.CO;2)
12. Цепелев В.Ю. Классификация прогностического ансамбля как метод повышения качества долгосрочного прогноза погоды. *Оптика атмосферы и океана*. 2023;36(4):313–319. <https://doi.org/10.15372/AOO20230408>
Tsepelev V.Yu. Classification of the predictive ensemble as a method of improving the quality of long-term weather forecast. *Optika atmosfery i okeana = Optics of the atmosphere and ocean*. 2023;36(4):313–319. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/AOO20230408>
13. Saha S., Moorthi S., Pan H-L., Wu X., Wang J., Nadiga S., Tripp P., Kistler R., Woollen J., Behringer D., Liu H., Stokes D., Grumbine R., Gayno G., Wang J., Hou Y-T., Chuang H-y., Juang H-M.H., Sela J., Iredell M., Treadon R., Kleist D., Delst P.V., Keyser D., Derber J., Ek M., Meng J., Wei H., Yang R., Lord S., van den Dool H., Kumar A., Wang W., Long C., Chelliah M., Xue Y., Huang B., Schemm J-K., Ebisuzaki W., Lin R., Xie P., Chen M., Zhou S., Higgins W., Zou C-Z., Liu Q., Chen Y., Han Y., Cucurull L., Reynolds R.W., Rutledge G., Goldberg M. The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2010;91(8):1015–1058. <https://doi.org/10.1175/2010BAMS3001.1>
14. Kistler R., Kalnay E., Collins W., Saha S., White G., Woollen J., Chelliah M., Ebisuzaki W., Kanamitsu M., Kousky V., van den Dool H., Jenne R., Fiorino M. The NCEP-NCAR 50-Year Reanalysis: monthly means CD-ROM and documentation. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2001;82:247–268. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(2001\)082<0247:TNNYRM>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(2001)082<0247:TNNYRM>2.3.CO;2)

Оригинальная статья / Original paper

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-2-123-146>

УДК 551.584.61:551.588.7;697.1

**Антропогенный поток тепла, выделяемый в атмосферу и почву в течение отопительного периода зданиями северных городов РФ**В.А. Фролькис^{1,2,3✉}, И.А. Евсиков^{1,3}¹ Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова, Санкт-Петербург, Россия² Санкт-Петербургский государственный экономический университет, Санкт-Петербург, Россия³ Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия✉ vfrolkis@voeikovmgo.ru

ID ВАФ, 0000-0002-0302-2083; ИАЕ; 0000-0003-4793-2975

Аннотация. Представлены оценки доли антропогенного потока тепла, обусловленные отоплением, при предположении, что он зависит от температуры наружного воздуха, а здания удовлетворяют теплофизическим нормам, приведенным в строительных правилах. На основе веб-картографической платформы OpenStreetMap, сервиса Яндекс Карты и ГИС ЖКХ построены модели застройки 12 городов и поселений, расположенных на севере России. Рассчитаны объемы и площади ограждающих конструкций всех зданий. Рассмотрены три различных алгоритма вычисления антропогенного потока тепла. Первый алгоритм использует понятие нормируемого сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций; второй основан на нормируемом значении удельной теплозащитной характеристики здания; третий использует нормируемую удельную характеристику расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания. Предлагается использовать усредненную оценку антропогенного потока тепла, полученную по всем алгоритмам. Антропогенный поток тепла определяли с административной и урбанизированной территории. Приведены оценки выделяемой за отопительный период антропогенной энергии с административной и урбанизированной территорий. С административной территории генерируемое количество тепла находится в интервале (в ПДж) для Сургута 8,29–20,7; Якутска 9,57–23,6; Архангельска 7,37–15,4; Мурманска — 5,16–11,6; Норильска — 2,99–9,09; Воркуты, Апатитов и Салехарда — 1,29–4,80; Нарьян-Мара — 0,961–1,92; Дудинки — 0,537–1,42; Тикси и Диксона — 0,247–0,681. Плотность потока тепла в направлении к подстилающей поверхности от нижней границы зданий в среднем в течение отопительного периода находится в интервале 1,20–1,96 Вт/м². Приведены значения антропогенной энергии, усредненные за отопительные периоды 2013–2018 и 2018–2023 гг.

© Авторы, 2025

© Authors, 2025

Ключевые слова: антропогенный поток тепла, антропогенный поток тепла к подстилающей поверхности, карты распределения антропогенного потока тепла, административная территория, урбанизированная территория, городской остров тепла

Для цитирования: Фролькис В.А., Евсиков И.А. Антропогенный поток тепла, выделяемый в атмосферу и почву в течение отопительного периода зданиями северных городов РФ. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2025;71(2):123–146. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-2-123-146>

Поступила 16.03.2025

После переработки 12.05.2025

Принята 09.06.2025

Anthropogenic heat flux into the atmosphere and soil created by settlements located in the north of Russia

Victor A. Frolkis^{1,2,3✉}, Igor A. Evsikov^{1,3}

¹ *Voeikov Main Geophysical Observatory, St. Petersburg, Russia*

² *Saint Petersburg State Economic University, St. Petersburg, Russia*

³ *Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russia*

✉ vfrolkis@voeikovmgo.ru

ID VAF, 0000-0002-0302-2083; IAE; 0000-0003-4793-2975

Abstract. Estimates are presented for the share of anthropogenic heat flux caused by heating, based on assuming that anthropogenic heat flux depends on outdoor air temperature and that buildings comply with the thermophysical standards specified in the construction regulations. Using the OpenStreetMap web mapping platform, the Yandex Maps service, and GIS housing and communal services, building models were constructed of 12 cities and settlements located in northern Russia. The volumes of all buildings and the surface areas of their enclosing structures were calculated. Three algorithms for estimating the anthropogenic heat flux are considered. The first algorithm uses the concept of normative heat transfer resistance of enclosing structures. The second is based on the normalized value of the specific heat protection characteristic of a building. The third uses the normalized specific characteristic of heat energy consumption for heating and ventilation of the building. It is proposed to use the average anthropogenic heat flux estimate obtained by all algorithms. anthropogenic heat flux is estimated from an administrative and urbanized area. During the heating period the anthropogenic heat flux density from the urbanized area per 1°C difference between indoor and outdoor air temperatures ranges from 0.31 to 1.75 W/(m²·°C). The anthropogenic heat flux density from the urbanized area for the average heating period temperature is located within the range where the lower boundary is estimated between 9.60 and 19.5 W/m², and the upper boundary between 30.0 and 61.2 W/m², depending on the settlement. In this case the total emitted anthropogenic energy (in PJ) from the administrative area is equal to 8.29–20.7 for Surgut; for Yakutsk 9.57–23.6; Arkhangelsk 7.37–15.4; Murmansk — 5.16–11.6; Norilsk — 2.99–9.09; Vorkuta, Apatite and Salekhard — 1.29–4.80; Naryan-Mar — 0.961–1.92; Dudinka — 0.537–1.42; Tiksi and Dixon's — 0.247–0.681. The anthropogenic heat flux density directed downward toward the underlying surface during the heating season is in the range of 1.20–1.96 W/m². Values of anthropogenic energy averaged over the heating periods 2013–2018 and 2018–2023 are given. Maps of the spatial distribution of the anthropogenic heat flux density for Vorkuta and Apatite are presented.

Keywords: anthropogenic heat flux, anthropogenic heat flux to the underlying surface, heating period, anthropogenic heat flux distribution maps, administrative territory, urbanized territory, urban heat island

For citation: Frolkis V.A., Evsikov I.A. Anthropogenic heat flux into the atmosphere and soil created by settlements located in the north of Russia. *Arctic and Antarctic Research*. 2025;71(2):123–146. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-2-123-146>

Received 16.03.2025

Revised 12.05.2025

Accepted 09.06.2025

Введение

Около двух третей территории Российской Федерации относится к зоне многолетней мерзлоты. В конце 60-х — начале 70-х гг. XX в. М.И. Будыко предположил, что в результате антропогенного загрязнения атмосферы начнется повышение приземной температуры воздуха, причем максимальное потепление будет наблюдаться в высоких широтах [1]. В ежегодном отчете NOAA указывается, что 11-й год подряд в Арктике наблюдается более сильное повышение температуры, чем на остальных территориях [2]. Такое изменение арктического климата может приводить к таянию вечной мерзлоты, что повлечет за собой значительные отрицательные последствия для экономики и жителей северных широт.

Выделяемая в атмосферу часть потребляемой энергии, называемая антропогенным потоком тепла (АПТ), состоит из потоков тепла от зданий, транспорта и метаболизма живых организмов [3]. В течение отопительного периода АПТ от городской застройки составляет от 89 до 96 % [3], причем он достигает максимального значения на урбанизированной территории, характеризующейся наиболее плотной застройкой и не превышающей 10 % от административной территории города. АПТ в жилых и промышленных районах является одним из основных факторов процесса таяния вечной мерзлоты в холодное время года. Летом этот процесс обусловлен наблюдаемым потеплением в северных широтах, на которое накладывается поток тепла от зданий, обусловленный нагревом инсоляцией непроницаемых материалов с большой тепловой инерцией с последующей их теплоотдачей [4].

Интенсивность острова тепла, обусловленного АПТ в холодный период, зависит от физико-географического положения города и численности его населения, от структуры промышленных предприятий и т. п. Для городов, расположенных в высоких широтах и примыкающих к ним умеренных широтах, количество выделяемого антропогенного тепла в декабре и январе может быть соизмеримо или даже больше количества поглощенной солнечной радиации. Так, в случае безоблачного неба согласно СП 131.13330.2020¹ на широтах 60, 64 и 68° с. ш. суммарная солнечная радиация (прямая и рассеянная) на горизонтальную поверхность составляет: за ноябрь 97, 56, 14; за декабрь 39, 0 и 0 и за январь 70, 29 и 0 МДж/м². Среднемесячные оценки АПТ (в МДж/м²), рассчитанные за отопительный период по среднесуточным температурам в течение 2013–2023 гг. для урбанизированной территории населенных пунктов России, расположенных на широтах 61–62° с. ш. (например, Сургут и Якутск), 64,5–66,5° с. ш. (Архангельск и Салехард), 67,5–67,6 (Воркута, Апатиты и Нарьян-Мар) и 68,5–69,5° с. ш. (Мурманск и Норильск), находятся соответственно в интервалах: в ноябре 1,58–5,28, 1,07–3,41, 1,14–2,99 и 1,25–5,79; в декабре 1,82–6,71, 1,35–3,95, 1,27–3,41 и 1,44–6,85; в январе 2,00–6,82, 1,46–4,28, 1,35–4,88 и 1,60–7,14. Приведенные значения АПТ указывают на важность его оценки в населенных пунктах северных широт.

АПТ может влиять на структуру и свойства городского атмосферного приземного слоя, так как, с одной стороны, повышение температуры, особенно в плотно застроенных районах, может создавать более интенсивную конвекцию и тем самым влиять на погоду, с другой стороны, в районах с интенсивной застройкой шероховатость поверхности возрастает, а это приводит к торможению воздушного потока в ре-

¹ СП 131.13330.2020 (СНИП 23-01-99*). Свод правил. Строительная климатология. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573659358> (дата обращения: 09.03.2025).

зультате поверхностного трения и замедлению обмена тепловой энергией с атмосферой [5]. Воздействие АПТ на приземный слой атмосферы во многом определяется тем, как этот поток тепла распределяется между компонентами теплового баланса поверхности. Часть АПТ обусловлена теплопередачей из помещений в атмосферу через стены и крыши зданий и вентиляцию, а другая часть тепла направлена вниз к подстилающей поверхности из-за потока через нижнюю границу здания, к которому добавляются тепловые стоки от работы систем канализации и водоснабжения.

АПТ, обусловленный энергией, используемой для отопления, зависит от температуры наружного воздуха. Эта зависимость приводит к появлению отрицательной обратной связи между температурой воздуха и АПТ, поскольку понижение температуры атмосферного воздуха увеличивает энергопотребление и АПТ, а увеличение АПТ приводит к росту температуры приземного воздуха [6]. Наиболее существенное влияние АПТ достигается при малой инсоляции или при полном ее отсутствии, в этом случае возможно подавление вертикального перемешивания при переходе к устойчивой стратификации и, в частности, уменьшение толщины атмосферного перемешанного слоя. С другой стороны, интенсивный АПТ может приводить к увеличению толщины перемешанного слоя за счет конвекции и даже к полному исчезновению ночной приземной инверсии [6].

Оценка АПТ может быть получена различными способами, например, инвентаризацией (суммирование потребляемой энергии), дистанционными спутниковыми измерениями и прямыми измерениями [7–10]. Также помимо измерений используется численное моделирование АПТ [11]. Так, региональная климатическая модель COSMO-CLM с разрешением 1 км, в которой учитывается энергопотребление зданий при помощи параметризации DCEP, является методом оценки «сверху вниз» [12].

На основе геоинформационных технологий и информационного моделирования зданий появился метод оценки АПТ, который можно назвать «снизу вверх». В рамках такого подхода АПТ вычисляется для каждого здания, а полный городской поток тепла получается суммированием по всем зданиям [13, 14]. Для г. Бостона (США) описан, по сути, близкий подход к оценке АПТ [15], но использующий другую технологию: рассматриваются некоторые здания, для которых с течением времени известно поведение их энергетического баланса (параметризация ВЕР + ВЕМ), что позволяет вычислить АПТ от этих зданий; предполагается, что однотипные здания генерируют со временем такой же поток тепла; все здания города распределяются по однотипным группам с последующим суммированием АПТ. К сожалению, такой метод оценки не может иметь широкого применения, это связано с отсутствием необходимых измерений теплофизических характеристик зданий, требующих больших финансовых затрат, и возможности использования соответствующей математической модели.

В данной работе применяется альтернативный способ оценивания АПТ по схеме «снизу вверх», когда АПТ вычисляется для каждого здания на основе действующих строительных норм по теплоизоляции зданий и их энергопотреблению СП 50.13330.2012², СП 131.13330.2020 и ГОСТ 30494-2011³, а полный АПТ полу-

² СП 50.13330.2012. Свод правил. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200095525> (дата обращения: 09.03.2025).

³ ГОСТ 30494-2011. Межгосударственный стандарт. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200095053> (дата обращения: 09.03.2025).

чается суммированием по всем зданиям населенного пункта [6, 13, 14]. Такой метод может иметь широкое применение при обладании определенными навыками программирования и не требует больших материальных затрат. Так, в нашей предыдущей работе [14] приведены оценки АПТ для 47 городов России с населением не менее полумиллиона человек. В данной работе рассчитан АПТ для 12 населенных пунктов, расположенных в приполярных и полярных областях России.

С использованием открытой веб-картографической платформы OpenStreetMap (OSM)⁴, сервиса Яндекс Карты⁵ и ГИС ЖКХ⁶ получена информация о контурах зданий и их высотах, на основе которой построены двух- и трехмерные (точнее 2,5-мерные) модели городской застройки, позволившие найти площадь ограждающей конструкции каждого здания и его объем, которые в совокупности с теплофизическими характеристиками здания позволяют оценить АПТ [13, 14].

На основе СП 50.13330.2012 реализованы три алгоритма оценки АПТ. Первый базируется на нормируемом значении сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций здания. Второй использует понятие удельной теплозащитной характеристики здания. В основе третьего лежит расчетное значение удельной характеристики расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания. Необходимость рассмотрения трех различных алгоритмов обусловлена тем, что в первом алгоритме АПТ рассчитывается по площади ограждающей конструкции здания, во втором и третьем — по его объему, но, в отличие от первого и второго, в третьем алгоритме учитываются потери тепла через вентиляцию. Первые два регламентируют теплозащитные характеристики оболочки здания, а также учитывают климатические условия, а третий алгоритм регламентирует расход тепловой энергии на отопление и вентиляцию. К тому же использование первого алгоритма позволяет оценить АПТ через нижнюю границу здания вниз.

Эти методики используют данные из свода правил, являющиеся, по сути, средними значениями, полученными в результате обработки большого массива данных. Кроме этого, СНиП, а затем свод правил менялись с течением времени. Здания, построенные как до появления СНиП и свода правил (до 1929 г.), так и после, могут им не удовлетворять. Поэтому мы рассматривали все три алгоритма, позволяющие оценить диапазон возможных значений АПТ с территории города.

АПТ оценивали как по средней температуре воздуха в течение отопительного периода t_{OT} (СП 131.13330.2020), так и по ежедневным среднесуточным температурам воздуха⁷ в течение отопительных периодов 2013–2018 и 2018–2023 гг.

Построены карты распределения плотности антропогенной энергии населенных пунктов в полярной области России за отопительный период при температуре наружного воздуха $t_{НАР}$ равной t_{OT} , которые могут быть полезны для уточнения составляющих теплового баланса при моделировании региональной атмосферы и городского приземного слоя.

⁴ OSM. OpenStreetMap. URL: <https://www.openstreetmap.org> (accessed 09.03.2025).

⁵ Картографический сервис Яндекс Карты. URL: <https://yandex.ru/maps> (дата обращения: 09.03.2025).

⁶ Государственная информационная система жилищно-коммунального хозяйства. Реестр объектов жилищного фонда. URL: <https://dom.gosuslugi.ru/#!/houses> (дата обращения: 09.03.2025).

⁷ Специализированные массивы для климатических исследований. URL: <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/> (дата обращения: 09.03.2025).

Об актуальности предлагаемого исследования говорит то, что в в моделях прогноза погоды и климата из-за недостаточного их разрешения непосредственный учет теплообмена между городскими зданиями и атмосферой в настоящий момент невозможен. Для решения этой проблемы необходимо использовать параметризацию потока тепла от городской застройки. Как правило, такая параметризация базируется на представлении городского каньона в виде двух зданий, стоящих через дорогу напротив друг друга [11]. В настоящей работе оценивается поток тепла от реальных городских зданий с разрешением $30 \times 30 \text{ м}^2$, что позволяет сформулировать более адекватные краевые условия для уравнения теплового баланса в региональных моделях прогноза погоды и климата и уточнить параметризацию антропогенного потока тепла.

Цель данной работы состояла в: а) оценке АПТ для 12 населенных пунктов, расположенных в высоких широтах и примыкающих к ним умеренных широтах; б) оценке теплового потока, направленного вниз к подстилающей поверхности через нижнюю границу здания, что важно при анализе таяния вечной мерзлоты в городских условиях; в) оценке пространственного распределения АПТ; г) определении зависимости АПТ от численности населения и объема зданий городской застройки; д) оценке средних значений АПТ за пятилетние периоды 2013–2018 и 2018–2023 гг.

Геометрическая модель населенного пункта

Построены геометрические модели городов и населенных пунктов России, расположенных за северным полярным кругом или вблизи него: Сургута, Якутска, Архангельска, Мурманска, Норильска, Воркуты, Апатитов, Салехарда, Нарьян-Мара, Дудинки, Тикси и Диксона⁸. В дальнейшем для удобства изложения любой из перечисленных населенных пунктов будем называть городом.

Среди различных геоинформационных сервисов, таких как Яндекс Карты, Google Maps⁹, 2ГИС¹⁰, OpenStreetMap (OSM) и других, позволяющих визуализировать городскую застройку, только OSM дает возможность получить контуры зданий в векторном формате, что позволяет точно оценить их площадь. По этой причине модели городов построены на основе данных веб-картографического ресурса OSM, который также содержит информацию о материалах и типах зданий, дорогах, зеленых насаждениях и т. п. На основании такой информации определены контуры зданий и, в некоторых случаях, их высота и тип.

Недостающие данные о высоте некоторых зданий доступны напрямую из сервиса Яндекс Карты через сайт Народная карта¹¹, где приведена информация об адресе, типе и высоте зданий. При отсутствии таких данных использовали информацию с сервиса ГИС ЖКХ (которая не учитывалась в более ранних работах [6, 13, 14]). В рассматриваемых городах для 80 % строений известна высота, за исключением Тикси (56 %), Диксона (59 %), Якутска (65 %) и Воркуты (73 %). Зданиям с неизвестной высотой, а это, как правило, одноэтажные строения небольшой площади, присваивается высота, равная 3 м.

⁸ Список упорядочен по мере уменьшения численности населения.

⁹ Google Maps. URL: <https://www.google.com/maps/> (дата обращения: 09.03.2025).

¹⁰ Картографический сервис «2ГИС». URL: <https://2gis.ru/> (дата обращения: 09.03.2025).

¹¹ Народные карты (редактор Яндекс Карт). URL: <https://n.maps.yandex.ru/> (дата обращения: 09.03.2025).

Для вычисления площади и объема здания написан скрипт на языке Python [16], собирающий геометрическую и географическую информацию из OSM и учитывающий высоту зданий.

Численность населения¹² и основные параметры городской застройки приведены в табл. 1, где данные, относящиеся к административной территории, приведены в верхней строке, соответствующей названию города, а к урбанизированной — в нижней строке.

Таблица 1

Численность населения и параметры зданий
на административной (верхняя строка) и урбанизированной (нижняя строка) территории
Table 1

Population and building parameters
for administrative (top row) and urbanized (bottom row) territories

Город	Население, человек	Средняя высота зданий, м	Площадь стен, 10 ⁶ м ²	Площадь крыш, 10 ⁶ м ²	Объем зданий, 10 ⁶ м ³	Показатель компактности, м ⁻¹	Площадь территории, 10 ⁶ м ²	Доля крыш в общей площади, %
Сургут	396443	6,1	13,4	8,18	0,0930	0,320	196,8	4,16
		15,0	10,3	4,96	0,0770	0,262	15,53	31,9
Якутск	355443	6,1	13,0	8,15	0,0730	0,401	181,1	4,50
		13,7	7,81	3,81	0,0540	0,286	13,63	28,0
Архангельск	301199	6,8	13,2	8,29	0,0802	0,371	339,5	2,44
		15,3	9,03	4,44	0,0617	0,290	15,88	28,0
Мурманск	270384	10,5	9,15	5,46	0,0583	0,344	170,9	3,19
		19,1	7,30	2,71	0,0456	0,279	10,25	26,4
Норильск	174453	13,6	4,47	1,86	0,0275	0,298	20,06	9,27
		19,3	4,22	1,49	0,0259	0,278	5,46	27,3
Воркута	56985	10,4	2,75	1,75	0,0175	0,357	82,60	2,12
		12,4	2,41	1,27	0,0155	0,319	4,94	25,7
Апатиты	49647	8,3	2,06	1,53	0,0149	0,344	32,23	4,75
		14,4	1,61	0,87	0,0119	0,282	3,06	28,4
Салехард	47910	6,7	2,51	1,54	0,0136	0,411	76,24	2,02
		12,2	1,52	0,75	0,0096	0,315	2,99	25,1
Нарьян-Мар	23399	9,2	1,61	0,80	0,0075	0,428	46,14	1,73
		22,8	1,05	0,35	0,0052	0,337	1,59	22,0
Дудинка	19556	9,5	0,69	0,49	0,0044	0,380	10,96	4,47
		16,5	0,53	0,22	0,0032	0,303	0,83	26,5
Тикси	4173	7,9	0,31	0,27	0,0018	0,472	5,090	5,30
		14,1	0,16	0,07	0,0009	0,333	0,32	21,9
Диксон	319	6,5	0,28	0,23	0,0014	0,529	0,890	25,84
		11,5	0,11	0,05	0,0006	0,350	0,26	19,2

¹² По переписи 2020 г.

Доля площади крыш относительно площади административной территории находится в интервале от 1,7 до 9,3 % за исключением поселения Диксон (25,8 %). Таким образом, площадь застройки на административной территории не превышает 10 % для одиннадцати рассматриваемых городов, что совпадает с плотностью застройки в городах России с населением не менее полумиллиона человек [14]. Следовательно, целесообразно рассматривать *урбанизированную территорию*, так как не менее 90 % административной территории не генерируют АПТ.

За *урбанизированную территорию* принимается часть города со зданиями высотой не менее 6 м, а ее площадь определяется суммарной площадью ячеек сетки, содержащих хотя бы часть одного такого здания. Ячейки расчетной сетки не относятся к урбанизированной территории, если они не содержат элементы зданий. Например, не относятся к урбанизированной территории сады, парки, площади, дворы и т. п. [13, 14].

На административной территории медианное значение высоты зданий колеблется от 3,0 до 15,0 м, оно равно 15,0 м для Норильска, 9,0 м для Воркуты, 3,0 для Сургута и 6,0 м для остальных городов. На урбанизированной территории медианная высота находится в диапазоне от 9,0 до 15,0 м, причем для Сургута, Якутска, Салехарда и Диксона она равна 9,0 м, для Архангельска и Воркуты — 10,0 м, а для остальных городов — 15,0 м.

Отношение площади поверхностей наружных ограждающих конструкций к заключенному в них объему здания называется эффективным показателем компактности здания. Более высокие значения показателя компактности соответствуют более высокому уровню теплопотерь, например, АПТ с одного квадратного метра возрастает в 2–2,3 раза в зависимости от климатических условий при увеличении этого показателя с 0,15 до 0,65 м⁻¹ [17]. На административной территории среднее значение показателя компактности по выборке — 0,39 м⁻¹, заметим, что для крупных городов средний по выборке показатель компактности также равен 0,39 м⁻¹ [14]. На урбанизированной территории показатель компактности меньше, он составляет порядка 66–93 % относительно административных границ. Таким образом, здания на урбанизированной территории обладают большей энергоэффективностью, что приводит к меньшей эмиссии тепловой энергии с 1 м³.

Во время отопительного периода некоторые здания не излучают тепло. Их можно определить как по типу, так и по площади, а проверить тип — по атрибутивной информации из OSM [16]. К таким зданиям относятся постройки площадью меньше 20 м², которые являются либо вспомогательными и не отапливаются, либо дают незначительный вклад в общий поток тепла, а также гаражи, стоянки, водонапорные башни, цистерны, элеваторы и т. п., поэтому они были удалены из модели [13, 14].

Площадь урбанизированной территории относительно административной территории соответственно составляет 29 % для Диксона и 27 % для Норильска, для остальных городов это отношение находится в интервале 3–9 %, при этом на урбанизированной территории площадь застройки (крыш) занимает порядка 20–30 %.

На рис. 1 в качестве примера приведена построенная геометрическая модель района Гвардейской площади в г. Норильске и фотография этой площади со стороны ул. Кирова. Сравнение фотографии и модели, по крайней мере визуальное, указывает на правильность модели городской застройки (это также подтверждается изображениями городской застройки в [13, 14]).

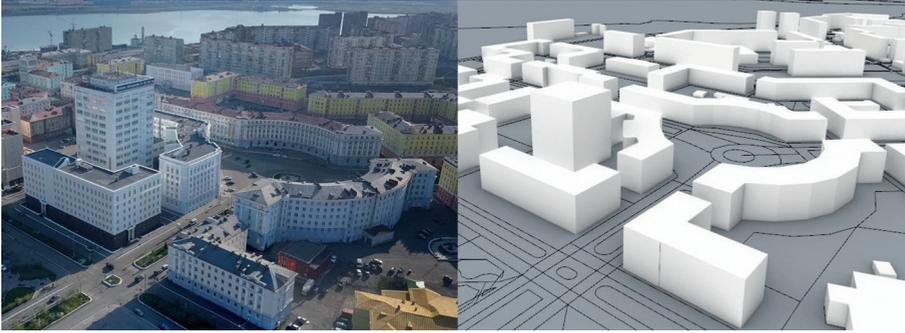


Рис. 1. Вид на Гвардейскую площадь со стороны ул. Кирова в г. Норильске (слева) и трехмерная модель этой же территории (справа)

Fig. 1. View of Gvardeyskaya Square from the Kirov St. in Norilsk (left) and a three-dimensional model of the same territory (right)

По геометрической модели вычислены площади всех ограждающих конструкций, что необходимо для оценки АПТ по первому алгоритму, а также объемы всех зданий, являющиеся основой для определения АПТ по второму и третьему алгоритмам. Построенная модель позволяет рассчитать пространственное распределение АПТ с произвольным разрешением, которое в данной работе выбрано равным $30 \times 30 \text{ м}^2$.

Расчет антропогенного потока тепла

Три алгоритма расчета АПТ разработаны при предположении, что городские здания соответствуют действующим строительным нормам СП 131.13330.2020, СП 50.13330.2012 и ГОСТ 30494-2011. Первый и третий алгоритмы описаны в более ранних работах [6, 13, 14], второй алгоритм излагается впервые. Оценка АПТ происходит с учетом разности температур воздуха внутри $t_{\text{вн}}$ и снаружи $t_{\text{нар}}$ здания.

Первый алгоритм [13, 14] использует «нормируемое сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций» $R_i^{\text{НОР}}$. Приведенное сопротивление теплопередаче отдельных ограждающих конструкций $R_i^{\text{ПП}}$ «должно быть не меньше нормируемых значений (поэлементные требования)» (пункт 5.1 в СП 50.13330.2012). Значение $R_i^{\text{НОР}}$ зависит от региона и определяется средней многолетней величиной «градусосутки отопительного периода (ГСОП)» (см. (5.2) в СП 50.13330.2012)

$$\text{ГСОП} = (t_{\text{вн}} - t_{\text{от}}) d_{\text{от}}, \quad (1)$$

где $t_{\text{от}}$ — средняя температура атмосферного воздуха за время отопительного периода, °С, и $t_{\text{от}}$ — его продолжительность, сут., берутся из таблицы 3.1 в СП 131.13330.2020.

$R_i^{\text{ПП}}$ выбирается равным $R_i^{\text{НОР}}$, что соответствует максимальному уровню теплопотерь здания. Согласно формуле (5.1) в СП 50.13330.2012, $R_i^{\text{НОР}}$ равно требуемому сопротивлению теплопередаче $R_i^{\text{ТР}}$ при коэффициенте $m_p = 1$, где используются интерполированные значения $R_i^{\text{ТР}}$ из таблицы 3 СП 50.13330.2012 для жилых зданий, гостиниц и общежитий. В значениях коэффициента учитываются наилучшие погодные условия, в том числе ветровая нагрузка и высокая влажность.

Коэффициент теплопередачи K_i , Вт/(м²·°С) через i -й элемент ограждающей конструкции вычисляется по формуле (см. табл. 3 в СП 50.13330.2012),

$$K_i = 1/R_i^{\text{TP}}. \quad (2)$$

Таким образом, АПТ (Вт) от разных частей ограждающей конструкции, попадающих в j -ю ячейку расчетной сетки,

$$Q_F^i(j) = K_i(t_{\text{ВН}} - t_{\text{НАР}})S_i(j), \quad (3)$$

где $S_i(j)$, м², — суммарная площадь i -х элементов ограждающей оболочки, попавших в j -ю ячейку; $i = 1$ — стены, $i = 2$ — крыши и нижняя граница зданий, $i = 3$ — светопрозрачные конструкции, кроме фонарей.

Коэффициенты теплопередачи K_i принимаются постоянными для всего города.

Второй алгоритм использует «нормируемое значение удельной теплозащитной характеристики здания» $k_{\text{ОБ},i}^{\text{TP}}$, Вт/(м³·°С). Удельная теплозащитная характеристика здания должна быть не больше нормируемого значения, величина которого определяется отопляемым объемом здания и градусо-сутками отопительного периода в районе строительства согласно табл. 7 и формулам (5.5) и (5.6) в СП 50.13330.2012,

$$Q_F^i(j) = k_{\text{ОБ},i}^{\text{TP}}(t_{\text{ВН}} - t_{\text{НАР}})V_i(j), \quad (4)$$

где $V_i(j)$ — объем части i -го здания, попадающего в j -ю ячейку, м³, а $k_{\text{ОБ},i}^{\text{TP}}$ — нормируемое значение удельной теплозащитной характеристики этой части здания.

Третий алгоритм [13, 14] использует «нормируемую (базовую) удельную характеристику расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания» $q_{\text{ОТ}}^{\text{TP}}$ (см. пункт 10 в СП 50.13330.2012).

Расчетное значение удельной характеристики расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания $q_{\text{ОТ}}^{\text{P}}$ не должно превышать $q_{\text{ОТ}}^{\text{TP}}$, Вт/(м³·°С), которое определяется количеством этажей и типом здания (см. табл. 14 в СП 50.13330.2012).

Значение $q_{\text{ОТ}}^{\text{P}}$ зависит от солнечной радиации (которая мала), внутреннего теплоступления, вентиляции, теплозащитных характеристик здания. Два последних параметра определяются климатическими условиями. Величина $q_{\text{ОТ}}^{\text{P}}$ должна рассчитываться для каждого здания, что нереально, так как отсутствует подробная информация о конструкции зданий и их инженерных системах. Учитывая, что должно быть $q_{\text{ОТ}}^{\text{P}} \leq q_{\text{ОТ}}^{\text{TP}}$, для получения верхней оценки теплопотерь здания в расчетах принимается $q_{\text{ОТ}}^{\text{P}} = q_{\text{ОТ}}^{\text{TP}}$, где $q_{\text{ОТ}}^{\text{TP}}$ определяется только этажностью и типом здания и не зависит от климатических условий в регионе строительства. В конечном счете тепловая энергия, расходуемая на отопление и вентиляцию, выделяется в окружающую среду в виде АПТ.

АПТ (Вт) от i -й части здания, находящегося в j -й расчетной ячейке,

$$Q_F^i(j) = q_{\text{ОТ},i}^{\text{TP}}(t_{\text{ВН}} - t_{\text{НАР}})V_i(j), \quad (5)$$

где $q_{\text{ОТ},i}^{\text{TP}}$ — нормируемая удельная характеристика расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания i -го типа, Вт/(м³·°С), $V_i(j)$ — объем части i -го здания в ячейке j , м³.

АПТ от разных зданий в j -й ячейке (см. (3)–(5)),

$$Q_F(j) = \sum_i Q_F^i(j).$$

Отсюда получаем оценку АПТ для территории

$$Q_F = \sum_{j=1}^N Q_F(j),$$

где N — число расчетных ячеек, покрывающих территорию.

Потери тепла из-за вентиляции здания оцениваются в 20 % от общих потерь [18], поэтому итоговое значение Q_F в рамках *первого* и *второго* алгоритмов необходимо откорректировать:

$$Q_F = \frac{Q_F}{80\%} 100\%.$$

При транспортировке тепла к зданиям по магистралям, расположенным под землей, теряется порядка 10 % в виде тепловых стоков $\Delta Q_{F,g}$, поэтому АПТ Q_F в рамках всех алгоритмов должен быть увеличен на величину теплового стока:

$$Q_F = Q_F + \Delta Q_{F,g} = (1 + 0,1) Q_F.$$

Плотность АПТ, усредненная по региону,

$$\bar{Q}_F = \frac{Q_F}{S_{\text{тер}}}, \quad (6)$$

где $S_{\text{тер}}$ — площадь административной или урбанизированной территории.

Коэффициенты теплопередачи K_i (см. (3)) постоянны в пределах города, $k_{\text{от}}^{\text{ТР}}$ зависят от объема здания, $q_{\text{от}}^{\text{ТР}}$ определяется типом и высотой здания, т. е. $k_{\text{от}}^{\text{ТР}}$ и $q_{\text{от}}^{\text{ТР}}$ индивидуальны для каждого городского здания.

В рамках первого алгоритма АПТ пропорционален площади ограждающих конструкций здания (см. (3)), в рамках второго и третьего — объему здания (см. (4) и (5)). Во всех алгоритмах для АПТ дается оценка сверху.

Отклонение расхода энергии на отопление и вентиляцию $q_{\text{от}}^{\text{П}}$ от нормируемой величины $q_{\text{от}}^{\text{ТР}}$ определяет класс энергоэффективности здания, поэтому знание класса энергоэффективности позволяет уточнить фактический расход энергии. Городским зданиям в настоящий момент присваиваются классы энергоэффективности, это позволит в будущем при расчете АПТ в рамках третьего алгоритма получить более точную оценку энергопотребления, что делает эту методику более перспективной. Как правило, первый алгоритм дает минимальную оценку АПТ, а третий — максимальную, поэтому можно предложить использовать усредненную по алгоритмам оценку АПТ.

АПТ с территорий, не содержащих здания (пустые ячейки расчетной сетки), принимается нулевым.

Рассматриваемые методики используют данные из свода правил, являющиеся, по сути, средними значениями, полученными в результате обработки большого массива данных, поэтому полученные результаты приводят к усредненной по территории оценке АПТ.

Суммарный АПТ за весь отопительный период во всех алгоритмах может быть вычислен, например, в результате умножения Q_F при $t_{\text{НАП}} = t_{\text{ОТ}}$ на длительность

отопительного периода $d_{от}$ (СП 131.13330.2020) или суммированием за дни отопительного периода с учетом наблюдаемых среднесуточных температур [13, 14].

При расчете АПТ температура воздуха в помещении $t_{вн}$ (см. (1), (3)–(5)) принимается равной 20 °С [13, 14].

Результаты моделирования антропогенного потока тепла для северных городов в течение отопительного периода

Полный АПТ вычисляется как в рамках административных границ, так и по урбанизированной территории. В среднем по выборке доля площади стен равна 70 %, площади крыш — 50 %, объема зданий — 73 %. Отсюда следует, что АПТ с урбанизированной территории ориентировочно должен быть порядка 60–80 % от АПТ с административной территории города.

Выделяемая с административной и урбанизированной территорий в течение отопительного сезона усредненная по региону плотность АПТ (Вт/(м²·°С)) (см. (6)) при разности между внутренней $t_{вн}$ и наружной $t_{нар}$ температурами воздуха в 1 °С ($t_{вн} - t_{нар} = 1$ °С) по трем алгоритмам, приведена в табл. 2.

Таблица 2

Средняя плотность антропогенного потока тепла при разности между внутренней $t_{вн}$ и наружной $t_{нар}$ температурами воздуха в 1 °С (Вт/(м²·°С))
Table 2

The average density of anthropogenic heat flow with the difference between the internal $t_{вн}$ and external $t_{нар}$ air temperatures of 1 °С (W/(m²·°С))

Город	$t_{от}, °С$	Административные границы			Урбанизированная территория		
		Алгоритм 1	Алгоритм 2	Алгоритм 3	Алгоритм 1	Алгоритм 2	Алгоритм 3
Сургут	–9,3	0,066	0,102	0,163	0,592	0,963	1,68
Якутск	–20,6	0,060	0,085	0,147	0,445	0,671	1,38
Архангельск	–4,5	0,041	0,062	0,086	0,559	0,885	1,34
Мурманск	–3,3	0,055	0,082	0,124	0,638	1,01	1,61
Норильск	–15	0,167	0,227	0,506	0,557	0,769	1,75
Воркута	–9,5	0,030	0,042	0,077	0,415	0,595	1,11
Апатиты	–4,5	0,070	0,105	0,170	0,516	0,830	1,38
Салехард	–11,3	0,029	0,041	0,069	0,425	0,622	1,18
Нарьян-Мар	–7,3	0,031	0,041	0,061	0,522	0,698	1,16
Дудинка	–15,0	0,055	0,072	0,145	0,470	0,651	1,41
Тикси	–19,4	0,053	0,067	0,134	0,375	0,469	1,09
Диксон	–11,2	0,281	0,360	0,697	0,308	0,423	0,96

В рамках рассматриваемой выборки разброс значений средней плотности АПТ, при $t_{вн} - t_{нар} = 1$ °С, для административной и урбанизированной территорий составляет в Вт/(м²·°С) 0,03–0,28 и 0,31–0,64 по первому алгоритму; 0,04–0,36 и 0,42–1,00 по второму алгоритму; 0,06–0,70 и 0,96–1,75 по третьему алгоритму соответственно.

Средняя плотность АПТ (в Вт/м²) может быть получена при умножении данных табл. 2 на разность температур между внутренним $t_{вн}$ и наружным $t_{нар}$ воздухом ($t_{вн} - t_{нар}$). Средняя плотность АПТ (Вт/м²) с административной и урбанизированной

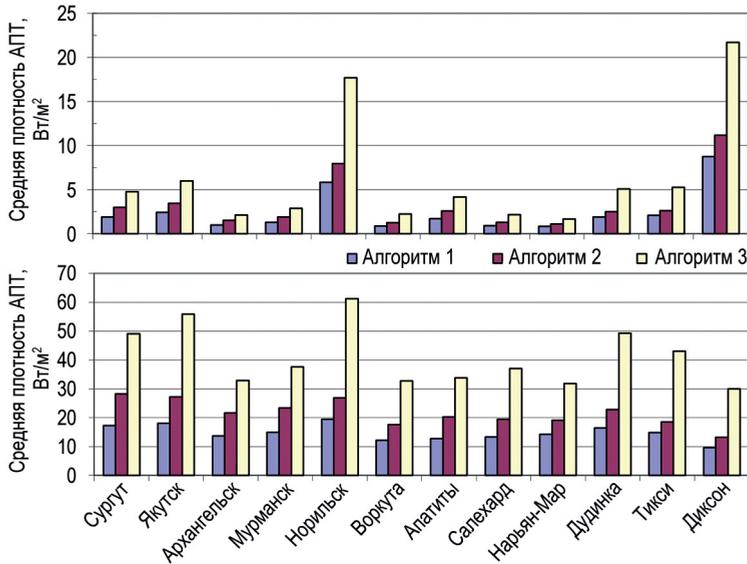


Рис. 2. Средняя плотность антропогенного потока тепла с административной (верхний рисунок) и урбанизированной (нижний рисунок) территории при температуре наружного воздуха $t_{\text{НАР}}$ равной средней температуре отопительного периода $t_{\text{ОТ}}$ ($\text{Вт}/\text{м}^2$)

Fig. 2. The average density of anthropogenic heat flow from the administrative (top drawing) and urbanized (bottom drawing) territories with the outdoor temperature $t_{\text{НАР}}$ equal to the average temperature of the heating period $t_{\text{ОТ}}$ (W/m^2)

территорий при температуре наружного воздуха $t_{\text{НАР}}$ равной средней температуре отопительного сезона $t_{\text{ОТ}}$ ($t_{\text{НАР}} = t_{\text{ОТ}}$) СП 50.13330.2012, показана на рис. 2.

На административной территории значения средней плотности АПТ при $t_{\text{НАР}} = t_{\text{ОТ}}$ находятся в диапазоне 0,84–8,8, 1,12–11,2 и 1,67–21,7 $\text{Вт}/\text{м}^2$ по 1-му, 2-му и 3-му алгоритмам соответственно, а для урбанизированной территории имеем 9,60–19,5, 13,2–28,2 и 30,0–61,2 $\text{Вт}/\text{м}^2$.

Для сравнения, согласно модели крупномасштабного городского потребления энергии (LUCY) глобальный средний городской АПТ имеет суточный диапазон 0,7–3,6 $\text{Вт}/\text{м}^2$ и больше, например, в Ванкувере в отдельных ячейках сетки он может достигать 119 $\text{Вт}/\text{м}^2$, а в Лондоне — 106,7 $\text{Вт}/\text{м}^2$ [3]. В оценках, приведенных для Томска [19], плотность АПТ, обусловленного отоплением с ноября по февраль, находится в интервале от 3 до 4 $\text{Вт}/\text{м}^2$, аналогичная оценка для Томска в [20] заключается в интервале от 2,48 до 3,84 $\text{Вт}/\text{м}^2$. Согласно расчетам в [14], полученным по первому и третьему алгоритмам, рассматриваемым в данной статье, плотность АПТ при $t_{\text{НАР}} = t_{\text{ОТ}}$ для Томска с административной территории равна 2,93 и 6,91 $\text{Вт}/\text{м}^2$ соответственно.

Умножая среднюю плотность АПТ (см. табл. 2) на $(t_{\text{ВН}} - t_{\text{НАР}})$ и на длительность суток (в сек.), получим среднюю плотность антропогенной энергии, выделяемой с административной и урбанизированной территорией. В рамках административных границ плотность антропогенной энергии, излучаемая в течение суток, находится в пределах 0,05–0,54 $\text{МДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$ по первому алгоритму, 0,06–0,69 $\text{МДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$ по

второму и 0,12–1,34 МДж/(м²·сут) по третьему. Для урбанизированной территории соответственно имеем 0,59–2,24, 0,77–3,52 и 1,67–5,66 МДж/(м²·сут).

Умножая среднюю плотность АПТ (см. табл. 2) на $(t_{\text{ВН}} - t_{\text{НАР}})$, на длительность суток (в сек.) и на площадь административной (или урбанизированной) территории из табл. 1, найдем антропогенную энергию, выделяемую с территории за сутки. Далее суммируя эту энергию за весь срок или конкретные дни отопительного периода, получаем оценку излучаемой антропогенной энергии.

Средняя антропогенная энергия, излучаемая за отопительный сезон с административной (верхняя строка для каждого города) и урбанизированной (нижняя строка) территорий при ежедневной среднесуточной температуре наружного воз-

Таблица 3

Средняя энергия (10^{15} Дж), выделяемая за отопительный сезон с административной (верхняя строка) и урбанизированной (нижняя строка) территории при среднесуточной температуре наружного воздуха $t_{\text{НАР}}$ усредненной в течение 2013–2018 и 2018–2023 гг.

Table 3

The average energy (10^{15} J) emitted during the heating season from the administrative (top row) and urbanized (bottom row) territories with the average daily outdoor air temperature $t_{\text{НАР}}$ averaged over 2013–2018 and 2018–2023

Город	Алгоритм 1		Алгоритм 2		Алгоритм 3	
	2013–2018	2018–2023	2013–2018	2018–2023	2013–2018	2018–2023
Сургут	7,29	6,84	11,37	10,66	18,2	17,0
	5,42	5,05	8,83	8,22	15,37	14,31
Якутск	8,56	8,47	12,12	12,00	21,1	20,9
	4,94	4,90	7,46	7,39	15,30	15,15
Архангельск	6,52	6,67	9,81	10,02	13,6	13,9
	4,12	4,21	6,53	6,68	9,90	10,11
Мурманск	4,64	4,76	6,92	7,09	10,4	10,7
	3,23	3,31	5,09	5,22	8,18	8,39
Норильск	2,64	2,52	3,60	3,44	8,02	7,66
	2,40	2,29	3,31	3,17	7,53	7,19
Воркута	1,67	1,63	2,34	2,29	4,27	4,16
	1,38	1,35	1,98	1,94	3,71	3,62
Апатиты	1,11	1,14	1,66	1,71	2,69	2,76
	0,77	0,80	1,24	1,28	2,06	2,13
Салехард	1,59	1,53	2,22	2,13	3,74	3,59
	0,90	0,87	1,32	1,27	2,52	2,42
Нарьян-Мар	0,866	0,829	1,15	1,10	1,73	1,65
	0,506	0,485	0,677	0,648	1,128	1,081
Дудинка	0,474	0,452	0,623	0,596	1,25	1,20
	0,308	0,294	0,426	0,407	0,923	0,882
Тикси	0,255	0,246	0,321	0,310	0,643	0,620
	0,113	0,109	0,142	0,137	0,331	0,319
Диксон	0,223	0,217	0,285	0,277	0,552	0,538
	0,071	0,069	0,098	0,095	0,223	0,217

духа¹³, усредненная за каждый из периодов 2013–2018 и 2018–2023 гг., приведена в табл. 3. При этом вычислении отопительный сезон начинается, когда в течение 5 суток среднесуточная температура воздуха не превышает 8 °С, и заканчивается, если среднесуточная температура воздуха превышает 8 °С.

Сургут, Якутск, Норильск, Дудинка и Тикси характеризуются более низкой наблюдаемой средней среднесуточной температурой в течение отопительного сезона за период 2018–2023 гг. по сравнению с предшествующим, но их отопительный сезон является более коротким. В остальных городах средняя температура отопительного сезона выше, но при этом в Архангельске, Мурманске, Воркуте и Апатитах отопительный сезон длиннее, а в Салехарде, Нарьян-Маре и Диксоне — короче. В итоге за период 2018–2023 гг. в Архангельске, Мурманске и Апатитах выделенная антропогенная энергия больше, чем за предшествующий период, а в остальных городах — меньше.

Из табл. 3 следует, что за исключением Архангельска, Мурманска и Апатитов период 2018–2023 гг. характеризуется несколько меньшим объемом антропогенного тепла, чем предыдущий.

Доля антропогенной энергии, излучаемой за отопительный сезон с урбанизированной территории, при учете ежедневной среднесуточной температуры наружного воздуха, и усредненная за 5-летний период 2018–2023 гг., по всем алгоритмам относительно административной территории составляет в %: для Сургута — 74–84, Якутска — 58–73, Архангельска — 63–73; Мурманска — 70–78; Норильска — 91–94; Воркуты — 83–87; Апатитов — 70–77; Салехарда — 57–67; Нарьян-Мара — 58–65; Дудинки — 65–74; Тикси — 44–51; Диксона — 32–40. Хотя антропогенная энергия с урбанизированной территории меньше, чем с административной, но она локализована на 10 % административной территории (см. табл. 1, за исключением Диксона и Норильска).

Согласно данным по теплоснабжению: в Сургуте отпуск тепловой энергии за 2021 г. составляет 3916,88 тыс. Гкал¹⁴, что эквивалентно 16,4 ПДж; в Якутске за 2008 г. аналогично имеем 2210 тыс. Гкал¹⁵, или 9,25 ПДж; в Мурманске за 2024 г. 2004,3 тыс. Гкал¹⁶, или 6,28 ПДж; в Апатитах и Кировске за 2024 г. 1524,81 тыс. Гкал¹⁷, или 6,38 ПДж, что дает для Апатитов 4,79 ПДж¹⁸; в Салехарде за 2015 г. отпущено в сеть 495,24 тыс. Гкал¹⁹, или 1,61 ПДж, в Нарьян-Маре за 2012 г. потрачено на отопле-

¹³ Специализированные массивы для климатических исследований. URL: <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/> (дата обращения: 09.03.2025).

¹⁴ Обосновывающие материалы к актуализированной схеме теплоснабжения городского округа город Сургут на период до 2035 года (Актуализация на 2023 год). Книга 3. Глава 2. Существующее и перспективное потребление тепловой энергии на цели теплоснабжения. Исполнитель: ООО «ДЖИ ДИНАМИКА». г. Санкт-Петербург, 2022 г. https://admsurgut.ru/files/materials/files/files6/Книга_3_Глава_2_Перспектива-1.pdf (дата обращения: 11.03.2025).

¹⁵ Гаврилов С.Ю., Андриевский В.В. Особенности схемы централизованного теплоснабжения г. Якутска. Новости теплоснабжения. 2009; 3(103). https://www.rosteplu.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=2674 (дата обращения: 11.03.2025).

¹⁶ <https://www.tgc1.ru/production/complex/kolsky-branch/> (дата обращения: 11.03.2025).

¹⁷ Указана суммарная тепловая мощность, потребляемая Апатитами и Кировском, поэтому приведенное значение скорректировано с учетом объема зданий для города Апатиты

¹⁸ То же, что 17.

¹⁹ <https://docs.cntd.ru/document/444824558> (дата обращения: 11.03.2025).

ние с учетом потерь в теплосетях 271,1 тыс. Гкал²⁰, или 1,14 ПДж. Указанные значения в целом согласуются с результатами в табл. 3, но заметим, что особенно в небольших северных поселениях для отопления также используется электрическая энергия.

Анализ результатов показывает, что существует линейная зависимость между выделяемой антропогенной энергией и объемом зданий, представленная в табл. 4 и 5 (в которых Апатиты отнесены к группе городов с населением не менее 50 тысяч человек).

Гистограммы антропогенной энергии и ее плотности, а также карты распределения плотности антропогенной энергии, выделяемой за отопительный период при $t_{\text{НАР}} = t_{\text{ОТ}}$ с административных территорий Воркуты и Апатитов, изображены для трех алгоритмов на рис. 3 и 4.

Таблица 4

Коэффициент линейной регрессии (МДж/м³) между антропогенной энергией, выделяемой с административной и урбанизированной территориями в течение отопительного периода (при $t_{\text{НАР}} = t_{\text{ОТ}}$), и суммарным объемом зданий

Table 4

Linear regression coefficient (MJ/m³) between anthropogenic energy emitted from administrative and urbanized territories during the heating period (with $t_{\text{НАР}} = t_{\text{ОТ}}$), and the total volume of buildings

Алгоритмы	В случае административной территории			В случае урбанизированной территории		
	Население менее 50 тыс. чел.	Население не менее 50 тыс. чел.	По всей выборке	Население менее 50 тыс. чел.	Население не менее 50 тыс. чел.	По всей выборке
1	98,6 ($R^2 = 0,94$)	90,2 ($R^2 = 0,75$)	97,0 ($R^2 = 0,94$)	90,6 ($R^2 = 0,96$)	63,1 ($R^2 = 0,85$)	79,0 ($R^2 = 0,97$)
2	143,6 ($R^2 = 0,96$)	145,0 ($R^2 = 0,84$)	146,8 ($R^2 = 0,96$)	136,0 ($R^2 = 0,98$)	114,4 ($R^2 = 0,92$)	126,6 ($R^2 = 0,99$)
3	243,0 ($R^2 = 0,94$)	186,6 ($R^2 = 0,60$)	227,4 ($R^2 = 0,91$)	242,1 ($R^2 = 0,95$)	157,5 ($R^2 = 0,56$)	218,3 ($R^2 = 0,91$)

Таблица 5

Коэффициент линейной регрессии (ГДж/чел.) между антропогенной энергией, выделяемой с административной территории в течение отопительного периода (при $t_{\text{НАР}} = t_{\text{ОТ}}$), и численностью населения

Table 5

Linear regression coefficient (GJ/person) between anthropogenic energy emitted from the administrative territory during the heating season (with $t_{\text{НАР}} = t_{\text{ОТ}}$) and the population size

Алгоритмы	Население менее 50 тыс. чел.	Население не менее 50 тыс. чел.	По всей выборке
1	31,9 ($R^2 = 0,95$)	22,7 ($R^2 = 0,92$)	22,0 ($R^2 = 0,95$)
2	44,9 ($R^2 = 0,95$)	34,3 ($R^2 = 0,94$)	33,1 ($R^2 = 0,96$)
3	72,9 ($R^2 = 0,97$)	53,1 ($R^2 = 0,91$)	52,5 ($R^2 = 0,95$)

²⁰ <https://www.rosteplo.ru/w/Нарьян-Мар> (дата обращения: 11.03.2025).

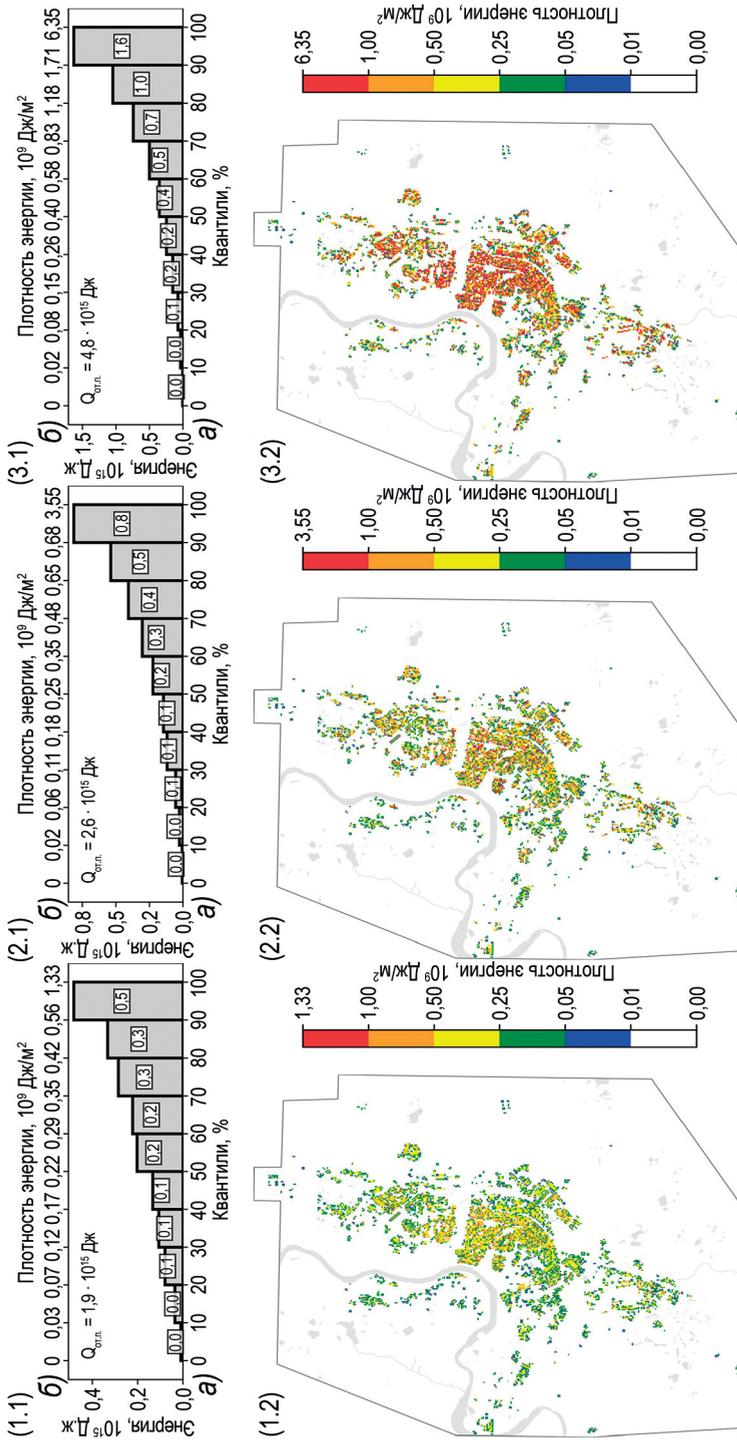


Рис. 3. Гистограммы ((1.1)–(3.1)) распределений антропогенной энергии (ПДж) и плотности антропогенной энергии (Дж/м²) (б), соответствующие уровням квантилей (а), а также карты ((1.2)–(3.2)) распределения плотности антропогенной энергии (Дж/м²), рассчитанные по трем алгоритмам, при $t_{нагр} = t_{от}$ за отопительный период с административной территории Воркуты. Числа, приведенные в столбцах на гистограммах ((1.1)–(3.1)), указывают на количество генерируемой антропогенной энергии в ПДж
 Fig. 3. Histograms ((1.1)–(3.1)) of the distributions of anthropogenic energy (PJ) and anthropogenic energy density (GJ/m²) (б), corresponding to the quantile levels (а), and maps ((1.2)–(3.2)) of the distribution of anthropogenic energy density (GJ/m²), calculated using three algorithms, with $t_{нагр} = t_{от}$ for the heating season from the administrative territory of Yarkutka. The numbers given in the columns on the histograms ((1.1)–(3.1)) indicate the amount of generated anthropogenic energy in PJ

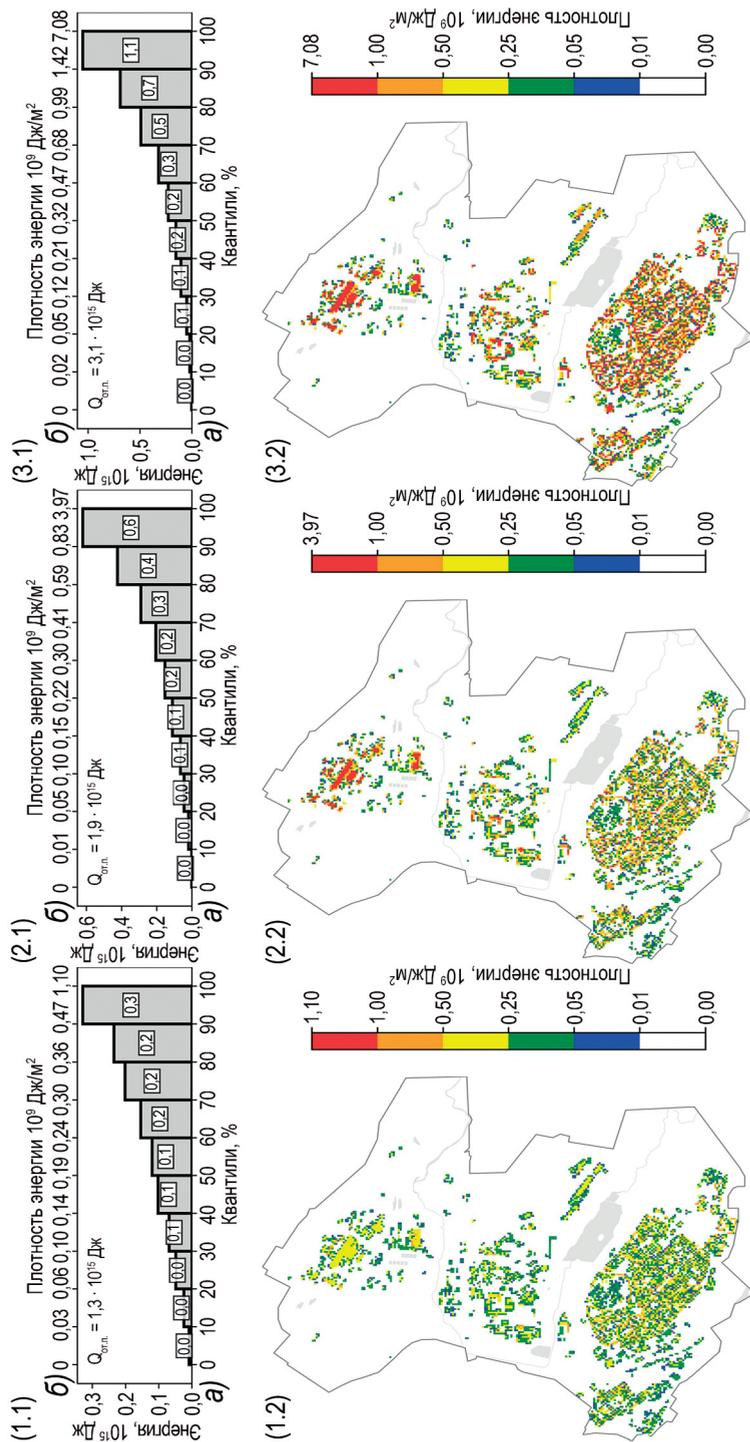


Рис. 4. Гистограммы ((1.1)–(3.1)) распределений антропогенной энергии (ПДж) и плотности антропогенной энергии (ГДж/м²) (б), соответствующие уровням квантилей (а), а также карты ((1.2)–(3.2)) распределения плотности антропогенной энергии (ГДж/м²), рассчитанные по трем алгоритмам, при $t_{\text{НАР}} = t_{\text{ОТ}}$ за отопительный период с административной территории Апатитов. Числа, приведенные в столбцах на гистограммах (1.1)–(3.1), указывают на количество генерируемой антропогенной энергии в ПДж

Fig. 4. Histograms ((1.1)–(3.1)) of the distributions of anthropogenic energy (PJ) and anthropogenic energy density (GJ/m²) (б), corresponding to the quantile levels (а), and maps ((1.2)–(3.2)) of the distribution of anthropogenic energy density (GJ/m²), calculated using three algorithms, with $t_{\text{НАР}} = t_{\text{ОТ}}$ for the heating season from the administrative territory of Apatite. The numbers given in the columns on the histograms (1.1)–(3.1) indicate the amount of generated anthropogenic energy in PJ

В Воркуте по первому алгоритму, например (см. рис. 3(1.1)), 10 % зданий выделяют минимальное количество антропогенной энергии 0,009 ПДж с плотностью, не превышающей 0,03 ГДж/м²; 10 % — генерируют 0,036 ПДж с плотностью от 0,03 до 0,07 ГДж/м²; а 10 % — максимально излучают 0,481 ПДж с плотностью от 0,53 до 1,33 ГДж/м². В целом все здания создают энергию в объеме 1,88 ПДж. Аналогичные результаты показаны на рис. 3(2.1) по второму и на рис. 3(3.1) по третьему алгоритмам. Приведены карты распределения плотности антропогенной энергии с территории Воркуты по первому (см. рис. 3(1.2)), второму (см. рис. 3(2.2)) и третьему (см. рис. 3(3.2)) алгоритмам.

На рис. 4 показаны результаты для Апатитов. Визуальное сравнение приведенной тепловой карты Апатитов с полем температуры, полученным по тепловым космическим снимкам высокого пространственного разрешения [10], показывает хорошее согласование между ними.

Использование первого алгоритма позволяет оценить АПТ вниз к подстилающей поверхности от нижней границы здания в течение отопительного сезона. Так, плотность АПТ при $t_{\text{НАР}} = t_{\text{ОТ}}$ с урбанизированной территории (в Вт/м²): Сургу́та — 1,96, Якутска — 1,88, Архангельска — 1,65; Мурманска — 1,43; Норильска и Апатитов — 1,60; Воркуты — 1,43; Салехарда — 1,47; Нарьян-Мара — 1,20; Дудинки — 1,69; Тикси — 1,23 и Диксона — 1,20. При этом энергия за отопительный период, выделяемая с урбанизированной территории вниз, соответственно равна (ПДж) для Сургу́та — 0,669; Якутска — 0,557; Архангельска — 0,562; Мурманска — 0,346; Норильска — 0,224; Воркуты — 0,182; Апатитов — 0,114; Салехарда — 0,108; Нарьян-Мара — 0,0474; Дудинки — 0,0358; Тикси — 0,0100 и Диксона — 0,0099.

Коэффициенты линейной регрессии K_V между антропогенной энергией, выделяемой с административной территории вниз к почве, в зависимости от объема зданий и численности населения соответственно приведены в табл. 6 и 7.

Таблица 6

Коэффициент линейной регрессии (МДж/м³) между антропогенной энергией, выделяемой вниз от нижней границы зданий с административной и урбанизированной территорий в течение отопительного периода (при $t_{\text{НАР}} = t_{\text{ОТ}}$), и суммарным объемом зданий

Table 6

Linear regression coefficient (MJ/m³) between anthropogenic energy released downwards from the lower boundary of buildings in administrative and urbanized areas during the heating period (with $t_{\text{НАР}} = t_{\text{ОТ}}$), and the total volume of buildings

В случае административной территории			В случае урбанизированной территории		
Население менее 50 тыс. чел.	Население не менее 100 тыс. чел.	По всей выборке	Население менее 50 тыс. чел.	Население не менее 100 тыс. чел.	По всей выборке
13,4 ($R^2 = 0,98$)	14,0 ($R^2 = 0,87$)	12,9 ($R^2 = 0,96$)	11,1 ($R^2 = 0,98$)	9,19 ($R^2 = 0,93$)	8,81 ($R^2 = 0,98$)

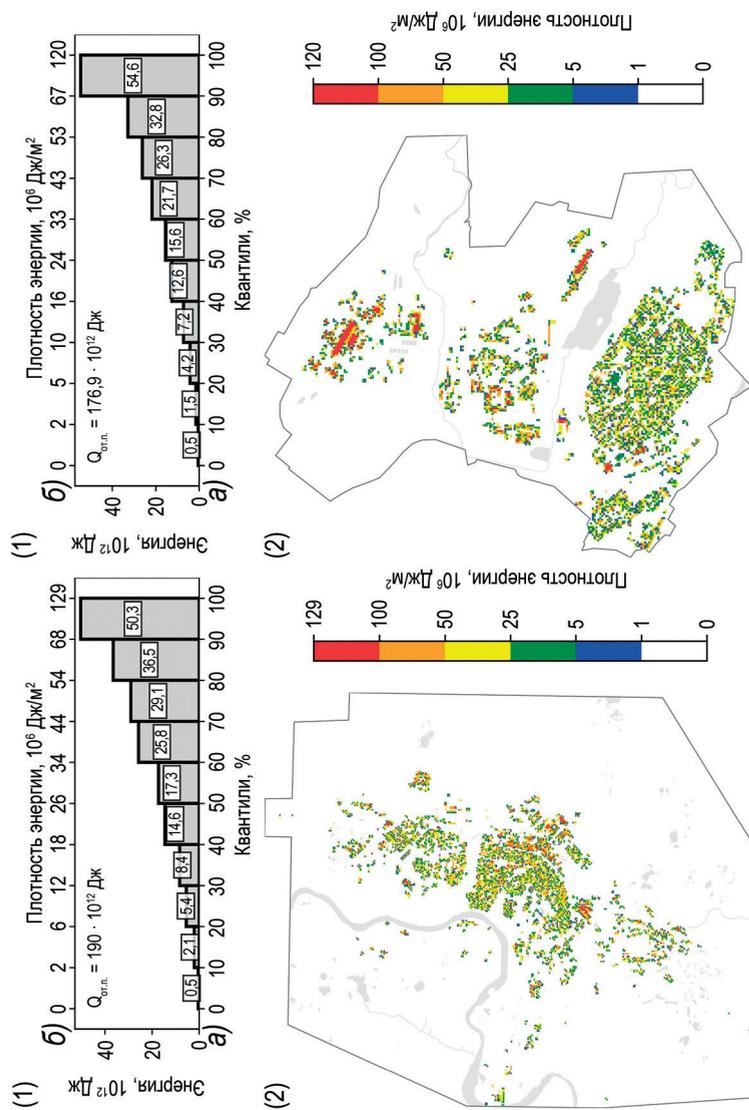


Рис. 5. Антропогенное тепло, направленное вниз к подстилающей поверхности от нижней границы здания, рассчитанное по первому алгоритму, в течение отопительного сезона при $t_{нар} = t_{от}$ с территории Воркуты (слева) и Апатитов (справа). Обозначения как на рис. 3

Fig. 5. Anthropogenic heat directed downwards to the underlying surface from the lower boundary of the building, calculated by the first algorithm, during the heating season from the territory of Vorkuta (left) and Apatite (right). Notation as in Fig. 3

Таблица 7

Коэффициент линейной регрессии (ГДж/чел) между антропогенной энергией, выделяемой вниз от нижней границы зданий с административной территории в течение отопительного периода (при $t_{\text{НАР}} = t_{\text{ОТ}}$), и численностью населения

Table 7

Linear regression coefficient (GJ/person) between anthropogenic energy emitted downwards from the lower boundary of buildings from the administrative territory during the heating period (with $t_{\text{НАР}} = t_{\text{ОТ}}$), and the population size

Население менее 50 тыс. чел.	Население не менее 50 тыс. чел.	По всей выборке
3,92 ($R^2 = 0,95$)	2,97 ($R^2 = 0,89$)	2,88 ($R^2 = 0,94$)

Антропогенное тепло, напрямую направленное к подстилающей поверхности от нижней границы здания в течение отопительного сезона при $t_{\text{НАР}} = t_{\text{ОТ}}$, для административной территорий Воркуты и Апатитов представлено на рис. 5.

Заключение

Предложен и реализован метод оценки с высоким пространственным разрешением распределения антропогенного потока тепла от городской застройки в течение отопительного периода, который не требует прямых измерений.

Требуемые значения сопротивления теплопередаче R_i^{TP} , приведенные в таблице 3 СП 50.13330.2012, устанавливаются при проектировании здания. Это минимальные требования, а не фактические характеристики существующих конструкций. Реальные здания имеют тепловые мосты (стыки, арматура), износ и ошибки монтажа, что снижает эффективное сопротивление и увеличивает теплопотери. Если при выполнении расчета удельной характеристики расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания по третьему алгоритму расчетное значение $q_{\text{ОТ}}^{\text{P}}$ превышает нормируемое значения $q_{\text{ОТ}}^{\text{TP}}$, то допускается уменьшение нормируемого сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций R_i^{HOP} , что реализуется выбором коэффициента $m_p \leq 1$ (см. (5.1) в СП 50.13330.2012). Следовательно, оценка АПТ по первому алгоритму может быть увеличена до значения, получаемого по второму, поэтому величина АПТ должна находиться между оценками по первому и третьему алгоритмам.

В рамках первого и второго алгоритмов используется предположение, что вентиляция создает дополнительно 20 % теплопотерь [18]. Эта оценка получена для общественных зданий, поэтому величина АПТ, рассчитанная по третьему алгоритму, учитывающему потери тепла на вентиляцию разных типов зданий, отличается от оценки по второму алгоритму.

Таким образом, первые два алгоритма (в отличие от третьего) недостаточно корректно учитывают потери тепла на вентиляцию, а третий не зависит от климатических условий в регионе строительства. К тому же предположение, что здания соответствуют строительным нормам по теплоизоляции, выполняется по городу в среднем. Следовательно, не зная классы энергоэффективности зданий и учитывая неопределенность в теплофизических параметрах зданий, а также то, что каждый из алгоритмов имеет свои минусы и плюсы (учет вентиляции, климатических условий, типов зданий), мы предлагаем использовать усредненную по трем алгоритмам оценку АПТ.

Анализ тепловых карт показывает районы с максимальным уровнем АПТ, т. е. районы с максимальным тепловым воздействием городской среды на атмосферу.

Выделяемая с урбанизированной территории плотность АПТ при средней температуре отопительного периода t_{OT} находится в интервале, нижняя граница которого оценивается от 9,60 до 19,5 Вт/м², а верхняя граница — от 30,0 до 61,2 Вт/м² для разных населенных пунктов. При этих условиях излучаемая антропогенная энергия (в ПДж) с административной территории равна: 8,29–20,7 для Сургута; 9,57–23,6 для Якутска; 7,37–15,4 для Архангельска; 5,16–11,6 для Мурманска; 2,99–9,09 для Норильска; 1,29–4,80 для Воркуты, Апатитов и Салехарда; 0,961–1,92 для Нарьян-Мара; 0,537–1,42 для Дудинки; 0,247–0,681 для Тикси и Диксона. Полученные результаты согласуются с количеством энергии, отпускаемой теплогенерирующими компаниями.

Плотность антропогенного потока тепла вниз к подстилающей поверхности с административной и урбанизированной территорий при $t_{НАР} = t_{OT}$ составляет соответственно 0,04–1,19 и 1,20–2,96 Вт/м².

Температура воздуха внутри зданий, особенно жилых, зачастую выше 20 °С, предусмотренных ГОСТ 30494-2011, поэтому реальное значение АПТ может быть выше рассчитанного.

Конфликт интересов. Конфликт интересов отсутствует.

Финансирование. Исследование выполнено при поддержке важнейшего инновационного проекта государственного значения (ВИПГЗ) «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ» (распоряжение Правительства РФ от 29 октября 2022 г. № 3240–р) в рамках НИР «Расширение системы климатического и экологического мониторинга и прогнозирования на территории России в целях обеспечения адаптационных решений в отраслевом и региональном разрезе, включая борьбу с опустыниванием».

Competing interests. No conflict of interests

Funding. The study was carried out with the support of the most important innovative project of state importance (VIPGP) “Unified national system for the monitoring of climatically active substances” (RF Government Order No. 3240-r dated October 29, 2022) within the framework of the R&D “Expanding the system of climatic and environmental monitoring and forecasting on the territory of Russia in order to provide adaptation solutions in the sectoral and regional context, including combating desertification”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Будыко М.И. *Изменения климата*. Л.: Гидрометеониздат; 1974. 280 с.
2. Van Deelen G. Another hot Arctic year indicates a new climate regime. *Eos*. 2024;105. <https://doi.org/10.1029/2024EO240566>
3. Allen L., Lindberg F., Grimmond C.S.B. Global city scale urban anthropogenic heat flux: model and variability. *International Journal of Climatology*. 2011;31(13):1990–2005.
4. Li D., Wang L., Liao W., Sun T., Katul G., BouZeid E., Marong B. Persistent urban heat. *Science Advances*. 2024;10(15): eadj7398. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adj7398>
5. Пененко В.В., Алоян А.Е. *Модели и методы для задач охраны окружающей среды*. Новосибирск: Наука, Сибирское отделение; 1985. 255 с.
6. Гинзбург А.С., Евсиков И.А., Фролькис В.А. Зависимость антропогенного потока тепла от температуры воздуха (на примере Санкт-Петербурга). *Известия РАН, Физика атмосферы и океана*. 2021;57(5):526–538. <https://doi.org/10.31857/S0002351521050060>

- Ginzburg, A.S., Evsikov I.A., Frolkis V.A. Dependence of the anthropogenic heat flux on air temperature (using St. Petersburg as an example). *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2021;57(5):461–471. <https://doi.org/10.1134/S0001433821050066>
7. Гинзбург А.С., Белова И.Н., Расплетина Н.В. Антропогенные потоки тепла в городских агломерациях. *Доклады АН*. 2011;439(2):256–259.
Ginzburg, A.S.; Belova, I.N.; Raspletina, N.V. Anthropogenic heat flows in urban agglomerations. *Doklady Akademii nauk*. 2011;439(2):256–259. (In Russ.).
 8. Makar P. A., Gravel S., Chirkov V., Strawbridge K.B., Froude F., Arnold J., Brook J. Heat flux, urban properties, and regional weather. *Atmospheric Environment*. 2006;40(15):2750–2766. <https://doi:10.1016/j.atmosenv.2005.11.061>
 9. Offerle B., Grimmond C.S.B., Fortuniak K. Heat storage and anthropogenic heat flux in relation to the energy balance of a central European city centre. *International Journal of Climatology*. 2005;25(10):1405–1419. <https://doi:10.1002/joc.1198>
 10. Варенцов М.И., Грищенко М.Ю., Константинов П.И. Сопоставление наземных и космических разномасштабных температурных данных на примере городов Российской Арктики для зимних условий. *Исследование Земли из космоса*. 2021;2:64–76. <https://doi.org/10.31857/S0205961421020093>
Varentsov M.I., Grischenko M.Yu., Konstantinov P.I. Comparison between in situ and satellite multiscale temperature data for Russian arctic cities for winter season. *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2021;2:64–76. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0205961421020093>
 11. Тарасова М.А. Варенцов М.И., Степаненко В.М. Параметризации взаимодействия атмосферы с городской поверхностью: обзор и перспективы развития. *Известия РАН, Физика атмосферы и океана*. 2023;59(2):127–148. <https://doi.org/10.31857/S0002351523020062>
Tarasova M.A., Varentsov M.I., Stepanenko V.M. Parameterization of interaction between the atmosphere and the urban surface: current state and Prospects. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2023;59(2):111–130. <https://doi.org/10.1134/S0001433823020068>
 12. Jin L., Schubert S., Fenner D., Meier F., Schneider C. Integration of a building energy model in an urban climate model and its application. *Boundary–Layer Meteorology*. 2021;178(2):249–281. <https://doi.org/10.1007/s10546-020-00569-y>
 13. Фролькис В.А. Евсиков И.А. Гинзбург А.С. Моделирование антропогенного потока тепла в течение отопительного периода в крупных городах России. *Известия РАН, Физика атмосферы и океана*. 2024;60(4):470–484. <https://doi.org/10.31857/S0002351524040051>
Frolkis V.A., Evsikov I.A., Ginzburg, A.S. Modeling anthropogenic heat flux during the heating season in large cities of the Russian Federation. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2024;60(4):407–420. <https://doi.org/10.1134/S0001433824700361>
 14. Фролькис В.А., Евсиков И.А. Оценка антропогенного потока тепла в течение отопительного периода в городах Российской Федерации с населением не менее полумиллиона человек. *Труды Главной геофизической обсерватории им А.И. Воейкова*. 2024;613:76–133.
Frolkis V.A., Evsikov I.A. Estimation of anthropogenic heat flux during the heating period in cities of the Russian Federation with a population of at least half a million. *Proceedings of the GGO*. 2024;613:76–133. (In Russ.).
 15. Chen W., Zhou Y., Xie Y., Chen G., Ding K. J., Li D. Estimating spatial and temporal patterns of urban building anthropogenic heat using a bottom–up city building heat emission model. *Resources, Conservation and Recycling*. 2022;177:105996. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105996>
 16. Евсиков И. А. Информационные технологии для расчета антропогенного потока тепла в условиях городской застройки. *Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии*. 2024;22(2):20–32. <https://doi.org/10.25205/1818-7900-2024-22-2-20-32>

- Evsikov I. A. Information technologies for calculating anthropogenic heat flux in urban areas. *Vestnik NSU. Series: Information Technologies*. 2024;22(2):20–32. (In Russ.). <https://doi.org/10.25205/1818-7900-2024-22-2-20-32>
17. Фролов К.А. Теплопотребление коттеджа в зависимости от его объемно–планировочных параметров. *Надежность и безопасность энергетики*. 2009;4(7):44–45.
Frolov K.A. Heat consumption of a cottage depending on its spatial planning parameters. *Reliability and safety of energy*. 2009;4(7):44–45. (In Russ.).
18. Подкопаева Е.В., Шехватова А.Н., Семенова Э.Е. Исследование ограждающих конструкций общественных зданий. *Инженерные системы и сооружения*. 2020;3–4(41–42):6–11.
Podkopaeva E.V., Shekhvatova A.N., Semenova E.E. Study of the enclosing structures of public buildings. *Engineering systems and structures*. 2020; № 3–4(41–42):6–11. (In Russ.).
19. Белан Б.Д., Пельмский О.А., Ужегова Н.В. Исследование антропогенной составляющей теплового баланса горда. *Оптика атмосферы и океана*. 2009;22(6):558–561.
Belan B.D., Pelymskii O.A., Uzhegova N.V. Study of the anthropogenic component of urban heat balance. *Optica Atmosfery i Okeana = Atmospheric and Oceanic Optics*. 2009;22(4):441–445.
20. Dudorova N.V., Belan B.D. The energy model of urban heat island. *Atmosphere*. 2022;13(457). <https://doi.org/10.3390/atmos13030457>

ГЛЯЦИОЛОГИЯ И КРИОЛОГИЯ GLACIOLOGY AND CRYOLOGY OF THE EARTH

Оригинальная статья / Original paper

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-2-147-163>

УДК 551.326.2(268.52)



Изменение продолжительности безледного периода в арктических морях с 1991 по 2023 г.

В.С. Порубаев✉, Л.П. Мочнова

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

✉ pvs@aari.ru

Аннотация. В работе обоснована актуальность проблемы учета продолжительности безледного периода в арктических морях с целью изучения климата и практического использования в хозяйственной деятельности. Использован временной ряд дат очищения акватории ото льда и начала замерзания, рассмотрена их межгодовая изменчивость в различных частях арктических морей. Сделано дополнительное разделение акватории морей Лаптевых и Восточно-Сибирского по однородным ледовым условиям на северные и южные их части. Обоснована необходимость такого разделения. Исследована межгодовая изменчивость продолжительности безледного периода в различных частях арктических морей за последние 33 года. Получены числовые характеристики продолжительности безледного периода для всего рассмотренного ряда и для трех одиннадцатилетних периодов. Показано, что в морях Лаптевых, Карском и на северо-западе Восточно-Сибирского моря увеличение продолжительности безледного периода происходило по всем рассмотренным временным одиннадцатилетним периодам. В юго-западной и восточной частях Восточно-Сибирского моря, а также в Чукотском море за последние 11 лет произошло незначительное уменьшение продолжительности безледного периода.

Ключевые слова: арктические моря, безледный период, исчезновение льда, начало замерзания

Для цитирования: Порубаев В.С., Мочнова Л.П. Изменение продолжительности безледного периода в арктических морях с 1991 по 2023 г. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2025;71(2):147–163. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-2-147-163>

Поступила 16.09.2024

После переработки 01.11.2024

Принята 02.04.2025

© Авторы, 2025

© Authors, 2025

Change in the duration of the ice-free period in the Arctic seas from 1991 to 2023

Viktor S. Porubaev✉, Liudmila P. Mochnova

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

✉pvs@aari.ru

Abstract. The Arctic seas are subdivided by the characteristic features of the ice regime into natural areas identified in the course of many years of observations and research by various scientists. At present, the ice cover of the Arctic seas is traditionally determined relative to such areas, identified in 1972 at the Arctic and Antarctic Research Institute. The ice-free period has some advantages over ice cover; for example, its start and end dates are an important ice characteristic. However, it is not always possible to determine the ice-free period for a large area of the sea since ice rarely disappears over its entire water area. In addition, climate change has led to the boundaries of some previously identified areas not fully corresponding to parts of the sea with uniform ice conditions. Warming in the Arctic has led to the southern waters of the Laptev Sea and the southwest of the East Siberian Sea becoming free of ice almost every year in recent decades, while in their northern part the ice-free period does not occur in some years. Therefore, for a more accurate dating of the ice-free period for the Laptev and East Siberian seas, this article proposes making some additions to the traditional zoning. The increase in the duration of the ice-free period in different parts of the seas began at different times, on average around 2000. To describe this process in the article, the time period from 1991 to 2023 was divided into three equal eleven-year periods. For each of them, the values of the duration of the ice-free period were calculated. The data analysis showed that the duration of the ice-free period in all parts of the Arctic seas in the second period (2002–2012) increased significantly compared to the first period (1991–2001). The increase ranged from 13 to 88 days, depending on the area of the sea. Over the past 11 years (2013–2023), the duration of the ice-free period in the Kara, Laptev, and northwestern part of the East Siberian Sea has increased by 8–18 days compared to the second time interval (2002–2012). In the southwestern and eastern parts of the East Siberian Sea, as well as in the Chukchi Sea, the ice-free period has not increased over the past 11 years, although compared to the first time period (1991–2001), it remains quite large.

Keywords: Arctic seas, beginning of freezing, disappearance of ice, ice-free period

For citation: Porubaev V.S., Mochnova L.P. Change in the duration of the ice-free period in the Arctic seas from 1991 to 2023. *Arctic and Antarctic Research*. 2025;71(2):147–163. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-2-147-163>

Received 16.09.2024

Revised 01.11.2024

Accepted 02.04.2025

Введение

В настоящее время в арктических морях интенсивно развивается хозяйственная деятельность. Увеличиваются грузоперевозки по Северному морскому пути (СМП), расширяется деятельность по добыче углеводородов на шельфе арктических морей [1]. Это обуславливает активизацию исследования ледовых и гидрометеорологических условий на трассе СМП и в прилегающих районах Арктики. Продолжительность безледного периода — одна из важных характеристик ледовых условий, и знание о нем для различных районов морей позволяет планировать плавание судов низких ледовых классов в акватории СМП, в оптимальные сроки проводить инженерно-геологические изыскания и разведочное бурение. Так, для Карского моря

рассмотрена межгодовая изменчивость безледного периода в районе перспективных углеводородных структур в юго-западной части моря и показано, что средняя продолжительность безледного периода в этом районе за последние 10 лет существенно увеличилась [2]. По спутниковым данным микроволнового диапазона рассмотрена продолжительность безледного периода в прибрежной зоне Карского моря и в море Лаптевых, и так же отмечено увеличение продолжительности безледного периода в последние десятилетия [3, 4]. Показаны особенности таяния ледяного покрова и в районе Канадского Арктического архипелага [5–8]. Ледовые фазы, в частности даты очищения ото льда и начала замерзания, которые и определяют продолжительность безледного периода, являются важной составляющей процессов в арктических морях. Эти вопросы рассматриваются в ряде работ для моря Лаптевых, Восточно-Сибирского и Чукотского морей [9–12].

Межгодовая изменчивость продолжительности безледного периода тесно связана с изменениями климата. Исследованию климата на основе ледовых наблюдений всегда уделялось большое внимание. Ряд авторов делает обоснованный вывод, что в арктическом регионе Земли основные изменения состояния ледяного покрова происходят под воздействием естественных факторов, которые превышают антропогенное воздействие на климат [13]. Обстоятельно проведены исследования изменчивости ледовых условий различных пространственных и временных масштабов в последней четверти XX в. в шельфовой зоне морей Баренцева и Карского [14]. Изучены и показаны климатические изменения ледовых условий, произошедшие в конце XX — начала XXI в. в азиатской части России, включая арктические и дальневосточные моря [15].

Состояние изученности ледовых условий в арктических морях России с середины прошлого века до двадцатых годов текущего века подробно описано в работе Е.У. Миронова [16]. Другие близкие исследования включают в себя описание характеристик климатических изменений ледовитости в российских арктических морях [17], вопросы нарастания и таяния ледяного покрова [18, 19], особенности эволюции ледяного покрова в современном климатическом периоде [20, 21].

Климатические изменения, а также запросы на обеспечение хозяйственной деятельности определяют актуальность исследования ледовых и гидрометеорологических условий в Арктике, важную роль в которых играет продолжительность безледного периода в морях России, анализ межгодовой изменчивости которого за последние десятилетия и является целью данной работы.

Исходные данные

Для определения дат очищения морей и сроков начала ледообразования использованы обзорные ледовые карты ААНИИ, построенные по спутниковым снимкам с дискретностью по времени 1 неделя. Ряд наблюдений, использованный в работе, охватывает период с 1991 по 2023 г. С 1991 по 1996 г. данные были сняты с ледовых карт, хранящихся в фондах ААНИИ. Ледовые карты за период с 1997 по 2023 г. в формате SEAGRID-3 размещены на сайте (http://old.aari.ru/odata/_d0015.php). Для зимнего периода распределение ледяного покрова представлено в виде возрастного состава (общая и частная сплоченность льдов разного возраста), для летнего периода на картах представлена информация о распределении сплоченности льда.

Особенности районирования акватории арктических морей в современных климатических условиях

Безледный период для всего моря определить не всегда возможно, так как лед редко исчезает на всей его акватории. Поэтому для определения ледовых характеристик, в том числе безледного периода, используется районирование акватории морей. Разделение акватории морей на части в зависимости от задач исследования имеет давнюю традицию. Вопросы деления акватории арктических морей по ледовым условиям рассматривались такими исследователями Арктики, как А.В. Колчак, В.Ю. Визе, Н.Н. Зубов и другими. Районирование позволяет учитывать географические и ледовые особенности арктических морей. В работе Д.Б. Карелина [22] подчеркнута важность учета географических особенностей морей и обращается внимание на необходимость сравнительной оценки ледовых условий одного района с другим. Также отмечено, что «северная часть моря Лаптевых является по существу заливом Ледовитого океана», южная же часть подвержена воздействию теплых вод сибирских рек и характеризуется преобладающим выносом льда в северном направлении. В этой же работе говорится, что на западе Восточно-Сибирского моря в летний период лед стаивает и обычно отступает севернее Новосибирских островов. Однако разделение акватории моря Лаптевых, а также западной части Восточно-Сибирского моря по принципу север–юг не нашло отражения в последующем районировании. В настоящее время в ААНИИ используется традиционное районирование, где в Карском море выделены юго-западная и северо-восточная части, в морях Лаптевых и Восточно-Сибирском выделены западные и восточные части. В Чукотском море российская акватория моря разделена на северную и южную части.

Важными характеристиками ледяного покрова являются ледяные массивы, которые играют большую роль в районировании акватории морей. Понятие о ледяных массивах (лед сплоченностью 7–10 баллов) сформулировал еще в 1945 г. П.А. Гордиенко [23], в этой же работе показана схема расположения ледяных массивов. Определение ледяных массивов, их названия и схема расположения практически не претерпели изменений в современной научной литературе.

Потепление в Арктике, происходящее в последние десятилетия, привело к тому, что определить безледный период для некоторых частей моря согласно традиционному районированию можно весьма приблизительно. Проблема в том, что за последние десятилетия очищение южной части морей происходило гораздо раньше, чем северной акватории. Нередки случаи, когда в отдельные годы в некоторых морях в южной части происходило полное очищение, а в северной их части лед оставался до начала нового замерзания. К таким частям относятся запад и восток моря Лаптевых, а также запад Восточно-Сибирского моря. Продолжительность безледного периода и ледовитость, определенные по традиционному районированию, не всегда отражают реальную ледовую ситуацию.

Для более точного определения характеристик безледного периода возникла необходимость для морей Лаптевых и Восточно-Сибирского, не изменяя границ прежних районов [24], сделать дополнительное разделение (рис. 1). При дополнительном районировании три традиционных района — западная и восточная части моря Лаптевых и западная часть Восточно-Сибирского моря — были разделены на южные и северные части. Границы районов Карского и Чукотского морей, а также восток Восточно-Сибирского моря остались прежними. В Чукотском море его северная часть в традиционном районировании не всегда используется, и ледовитость в ней в настоящее время не определяется.

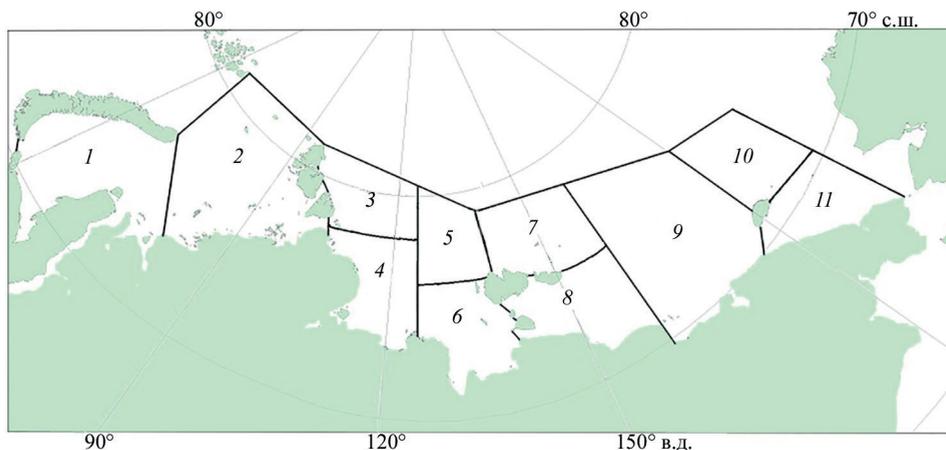


Рис. 1. Границы арктических морей и их районов.

1 — юго-запад Карского моря, 2 — северо-восток Карского моря, 3 — северо-запад моря Лаптевых, 4 — юго-запад моря Лаптевых, 5 — северо-восток моря Лаптевых, 6 — юго-восток моря Лаптевых, 7 — северо-запад Восточно-Сибирского моря, 8 — юго-запад Восточно-Сибирского моря, 9 — восточная часть Восточно-Сибирского моря, 10 — северо-запад Чукотского моря, 11 — юго-запад Чукотского моря

Fig. 1. The boundaries of the Arctic seas and their regions.

1 — southwest of the Kara Sea, 2 — northeast of the Kara Sea, 3 — northwest of the Laptev Sea, 4 — southwest of the Laptev Sea, 5 — northeast of the Laptev Sea, 6 — southeast of the Laptev Sea, 7 — northwest of the East Siberian Sea, 8 — southwest of the East Siberian Sea, 9 — eastern part of the East Siberian Sea, 10 — northwest of the Chukchi Sea, 11 — southwest of the Chukchi Sea

Дополнительное разделение акватории моря на части дает возможность более точно определить начало безледного периода в районах моря, однако в теплое время года небольшое количества льда может оставаться в море до начала нового замерзания. Поэтому дата очищения ото льда определяется при некотором допуске. В этой работе сроком очищения акватории ото льда считалась дата, когда площадь льда любой сплоченности в рассматриваемом районе составляла менее 3 баллов.

В настоящее время для оценки продолжительности безледного периода часто используется 15 % пороговый метод [3–5]. Учитывая, что в период максимального стаивания лед остается в основном на периферии моря и имеет небольшую сплоченность, критерий менее 3 баллов дает результаты, близкие к результатам, полученным при использовании 15 % порогового метода. Использование 15 % метода может приводить к тому, что при небольшом количестве льда на периферии начало безледного периода в море в некоторых случаях определяется слишком поздно или не определяется совсем.

Межгодовая изменчивость сроков очищения и начала замерзания в районах арктических морей за период с 1991 по 2023 г.

Арктические моря и их районы расположены в различных географических и климатических зонах Арктики, что определяет в них ледовые условия. Климатические особенности, характерные для определенного ряда лет, проявляются в ледовых условиях морских регионов. В частности, региональный климат определяет продолжительность безледного периода в различных районах морей.

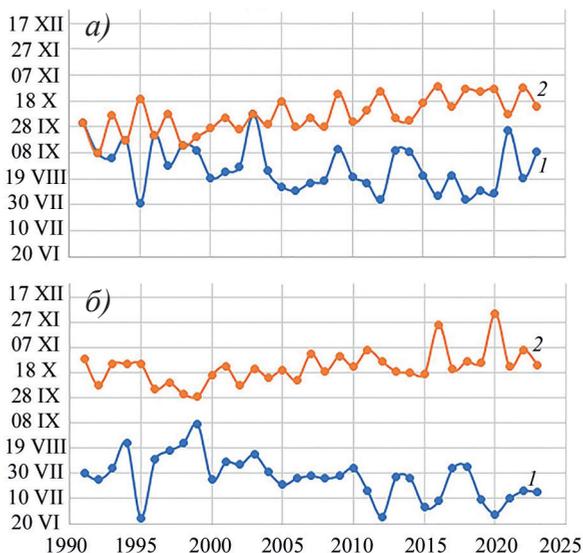


Рис. 2. Даты очищения ото льда и начала ледообразования в северо-восточной (а) и юго-западной (б) частях Карского моря.

1 — даты очищения ото льда, 2 — даты начала ледообразования

Fig. 2. Dates of ice clearing and the beginning of ice formation in the northeastern (a) and southwestern parts (b) of the Kara Sea.

1 — dates of ice clearing, 2 — dates of the beginning of ice formation

На рис. 2 показано межгодовое изменение дат очищения ото льда и сроков начала ледообразования в северо-восточной и юго-западной частях Карского моря, на которые море разделено согласно традиционному районированию. Зоны льда в период таяния в этих районах хотя и имеют некоторую локальную привязку, но их положение зависит во многом от переменного направления воздушных потоков. Поэтому нет необходимости в разделении акватории Карского моря на дополнительные части. Одним из проявлений климатических изменений в северо-восточной части моря является то, что безледный период с 2004 г. стал отмечаться ежегодно. В юго-западной части моря на рассматриваемом временном интервале безледный период имел место всегда, а климатические изменения проявляются в более ранних датах очищения ото льда и более поздних сроках начала замерзания.

На рис. 3 показаны графики дат очищения ото льда и начала замерзания в дополнительно выделенных частях запада моря Лаптевых. В северо-западной части моря нередко очищение ото льда не происходило. Причиной этого является Таймырский ледяной массив, который распространяется на эту часть моря Лаптевых. В юго-западной части моря начиная с 2008 г. очищение происходило ежегодно, его продолжительность характеризовалась большой амплитудой. Амплитуда сроков начала замерзания в обеих частях моря значительно меньше, чем амплитуда сроков очищения ото льда.

В северо-восточной части моря Лаптевых очищение ото льда в отдельные годы не происходило, в то время как в его юго-восточной части оно имело место всегда, кроме 1996 г., хотя здесь расположен Янский ледяной массив (рис. 4). Основное

Change in the duration of the ice-free period in the Arctic seas from 1991 to 2023

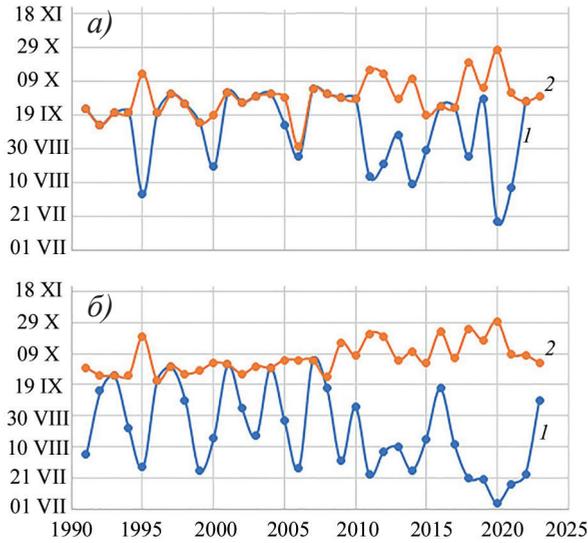


Рис. 3. Даты очищения и начала ледообразования в северо-западной (а) и юго-западной (б) частях моря Лаптевых.

1 — даты очищения ото льда, 2 — даты начала ледообразования

Fig. 3. Dates of ice clearing and the beginning of ice formation in the northwestern (a) and southwestern parts (b) of the Laptev Sea.

1 — dates of ice clearing, 2 — the dates of the beginning of ice formation

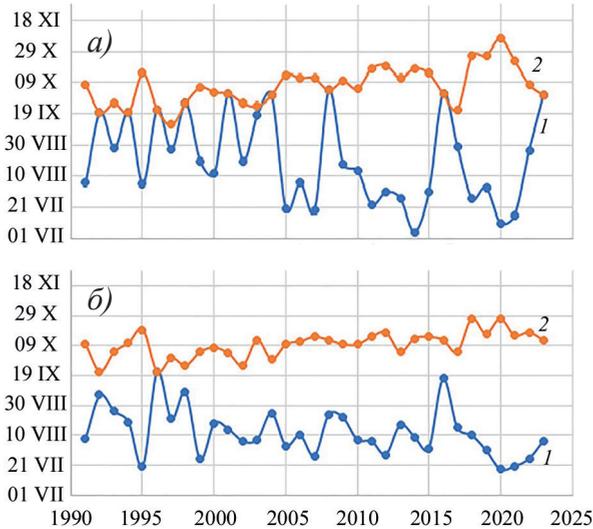


Рис. 4. Даты очищения и начала ледообразования в северо-восточной (а) и юго-восточной (б) частях моря Лаптевых.

1 — даты очищения ото льда, 2 — даты начала ледообразования

Fig. 4. Dates of ice clearing and the beginning of ice formation in the north-eastern (a) and south-eastern parts (b) of the Laptev Sea.

1 — dates of ice clearing, 2 — the dates of the beginning of ice formation

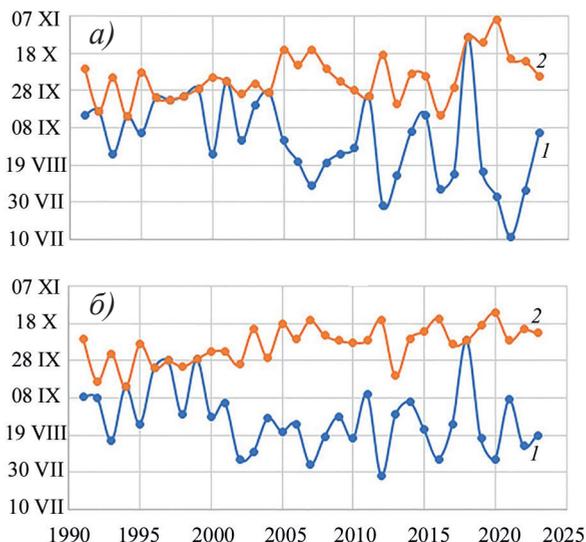


Рис. 5. Даты очищения и начала ледообразования в северо-западной (а) и юго-западной (б) частях Восточно-Сибирского моря.

1 — даты очищения ото льда, 2 — даты начала ледообразования

Fig. 5. Dates of ice clearing and the beginning of ice formation in the northwestern (a) and southwestern parts (b) of the East Siberian Sea.

1 — dates of ice clearing, 2 — the dates of the beginning of ice formation

влияние на таяние льда в юго-восточной части моря Лаптевых оказывают воды сибирских рек и воздушные потоки с континента в теплый период года. В северо-восточной части моря отмечалась сравнительно большая амплитуда сроков очищения ото льда, по сравнению с которой амплитуда сроков начала замерзания в этой части моря и амплитуда сроков очищения и начала замерзания в юго-восточной части моря были значительно меньше.

Межгодовая изменчивость сроков очищения ото льда и начала замерзания в северо-западной и юго-западной частях Восточно-Сибирского моря показана на рис. 5. В северо-западной части этого моря безледный период в отдельные годы, особенно в первые 15 лет, нередко отсутствовал. В юго-западной части Восточно-Сибирского моря безледный период начиная с 2000 г. наблюдался, кроме 2018 г., постоянно, хотя здесь располагается Новосибирский ледяной массив. Причиной этого являются воздушные потоки с континента в теплое время года, как и в юго-восточной части моря Лаптевых.

На рис. 6 показана межгодовая изменчивость сроков очищения и начала замерзания в восточной части Восточно-Сибирского моря. Как видно из рисунка, безледный период в этой части моря не наблюдался с начала рассматриваемого временного интервала до 2004 г. В последующие годы безледный период был незначительным, а в ряде лет вообще отсутствовал, что является следствием расположенного здесь Айонского массива. Потепление климата проявилось в том, что с 2005 г. акватория в этой части моря в отдельные годы стала очищаться ото льда.

На рис. 7 показано межгодовое изменение сроков очищения и начала замерзания в северо-западном и юго-западном районах Чукотского моря. Эти два района относятся к российской части моря.

Change in the duration of the ice-free period in the Arctic seas from 1991 to 2023

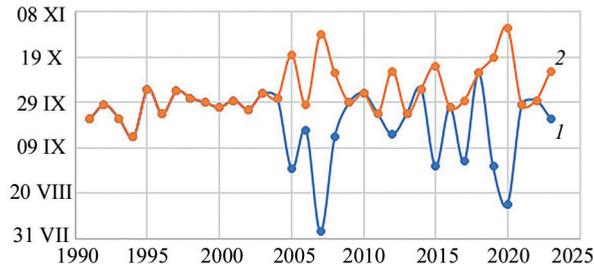


Рис. 6. Даты очищения и начала ледообразования в восточной части Восточно-Сибирского моря.

1 — даты очищения ото льда, 2 — даты начала ледообразования

Fig. 6. Dates of ice clearing and the beginning of ice formation in the eastern part of the East Siberian Sea

1 — dates of ice clearing, 2 — the dates of the beginning of ice formation

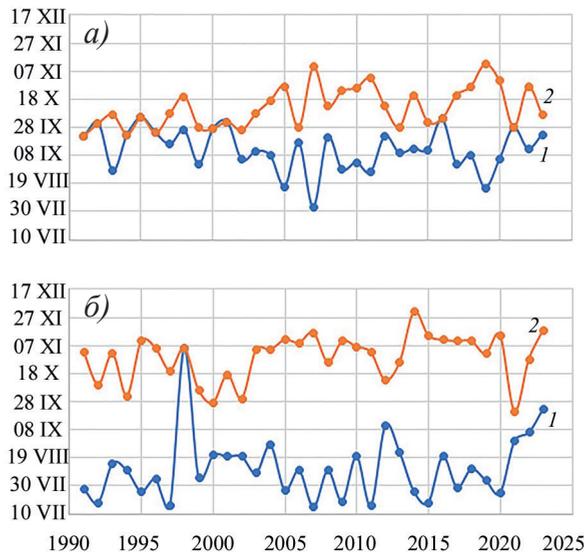


Рис. 7. Даты очищения ото льда и начала ледообразования в северо-западной (а) и юго-западной (б) частях Чукотского моря.

1 — даты очищения ото льда, 2 — даты начала ледообразования

Fig. 7. Dates of ice clearing and the beginning of ice formation in the northwestern (a) and southwestern (b) parts of the Chukchi Sea.

1 — dates of ice clearing, 2 — the dates of the beginning of ice formation

Главное отличие безледного периода в этих районах Чукотского моря в его продолжительности. В северо-западной части моря в первые одиннадцать лет рассматриваемого временного интервала безледный период был мал либо его не было совсем. В последующем, начиная с 2002 г., безледный период здесь отмечался в большинстве лет, но имел небольшую продолжительность. В юго-западной части моря безледный период имел место всегда, кроме 1998 г., продолжительность его была значительно больше, чем в северо-западной части, что определяется ее южным положением и влиянием теплых воздушных потоков со стороны Тихого океана.

Сроки очищения ото льда и начала замерзания, продолжительность безледного периода в районах арктических морей с 1991 по 2023 г.

В табл. 1 приведены средние и экстремальные даты очищения районов арктических морей ото льда. Средние даты очищения во всех частях морей приходятся в основном на август и изменяются от 26 июля до 6 сентября. Стандартное отклонение изменяется от 12 до 21 дня в зависимости от района моря.

Раньше других ото льда освобождается юго-западная часть Карского моря. Очищение ото льда здесь в среднем происходит в конце июля, наиболее раннее отмечено в конце июня, а самое позднее — в первой декаде сентября. Сравнительно раннее очищение ото льда этой акватории объясняется проникновением теплых атлантических вод из Баренцева моря и южным положением этой части моря.

Наиболее поздние средние сроки очищения ото льда наблюдаются на востоке Восточно-Сибирского моря и в северной части Чукотского моря, которые в среднем приходятся на начало сентября. Экстремально раннее очищение в этих частях морей отмечено в начале августа, а экстремально позднее произошло в третьей декаде сентября. Эти два соседних района граничат с Арктическим бассейном и удалены от Атлантического и Тихого океанов, что определяет здесь поздние сроки очищения ото льда.

В остальных районах арктических морей средние даты очищения приходятся на август, а экстремально ранние отмечались в июле. Экстремально позднее очищение ото льда происходило во всех морях только в сентябре.

Особенностью сроков начала замерзания в арктических морях является то, что в большинстве частей арктических морей средние даты начала замерзания отмечаются в октябре (табл. 2). Только в северо-западной части моря Лаптевых средняя дата замерзания приходится на конец сентября, что обусловлено географическим положением этого района и расположенным здесь Таймырским ледяным массивом.

Экстремально раннее начало ледообразования во всех частях морей начиналось в августе, кроме северо-запада моря Лаптевых, где оно отмечалось в сентябре. Здесь увеличение площади ледяного покрова в 2006 г. началось в конце августа вследствие выноса льдов из Арктического бассейна.

Экстремально позднее начало замерзания льда в частях морей имеет большой разброс по времени в зависимости от их географического положения и гидрометеорологических условий конкретного года.

Стандартное отклонение сроков начала замерзания изменяется от 9 до 17 дней и в среднем составляет 12 дней, что меньше по сравнению со стандартным отклонением дат очищения акватории ото льда, которое составляет в среднем 16 дней.

На продолжительность безледного периода оказывают влияние различные факторы, такие как температурный режим атмосферы, дрейф льда, теплозапас моря, наличие остаточных льдов. Численные характеристики продолжительности безледного периода в районах арктических морей приведены в табл. 3. Наибольшая средняя продолжительность безледного периода имеет место на юго-западе Карского и на юге Чукотского морей. В этих же районах была отмечена наибольшая максимальная продолжительность безледного периода, которая в Карском море составила более пяти месяцев, а в Чукотском более четырех, что объясняется близостью теплых вод Атлантического и Тихого океанов.

Таблица 1

Средние и экстремальные сроки очищения акватории ото льда
в различных частях морей за период с 1991 по 2023 г.

Table 1

Average and extreme times for ice clearing
in different parts of the seas for the period from 1991 to 2023

Часть моря	Экстремально ранние даты очищения ото льда	Средние даты очищения ото льда	Экстремально поздние даты очищения ото льда	Стандартное отклонение сроков очищения, дни
Северо-восток Карского	31.07	22.08	25.09	14
Юго-запад Карского	25.06	26.07	07.09	17
Северо-запад Лаптевых	18.07	21.08	28.09	19
Юго-запад Лаптевых	05.07	12.08	17.09	21
Северо-восток Лаптевых	05.07	06.08	18.09	18
Юго-восток Лаптевых	18.07	10.08	17.09	15
Северо-запад Восточно-Сибирского	11.07	21.08	20.09	17
Юго-запад Восточно-Сибирского	28.07	22.08	10.09	12
Восток Восточно-Сибирского	03.08	02.09	22.09	15
Север Чукотского	02.08	06.09	26.09	13
Юг Чукотского	15.07	08.08	23.09	18

Таблица 2

Средние и экстремальные сроки замерзания акватории
в различных частях морей за период с 1991 по 2023 г.

Table 2

Average and extreme periods of freezing of water areas
in different parts of the seas for the period from 1991 to 2023

Часть моря	Экстремально ранние даты начала замерзания	Средние даты начала замерзания	Экстремально поздние даты начала замерзания	Стандартное отклонение сроков начала замерзания, дни
Северо-восток Карского	08.09	07.10	29.10	14
Юго-запад Карского	29.09	22.10	04.12	13
Северо-запад Лаптевых	31.08	28.09	27.10	11
Юго-запад Лаптевых	22.09	06.10	30.10	10
Северо-восток Лаптевых	12.09	06.10	06.11	12
Юго-восток Лаптевых	22.09	09.10	27.10	9
Северо-запад Восточно-Сибирского	14.09	04.10	05.11	12
Юго-запад Восточно-Сибирского	14.09	06.10	24.10	10
Восток Восточно-Сибирского	14.09	03.10	01.11	11
Север Чукотского	22.09	11.10	12.11	15
Юг Чукотского	21.09	29.10	01.12	17

Наименьшая средняя продолжительность безледного периода наблюдается в северо-западной части моря Лаптевых и в восточной части Восточно-Сибирского моря, которая составляет 17 и 13 дней соответственно. Причиной непродолжительного безледного периода являются расположенные здесь большие ледяные массивы — Таймырский и Айонский, в состав которых входят остаточные двухлетние и многолетние льды. В северной части Чукотского моря безледный период несколько больше и в среднем составляет 30 дней, хотя здесь расположен Чукотский Северный ледяной массив. В отдельные годы в состав этого массива входят старые льды, что влияет на сроки очищения ото льда.

Сравнительно небольшой средний безледный период отмечается в северо-западной части Восточно-Сибирского моря, он составляет 32 дня, несмотря на то что ледяного массива здесь нет. Сказывается влияние Арктического бассейна и близость Айонского массива, который в отдельные годы распространяется и на северо-запад Восточно-Сибирского моря.

На фоне потепления климата Арктики кроме ледяных массивов на продолжительность безледного периода влияют и другие факторы. Например, в юго-восточной части моря Лаптевых в холодное время года формируется Янский ледяной массив, но продолжительность безледного периода здесь составляет 68 дней, что заметно выше, чем в соседних частях арктических морей (см. табл. 3). На очищение ото льда здесь влияют преобладающие воздушные потоки с континента в теплое время года и большой речной сток [22].

На северо-востоке моря Лаптевых ледяного массива нет, но средняя продолжительность безледного периода здесь практически такая же, как на северо-востоке Карского, на юго-западе Лаптевых и юго-западе Восточно-Сибирского морей (см. табл. 3). Близкие значения продолжительности безледных периодов, которые здесь составляют от 40 до 47 дней, обусловлены влиянием различных факторов, таких как ледяные массивы, направление воздушных потоков, температурный режим атмосферы и другие.

Для достоверной оценки климатических изменений необходимо учитывать минимальный ряд лет, по которому проводится оценка. Для оценки состояния климата было предложено использовать осредненные ледовые и гидрометеорологические характеристики за периоды не менее 10 лет [25]. Аномальные характеристики состояния ледяного покрова или атмосферы в конкретный год могут свидетельствовать только о межгодовой изменчивости явления. В нашем случае тридцатитрехлетний ряд ежегодных значений продолжительности безледного периода было удобно разделить на три одиннадцатилетних временных интервала, чтобы получить по ним климатические оценки.

Анализ данных показал, что средняя продолжительность безледного периода с 1991 г. за каждые последующие одиннадцатилетние периоды изменялась. По сравнению с первым периодом (1991–2001 гг.) во втором периоде (2002–2012 гг.) она существенно увеличилась. В среднем по всем районам увеличение составило около 20 дней.

В третьем периоде (2013–2023 гг.) по сравнению со вторым продолжительность безледного периода в морях Карском и Лаптевых, а также в северо-западной части Восточно-Сибирского моря увеличилась в среднем на 15 дней. На юго-западе Восточно-Сибирского моря, в его восточной части и в Чукотском море произошло незначительное уменьшение безледного периода, хотя по сравнению с первым периодом (1991–2001 гг.) он остался большим.

Таблица 3

Table 3

Продолжительность безледного периода в российских арктических морях

Duration of the ice-free period in the Russian Arctic seas

Часть моря	Продолжительность безледного периода по 33-летнему ряду				Средняя продолжительность безледного периода по одиннадцатилетним периодам			Изменение продолжительности безледного периода между периодами по 11 лет	
	Мини-мальная	Средняя	Макси-мальная	Стандартное отклонение	1991–2001	2002–2012	2013–2023	Между (1) и (2)	Между (2) и (3)
					(1)	(2)	(3)		
Северо-восток Карского	0	41	85	28	22	45	55	23	10
Юго-запад Карского	22	88	159	27	69	88	106	19	18
Северо-запад Лаптевых	0	17	101	28	9	13	29	3	17
Юго-запад Лаптевых	0	46	117	34	28	42	69	13	28
Северо-восток Лаптевых	0	47	118	38	25	50	65	25	15
Юго-восток Лаптевых	0	68	101	23	45	62	70	17	8
Северо-запад	0	32	96	30	9	38	49	29	11
Восточно-Сибирского	0	40	84	24	20	54	47	34	-7
Восточно-Сибирского	0	13	87	24	0	19	20	19	1
Восток Восточно-Сибирского	0	30	100	27	10	44	34	34	-10
Север Чукотского	0	79	128	31	70	83	84	13	-1
Юг Чукотского	0								

Обсуждение результатов

Вопросы, связанные с характеристиками безледного периода в арктических морях, рассматривались во многих работах. Больше всего работ опубликовано по юго-западной части Карского моря. Однако сравнение результатов не всегда возможно, потому что в разных работах используются разные критерии и различные исходные данные. В работах [18, 19] сведения об очищении ото льда и сроках устойчивого ледообразования представлены в виде изолиний дат ледовых фаз, а не в виде численных характеристик. В работах [3, 4] использованы спутниковые снимки микроволнового диапазона с разрешением 25 км, что приводит к большим погрешностям при определении продолжительности безледного периода.

В более ранней работе Е.У. Миронова с соавторами [2] продолжительность безледного периода определялась в конкретных точках центральной части юго-запада Карского моря по снимкам видимого и инфракрасного диапазонов с разрешением 1 км. Средняя продолжительность безледного периода по этим данным за двадцать лет (1989–2008 гг.) составила 90 дней. В данной работе также были использованы спутниковые снимки видимого и инфракрасного диапазонов, но безледный период определялся для всей акватории юго-западной части моря, и средняя продолжительность его здесь за близкий ряд лет (1991–2008 гг.) составила 73 дня. За следующее десятилетие (2009–2018 гг.) средняя продолжительность безледного периода по предыдущим данным [2] составила 132 дня, по вновь полученным нами данным за этот же период — 99 дней.

Продолжительность безледного периода в первом и втором случаях у нас оказалась меньше, чем в предыдущей работе [2], на 17 и 33 дня соответственно. Это объясняется тем, что мы провели расчет по данным для всей акватории, включая прибрежные и северные районы юго-западной части моря, где очищение ото льда происходит позже, а замерзание начинается раньше по сравнению с центральной частью моря, что и определило более короткий безледный период.

Известны значения продолжительности безледного периода в прибрежной зоне Карского моря, полученные для пяти наборов спутниковых данных микроволнового диапазона [3]. Для юго-западной части Карского моря полученная продолжительность безледного периода изменится от 74 до 101 дня в зависимости от набора данных.

Все результаты по юго-западной части Карского моря, приведенные в упомянутых работах, относятся к различной площади, рассчитаны по различным временным интервалам, в расчетах использованы спутниковые данные с различными пространственными разрешениями, что затрудняет сравнение полученных результатов. Анализ полученных результатов в разных работах дает лишь оценку продолжительности безледного периода для различных временных интервалов и для различных районов юго-западной части Карского моря.

Заключение

Анализ межгодового изменения продолжительности безледного периода показал, что за последние десятилетия в большинстве районов арктических морей произошло значительное его увеличение. Даты очищения ото льда имеют тенденцию к более раннему, а сроки замерзания к более позднему их наступлению, в результате чего продолжительность безледного периода увеличивается. В различных частях морей увеличение продолжительности безледного периода началось в разное время и пришлось в основном на первое десятилетие этого столетия.

В среднем в северных частях морей продолжительность безледного периода, рассчитанная по 33-летнему ряду, изменяется от 17 до 47 дней, а в южных — от 40 до 88 дней, в зависимости от районов моря. Таймырский и Айонский ледяные массивы оказывают большое влияние на продолжительность безледного периода. В тех частях морей, где расположены ледяные массивы, продолжительность безледного периода небольшая. В северо-западной части моря Лаптевых она составляет 17, а на востоке Восточно-Сибирского моря 13 дней.

Важной особенностью безледного периода в арктических морях является то, что за последние одиннадцать лет, как и за одиннадцать предыдущих, его средняя продолжительность увеличилась в морях Карском, Лаптевых и в северо-западной части Восточно-Сибирского моря (см. табл. 3). В юго-западной и восточной частях Восточно-Сибирского моря, а также в Чукотском море за последние одиннадцать лет средняя его продолжительность не увеличилась, а в основном несколько уменьшилась.

Конфликт интересов. Авторы не имеют конфликта интересов.

Финансирование. Исследования выполнены в рамках НИТР 5.1.2 Росгидромета на 2020–2024: «Развитие существующих и разработка новых методов и технологий долгосрочного (месячного и сезонного) прогнозирования элементов ледово-гидрологического режима арктических морей, низовьев и устьевых областей рек в условиях климатических изменений». Тема 252625.

Competing interests. The authors have no conflict of interest.

Funding. The research was carried out within the framework of the Scientific and Technical Project 5.1.2 of Roshydromet for 2020–2024: “Development of existing and new methods and technologies for long-term (monthly and seasonal) forecasting of elements of the ice-hydrological regime of the Arctic seas, lower reaches and estuarine areas of rivers in the context of climate change”, theme 252625.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Ерохин В.Л. Динамика грузоперевозок по Северному морскому пути (2013–2023 гг.). *Маркетинг и логистика*. 2023;6(50):14–23.
Erokhin V.L. Dynamics of cargo transportation along the Northern Sea Route (2013–2023). *Marketing i logistika = Marketing and logistics*. 2023;6(50):14–23. (In Russ.).
2. Сочнев О.Я., Корнишин К.А., Ефимов Я.О., Миронов Е.У., Порубаев В.С. Межгодовая изменчивость продолжительности безледного периода в юго-западной части Карского моря. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2019;65(3):239–254. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2019-65-3-239-254>
Sochnev O.Ya., Kornishin K.A., Yefimov Ya.O., Mironov Ye.U., Porubayev V.S. Interannual variability of the ice-free period duration in the southwestern Kara Sea. *Problemy Arktiki i Antarktiki = Arctic and Antarctic Research*. 2019;65(3):239–254. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2019-65-3-239-254>
3. Шабанов П.А. Изменения продолжительности безледного периода в прибрежной зоне Карского моря по спутниковым данным. *Океанология*. 2022;62(4):518–531. <https://doi.org/10.31857/S0030157422040104>
Shabanov P.A. Ice-free period duration changes in the coastal zone of the Kara Sea using satellite data. *Okeanologiya = Oceanology*. 2022;62(4):518–531. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0030157422040104>
4. Shabanov P.A., Baranskaya A.V. Extension of the ice-free period in the Laptev Sea according to remote sensing data. *Oceanology*. 2023;63(1):11–22. <https://doi.org/10.1134/S0001437023070184>

5. Peng G., Steele M., Bliss A. et al. Temporal means and variability of Arctic sea ice melt and freeze season climate indicators using a satellite climate data record. *Remote Sensing*. 2018;10(9):1328–1353. <https://doi.org/10.3390/rs10091328>
6. Cavalieri D.J., Parkinson C.L. Arctic sea ice variability and trends, 1979–2010. *The Cryosphere*. 2012;6:881–889. <https://doi.org/10.5194/tc-6-881-2012>
7. Howell S., Duguay C., Markus T. Sea ice conditions and melt season duration variability within the Canadian Arctic Archipelago: 1979–2008. *Geophysical Research Letters*. 2009;36(10):1–6. <https://doi.org/10.1029/1009GL037681>
8. Stroeve J.C., Serreze M.C., Holland M.M., Kay J.E., Malanik J., Barrett A.P. The Arctic's rapidly shrinking sea ice cover: a research synthesis. *Climatic Change*. 2012;110:1005–1027. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0101-1>
9. Егоров А.Г. Летняя кромка льдов и осенние сроки устойчивого ледообразования в морях Лаптевых, Восточно-Сибирском и Чукотском в 1981–2018 гг. *Лед и Снег*. 2021;61(1):117–127. <https://doi.org/10.31857/S2076673421010075>
Egorov A.G. Positions of the summer ice edge and autumn dates of stable ice formation in the Laptev, East-Siberian and Chukchi seas in 1981–2018. *Lёд i Снег = Ice and Snow*. 2021;61(1):117–127. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S2076673421010075>
10. Егоров А.Г., Павлова Е.А. Изменение сроков устойчивого ледообразования в восточных арктических морях России в начале XXI в. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2019;4(65):389–404. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2019-65-4-389-404>
Egorov A.G., Pavlova E.A. Changes in the time of stable ice formation in the Russia eastern Arctic seas of at the beginning of the 21st century. *Problemy Arktiki i Antarktiki = Arctic and Antarctic Research*. 2019;4(65):389–404. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2019-65-4-389-404>
11. Спичкин В.А. Основные природные факторы, определяющие аномалии сроков начала ледообразования в морях сибирского шельфа. *Труды АННИИ*. 1987;402:81–92.
Spichkin V.A. The main natural factors that determine the anomalies of the timing of the beginning of ice formation in the seas of the Siberian shelf. *Trudy Arkticheskogo i antarcticheskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta = Proc. of AARI*. 1987;402:81–92. (In Russ.).
12. Егоров А.Г., Спичкин В.А. Метод локально-генетической типизации ледовых условий. *Труды АННИИ*. 1994;432:146–163.
Egorov A.G., Spichkin V.A. The method of local genetic typification of ice conditions. *Trudy Arkticheskogo i antarcticheskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta = Proc. of AARI*. 1994;432:146–163. (In Russ.).
13. Фролов И.Е., Гудкович З.М., Карклин В.П., Ковалев Е.Г., Смоляницкий В.М. Климатические изменения ледяного покрова морей евразийского шельфа. *Научные исследования в Арктике*. Т. 2. СПб.: Наука; 2007. 136 с.
14. Данилов А.И., Миронов Е.У., Спичкин В.А. (ред.). *Изменчивость природных условий в шельфовой зоне Баренцева и Карского морей*. СПб.: АННИИ; 2004. 320 с.
15. Думанская И.О. *Ледовые условия морей азиатской части России*. Обнинск: ИГ-СОЦИН, 2017. 640 с.
16. Миронов Е.У. Состояние изученности ледовых условий. В кн. Ашик И.М. (ред.). *Моря российской Арктики в современных условиях*. СПб.: АННИИ; 2021. С. 41–44.
17. Юлин А.В., Климатические изменения площади льдов в Северном Ледовитом океане и в российских арктических морях. В кн. Ашик И.М. (ред.). *Моря российской Арктики в современных условиях*. СПб.: АННИИ; 2021. С. 132–164.
18. Егоров А.Г. Ледовые условия в период нарастания ледяного покрова. В кн. Ашик И.М. (ред.). *Моря российской Арктики в современных условиях*. СПб.: АННИИ; 2021. С. 142–163.

19. Юлин А.В. Ледовые условия в период таяния ледяного покрова. В кн. Ашик И.М. (ред.). *Моря российской Арктики в современных условиях*. СПб.: ААНИИ; 2021. С. 164–177.
20. Макаров А.С., Миронов Е.У., Иванов В.В., Юлин А.В. Ледовые условия морей Российской Арктики в связи с происходящими климатическими изменениями и особенности эволюции ледяного покрова в 2021 году. *Океанология*. 2022;62(6):845–856. <https://doi.org/10.31857/S0030157422050124>
Makarov A.S., Mironov E.U., Ivanov V.V., Yulin A.V. Ice conditions of the Russian Arctic seas in connection with occurring climatic changes and peculiarities of ice cover evolution in 2021. *Oceanologiya = Oceanology*. 2022;62(6):845–856. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0030157422050124>
21. Юлин А.В., Тимофеева А.Б., Павлова Е.А., Шаратунова М.В., Хотченков С.В. Межгодовая и сезонная изменчивость ледовитости российских арктических море в современном климатическом периоде. *Труды ГОИН*. 2019;220:44–60.
Yulin A.V., Timofeeva A.B., Pavlova E.A., Sharatunova M.V., Khotchenkov S.V. Interannual and seasonal changes the ice cover in the Russian Arctic seas in the modern climatic period. *Trudy Gosudarstvennogo okeanograficheskogo instituta = Proceedings of State Oceanographic Institute*. 2019;220:44–60. (In Russ.).
22. Карелин Д.Б. Учет географических особенностей районов, в кн. *Ледовая авиационная разведка*. М.; Л.: Главсевморпуть; 1946. С. 77–97.
23. Гордиенко П.А. О ледовых массивах арктических морей. *Проблемы Арктики*. 1945;1:94–97.
Gordienko P.A. On the ice massifs of the Arctic seas. *Problemy Arktiki = Problems of Arctic* 1945;1:94–97. (In Russ.).
24. Гудкович З.М., Кириллов А.А., Ковалев Е.Г., Сметанникова А.В., Спичкин В.А. *Основы методики долгосрочных ледовых прогнозов для арктических морей*. Л.: Гидрометеоиздат; 1972. 348 с.
25. Монин А.С. *Прогноз погоды как задача физики*. М.: Наука; 1969. 184 с.

ГЕОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА GEOLOGY AND GEOPHYSICS

Оригинальная статья / Original paper

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-2-164-183>

УДК 550.83



Crustal structure of the Bunger Oasis and Highjump Archipelago (East Antarctica) based on magnetic data acquired by using fixed-wing UAV

Alexander V. Golynsky¹✉, Dmitry A. Golynsky¹, German L. Leitchenkov¹,
Nikita V. Borovkov¹, Vasily G. Antsev², Fedor G. Gutorov²,
Alexander E. Simakov²

¹ All-Russia Scientific Research Institute for Geology and Mineral Resources
of the World Ocean (VNIIOkeangeologia), St. Petersburg, Russia

² Radar mms JSC, Unmanned Aerial and Marine Systems Division, St. Petersburg, Russia

✉ sasha@vniio.nw.ru

IDAVG, 0000-0003-2546-4082; DAG, 0000-0001-8717-0894; GLL, 0000-0001-6316-8511;
NVB, 0000-0003-2568-2039; VGA, 0009-0007-4472-7139; FGG, 0009-0009-6720-2997;
AES, 0000-0002-2006-3071

Abstract. This study seeks to demonstrate the relationship between magnetic anomalies and geological structure of Precambrian complexes of the Bunger Oasis and Highjump Archipelago, East Antarctica. Aeromagnetic data effectively maps geological units, revealing distinct magnetic signatures for Neoproterozoic and Palaeo-Mesoproterozoic terrains. This provides the possibility of significantly improving existing geological maps, particularly in poorly mapped areas like the Highjump Archipelago. Magnetic anomaly intensity and strike correlate with rock composition and regional structural trends, enabling better differentiation of lithological units like magnetic metapelites and non-magnetic metapsammites. Tilt derivative calculations enhance structural mapping by linking magnetic sources to specific rock suites. As an example, a prominent northeast-striking belt of positive magnetic anomalies marks a key boundary between Archean and Mesoproterozoic complexes. Variations in the belt's strike suggest complex tectonic history, including potential fault contacts. Intrusive bodies exhibit complex magnetic characteristics. The Paz Cove intrusion displays a negative anomaly likely due to reversed remanent magnetization, while the Algae Lake intrusion has both positive and negative anomalies

© Авторы, 2025

© Authors, 2025

reflecting varying rock compositions. The Gabbro intrusions in the northeastern part of the Highjump Archipelago correlate with positive anomalies, while the intense negative anomaly over the Kashalot Island gabbroic intrusion suggests reversed magnetization. This study aims to produce a structural (tectonic) map of the Bunger Oasis and Highjump Archipelago by analyzing magnetic anomaly data collected by an unmanned aerial vehicle during the 69th RAE, combined with existing geological information for the area. The study highlights the value of UAV aeromagnetic surveys for detailed geological mapping in challenging environments, providing crucial insights into East Antarctica's Precambrian history.

Keywords: aeromagnetic survey, magnetic anomalies, magnetic properties, Bunger Oasis, Highjump Archipelago, Precambrian suites, intrusions

For citation: Golynsky A.V., Golynsky D.A., Leitchenkov G.L., Borovkov N.V., Antsev V.G., Gutorov F.G., Simakov A.E. Crustal structure of the Bunger Oasis and Highjump Archipelago (East Antarctica) based on magnetic data acquired by using fixed-wing UAV. *Arctic and Antarctic Research*. 2025;71(2):164–183. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-2-164-183>

Received 07.04.2025

Revised 12.05.2025

Accepted 27.05.2025

Introduction

From the tectonic and geodynamic point of view, the Bunger Oasis and Highjump archipelago area plays a crucial role in the architecture of the Indo-Australo-Antarctic junction within Gondwana and Rodinia supercontinents [1, and references therein]. According to the studies that have been published, the Bunger Oasis area records the Mesoproterozoic assembly of Australo-Antarctica during the process of Rodinia supercontinent amalgamation. In particular, the region under study is considered as part of a wide Mesoproterozoic orogeny (1300–1150 Ma), extending from South-West Australia (Albany-Fraser Orogeny) towards its Antarctic counterparts in Wilkes Land: Windmill Islands, Bunger Hills, Obruchev Hills and some outcrops on the Denman glacier [1, and references therein]. But the effect of the Neoproterozoic–Cambrian amalgamation of Gondwana on the Indo-Australo-Antarctica subcontinents remains debatable. Aeromagnetic data obtained enables one to constrain the tectonic units, terrains, their relationships and structural features. Integration of aeromagnetic data with the geological map and tectonic model may clarify the geological history of the Bunger Hills Proterozoic province within the context of the Mesoproterozoic orogeny, including its relationship to its Australian counterparts.

The Bunger Oasis and Highjump Archipelago were previously surveyed aeromagnetically during the First Soviet Antarctic Expedition in 1956 and since that time the area has not been surveyed in detail. Several recently acquired aerogeophysical profiles by international programs conducted in this region mainly aimed to study only the structure of Denman and Scott Glaciers [2]. To fill the gap in the knowledge of the geologically complex Precambrian Province the VNIIOkeangeologia and Radar-mms undertook a high resolution aeromagnetic survey using a fixed-wing unmanned aerial vehicle (UAV) in January of 2023/24 field season, a world first [3]. The aeromagnetic survey was primarily conducted to expand the magnetic dataset for East Antarctica. This was necessary to refine our understanding of the crustal structure of the Bunger Oasis and Highjump Archipelago, and to better establish the geological connections between Antarctica and the formerly adjacent Gondwana and Rodinia supercontinents. The survey was accomplished with a profile spacing of 250 m and tie-line spacing of 1250 m. It was flown draped at ~120–150 m above the relief surface (Fig. 1). The airborne magnetometer system allowed a rapid acquisition of data covering 2940 linear kilometers over an area

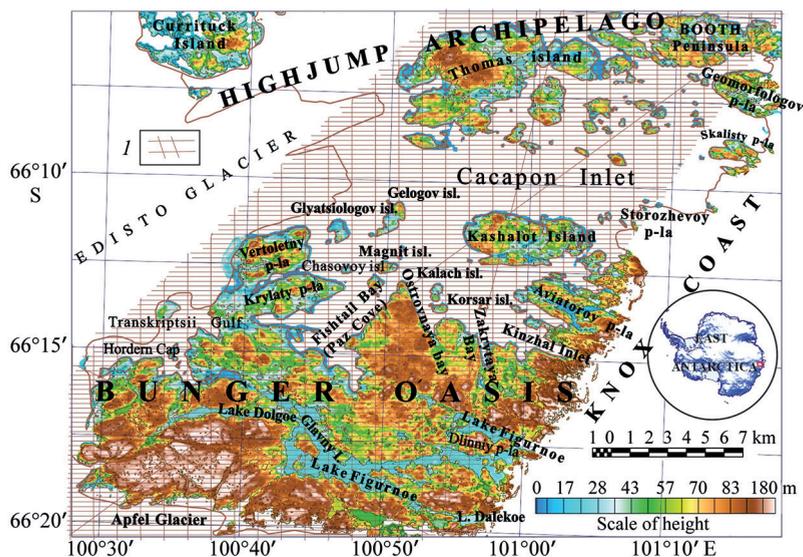


Fig. 1. Aeromagnetic survey flight lines in the Bunger Oasis and the Highjump Archipelago against a background of surface topography from SPOT-5 satellite data. The inset (red square) shows the survey area within Antarctica. *l* — survey lines

Рис. 1. Схема маршрутов аэромагнитной съемки в оазисе Бангера и архипелаге Хайджамп на фоне рельефа поверхности по данным спутника SPOT-5. На врезке красный квадрат показывает район работ в пределах Антарктиды. *l* — маршруты съемки

of 601 km². The onboard magnetometric system was equipped with a high-precision two-frequency satellite positioning system for accounting differential corrections using a ground base station in Post Processing Kinematic mode. The data underwent rigorous processing including several corrections: magnetic compensation for the aircraft's maneuvers, de-spiking, application of the International Geomagnetic Reference Field, adjustment for diurnals measured by a temporary base station and full levelling [3].

The survey results were used to compile a magnetic anomaly map at 1:25,000 scale, which clearly demonstrates the variability of morphological and amplitude characteristics of deeply metamorphosed Precambrian complexes (Fig. 2). The map shows significant variations not only in the strike but also in the shapes of anomalies ranging from individual features to complex systems. Areas of a sharply differentiated field are presented alongside the relatively quiet sections. Geological features of diverse scales, from several hundred meters up to the regional scale of the survey area, were identified through analysis of the aeromagnetic data, highlighting its comprehensive coverage. This includes the tectonic contact between Neoproterozoic and Mesoproterozoic terranes and abundant mafic to felsic intrusions [1, 4, 5]. However, it is broadly accepted that, when the distance between the magnetic sensor and the geological source exceeds the assumed size and internal dimensions of the magnetic rock body, interpretations of these parameters become inherently uncertain.

The primary objective of this work is to create a structural (tectonic) map of the Bunger Oasis and Highjump Archipelago based on the analysis of the magnetic anomaly data gathered during the 69th Russian Antarctic Expedition (RAE) using UAV, combined with existing geological information for the area.

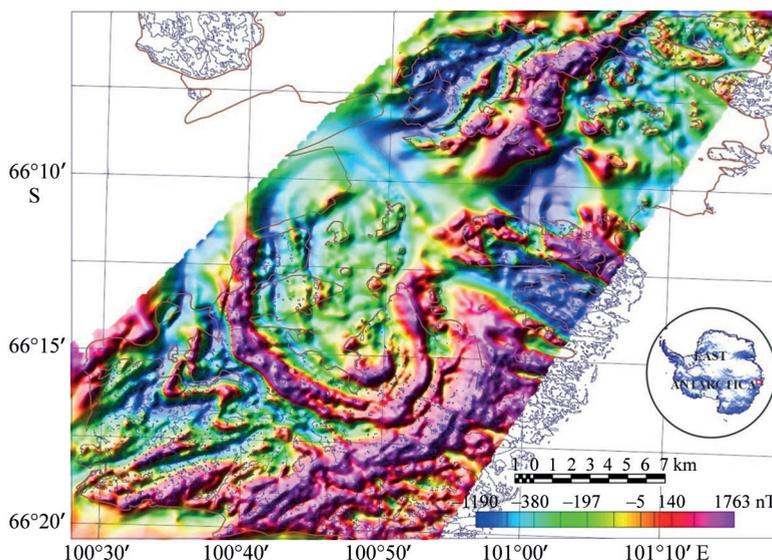


Fig. 2. Magnetic anomaly map of the Bunger Oasis and Highjump Archipelago. The blue lines indicate the location of lakes and islands. The thick brown line represents the coastline and the grounding line of the ice shelf

Рис. 2. Карта аномального магнитного поля оазиса Бангера и архипелага Хайджамп. Синие линии показывают местоположение озер и островов. Толстая коричневая линия отвечает береговой черте и линии налегания шельфового ледника

Geological Overview of the Bunger Oasis and Highjump Archipelago

According to [1], the Bunger Oasis and Highjump Archipelago comprise three or possibly four main structural-lithological complexes (tectonic units), defined by their structural and lithological characteristics: 1) an Archean terrane composing the eastern and southeastern parts of the Bunger Oasis and represented mainly by the orthogneissic complex of tonalite–trondhjemite–granodiorite (TTG) composition with protolith crystallization ages ranging between 2800 and 2600 Ma. This terrane, interpreted as part of an Archean basement reworked during the Mesoproterozoic orogeny, is juxtaposed against the Proterozoic metamorphic terrane by a blind thrust fault. It is thought to be located on the margin of the Mawson protocraton; 2) a Paleo- to Mesoproterozoic volcano-sedimentary metamorphic terrane; 3) a Mesoproterozoic magmatic complex represented by several gabbro-monzonite-granite plutons (Paz Cove intrusion in the center; Algae Lake intrusion in the south; Booth Peninsula batholith in the north-east) and 4) Dyke swarm complex represented by late Mesoproterozoic mafic dikes (1130 Ma, continental tholeiites) and, presumably, late Neoproterozoic, alkaline dykes (basanites-trachybasaltes-phonotephrites and lamproites) [6].

Russian geologists further subdivided the main tectonic units into lithological suites during the surveys of the Bunger Oasis conducted between the 62nd and 69th Russian Antarctic Expeditions (RAE, 2017–2024). The resulting geological map from the studies has not been published yet, but it was presented at the SCAR scientific conference in Chile [7]. Many suites on this map have small horizontal dimensions (tens to hundreds of meters) but extend for hundreds of meters to kilometers [Egorov, pers. communication].

This means that many geological features are undetectable in the magnetic anomaly field. Magnetic sources in this area range from weakly to strongly magnetic and are often closely spaced [Egorov, pers. communication]. The resulting superposition effects make it difficult to definitively correlate specific suites with individual anomalies.

The lack of modern geological surveys in the Highjump Archipelago necessitated the use of two existing maps: the Soviet map [4] and an Australian Geological survey map (Fig. 3 [1, 5]). However, the geological information on both maps is too generalized and lacks too much detail to be a match for the geophysical information obtained. In particular, the complexity of interpreting the magnetic anomaly map arises from the necessity of identifying several metamorphic suites characterized by homogeneous magnetic properties. These suites are tentatively correlated with rocks found in the Bunger Oasis.

The Archean terrane occupies the southern and the southeastern parts of the Bunger Oasis and comprises interlayered felsic and mafic orthogneisses of TTG compositions. The magmatic protoliths of Archean orthogneisses were formed between 2800 and 2700 Ma and inherited zircons from Bunger metasedimentary suites [1]. The Archean orthogneissic complex is represented by interlaying mafic schists, felsic orthogneisses, tonalitic to granodioritic orthogneisses (overlying with schists, $2,685 \pm 25$ Ma and $2,705 \pm 15$ Ma, protolith crystallization) and orthogneisses of alkaline granite composition ($2,618 \pm 34$ Ma and $2,602 \pm 35$ Ma, protolith crystallization) [1]. In general, more felsic orthogneisses are represented by orthopyroxene-bearing tonalites and granodiorites whereas the mafic ones are represented by quartz-rich dioritic gneisses, as defined by [1]. Migmatization is evident as orthopyroxene-(±) hornblende leucosome. Locally, the Archean orthogneissic complex contains lenses of pelitic metasedimentary rocks. Metamorphic zircon rims yield lower intercept and concordant ages of ca. 1,250–1,200 Ma [1]; there is no evidence of Archean metamorphism (ca. 2700 Ma). Zircons from the orthogneisses and paragneisses exhibit morphological and isotopic similarities, as well as similar geochemical characteristics, suggesting their formation through fractionation from a single magmatic source. This allows the association of these rocks to be interpreted as a syngenetic sedimentary-volcanic series formed in an extensional basin setting [1].

At the Neoproterozoic-Paleoproterozoic time, a newly formed crust began to develop with the formation of the primarily sedimentary suite being deposited on the Archean basement. The protoliths of these rocks were predominantly argillaceous sediments and basic graywackes. The metapelites of this suite contain an inherited zircon population providing ages of around 2700 Ma [1], suggesting that the sediments were derived mainly from the local Neoproterozoic rocks. Sm-Nd data from the primary sedimentary rocks also indicate a significant contribution of the Archean crust to their protolith.

The paleoproterozoic metamorphic complex is composed of variably migmatized orthopyroxene plagiogneisses corresponding to quartz diorites, tonalites or granodiorites. The largest bodies of this suite occur in the central part of the Bunger Oasis, where the outcrop widths approach 1 km [Egorov, pers. communication]. They extend from the northern shore of Lake Figurnoye northeastward and northward to Zakrytaya and Ostrovnaya Bays. In the western and eastern parts of the oasis, the rocks of this suite form smaller discontinuous, lenticular bodies with outcrop widths not exceeding 300 m.

The mesoproterozoic rocks in the Bunger Oasis are most prevalent around Transkriptsii Gulf, the northwestern and northern shores of Lake Figurnoye, and along the coast between Ostrovnaya Bay and Kinzhal Inlet. They are subdivided into

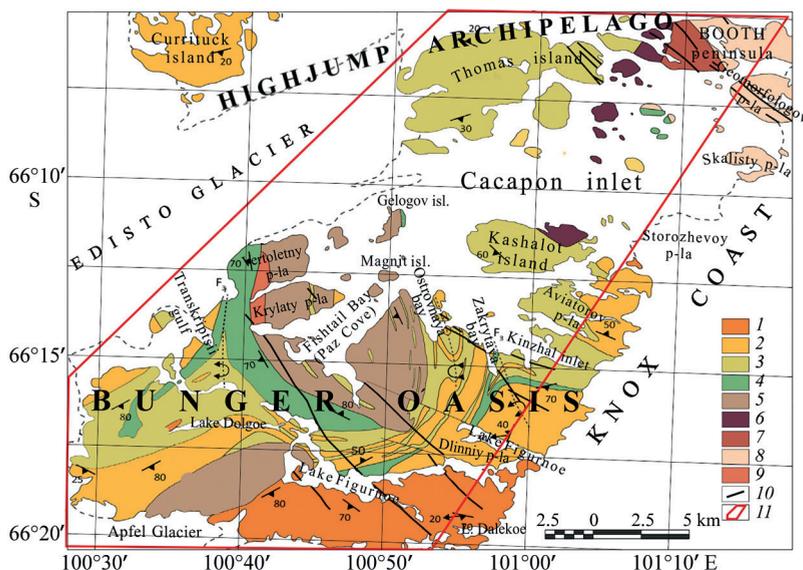


Fig. 3. Simplified regional geological map of the Bunger Hills and Highjump Archipelago (figure modified after [1]). 1 — composite mafic-felsic orthogneiss; 2 — tonalitic-granitic orthogneiss; 3 — interlayered pelite-orthogneiss; 4 — migmatitic metapelitic gneiss; 5 — pyroxene-bearing quartz monzogabbro; 6 — gabbro; 7 — quartz monzonite-monzodiorite; 8 — hornblende-pyroxene granite; 9 — garnet-pyroxene granite; 10 — mafic dyke; 11 — aeromagnetic survey area boundary

Рис. 3. Упрощенная региональная геологическая карта холмов Бангера и архипелага Хайджамп (рисунок изменен по [1]). 1 — комплекс расслоенных ортогнейсов (от мафических до фельзических); 2 — тоналит-гранитовый ортогнейс; 3 — переслаивающиеся пелитовые гнейсы и ортогнейсы; 4 — мигматитовый метапелитовый гнейс; 5 — пироксен-содержащий кварцевый монзогаббро; 6 — габбро; 7 — кварцевый монзонит-монцодиорит; 8 — пироксен-содержащий роговообманковый гранит; 9 — гранат-пироксеновый гранит; 10 — мафические дайки; 11 — контур площади аэромагнитной съемки

primary volcano-sedimentary and sedimentary sequences. The Mesoproterozoic stage of the crustal formation in this area is thought to have begun with active volcanism, leading to the formation of predominantly tholeiitic effusive rocks. Subsequently, volcanic activity transitioned to a sedimentation regime, resulting in thick sedimentary sequences dominated by metapsammites and metapelites. The maximum depositional age for metapsammites is estimated at 1368 ± 22 Ma, and for metapelites at 1490 ± 27 Ma [5].

Primarily tholeiitic, metaeffusive rocks are overlaid or embedded as lenses and boudins within aluminous metasedimentary gneisses. The metaeffusive rocks are represented by variably migmatized ortho- and clinopyroxene schists of mafic to intermediate composition. The metasedimentary gneisses, represented by garnet and sillimanite-garnet gneisses, quartzite gneisses, and calc-silicate rocks, also include the subordinate suite of migmatized schists [4, 5]. In most cases, the schists form elongated lenticular bodies (up to 8.5 km), reaching thicknesses of several hundred meters. Fragments of this migmatized schist suite, as lenticular xenoliths of varying thickness and length, are also mapped within the Paz Cove intrusion.

Among the metapsammite rocks, variably migmatized garnet and sillimanite-garnet gneisses, quartzite gneisses and quartzites dominate. The protoliths of this formation were most likely represented by sedimentary rocks with a subordinate amount of volcanic

material. The metapsammite suite rocks are found in close spatial association with the schists of mafic to intermediate composition, forming continuous lenticular bodies that are 30–380 m thick. They are also observed within the Paz Cove intrusion as small and thin lenticular xenoliths [4, 5].

The metapelitic sequence is represented by cordierite-garnet, garnet-cordierite, and orthopyroxene-cordierite felsic gneisses. Subordinate components of the metapelitic sequence are sillimanite-biotite-garnet gneisses with embedded schists and garnet-biotite-orthopyroxene plagiogneisses. Even less common are garnet and biotite-cordierite-orthopyroxene schists and quartzite gneisses. The protolith of this suite is assumed to be argillaceous rocks [1]. The overall composition of the formation can be characterized as an alternation of predominantly intensely migmatized, highly aluminous rocks with a distinctly subordinate proportion of quartzose rocks (metapsammites). The maximum depositional age of the sedimentary protolith of biotite-garnet-cordierite gneiss is 1490 ± 27 Ma [1].

The metapelitic sequence is widespread in the western and eastern parts of the Bunger Oasis (on the Vertoletny and Krylaty Peninsulas, along the northern shore of Lake Figurnoye, and east of Kinzhal Inlet) where it forms relatively large bodies with apparent outcrop widths of up to 1100–1700 m [4, 5]. Fragments of lenticular xenoliths of this suite are found within the Paz Cove intrusion. These fragments do not exceed 100 m in thickness, and their maximum observed length is about 900 m.

The next stage in the region's development is associated with intense tectonothermal activity, leading to deformation and high-grade metamorphism. This process was accompanied by the emplacement of intrusions ranging in composition from mafic to felsic, approximately between 1200 and 1170 Ma. Mesoproterozoic metamorphism reached peak conditions at granulite facies at interval between 1190 ± 15 Ma [8] and 1183 ± 8 Ma [9]. U-Pb LA-ICP MS (Laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry) geochronology for monazite from metamorphic rocks provided retrograde (isobaric cooling) metamorphic ages ranging between 1177 ± 12 and 1164 ± 5 Ma [10]. Prograde metamorphism may have begun earlier, at 1250 Ma, coinciding with pluton emplacement, according to [1]. Peak conditions reached 5.5–7.2 kbar and 800–960 °C and persisted between 1220 and 1180 Ma. The evolution of the endogenous regime followed a near-isobaric cooling path. The metamorphism corresponds to stage II of the Albany-Fraser Orogen and reflects the extension potentially associated with unloading and uplift (exhumation) during the development of a collisional orogen that arose after tectonic stage I in the Albany-Fraser Province [1].

The Mesoproterozoic intrusive complex is represented by three large intrusions: Charnockitic Peninsula (Booth Peninsula) batholith in the north, the Algae Lake pluton in the South, and the Paz Cove batholith (hypabyssal intrusion) in the central part [5]. The rocks exhibit a compositional range from mafic orthopyroxene-bearing gabbro to intermediate quartz monzogabbro and monzodiorite, and ultimately to felsic monzonite and charnockitic/orthopyroxene-bearing granites. The Algae Lake pluton and Paz Cove batholith are petrographically very similar [5]. The Paz Cove batholith forms a complex intrusive body, with interfingering relationships observed along its contacts with the host gneissic complex. It also contains sheet-like xenoliths hundreds of meters long, such as those near the southeastern contact. The presence of numerous sheet-like xenoliths, conforming to the contact of the Paz Cove intrusion, may be explained by the formation of a multiphase lopolith. In some areas, the rocks of the intrusion are foliated and even described as migmatitic [1].

The Algae Lake pluton predominantly consists of quartz gabbro and quartz monzogabbro while the Paz Cove pluton varies in composition from gabbro-diorite to granodiorite. U-Pb zircon geochronology for quartz gabbro collected both from the Algae Lake and Paz Cove plutons provided statistically indistinguishable magmatic crystallization ages of 1171 ± 3 Ma and 1170 ± 4 Ma, respectively [11].

The Booth Peninsula batholith (Charnockitic Peninsula pluton, [4, 5]) is the largest and most compositionally diverse intrusion of the Bunger Oasis region. Ravich et al. [4] estimated the exposed area of the intrusion to be 300 km², though a significant portion remains hidden beneath ice and fjord waters. The Booth Peninsula batholith outcrops across most of the Charnockitic, Geomorfologov, and Skalisty peninsulas, as well as nearby islands and part of Miles Island. The eastern part of the Charnockitic Peninsula batholith, including small nunataks 5 km east and 20 km east-northeast of Miles Island, is generally more felsic than the other two large intrusions and contains a variety of intrusive rocks ranging from orthopyroxene-bearing quartz monzodiorites to quartz monzonites and granites (i. e., charnockites *sensu stricto*). According to [11], the batholith is predominantly charnockitic but transitioning locally to quartz monzonitic. However, contacts between the different plutonic rock types within the batholith are difficult to map because they are gradational and most exhibit the characteristic dark reddish-brown weathering of charnockites. Generally, more felsic varieties intrude later than the more mafic ones, though locally they transit into one another [11]. U-Pb zircon geochronology for quartz monzogabbro from Booth Peninsula yields a crystallization age at 1151 ± 4 Ma, which is younger than the crystallization age obtained for the Paz Cove and the Algae Lake samples [11].

To the west, the Booth Peninsula batholith is bounded by a linear intrusion composed of gabbro and quartz gabbro. This sill-like intrusion extends as a sub-meridional belt for 15 km from Kashalot (Fuller) Island to Miles Island. Sheraton et al. [5] noted that these rocks are petrographically similar to the more mafic rocks of the Algae Lake and Paz Cove intrusions. However, the age of this intrusion is unknown and, therefore, its genetic relationship, if any, to the Booth Peninsula batholith or other intrusion still remains an open question.

Northwest-southeast trending dolerite dikes swarm is widespread in the Bunger Oasis and the Highjump Archipelago. Dyke swarm is represented by continental tholeiites and has a crystallization age at 1130 ± 10 Ma (U-Pb zircon, baddeleyite; [6]). The lack of metamorphic overprinting in these dikes indicates that the area has not undergone significant thermal reworking. The dikes were emplaced approximately 20 million years after the last known phase of plutonism in the Bunger Oasis. They were intruded at the end of the second stage of the Albany-Fraser Orogeny, signaling the termination of a protracted period of lithospheric thermal weakening that may have been caused by prolonged underplating of basic mantle material during orogenic collapse.

Magnetic properties of rocks

Over 15,000 magnetic susceptibility measurements were performed on a comprehensive collection of Bunger Oasis rock samples spanning from the Neoproterozoic to the Mesoproterozoic [Egorov, pers. communication]. The sample collection was gathered during recent Russian geological, which included ground magnetic measurements as well. For example, [16] based on ground magnetic data from the 64th Russian Antarctic Expedition (RAE), reported that a negative magnetic anomaly with an intensity of -500 to -700 nT corresponds to the porphyritic quartz monzodiorite and granodiorite sequence of

the Paz Cove intrusion. These intrusive rocks are characterized by a unimodal distribution of magnetic susceptibility (27.1×10^{-3} SI units), indicating they are magnetic rocks. Therefore, reverse magnetization is a likely possibility for these rocks.

Golynsky et al. [2019] also note that the Paz Cove metagabbroids correspond to a low-gradient negative magnetic anomaly field with anomaly intensities of $-(400-700$ nT) and exhibit a bimodal distribution of magnetic susceptibility with modes corresponding to 2.92×10^{-3} SI units and 24.2×10^{-3} SI units. The discrepancy between the magnetic properties of the rocks and the sign of the magnetic field intensity is most likely explained by the reverse direction of the magnetization vector. The gabbro-dolerites forming the largest dike of the Bunger Oasis exhibit a unimodal distribution of magnetic susceptibility (48.0×10^{-3} SI units), which enables one to classify them as magnetic rocks [7].

Among the geological suites identified in the Bunger Oasis only two exhibit low magnetic susceptibility values: the Mesoproterozoic metapsammite sequence and the Neoproterozoic-Paleoproterozoic sedimentary sequence, primarily argillaceous sediments and basic graywackes [Egorov, pers. communication]. The magnetic properties of the metapsammite sequence remain invariable throughout the Bunger Oasis. They are attributed to the variably migmatized garnet and sillimanite-garnet gneisses, quartzite gneisses and quartzites [7]. At the same time, very weakly and weakly magnetic varieties predominate, therefore, these rock types collectively influence the overall magnetic properties of this suite. All the remaining metamorphic and igneous lithologies within the Bunger Hills oasis demonstrate variable magnetic properties classified as weakly to strongly magnetic [7].

A collection of samples gathered by N.V. Borovkov and V.A. Maslov of VNIIOkeangeologia from the western part of the Charnockitic Peninsula enabled them to measure the magnetic susceptibility in a series of intrusive rocks. Specifically, Opx-, Bt-, and Gt-bearing monzodiorites, as well as Opx-bearing diorites and monzonites were measured. These rocks exhibit high magnetic susceptibility values ranging from 20×10^{-3} to 36×10^{-3} SI units. It was also noted that stringers of fine-grained Opx-monzodiorites possess even higher magnetic susceptibility values — up to 110×10^{-3} SI units, whereas Q-bearing monzodiorites show significantly lower values, in the range of 4.3×10^{-3} to 5.6×10^{-3} SI units.

Even with a limited sample collection, the results suggest that granitic (i. e., charnockites *sensu stricto*) rocks play a primary role in the structure of the Charnockitic batholith while most intermediate rocks have a restricted distribution. Among others, Q-bearing monzodiorites exhibit significantly lower magnetic susceptibility compared to other rock types. This assumption is based on the fact that despite their high magnetic susceptibility values intermediate rocks do not produce intense magnetic anomalies across the entire batholith area.

Summarizing the magnetic properties of the Bunger Oasis rocks, it's clear that the significant variability in magnetization poses challenges for the interpretation of the magnetic anomalies [7]. Determining the specific source suite for a given local magnetic field component is not always straightforward.

Results

The geological structure map of the Bunger Oasis and Highjump Archipelago was constructed using calculations of the first vertical derivative of the magnetic anomaly field derived from aeromagnetic survey data. This derivative is most effective for highlighting local features of magnetic anomalies, such as the axes and lines of disruption in the magnetic field structure, which are particularly important in analyzing areas with

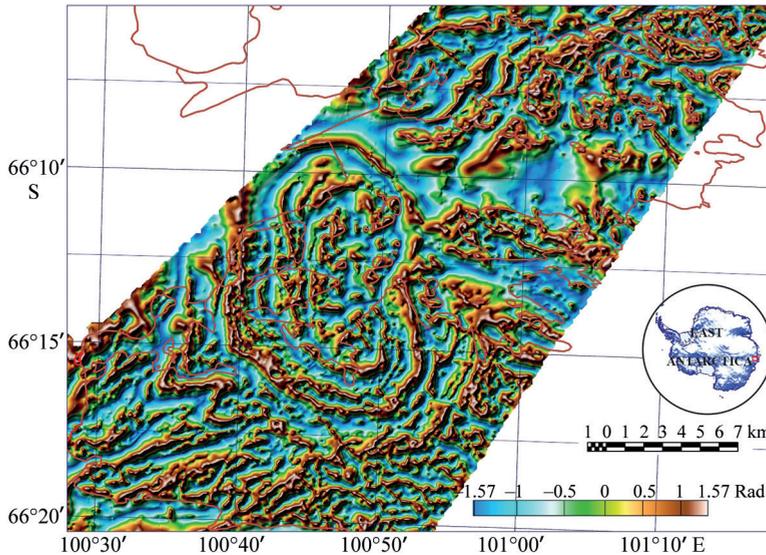


Fig. 4. Shaded relief map of tilt derivative of the Bunger Oasis and Highjump Archipelago aeromagnetic data

Рис. 4. Карта теневого рельефа производной наклона аэромагнитных данных оазиса Бангера и архипелага Хайджамп

sharply differentiated fields. Additionally, calculations of the horizontal derivative and the tilt derivative (Fig. 4) were performed. The tilt derivative provides the most accurate delineation of magnetic sources as, according to theory, the zero contour line of the tilt derivative corresponds to the location of the edge anomaly source [12].

All the aforementioned transformations were generated as colored shaded relief maps. This visualization method provides a clearer picture of the magnetic anomaly distribution, revealing the underlying geological bodies. It also facilitates more confident identification of the magnetic field's key morphological features when each is distinguished by unique attributes. In constructing the geological structure map (Fig. 5) we primarily relied on the tilt derivative calculations which allowed identifying the main magnetic sources and areas devoid of them throughout the study area. These were then correlated with geological suites and intrusive bodies. These bodies were examined, and if they were found to correspond to the rocks of a specific formation, they were then assigned the index of that formation. Areas lacking magnetic sources generally correspond to the non-magnetic metapsammite suite, part of the Mesoproterozoic Wilkes Land orogen [1].

For the protocraton region, the correlation between magnetic sources and the identified formations is ambiguous. Nevertheless, the primary magnetic sources were associated with the felsic orthogneisses which are most widespread in this area. We interpret the remaining protocraton rocks as interlayered suites, including metaintrusive gabbroids. The predominantly mafic crystalline suite is the exception, sometimes correlating with high-amplitude anomalies (see Figs. 2, 5).

The magnetic anomalies in the Bunger Oasis and Highjump Archipelago region are characterized by a complex structure. The principal geological features of the region

are effectively revealed in the complete set of amplitude, morphological and structural characteristics of the magnetic anomaly field. The intensity of the magnetic anomalies is determined by the lithology of the geological sequences while the strike of the magnetic anomalies corresponds to the prevailing geostructural framework. The magnetic field is relatively calm in some areas, while others show sharply contrasting fields with high-intensity anomalies. These anomalies have significant horizontal gradients and amplitudes up to 1800 nT. This is characteristic, for example, for regions composed of layered migmatites associated with metapelitic paragneisses. The high horizontal gradients of magnetic anomalies in zones where paragneisses occur are caused by several

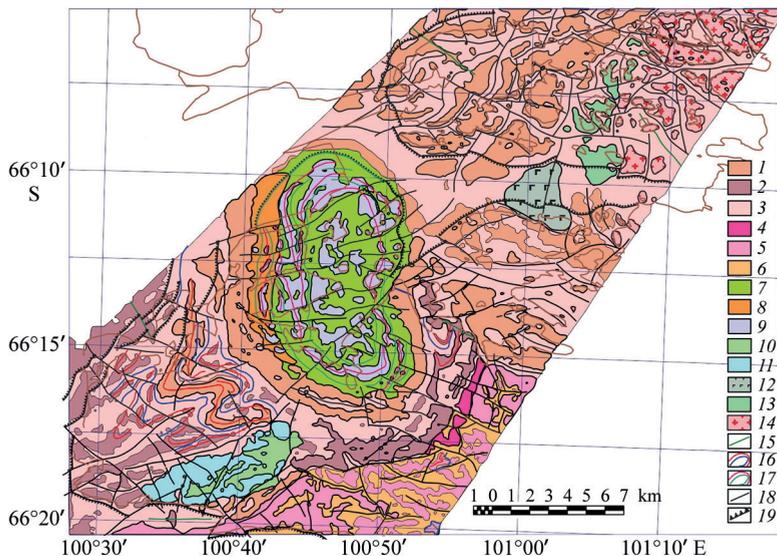


Fig. 5. The geological structure map of the Banger Oasis and the Highjump Archipelago, based on aeromagnetic survey data.

Mesoproterozoic Wilkes Land orogen: 1 — predominantly layered migmatites with a substrate of cordierite-garnet and garnet-cordierite, orthopyroxene-cordierite schists and gneisses; 2 — predominantly migmatized ortho- and clinopyroxene schists of basic to intermediate composition; 3 — predominantly migmatized garnet and sillimanite-garnet gneisses, quartzite gneisses, and quartzites. Neoproterozoic-Paleoproterozoic Mawson protocraton: 4 — migmatized pyroxene schists and metagneisses; 5 — orthopyroxene orthogneisses of plagiogranite-tonalite-granodiorite-granite composition; 6 — interlayering metamorphic rocks of various compositions with meta-intrusive rocks. Intrusive rocks: Paz Cove intrusion: 7 — predominantly biotite- and orthopyroxene-metamorphosed gabbro, gabbrodiorite, diorite, and quartz diorite porphyrites, less commonly granodiorite porphyrites; 8 — bodies of porphyritic orthopyroxene granodiorites; 9 — interlayering of orogenic and intrusive rocks. Algae Lake intrusion: 10 — metadiorites-quartz metamonzodiorite; 11 — gabbro and gabbro-diorite porphyrites with subordinate diorite porphyrites. Mesoproterozoic plutons: 12 — gabbro and quartz gabbro pluton associated with a magnetic low; 13 — gabbro and quartz gabbro plutons; 14 — plutons of quartz monzodiorites, quartz monzonites, and granites. Other elements: 15 — dolerite and gabbrodolerite dykes; 16 — large folds expressed in magnetic field; 17 — axes of local positive and negative anomalies highlighting the concentric zoning of the Paz Cove intrusion and surrounding country rocks; 18 — faults, structural discontinuities, lineaments; 19 — normal faults

factors including the heterogeneous composition of the formation, varying degrees of migmatization, the presence of schistosity and blastomylonitization zones, the occurrence of metagabbro and schists with high titanomagnetite content.

The aeromagnetic data results reveal a complex pattern over the areas where both metapelites and metapsammite sequences occur. In several instances, across extensive areas (Thomas and Kashalot Islands), where literature sources suggest the predominance of rocks we associate with the metapelitic suite, the intense negative anomalies are also observed, potentially, originating from different rock types (see Fig. 2). The presence of intense negative anomalies on the Aviatorov Peninsula indicates predominantly non-magnetic rocks, compositionally similar to the metapsammite suite. However, published maps from previous studies (see Fig. 3) indicated the presence of both aforementioned formations in this area characterized by roughly equal distribution [4, 5], which, we believe, is inaccurate. However, no recent detailed geological investigations have been conducted in these areas.

Areas dominated by intense negative magnetic anomalies (up to -1200 nT) correlate with the metapsammite sequence, which primarily consists of variably migmatized garnet and sillimanite-garnet gneisses, quartzite gneisses and quartzites, also characterized by extremely low modal magnetic susceptibility values.

The boundary between Paleoproterozoic-Neoproterozoic and Mesoproterozoic terranes in the southeastern Bunger Oasis is clearly delineated by an extensive linear zone (belt) of positive magnetic anomalies. This zone strikes northeast and is characterized by variations in the shape and amplitude of the anomalies (see Figs. 2–4). This belt exhibits an en-echelon arrangement of anomalies comprising the most intense anomalies (up to 900 – 1000 nT) concentrated within the Mesoproterozoic part of the metamorphic complex.

Рис. 5. Схема геологического строения оазиса Бангера и архипелага Хайджамп, по материалам аэромагнитной съемки.

Мезопротерозойский ороген Земли Уилкса: 1 — преимущественно послойные мигматиты с субстратом кордиерит-гранатовых и гранат-кордиеритовых, ортопироксен-кордиеритовых сланцев и гнейсов; 2 — преимущественно мигматизированные орто- и двупироксеновые кристаллические сланцы основного-среднего состава; 3 — преимущественно мигматизированные гранатовые и sillimanит-гранатовые гнейсы, кварцито-гнейсы и кварциты.

Неоархейско-палеопротерозойский протократон Моусона: 4 — мигматизированные пироксеновые кристаллические сланцы и меланогнейсы; 5 — ортопироксеновые ортогнейсы плагиигранит-тоналит-гранодиорит-гранитного состава; 6 — переслаивающиеся метаморфические породы различного состава с метаинтрузивными породами.

Интрузивные породы: Интрузия Паз-Коув: 7 — преобладающие дву- и ортопироксеновые метаморфизованные габбро-габбродиорит-, диорит- и кварцевые диорит-порфиры, реже гранодиорит-порфиры; 8 — тела порфировидных ортопироксеновых гранодиоритов; 9 — переслаивание пород орогена и интрузивных пород.

Интрузия Алго-Лэйк: 10 — метадiorиты-кварцевые метамонцодиориты; 11 — габбро- и габбродиорит-порфиры с подчиненными диорит-порфирами.

Мезопротерозойские плутоны: 12 — плутон габбро и кварцевых габбро, ассоциированный с магнитным минимумом; 13 — плутоны габбро и кварцевых габбро; 14 — плутоны кварцевых монцодиоритов, кварцевых монцонитов и гранитов.

Прочие элементы: 15 — долеритовые и габбродолеритовые дайки; 16 — крупные складки, выработанные в магнитном поле; 17 — оси локальных положительных и отрицательных аномалий, подчеркивающих концентрическую зональность пород интрузии Паз-Коув и вмещающих пород; 18 — разломы, линии нарушения структуры поля, линеаменты; 19 — сбросы

The foreland of the Mawson paleocraton [13], which we hypothesize is exposed in the southeastern part of the Bungee Oasis (see Fig. 5), lacks such intense anomalies. In some cases, they only reach 500–700 nT. Furthermore, the anomaly trends in this area are predominantly sub-latitudinal and characterized by short-wavelength anomalies unlike the boundary zone where the superposition effect from various sources results in a regional-scale anomaly.

The strike of the intense anomaly belt changes noticeably from west to east, trending northeast east of the Algae-Lake intrusion. The central segment extends sub-latitudinally along Lake Figurnoye suggesting that the lake is located at the contact between two major tectonic elements, the paleocraton and the mobile belt. The eastern segment strikes north, and it is orthogonally juxtaposed to the east by predominantly intense anomalies associated with relatively thick units with felsic orthogneisses, along with minor layers of intermediate orthogneisses and schists, despite both formations possessing only moderate magnetic susceptibility values. In contrast, alkaline orthogneisses mapped in this area strikes concordantly with the aforementioned magnetic belt and/or the boundary between the two metamorphic complexes.

The overall magnetic anomaly pattern over the paleocratonic block is quite complex lacking a clear correlation with the identified metamorphic suites, whose layers often exhibit limited horizontal extent. A wide range of relationships between main rock types and the magnetic anomalies has been established. However, since felsic orthogneisses are predominant, their distribution largely determines the magnetic anomaly pattern in this area, with other formations contributing additional elements. Numerous dikes of metagabbro, metabasites, and gabbro-dolerites, possessing strong magnetic properties, further complicate the magnetic anomaly pattern.

It should be noted that the Neoproterozoic rocks of the protocratonic region are characterized by a striking prevalence of positive magnetic anomalies, varying significantly in intensity, wavelength, form, and orientation. Negative anomalies are extremely rare, largely corresponding to areas of low relief, such as Lake Figurnoye with its branches and Lake Dalekoe, suggesting their tectonic nature.

Gabbro and orthopyroxene granite intrusions, mapped in the northeastern part of the Highjump Archipelago (see Figs. 2, 5), correlate well with local, low-intensity magnetic anomalies occurring against a background regional negative minimum. While anomalies associated with gabbro intrusions can exceed 800 nT, those above the orthopyroxene granite intrusions of the Charnockitic batholith rarely exceed 50 nT. It is important to note that these low-amplitude anomalies correspond to all bedrock outcrops in the Highjump Archipelago region and should be attributed to granitic intrusions. The high concentration of local anomalies further supports the existence of a large batholith intruding into the metasedimentary sequence.

Westwards from the batholith, a linear chain of islands trending sub-meridionally and composed of gabbro intrusions, also correlates primarily with short-wavelength magnetic anomalies with intensity varying from 150–300 to 600–800 nT (see Fig. 2). These anomalies also occur against a negative background, but here the amplitude of the minima is significantly higher in comparison with the area of quartz-monzodiorite and granite intrusions, reaching –700 to –900 nT. One of the gabbro intrusions, according to literature sources, is mapped in the northern part of Kashalot Island [4, 5]. However, in this case, it corresponds to a deep minimum exceeding –1000 nT in amplitude. At this stage of

research, such an unusual magnetic field anomaly distribution over this gabbro intrusion remains an enigma without a definitive explanation. Several hypotheses do exist, but they are still speculative, and it is crucial to verify the actual composition of the intrusion. If it is indeed gabbro, it is most likely that it intruded during a period of reversed magnetic polarity, and its remanent magnetization exceeds the induced magnetization. This suggests that all the other gabbro intrusions within the 15-km belt differ in their emplacement age. Determining their relative ages will require geochronological studies. However, it is noteworthy that a strong minimum is also observed over the Paz Cove intrusion, which may indirectly indicate a synchronous emplacement of these two intrusions.

Regarding the two other largest intrusions of the Bunger Oasis, Paz Cove and Algae Lake, both are clearly discernible in the magnetic anomaly pattern, but in distinctly different ways (see Figs. 2, 4, 5). All rock varieties of the Paz Cove intrusion, despite some variations, are most often characterized as moderately magnetic (27.1×10^{-3} SI units). The overall magnetic susceptibility distribution is primarily influenced by quartz diorite porphyrites and granodiorite porphyrites, to a lesser extent by diorite porphyrites, and even less by gabbro and gabbro-diorite porphyrites [16]. Given this, the presence of a broad minimum over the intrusion can only be explained by assuming the rocks possess reversed remanent magnetization.

The Paz Cove hypabyssal intrusion (see Fig. 5) is primarily associated with a region of predominantly negative anomalies shaped like a sub-meridionally elongated, deformed oval. The periphery of the oval is marked by a belt of intense positive anomalies flanking the intrusion from the west, south, and east. Only in the north is a relatively low-amplitude maximum recorded, likely representing the northern limit of the intrusion (see Figs. 2, 4, 5). The decrease in anomaly intensity in this case is explained by the deepening of magnetic sources beneath the Edisto Glacier along a system of normal faults. The most intense negative anomalies (over -700 nT) are registered in the west of the intrusion, where they correlate with the area of porphyritic orthopyroxene granodiorites.

There is every reason to believe that within the main oval of the magnetic anomaly field distribution, an inner oval exists, formed by local anomalies of low intensity (50–150 nT) interspersed with relatively deep minima (-300 to -700 nT), which is clearly captured by all magnetic anomaly field derivatives (see Figs. 4, 5). In the north, west, and south, it is formed mainly by linear anomalies, while in the eastern part, diversely shaped anomalies prevail, but in all cases, they are conformal to the outer boundary of the intrusion. Moreover, in the western part of the intrusion, there is another branch of the oval that gradually fades as it moves from north to south, suggesting asymmetry in the intrusion's structure. The central part of this structure is associated with a mosaic magnetic anomaly field pattern. This can likely be explained by the fractionation of the magmatic melt and the presence of interlayers of host rocks, as documented by geological observations [4, 5].

Almost all islands in Fishtail Bay (Paz Cove) are composed mainly of gabbro and gabbro-diorites, and in some cases, they are interspersed with thin lenticular layers of basement rocks. A majority of them coincide with local positive anomalies, contradicting the earlier suggestion about the nature of the magnetic minimum being related to the reversed remanent magnetization of the rocks composing the Paz Cove batholith and the low magnetic properties of metapsammite rocks. The reason for this phenomenon is not entirely clear, and it is possible that it is caused by more magnetic basement rocks buried at shallow depths.

It should also be noted that the contact between the Paz Cove intrusive rocks and the host rocks in the western part of the area is more or less clearly traced in the magnetic field as a linear gradient zone with a sub-meridional trend. Conversely, a zone of strong positive magnetic anomalies appears over the intrusion in the south and east, contradicting existing geological maps. This is likely due to the basement rocks occurring at a relatively shallow depth. These basement rocks are presumably the primary source of the magnetic anomaly field in the eastern and southern parts of the intense magnetic anomaly belt. Here, the superposition effects from different sources are most pronounced. In addition, there is a significant difference in the anomaly gradients on either side of the eastern branch of the belt. High gradients are characteristic of the east of the belt and they noticeably decrease to the west, which serves as an additional argument in favor of the assumption of buried anomaly sources beneath the igneous rocks of the intrusion.

Establishing the spatial boundaries of the hypabyssal intrusion is further complicated by the observations of Stüwe and Wilson [14], who noted that the contacts generally conform to the layering within the surrounding gneisses, whose mineralogy is also similar to that of the batholith rocks, and the contact relationships are gradational. Only in some places the contacts are intruded by coarse-grained, non-foliated charnockites.

In the magnetic anomaly field, the Algae Lake intrusion is also characterized in a unique way with areas of both positive and negative anomalies, primarily developed over gabbroic rocks. The predominance of hemo-ilmenite over titanomagnetite in the gabbroic rocks may indicate the presence of lamellar magnetism and the occurrence of anomalies due to reversed remanent magnetization [15]. Positive anomalies correlate more with areas dominated by diorite-quartz monzodiorite compositions, characteristic of the southwestern part of the intrusion. It's important to note that only the northwestern boundary is reliably determined. This boundary coincides with a minimum in the tilt derivative and extends northeastward to Lake Figurnoye. The most ambiguous magnetic anomaly distribution pattern is observed in the south and east of the intrusion, where anomalies may be caused by buried rocks of the Mesoproterozoic orogen, particularly rocks of the metapelite sequences suite, mapped in close proximity to and as small interlayers within the intrusion.

According to geological data, the thickness of dolerite and gabbro-dolerite dikes varies widely, from a few meters to 50–80 meters, as in the case of the region's largest dike, which crosses Bunger Oasis from northwest to southeast. Due to their small size, almost all known dikes cannot be discerned in the magnetic anomaly pattern, despite their high magnetic susceptibility values ($41.5 \cdot 10^{-3}$ SI units). As for the largest dike in Bunger Oasis, it also lacks a clear expression and correlates fragmentarily with both negative and positive anomalies, primarily residing within areas of low magnetic values. This is clearly visible in the area south of Lake Figurnoye, where the southern segment of the dike lies almost entirely within a region of positive anomalies. However, the local components do not show a clear correlation with the dike's location. A similar anomaly distribution was observed in ground survey data [16]. This situation may indicate that the dike, due to its dimensions, is not reflected in the magnetic field, but it is also possible that they intruded during a period of reversed polarity. One of the oasis's extensive and thick dikes, intruding along the coastal zone on both sides of Zakrytaya Bay, exhibits a similar pattern when local anomalies along its strike are randomly distributed.

Among the most striking geological structures clearly revealed in the aeromagnetic data of Bunger Oasis are folds mapped in several locations (see Figs. 2, 4, 5). For

example, on the southern coast of Izvilistaya Bay and Lake Dolgoe, as well as the south of Ostrovnaya Bay. Existing literature on well-studied regions of the world indicates that fold geometry, including the dip, strike, and plunge of the axial plane, as well as the dip angles of the limbs, all influence the magnetic response [17]. Aeromagnetic data are most effective for visualizing upright and inclined folds (with vertical or steeply dipping axial planes) and less effective for visualizing recumbent folds (with horizontal axial planes). The folds in the southwestern part of the oasis are characterized by near-vertical axial planes, which allowed the detection of a system of positive and negative anomalies caused by the combined effect of interlayered strata, including those with low magnetic susceptibility values. The most contrasting folds relate to the D_2 deformation episode, belonging to the class of tight to isoclinal F_2 folds with subvertical or steeply dipping axial surfaces (dipping towards recumbency and having shallow, generally south-southwest plunging axial planes). The strike of the axial planes of the F_2 folds varies from sublatitudinal to northeasterly [4].

It is noteworthy that the observed increased intensity of the anomalies in the fold hinges may be related to the superposition of magnetic responses from the two limbs. However, such higher-amplitude anomalies could also develop due to localized increases in magnetic mineral content resulting from structural focusing of fluids in hinge zones during deformation or from limb attenuation and hinge thickening during intense fold tightening.

Most of the faults identified on the interpreted map, with rare exceptions, do not directly correspond to observed magnetic maxima and are mostly associated with minima that contrast with the surrounding field pattern. Additionally, faults were identified by the displacement and bending of anomaly axes, as well as their attenuation or termination. Normal faults were recognized by abrupt changes in the spectral composition of magnetic anomalies and by the appearance of regional anomalies with diffuse outlines, and also by a significant decrease in amplitude.

Thus, the analysis of the magnetic anomaly pattern of Bunger Oasis and Highjump Archipelago, combined with geological information, has identified two fragments of major geological provinces within the region. These are the structural-material Mawson Neoproterozoic-Paleoproterozoic cratonic complex and the Paleo-Mesoproterozoic volcano-sedimentary complex of the Mesoproterozoic orogen (mobile belt) of Wilkes Land, as a westward continuation of the Albany-Fraser Orogen in southwestern Australia, which are further subdivided into a number of smaller units identified by researchers. The Mesoproterozoic intrusive complex is represented by three large plutons: Paz Cove, Algae Lake, and Charnockitic, in which the main rock varieties are gabbro, tonalites, quartz monzogabbro, granites, and quartz monzodiorites.

Conclusions

The magnetic anomaly map reveals distinct patterns correlating with specific geological units: a Neoproterozoic terrane, and a Palaeo-Mesoproterozoic complex of orthogneiss, pelite gneiss, migmatitic pelite gneiss, and Mesoproterozoic plutonic rocks. This data provides valuable insights into the regional geological evolution and the Precambrian history of East Antarctica. The observed magnetic anomaly patterns, and the resulting spatial distribution of the source bodies, offer a significantly more effective tool for detailed geological mapping than existing published maps, particularly

for the Highjump Archipelago (e. g., Thomas Island), Kashalot Island, and the Aviatorov Peninsula, where current maps demonstrate a clear lack of detail.

Within the Bunger Oasis and Highjump Archipelago, magnetic anomalies reflect the underlying geological structure, with anomaly intensity linked to rock composition and anomaly strike aligning with the regional structural framework. Tilt derivative calculations aided in mapping this structure, associating magnetic sources with specific rock suites and non-magnetic areas with metapsammite rocks.

Although widespread felsic orthogneisses are likely to be the primary magnetic source within the protocraton, correlating specific anomalies remains challenging due to the potential contribution of other sources, including numerous dikes, which further complicate the magnetic anomaly pattern. High-intensity positive anomalies (up to 1800 nT) are associated with magnetic, layered migmatitic metapelites, while strong negative anomalies (down to -1200 nT) correspond to non-magnetic metapsammite rocks.

A prominent northeast-striking linear belt of positive magnetic anomalies (see Fig. 2) demarcates the boundary between the Paleo/Neoproterozoic and Mesoproterozoic complexes in the southeastern Bunger Oasis. This zone, characterized by an en-echelon arrangement, hosts the most intense anomalies (up to 900–1000 nT) within the Mesoproterozoic complex. Conversely, the hypothesized Mawson paleocraton foreland (see Figs. 2, 5) exhibits weaker, sub-latitudinal anomalies (maximum 500–700 nT) with shorter wavelengths, indicating a distinct geological setting. The strike of the intense anomaly belt varies: (1) northeast east of the Algae Lake intrusion; (2) sub-latitudinal along Lake Figurnoye, potentially marking a tectonic contact; and (3) north-trending in the east, orthogonally juxtaposed against intense anomalies associated with felsic and intermediate rocks.

Aeromagnetic data reveal a complex relationship between magnetic anomalies and intrusive bodies. The Paz Cove and Algae Lake intrusions exhibit contrasting magnetic signatures (see Figs. 2, 4, 5). The moderately magnetic (27.1×10^{-3} SI units) Paz Cove intrusion [7] is associated with a broad negative anomaly, likely due to reversed remanent magnetization. This sub-meridionally elongated, deformed oval is bounded by intense positive anomalies (west, south, and east), with a low-amplitude northern maximum marking the intrusion's limit (see Figs. 2, 4, 5). The northward decrease in anomaly amplitude suggests deepening magnetic sources beneath the Edisto Glacier along normal faults. The strongest negative anomalies (>-700 nT) correlate with porphyritic orthopyroxene granodiorites to the west. High magnetic gradients along the eastern edge of this anomaly belt, decreasing significantly westward, further support the presence of buried sources beneath the Paz Cove intrusion.

Within the main negative magnetic oval of the Paz Cove intrusion, a lower-intensity inner oval (50–150 nT with minima of -300 to -700 nT) is apparent in magnetic field derivatives. This inner structure, defined by linear anomalies to the north, west, and south, and more complex anomalies to the east, conforms to the outer intrusion boundary. A westward-trending branch fades southward, suggesting structural asymmetry. The central mosaic anomaly pattern likely reflects magmatic melt fractionation and interlayered host rocks [4, 5].

The Algae Lake intrusion displays a distinct magnetic signature characterized by both positive and negative anomalies. Negative anomalies predominantly correspond to gabbroic rocks, where the prevalence of hemo-ilmenite over titanomagnetite suggests lamellar magnetism and the possibility of reversed remanent magnetization as the anomaly

source. Positive anomalies are most confidently correlated with areas dominated by diorite-quartz monzonite-diorite rocks, particularly in the southwestern portion of the intrusion. Only the northwestern intrusion boundary is reliably defined, coinciding with a tilt derivative minimum extending northeast towards Lake Figurnoye. The southern and eastern boundaries exhibit a more ambiguous magnetic signature. Here, positive anomalies may originate from underlying Mesoproterozoic orogenic rocks, particularly metapelites mapped near and within the intrusion as enclaves.

In the northeastern Highjump Archipelago, gabbro and orthopyroxene granite intrusions correlate with localized, low-intensity magnetic anomalies (150–800 nT for gabbro, <50 nT for granite) superimposed on a regional negative minimum (see Figs. 2, 5). Low-amplitude anomalies over bedrock outcrops correspond to granitic intrusions, supporting the interpretation of a large batholith within the metasedimentary sequence. A sub-meridionally trending chain of gabbro intrusions west of the batholith exhibits short-wavelength anomalies (150–800 nT) against a strong negative background (–700 to –900 nT), significantly more negative than that observed near quartz-monzodiorite and granite intrusions [see Fig. 2]. The gabbro intrusion on Kashalot Island is associated with an exceptionally deep magnetic minimum (up to –1000 nT), requiring further investigation. A leading hypothesis attributes this, and potentially the reversed magnetization observed in the Paz Cove intrusion, to emplacement during a period of reversed magnetic polarity, exceeding the induced magnetization. This hypothesis necessitates further analysis, including compositional and geochronological studies of intrusions within a 15-km belt to determine relative ages.

Magnetic susceptibility measurements of Bunger Oasis rocks reveal a wide range of values, from very weakly magnetic psammitic rocks and granitic veins ($<0.3 \times 10^{-3}$ SI units) to strongly magnetic mafic schists, metagabbroids, metabasites, and dolerites/gabbrodolerites ($>47.8 \times 10^{-3}$ SI units), with intermediate values observed in other suites [7]. The presence of magnetite-rich rocks within the metapelite suite likely explains the significant positive magnetic anomaly (4600–6190 nT; [16]). Thin dikes of magnetic rocks (e. g., metagabbroids) produce only localized positive anomalies.

In conclusion, this study demonstrates the effectiveness of fixed-wing UAV aeromagnetic surveys for mapping complex geological structures in areas like the Bunger Oasis and Highjump Archipelago, highlighting a strong correlation between magnetic anomaly characteristics and the composition and distribution of geological units.

Competing interests. The authors have no competing interests.

Funding. This study was carried out under the State Assignment No. 049-00005-25-00 of the Federal Agency for Subsoil Use for 2024.

Acknowledgements. We are grateful to the management of VNIIOkeangeologia and Radar mms for their support in conducting innovative geomagnetic research in East Antarctica. We acknowledge the reviewers' comments, which contributed to improving the article's quality.

Конфликт интересов. Конфликт интересов отсутствует.

Финансирование. Это исследование выполнено в рамках государственного задания № 049-00005-25-00 Федерального агентства по недропользованию на 2024 г.

Благодарности. Мы благодарны руководству ВНИИОкеангеология и АО НПП «Радар ммс» за поддержку в проведении инновационных геомагнитных исследований в Восточной Антарктиде. Мы благодарим рецензентов за комментарии, которые помогли улучшить качество статьи.

REFERENCES

1. Tucker N.M., Payne J.L., Clark C., Hand M., Taylor R. J. M., Kylander-Clark A.R.C., Martin L. Proterozoic reworking of Archean (Yilgarn) basement in the Bunge Hills, East Antarctica. *Precambrian Research*. 2017;298:16–38. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.05.013>
2. Aitken A.R.A., Young D.A., Ferraccioli F., Betts P.G., Greenbaum J.S., Richter T.G., Roberts J.L., Blankenship D.D., Siegert M.J. The subglacial geology of Wilkes Land, East Antarctica. *Geophysical Research Letters*. 2014;41:2390–2400. <https://doi.org/10.1002/2014GL059405>
3. Simakov A.E., Gutorov F.G., Leitchenkov G.L., Golynsky A.V., Antsev V.G., Golynsky D.A. Results of aeromagnetic survey using unmanned aerial system at the Bunge Hills and Highjump Archipelago, Wilkes Land, East Antarctica. *Journal of Mining Institute*. 2025;16579:1–15.
4. Ravich M.G., Klimov L.V., Soloviev D.S. The Precambrian of East Antarctica. *Israel Program for Scientific Translations*. Jerusalem; 1968. 475 p.
5. Sheraton J.W., Tingey R.J., Oliver R.L., Black L.P. Geology of the Bunge Hills-Denman Glacier region, East Antarctica. *AGSO Bull.* 1995;244:136 p.
6. Stark J.C., Wang X.-C., Li Z.-X., Rasmussen L., Sheppard S., Zi J.-W., Clark C., Yand M., Li W.-X. In situ U–Pb geochronology and geochemistry of a 1.13 Ga mafic dyke suite at Bunge Hills, East Antarctica: the end of the Albany–Fraser Orogeny. *Precambrian Research*. 2018;310:76–92. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2018.02.023>
7. Golynsky D., Egorov M., Gonzhurov N., Mandrikov V., Golynsky A. Magnetic properties of the Bunge Oasis rocks, East Antarctica. In: *Abstract Book, 11th SCAR Open Science Conference*, 19–23 October 2024. Pucon, Chili; 2024. Abstract 239.
8. Sheraton J.W., Tingey R.J., Black L.P., Oliver R.L. Geology of the Bunge Hills area, Antarctica implications for Gondwana correlations. *Antarctic Science*. 1993;5(1):85–102.
9. Tucker N.M., Hand M. New constraints on metamorphism in the Highjump Archipelago, East Antarctica. *Antarctic Science*. 2016;28:487–503. <https://doi.org/10.1017/S095410201600033X>
10. Daczko N.R., Halpin J.A., Fitzsimons I.C.W., Whittaker J.M. A cryptic Gondwana-forming orogen located in Antarctica. *Scientific Reports*. 2018;8:8371. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-26530-1>
11. Sheraton J.W., Black L.P., Tindle A.G. Petrogenesis of plutonic rocks in a Proterozoic granulite-facies terrane — the Bunge Hills, East Antarctica. *Chemical Geology*. 1992;97:163–198. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(92\)90075-G](https://doi.org/10.1016/0009-2541(92)90075-G)
12. Verduzco B., Fairhead J.D., Green C.M., MacKenzie C. New insights into magnetic derivatives for structural mapping. *The Leading Edge*. 2004;23:116–119.
13. Fanning C.M., Dally S.J., Bennett V.C., Ménot R.P., Peucat J.J., Oliver G.J.H., Monnier O. The “Mawson Block”: once contiguous Archean to Proterozoic crust in the East Antarctic Shield and the Gawler Craton. In: Ricci C.A. (Ed.). *Abstracts, 7th International Symposium on Antarctic Earth Sciences*, 10–15 September, 1995. Sienna, Italy; 1995.
14. Stüwe K., Wilson C.J.L. Interaction between deformation and charnockite emplacement in the Bunge Hills, East Antarctica. *Journal of Structural Geology*. 1990;12:767–783.
15. McEnroe S.A., Brown L.L. A closer look at remanence dominated aeromagnetic anomalies: Rock magnetic properties and magnetic mineralogy of the Russell Belt microcline-sillimanite gneiss, northwest Adirondack Mountains, New York. *Journal of Geophysical Research*. 2000;105(B7):16437–16456. <https://doi.org/10.1029/2000JB900051>
16. Golynsky D.A., Mandrikov V.S., Egorov M.S. Results of ground magnetometric works of the 64th RAE. *Russian Polar Research*. 2019;3:22–25. (In Russ.)
17. Sheraton J.W., Black L.P., Tindle A.G. Petrogenesis of plutonic rocks in a Proterozoic granulite-facies terrane — the Bunge Hills, East Antarctica. *Chemical Geology*. 1992;97:163–198.
18. Betts P., Moore D., Aitken A., Blaikie T., Jessel M., Ailleres L., Armit R., McLean M., Munukutla R., Chukwu C. Geology from aeromagnetic data. *Earth-Science Reviews*. 2024;258(3):104958. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2024.104958>

Строение земной коры оазиса Бангера и архипелага Хайджамп (Восточная Антарктида)

на основе магнитных данных, полученных с помощью
беспилотного летательного аппарата самолетного типа

А.В. Голынский¹✉, Д.А. Голынский¹, Г.Л. Лейченков¹, Н.В. Боровков¹,
В.Г. Анцев², Ф.Г. Гуторов², А.Е. Симаков²

¹ *Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов
Мирового океана (ФГБУ «ВНИИОкеангеология»), Санкт-Петербург, Россия*

² *НПК Беспилотные авиационные и морские системы, АО Научно-производственное
предприятие «Радар ммс», Санкт-Петербург, Россия*

✉sasha@vniio.nw.ru

ORCID АВГ, 0000-0003-2546-4082; ДАГ, 0000-0001-8717-0894; ГЛЛ, 0000-0001-6316-8511
НВБ, 0000-0003-2568-2039; ВГА, 0009-0007-4472-7139; ФГТ, 0009-0009-6720-2997;
АЕС, 0000-0002-2006-3071

Расширенный реферат

Наше исследование демонстрирует взаимосвязь между магнитными аномалиями и геологической структурой докембрийских комплексов оазиса Бангера и архипелага Хайджамп в Восточной Антарктиде. Аэромагнитные данные эффективно картируют геологические подразделения, выявляя отчетливые магнитные черты для неархейских и палео-мезопротерозойских толщ. Это дает возможность значительно улучшить существующие геологические карты, особенно в слабоизученных районах, таких как архипелаг Хайджамп. Интенсивность и простираание магнитных аномалий коррелируют с составом пород и региональными структурными трендами, что позволяет лучше дифференцировать литологические подразделения, такие как магнитные метапелиты и немагнитные метапсаммиты. Расчеты производной магнитного наклона улучшают структурное картирование, связывая магнитные источники с конкретными комплексами пород. Так, например, выраженный пояс положительных магнитных аномалий северо-восточного простираания отмечает ключевую границу между архейскими и мезопротерозойскими комплексами. Изменения в простираании пояса указывают на сложную тектоническую историю, включая возможные разломные контакты. Интрузивные тела демонстрируют сложные магнитные характеристики. Интрузия Паз-Коув проявляется в виде отрицательной аномалии, вероятно, из-за обратной остаточной намагниченности, в то время как интрузия озера Алги имеет как положительные, так и отрицательные аномалии, отражающие различный состав пород. Интрузии габбро в северо-восточной части архипелага Хайджамп коррелируют с положительными аномалиями, тогда как интенсивная отрицательная аномалия над интрузией острова Кашалот предполагает обратную намагниченность.

Основная цель данной работы заключается в создании структурной (тектонической) схемы оазиса Бангера и архипелага Хайджамп на основе анализа аномального магнитного поля, полученного в ходе работ 69-й РАЭ с применением беспилотника самолетного типа, и существующей геологической информации по данной территории. Исследование подчеркивает ценность аэромагнитных съемок с использованием БПЛА для детального геологического картирования в сложных условиях, предоставляя важную информацию о докембрийской истории Восточной Антарктиды.

Ключевые слова: аэромагнитная съемка, магнитные аномалии, магнитные свойства, оазис Бангера, архипелаг Хайджамп, докембрийские толщи, интрузии

Для цитирования: Golynsky A.V., Golynsky D.A., Leitchenkov G.L., Borovkov N.V., Antsev V.G., Gutorov F.G., Simakov A.E. Crustal structure of the Bunger Oasis and Highjump Archipelago (East Antarctica) based on magnetic data acquired by using fixed-wing UAV. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2025;71(1):164–183. [https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71\(1\)-164-183](https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71(1)-164-183)

Поступила 07.04.2025

После переработки 12.05.2025

Принята 27.05.2025

ЭКОЛОГИЯ, БИОЦЕНОЛОГИЯ И БИОГЕОГРАФИЯ ECOLOGY, BIOCENOLOGY AND BIOGEOGRAPHY

Оригинальная статья / Original paper

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-2-184-200>

УДК 631.4



Орнитогенные почвы Берега Правды и архипелага Хасуэлл, Восточная Антарктида: морфологическое строение и биогеохимические особенности

И.И. Алексеев^{1,2✉}, Е.Н. Грек^{1,3}, А.А. Четверова¹

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

² ФГБУ ФИЦ «Карельский научный центр Российской академии наук», Петрозаводск, Россия

³ ФГБУ «Государственный гидрологический институт», Санкт-Петербург, Россия

✉ i.alekseev@aari.ru

ИИА, 0000-0002-0512-3849; ЕНГ, 0000-0002-5515-4686; ААЧ, 0000-0001-7461-3617

Аннотация. В условиях продолжающегося расширения человеческого присутствия в Антарктике важным представляется более эффективное осуществление широкого круга мер с целью всесторонней защиты окружающей среды, а также соблюдения фундаментальных принципов системы Договора об Антарктике. Почвы являются важнейшими компонентами всех наземных экосистем и играют роль пространственной основы экосистем. Несмотря на многочисленные исследования, проведенные в различных секторах Антарктики, почвы этого региона остаются недостаточно изученными. Целью данного исследования является изучение процессов биогенной аккумуляции вещества и биогенно-абиогенных взаимодействий в почвах Берега Правды и архипелага Хасуэлл, Восточная Антарктида — окрестности круглогодичной станции Мирный. В ходе исследования были проведены полевые наблюдения и лабораторные анализы почв, с акцентом на определение химического состава и уровней накопления органического вещества. Установлено, что почвы имеют умеренно кислую и близкую к нейтральной реакцию. На острове Хасуэлл зафиксированы высокие уровни накопления общего углерода, обусловленные орнитогенным влиянием. В отличие от других почв Восточной Антарктиды, здесь наблюдается наличие гумусоподобной плазмы. Изученные почвы характеризуются низким (или умеренным) уровнем загрязнения согласно геоаккумуляционному индексу *Igeo*, однако отмечается увеличение темпов аккумуляции поллютантов в орнитогенных местообитаниях и на поверхности торфяных горизонтов.

© Авторы, 2025

© Authors, 2025

Ключевые слова: криогенные почвы, орнитогенные почвы, микроморфология, тяжелые металлы, Восточная Антарктида

Для цитирования: Алексеев И.И., Грек Е.Н., Четверова А.А. Орнитогенные почвы Берега Правды и архипелага Хасуэлл, Восточная Антарктида: морфологическое строение и биогеохимические особенности. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2025;71(2):184–200. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-2-184-200>

Поступила 01.12.2024

После переработки 28.04.2025

Принята 27.05.2025

Ornithogenic soils of Pravda Coast and Haswell archipelago, East Antarctica: morphological composition and biogeochemical features

Ivan I. Alekseev^{1,2✉}, Elena N. Grek^{1,3}, Antonina A. Chetverova¹

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

² Karelian Research Centre of the Russian Academy of Science, Petrozavodsk, Russia

³ State Hydrological Institute, St. Petersburg, Russia

✉i.alekseev@aari.ru

ИД ИА, 0000-0002-0512-3849; ENG, 0000-0002-5515-4686; AAC, 0000-0001-7461-3617

Abstract. In view of the continuing human expansion in Antarctica, it is crucial to implement a wide range of measures to effectively protect the natural environment and uphold the fundamental principles of the Antarctic Treaty system. Soil is the most important component of all terrestrial ecosystems, which plays a crucial role as the spatial basis of ecosystems. Despite the considerable research performed in different sectors of Antarctica, soils and soil-like bodies of Antarctica remain poorly investigated. The aim of this study is to investigate the processes of biogenic accumulation of substances and biogenic-abiogenic interactions in the soils of the Pravda Coast and the Haswell Archipelago, East Antarctica — vicinities of the Antarctic station Mirny. Field observations and laboratory analyses were conducted, focusing on determining the chemical composition and levels of organic matter in the soils. It was found that the soils exhibit a moderately acidic to near-neutral pH. High levels of organic carbon accumulation were recorded on Haswell Island, influenced by ornithogenic factors. Unlike most soils in East Antarctica, these soils display a presence of humus-like plasma. The soils studied are characterized by low (or moderate) levels of contamination, according to *Igeo* (geoaccumulation index); however, an increase in pollutant accumulation rates is observed in ornithogenic habitats and on the surfaces of peat horizons.

Keywords: cryogenic soils, ornithogenic soils, micromorphology, heavy metals, East Antarctica

For citation: Alekseev I.I., Grek E.N., Chetverova A.A. Ornithogenic soils of Pravda Coast and Haswell archipelago, East Antarctica: morphological composition and biogeochemical features. *Arctic and Antarctic Research*. 2025;71(2):184–200. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-2-184-200>

Received 01.12.2024

Revised 28.04.2025

Accepted 27.05.2025

Введение

Эффективная реализация мер по охране окружающей среды крайне важна для сохранения уникальных экосистем Антарктики, а также для надлежащего соблюдения основополагающих принципов Договора об Антарктике. Эти меры включают оценку антропогенного воздействия на окружающую среду (ввиду интенсификации

туристической деятельности, расширения присутствия национальных антарктических программ и пр.) и постоянный мониторинг различных компонентов природных экосистем, таких как почвы.

Несмотря на увеличение количества научных исследований природной среды Антарктиды, почвы этого региона все еще остаются недостаточно изученными. Хотя в большинстве исследований делается вывод о преобладании слабо развитых почв по всей Антарктиде [1–3], некоторые из последних работ показывают значительное разнообразие почв [4–7]. Стоит отметить, что для большинства почв Антарктиды (особенно прибрежных оазисов Восточной Антарктиды) характерны следующие особенности: отсутствие (или слабо развитость) верхних органогенных и органо-минеральных горизонтов, слабо выраженная дифференциация почвенных горизонтов и их латеральная сплошность, отсутствие структуры почвенного материала и образования глинистых минералов [5]. Почвы Антарктиды в целом отличаются слабо развитыми высокоскелетными профилями с низкими содержаниями органического вещества [4–7]. Так как основным лимитирующим фактором почвообразования на шестом континенте является увлажнение, а не температура, то наиболее влагообеспеченные местообитания, которые заняты комплексами низших растений, являются главными ареалами «классического» почвообразования [6–8]. При слабоинтенсивном разложении и гумификации растительных остатков, связанных с коротким периодом биологической активности, процессы почвообразования проходят замедленно. Экосистемы антарктических оазисов и прибрежных территорий испытывают воздействие привнесенного органического вещества — гуано, которое коренным образом влияет на ход почвообразования и выветривания скальных пород. Так, по опубликованным ранее данным, колонии пингвинов на острове Хасуэлл (1 км²) привносят на сушу около 10 тонн обогащенного азотом и фосфором органического вещества в год [1].

Орнитогенные почвы являются специфическим вариантом почвообразования, который особенно широко представлен в Западной Антарктиде [9]. Отдельные исследования приводятся и для Арктического региона [10, 11].

Разными авторами ранее была установлена специфика организации и функционирования орнитогенных почв Антарктики [9, 12, 13]. Было отмечено, что высокий уровень накопления биофильных элементов вместе в орнитогенным переносом семян и целых растений является причиной формирования тундровых сообществ в Маритимной зоне Антарктики, что коренным образом отличает эту зону от остальных частей региона [9]. М.А. Глазовская [1] описывала глубокую трансформацию минеральной массы почвообразующих пород под материалом гуано. К.К. Марков в своей работе [14] отмечал, что к эвтрофикации водоемов острова Хасуэлл и интенсивному росту низших растений в них приводят именно огромные залежи гуано. Это подтверждается данными, опубликованными в работе Е.Е. Сыроечковского [15]. Достаточно полный обзор параметров орнитогенного почвообразования дан в исследовании бразильских коллег [16]. Так, в частности, как отдельный почвообразовательный процесс был выделен процесс орнитогенного почвообразования (авторы выделяют накопление фосфора и азота, а также интенсивное депонирование органического вещества как основные признаки этого типа почвообразования). Помимо этого, было отмечено, что в случае орнитогенного почвообразования формируются новые почвенные минералы класса фосфатов. В целом орнитогенные почвы (Ornithosols) [17] характеризуются низкими значениями рН, высокими значениями органического

углерода и азота [18, 19]. Орнитогенный процесс почвообразования проявляется в субсидировании бедных наземных экосистем песчаных и каменистых островов органическим веществом. На поверхность почв поступают углерод и азот, что способствует формированию орнитогенных почв и посторнитогенных сукцессий растительности. Орнитогенное почвообразование проявляется не только в участках накопления гуано, но и при колонизации субстратов растениями и мелкими беспозвоночными организмами, перенесенными в результате орнитохории. Кроме непосредственного влияния птиц на локалитеты почв орнитогенных пляжей, их влияние распространяется путем частичного растворения и миграции веществ в ландшафте, нитрификации, что приводит к запуску посторнитогенных сукцессий и коренному изменению локальной геохимии ландшафтов [16].

Настоящее исследование посвящено исследованию морфологических особенностей, физико-химических и биологических характеристик почв, а также определению характерных особенностей процессов биогенной аккумуляции органического вещества и оценке возможных источников загрязнения в почвах Берега Правды и архипелага Хасуэлл, Восточная Антарктида.

Материалы и методы

Полевые экспедиционные работы выполнялись в рамках сезонной 69-й Российской антарктической экспедиции в районе станции Мирный в январе–марте 2024 г.

Берег Правды и архипелаг Хасуэлл

Данный район исследования ($66^{\circ} 31' \text{ ю. ш.}, 93^{\circ} 00' \text{ в. д.}$) прилегает непосредственно к территории российской круглогодичной станции Мирный. Станция расположена на Берегу Правды (Земля Королевы Мэри) (рис. 1). Окрестности станции стихийно завалены разным брошенным неисправным и разобранным оборудованием, расходными материалами, запчастями, загрязнены разливами масла и бензина. Архипелаг Хасуэлл расположен всего в 3 км от станции Мирный на континентальном

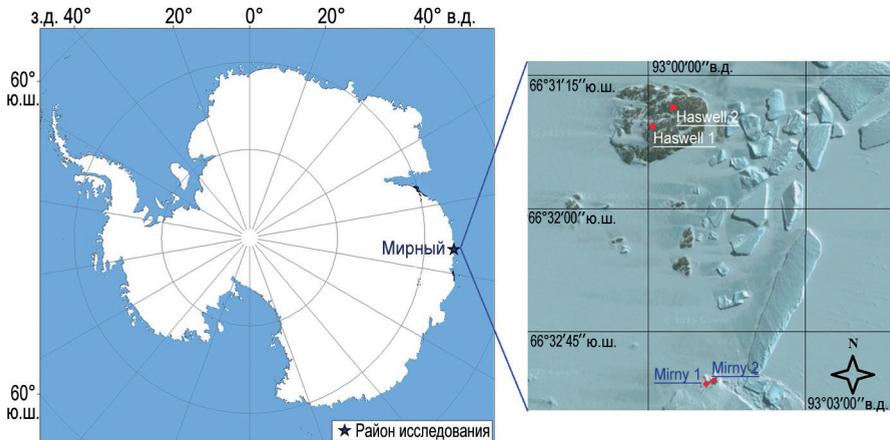


Рис. 1. Карта района исследования — Берег Правды и остров Хасуэлл, точками обозначены места заложения почвенных разрезов (прикопок) (основа изображения ©Google Earth 2010)

Fig. 1. Map of the study area — Pravda Coast and Haswell archipelago, points — location of soil pits (background image credit @Google Earth 2010)

берегу моря Дэвиса [16]. Остров Хасуэлл — самый крупный из островов архипелага, расположенный у побережья Антарктиды, примерно в 3 км (1,9 мили) к северу от мыса Мабус на Земле Королевы Мэри. Остров Хасуэлл признан Особо охраняемым районом Антарктики № 127 [20], так как является местом гнездования почти всех видов птиц, гнездящихся в Восточной Антарктиде (антарктический буревестник *Talassoica antarctica*, серебристо-серый буревестник *Fulmarus glaciolooides*, капский буревестник *Daption capense*, снежный буревестник *Pagodroma nivea*, качурка Вильсона *Oceanites oceanicus*, южнополярный поморник *Catharacta maccormicki*, пингвин Адели *Pygoscelis adeliae*). В районе встречаются пять видов ластоногих, включая охраняемого тюленя Росса *Ommatophoca rossii*. Юго-восточнее острова на припайном льду располагается крупная колония императорских пингвинов *Aptenodytes forsteri* [21]. Площадь острова составляет 0,82 км², высота 93,1 м над уровнем моря. Абсолютные высоты большинства островов не превышают 35 м над уровнем моря [22].

Для района станции характерны частые метели, особенно зимой, а также сильные стоковые ветры. Средняя скорость ветра составляет 11,2 м/с, максимальная — 56 м/с. В течение года в среднем 204 дня скорость ветра в районе станции Мирный превышает 15 м/с. Преобладающее направление ветра восточно-юго-восточное. Среднегодовая температура воздуха составляет –11,5 °С, максимальная — 6,8 °С, минимальная –40,3 °С. Район богат айсбергами. Большую часть года море покрыто припаем. В море Дэвиса максимальная ширина припая в сентябре–октябре достигает 30–40 км [19].

Методики лабораторных исследований

Полученные в рамках полевых маршрутных исследований пробы почв на борту НЭС «Академик Трёшников» были доставлены в Санкт-Петербург для дальнейшего анализа. В ходе лабораторных анализов были определены химические и физические параметры почв по стандартным методикам [23]:

- рН водной суспензии и солевой рН (1:2,5);
- содержание органического углерода и азота на элементном анализаторе Vario EL III (Elementar, Germany);
- обменная кислотность и гидролитическая кислотность;
- гранулометрический состав почвы (доля мелкозема) пипет-методом Качинского [24];
- почвенное дыхание — инкубационный метод по Андерсону [25].

Шлифы для микроморфологических исследований были получены из микромонолитов почв, отобранных в полевых условиях. Пробы были высушены и насыщены смолой. Шлифы были исследованы с помощью поляризационного микроскопа Leica DM 750 р (Leica, Швейцария) в проходящем свете и при скрещенных николях. Были исследованы следующие микроморфологические показатели почв: микроструктура почвы, пространственное распределение частиц, элементы микроструктуры и характер органического вещества. Терминология, используемая для микроморфологического описания проб, была взята из работ [26, 27], а также из руководства Э.И. Гагариной [28] и М.И. Герасимовой [29], где подробно описана микроорганизация почв.

Определение валового содержания тяжелых металлов в отобранных пробах проводили рентгенофлюоресцентным методом на спектрометре Спектроскан-МАКС фирмы «СПЕКТРОН» согласно методике (ОСТ 10-259–2000). Химические элементы были проанализированы как минимум в трехкратной повторности ($n = 3–6$).

Для оценки степени загрязнения почв были рассчитаны индексы геоаккумуляции (*Igeo*). Геоаккумуляционный индекс (*Igeo*) представляет собой количественный показатель, применяемый для оценки уровня загрязнения почвы или осадков тяжелыми металлами и другими токсичными веществами. Он позволяет определить степень накопления загрязняющих веществ в геосистемах по сравнению с фоновыми значениями, характерными для данной географической области [30]. Существуют следующие градации:

- $Igeo < 0$ — отсутствие загрязнения;
- $0 \leq Igeo < 1$ — легкое загрязнение;
- $1 \leq Igeo < 2$ — умеренное загрязнение;
- $2 \leq Igeo < 3$ — значительное загрязнение;
- $Igeo \geq 3$ — сильное загрязнение.

Этот индекс выражается следующим образом:

$$Igeo = \log_2 [Cn/1,5Bn], \quad (1)$$

где Cn — измеренная концентрация элемента (n) в почве; Bn — геохимическое фоновое значение элемента (n), константа 1,5 позволяет анализировать естественные колебания содержания данного вещества в окружающей среде и выявлять очень небольшое антропогенное влияние.

Ранее было сделано заключение, что значения содержаний элементов в земной коре и средние значения содержаний элементов в почве не всегда могут использоваться как фоновые в расчетах индексов, подобных *Igeo*, поскольку невозможно получить рациональные результаты [31]. Поэтому некоторые авторы предлагают, где это возможно, использовать местные фоновые значения (образцы из незагрязненных почв) [32]. Однако, учитывая очень ограниченные данные о микроэлементах в природных почвах архипелага Хасуэлл, значения верхней континентальной коры были использованы в качестве фоновых концентраций для исследовательских участков станции Мирный и острова Хасуэлл.

Результаты и обсуждение

Морфологические особенности почв

Стоит подчеркнуть, что по особенностям распространения почвенного покрова Антарктида — это группа мелких и сильно удаленных друг от друга «островов педосферы», каждый из которых обладает своей спецификой [6, 7]. Архипелаг Хасуэлл и Берег Правды хоть и являются самыми северными в географическом плане районами исследования, но в то же время отличаются наибольшей суровостью климатических условий.

В верхних горизонтах посторнитгенных почв преобладают процессы торфообразования и торфонакопления. Материал этих горизонтов представлен преимущественно неразложившимися и слабо разложившимися остатками моховой растительности. Гумусовые горизонты характеризуются различной степенью ассоциации остатков гуано с минеральной частью, что связано как с разным количеством самого мелкозема, так и со степенью разложения гуано. Также заметны процессы гумификации, наблюдается тенденция к агрегированию почвенной массы. Все это свидетельствует о большой роли органического вещества гуано в почвообразовательном процессе. В срединных горизонтах отмечены признаки ожелезнения минералов

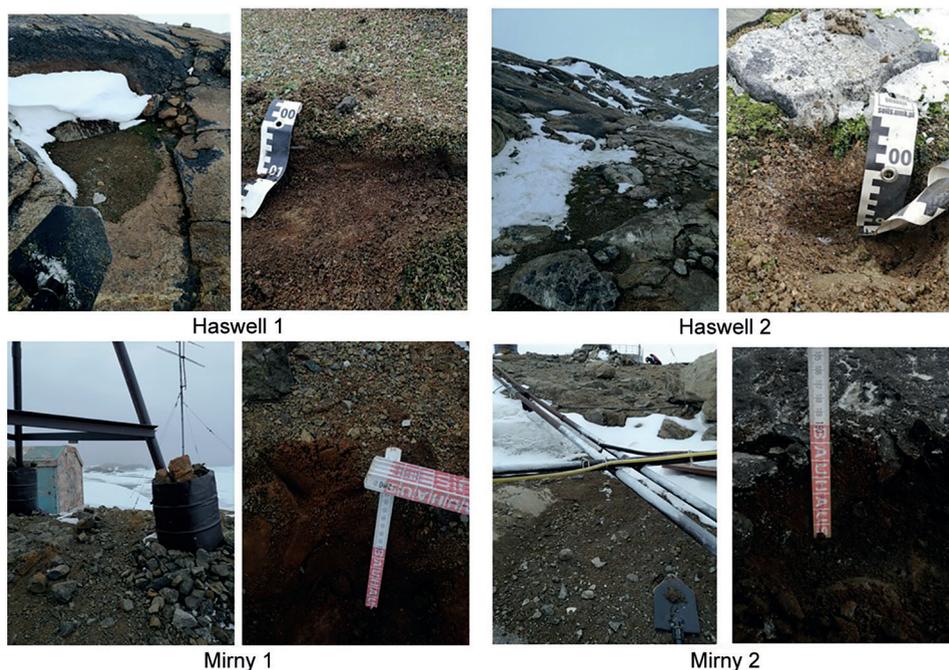


Рис. 2. Изученные почвенные профили и ландшафты: Haswell 1 — литозем криотурбированный на многолетнемерзлых породах (Turbic Lithic Cryosol (Arenic)); Haswell 2 — литозем орнитогенный криотурбированный на многолетнемерзлых породах (Ornithic Turbic Cryosol (Arenic)); Mirny 1 — технозем криотурбированный на многолетнемерзлых породах (Turbic Technosol (Arenic)); Mirny 2 — технозем криотурбированный на многолетнемерзлых породах (Turbic Technosol (Arenic) coarsic). Названия в скобках согласно World Reference base for soil resources [17]

Fig. 2. Soil profiles and landscapes studied: Haswell 1 — Turbic Lithic Cryosol ; Haswell 2 — Ornithic Turbic Cryosol (Arenic); Mirny 1 — Turbic Technosol (Arenic)); Mirny 2 — Turbic Technosol (Arenic) coarsic. Names according to the World Reference base for soil resources [17]

(железистые пленки на поверхности), а также ассоциирование минералов обломочной фракции с органическим веществом гуано (в меньшей степени, чем в вышележащих собственно орнитогенных горизонтах) (рис. 2).

Помимо этого, продукты жизнедеятельности птиц (гуано) способствуют частичному растворению и миграции веществ в ландшафте, нитрификации, что приводит к запуску посторнитогенных сукцессий [33].

Микроморфологическое строение почв

В рамках настоящего исследования было изучено микроморфологическое строение поверхностных и срединных горизонтов как орнитогенных почв (на примере профиля Haswell 2), так и почв, не подверженных прямому активному влиянию орнитогенного фактора (на примере профиля Mirny 2).

Плазма в изученных шлифах поверхностного горизонта орнитогенной почвы (Haswell 2) имеет хорошо выраженную ламинарную структуру в материале гуано (рис. 3). Гуано очень плотно покрывает поверхность зерен и образует толстые пленки и широкие микрозоны с уплотненной скелетной структурой. В некоторых микрозонах

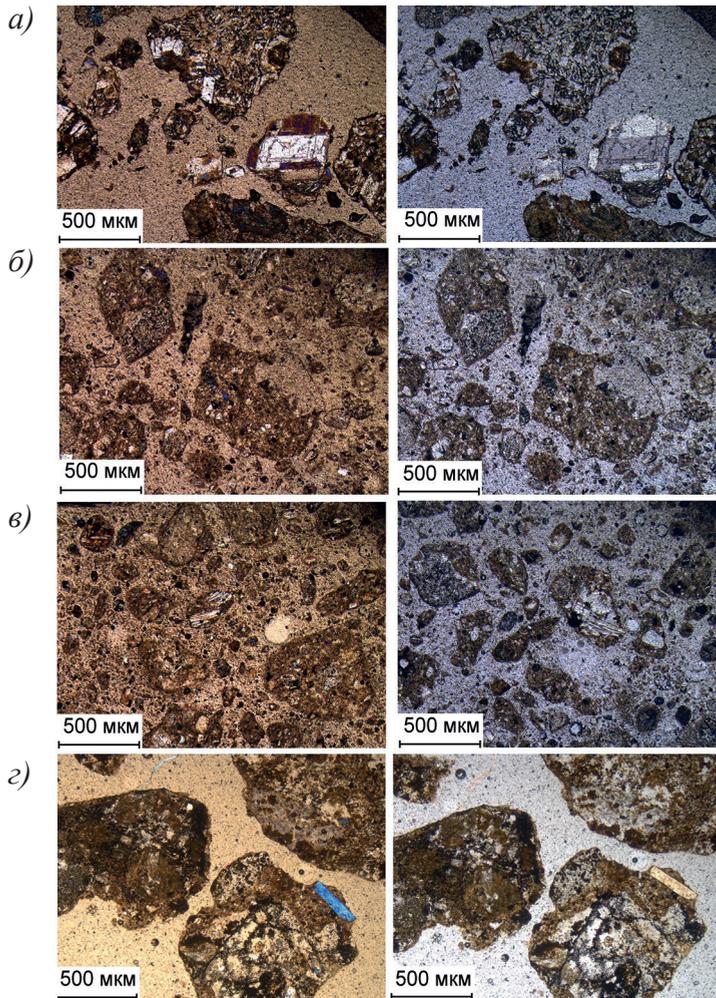


Рис. 3. Микроморфологическое строение почв Берега Правды и острова Хасуэлл, Восточная Антарктида. Слева — скрещенные николи, справа — параллельные николи. Пробы: *a* — Haswell 2 0–1 см; *б* — Haswell 2 1–23 см; *в* — Mirny 2 0–2 см; *г* — Mirny 2 2–20 см

Fig. 3. Micromorphological features of soils of Pravda Coast and Haswell island, East Antarctica. Left — nicols X, polarized light; right — nicols II, plain light. Samples: *a* — Haswell 2 0–1 cm; *б* — Haswell 2 1–23 cm; *в* — Mirny 2 0–2 cm; *г* — Mirny 2 2–20 cm

образуются сгустки и конкреции, а в периферических частях плазмы образуются микроскопические кристаллы биогенных фосфатов и сульфатов.

Другим специфическим типом органогенной плазмы, которая образуется в орнитогенных и посторнитогенных почвах под современными или заброшенными местами гнездования, является гумусоподобная плазма, которая представляет собой еще один широко распространенный пример органоминеральных взаимодействий в орнитогенных и посторнитогенных почвах [33]. Она может накапливаться на поверхности крупных зерен в виде гуано и плохо разложившегося орнитогенного материала

(фрагменты перьев, яичной скорлупы, тканей и костей), а также в виде органической коллоидной плазмы (рис. 3). Образование биопленок здесь также происходит за счет живых и мертвых остатков колоний нитрофильных водорослей (в основном *Prasiola crista*) как на поверхности почвы, так и на каменных валунах и гравии. В условиях обогащенного азотом субстрата заселение поверхности водорослями происходит довольно интенсивно, что характерно для начальных этапов экогенетической сукцессии, что обусловлено высоким содержанием легкодоступных элементов питания.

Почвы, развивающиеся по петроземно-литоземному типу [34] без заметного влияния орнитогенного фактора (Mirny 2), значительно отличаются по микростроению. Здесь так же, как и в почвах оазисов Восточной Антарктиды, наблюдается серитизация полевых шпатов, а глинообразование развито значительно в меньшей степени, чем в почвах под слоем гуано [4]. Наблюдается формирование агрегатов пластинчатой и линзовидной формы из-за многократного замерзания и оттаивания почв. На микроморфологических снимках можно увидеть особенности неогенеза и перераспределения карбонатов кальция, а также микрокристаллическую известковую агрегацию и цементацию скелетных частиц.

Для срединных горизонтов (Mirny 2 2–20 см и Haswell 2 1–23 см) в целом отмечены следующие схожие микроморфологические особенности: на поверхностях зерен обычно образуются тонкие прерывистые пленки коричневого цвета, а желтоватые интерференционные цвета, наблюдаемые в скрещенных слоях, объясняют преимущественно глинистый состав мелкозернистых материалов с железистыми компонентами. В обоих исследованных шлифах подповерхностных горизонтов мелкоземистый материал встречается редко и обычно присутствует в виде пленок (коричневого цвета) на поверхностях песка и гравия. На микрофотографиях заметны некоторые зоны с глинистой плазмой и оптически-ориентированная аккумуляция глинистого материала. Это в принципе характерно для почв оазисов Восточной Антарктиды, наряду с глинистыми пленками (кутанами) на минеральных зернах, что было описано ранее нашими коллегами [6, 7]. Отмеченные на микрофотографиях пустоты указывают на активное влияние на структуру почвы циклов промерзания-оттаивания, а также возможность иллювирирования глинистого материала по профилю по этим пустотам.

Физико-химические характеристики почв

Основные почвенные физико-химические параметры изученных на территории, прилегающей к круглогодичной станции Мирный — Берег Правды и архипелаг Хасуэлл, — почв приведены в табл. 1. Для изученных почв характерна умеренно

Таблица 1

Физико-химические параметры изученных почв Берега Правды и острова Хасуэлл

Table 1

Physical-chemical parameters of the soils of Pravda Coast and Haswell island

Почвенный горизонт, глубина	pH _{H₂O}	pH _{KCl}	ТС, %	N, %	C:N	Базальное дыхание, мг·г ⁻¹ ·сутки ⁻¹	Мелкозем (<1 мм), %
Mirny 1 0–1,5 см BC ₁	5,90±0,43	5,72±0,32	1,52±0,09	0,18±0,03	8,44±0,76	0,008±0,001	27,13±1,56
Mirny 1 1,5–20 см BC ₂	5,96±0,23	5,82±0,12	0,52±0,08	0,051±0,03	10,02±0,21	0,009±0,002	22,13±1,02

Окончание табл. 1

Почвенный горизонт, глубина	pH _{H₂O}	pH _{KCl}	ТС, %	N, %	C:N	Базальное дыхание, мг·г ⁻¹ ·сутки ⁻¹	Мелкозем (<1 мм), %
Mirny 2 0–2 см BC ₁	5,76±0,32	5,32±0,45	1,24±0,12	0,11±0,02	11,27±1,21	0,008±0,001	23,58±1,87
Mirny 2 2–20 см BC ₂	5,86±0,12	5,62±0,23	0,45±0,08	0,050±0,007	9,21±0,76	0,007±0,001	18,58±1,56
Haswell 1 0–3 см Bc _{algae}	5,89±0,12	5,42±0,12	2,24±0,10	0,21±0,02	10,27±0,21	0,027±0,003	27,58±0,57
Haswell 1 3–15 см BC	5,76±0,11	5,42±0,10	0,98±0,12	0,098±0,02	10,05±0,18	0,008±0,001	24,58±0,57
Haswell 2 0–1 см (AY _{om})	6,17±0,12	6,02±0,12	12,62±0,87	4,02±0,12	3,14±0,13	0,132±0,10	32,02±1,02
Haswell 2 1–23 см (BC _{om})	5,76±0,14	5,20±0,12	4,96±0,56	0,98±0,30	5,04±0,18	0,087±0,009	28,02±0,87

кислая и близкая к нейтральной реакция среды. Самые высокие уровни накопления органического вещества (углерода до 12,62 %, азота до 4,02 %) и почвенного дыхания (до 0,132 мг·г⁻¹·сутки⁻¹) отмечаются на острове Хасуэлл, находящемся под сильным влиянием орнитогенного фактора (места гнездования *Pygoscelis adeliae* и летающих птиц). Доля мелкозема в изученных почвах колеблется от 18,58–27,13 % в почвах окрестностей станции Мирный до 24,58–32,02 % в случае орнитогенных почв острова Хасуэлл.

Связь почвенных параметров и степени химического загрязнения почв

Данные по содержанию тяжелых металлов в изученных почвах приведены в табл. 2. Средние концентрации металлов среди исследованных существенно различались (дисперсионный анализ Краскела–Уоллиса, $p < 0,001$). Анализ показал, что содержание исследуемых элементов составило 0,04–55,70 мг·кг⁻¹ (Pb), 0,05–12,8 мг·кг⁻¹ (Cr), 1,75–125,2 мг·кг⁻¹ (Cu), 0,052–1,060 мг·кг⁻¹ (Cd), 0,46–26,2 мг·кг⁻¹ (Ni), 16,05–206,60 мг·кг⁻¹ (Zn), 0,100⁻¹, 189 мг·кг⁻¹ (As), 0,021–0,533 мг·кг⁻¹ (Hg) в окрестностях станции Мирный и прилегающего острова Хасуэлл.

В целом верхние горизонты почвы антропогенных участков на станции Мирный показали более высокие концентрации большинства изученных элементов по сравнению с природными ландшафтами острова Хасуэлл. Однако поверхностная проба орнитогенной почвы, образовавшейся под непосредственным воздействием гуано пингвинов, показала повышенное содержание цинка (до 256,50 мг/кг) и мышьяка (до 1,213 мг/кг). В верхнем слое почвы, находящейся в отдалении от места гнездования пингвинов (Haswell 1 0–3 см), такие тенденции накопления не наблюдаются. Предыдущие исследования влияния морских птиц на развитие почв в районе субантарктических островов и арктических островов [10, 11, 36] показали, что эти процессы вносят существенный вклад в перенос микроэлементов и питательных веществ из морских в прибрежные экосистемы.

Индекс геоаккумуляции (*Igeo*) характеризует почву Mirny 2 как умеренно загрязненную ($1 < Igeo < 2$) по свинцу (Pb) и от незагрязненной до умеренно загрязненной ($0 < Igeo < 1$) по никелю. Все пробы со станции Мирный и острова Хасуэлл характеризуются как практически не загрязненные ($Igeo \leq 0$) в отношении

Таблица 2

Содержание тяжелых металлов в изученных почвах
Берега Правды и острова Хасуэлл

Table 2

Heavy metals content in the soils of Pravda Coast and Haswell island

Почвенный горизонт, глубина	Pb, мг·кг ⁻¹	Cr, мг·кг ⁻¹	Cu, мг·кг ⁻¹	Cd, мг·кг ⁻¹	Ni, мг·кг ⁻¹	Zn, мг·кг ⁻¹	As, мг·кг ⁻¹	Hg, мг·кг ⁻¹
Mirny 1 0–1,5 см BC ₁	1,05±0,14	0,06±0,01	6,24±0,80	0,108±0,056	0,75±0,010	45,3±2,09	1,128±0,14	0,021±0,002
Mirny 1 1,5–20 см BC ₂	55,7±2,31	10,2±1,02	125,2±5,1	0,107±0,024	26,2±1,96	103,6±4,2	0,718±0,067	0,020±0,004
Mirny 2 0–2 см BC ₁	6,20±0,56	12,8±1,04	50,2±2,10	0,199±0,027	13,2±1,02	116,2±5,3	0,100±0,017	0,533±0,067
Mirny 2 2–20 см BC ₂	18,62±1,3	8,82±0,87	12,35±0,87	0,077±0,010	8,69±0,56	47,2±1,212	0,580±0,087	0,021±0,003
Haswell 1 0–3 см Bc _{algae}	0,53±0,08	0,76±0,12	1,75±0,45	0,052±0,09	0,46±0,08	16,05±1,10	1,189±0,12	0,025±0,004
Haswell 1 3–15 см BC	0,18±0,03	1,20±0,34	6,64±0,87	0,368±0,045	0,73±0,09	64,30±2,2	0,456±0,087	0,018±0,005
Haswell 2 0–1 см (AY _{orn})	0,04±0,01	2,27±0,61	19,40±1,97	1,06±0,09	0,90±0,12	206,6±6,43	0,100±0,018	Не обнаружено

Таблица 3

Геоаккумуляционный индекс (*Igeo*) в изученных пробах почв
Берега Правды и архипелага Хасуэлл

Table 3

Geoaccumulation index (*Igeo*) in soil samples from Pravda Coast and Haswell archipelago

Почвенный горизонт, глубина	Pb	Cr	Cu	Cd	Ni	Zn	As	Hg
Mirny 1 0–1,5 см BC ₁	-4,18	-10,12	-1,87	-0,76	-4,12	-0,53	-2,31	-1,41
Mirny 1 1,5–20 см BC ₂	1,42	-2,12	3,45	-2,15	0,43	0,87	-3,71	-1,87
Mirny 2 0–2 см BC ₁	-2,31	-2,01	1,98	-1,87	-0,76	0,67	-6,34	3,5
Mirny 2 2–20 см BC ₂	-0,87	-3,12	-0,41	-3,14	-0,87	-0,42	-4,1	-1,98
Haswell 1 0–3 см Bc _{algae}	-4,96	-6,41	-3,12	-2,87	-5,76	-1,87	-2,31	-1,73
Haswell 1 3–15 см BC	-8,12	-4,51	0,12	2,04	-4,12	2,15	-5,98	-1,55
Haswell 2 0–1 см (AY _{orn})	-8,01	-5,31	-1,76	-0,31	-4,12	-0,08	-3,78	-

хрома (Cr). Значения *Igeo*, равные 1,98, были найдены для меди (Cu) в верхнем горизонте Mirny 2 0–2 см, что указывает на умеренное загрязнение почв по данному индексу. Срединный горизонт орнитогенной почвы (Haswell 1 3–15 см) характеризуется значением *Igeo* по кадмию, равным 2,04, *Igeo* по цинку, равным 2,15 (умеренно загрязненная проба), и значением *Igeo* по меди, равным 0,12, что характеризует эту пробу как практически не загрязненную по данному элементу. Эти рассчитанные показатели, характеризующие некоторую степень загрязнения данной пробы, вероятно, связаны с более высоким накоплением этих элементов в продуктах жизнедеятельности пингвинов. Феномен накопления Cd в орнитогенных почвах и более высокий индекс *Igeo* ранее были описаны для Маритимной Антарктики [37]. Все изученные верхние горизонты почв окрестности станции Мирный и острова Хасуэлл были охарактеризованы как практически не загрязненные ($I_{geo} \leq 0$) в отношении ртути (Hg), кроме верхнего горизонта почвы Mirny 2 0–2 см, где значение *Igeo* составило 3,50. В целом полученные значения *Igeo* для изученных тяжелых металлов и металлоидов ниже или немного выше нуля, что указывает на низкое или умеренное загрязнение изученных почв.

Для оценки рисков загрязнения окружающей среды особенно важно определить возможные источники загрязняющих веществ, а именно разграничить антропогенные и природные аномалии. Однако широко известно, что загрязнение природной среды обычно представляет собой сочетание и взаимодействие различных факторов.

В результате статистического анализа, позволяющего выявить корреляцию между содержанием изученных тяжелых металлов и физико-химическими параметрами в исследуемых почвах, никаких значимых положительных корреляций между почвенными параметрами и содержанием тяжелых металлов обнаружено не было. Это может быть связано с высокой изменчивостью значений как содержания металлов, так и физико-химических параметров в исследуемых почвах. В почвах станции Мирный и острова Хасуэлл значимая положительная корреляция обнаружена для пар медь–хром ($R = 0,915$), хром–никель ($R = 0,914$), медь–никель ($R = 0,808$), медь–цинк ($R = 0,831$). Также наблюдалась значимая отрицательная корреляция между цинком и мышьяком ($R = -0,827$).

В связи с высокой изменчивостью распределения металлов в почвенном профиле, а также с сочетанием возможных источников накопления тяжелых металлов в почве был проведен анализ главных компонент (PCA) с целью выявления зависимостей между содержанием в почве различных тяжелых металлов (см. табл. 4).

Главный компонент 1 (PC1) объясняет 62,4 % общей вариации и показывает значительные положительные факторные нагрузки по содержанию общего органического углерода, азота, мелкозема, цинка и кадмия. Обычно содержание общего органического углерода (TOC) и гранулометрический состав почвы считаются наиболее важными свойствами, которые необходимо учитывать при исследовании поведения тяжелых металлов в почвах [28, 29]. Содержание тяжелых металлов обычно увеличивается по мере увеличения содержания мелкозема из-за более высокой способности мелких частиц адсорбировать тяжелые металлы. Органические вещества также были описаны как хорошие поглотители металлов [32]. В этом контексте изучение орнитогенных почв становится особенно актуальным для целей мониторинга окружающей среды и оценок экологических рисков, связанных с деятельностью человека в Антарктиде. Ранее обсуждалось, что орнитогенные почвы, как правило,

Таблица 4

**Матрица нагрузок (factor solution) анализа главных компонент
для почв Берега Правды и острова Хасуэлл**

Table 4

**Factor solution matrix of the principal component analysis (PCA)
of soils of Pravda Coast and Haswell island**

Переменная	Главные компоненты		
	PC1 (62,40 % общей вариации)	PC2 (19,80 % общей вариации)	PC3 (5,25 % общей вариации)
Pb	-0,012	0,852	-0,039
Cd	0,756	0,081	0,001
Cr	-0,386	0,743	-0,102
Cu	0,07	0,912	0,132
Ni	-0,327	0,901	-0,023
Zn	0,734	0,435	0,191
As	-0,243	0,121	-0,634
Hg	-0,141	0,231	0,792
pH	-0,052	-0,062	0,932
TOC	0,784	-0,324	-0,071
N	0,79	-0,235	-0,005
C/N	-0,746	0,283	-0,102
Мелкозем	0,601	-0,472	-0,305

Примечание. Примененный метод ротации — варимакс (*varimax*).

Note. The applied rotation method is *varimax*.

характеризуются повышенными содержаниями не только органических веществ, но и тяжелых металлов [38–41], что хорошо коррелирует с нашими данными. Относительно высокое содержание мышьяка может быть вызвано его растворением в воде [42], откуда он может быть поглощен морскими водорослями и антарктическим крилем и, следовательно, попасть в пищевую сеть, переходя к хищникам, таким как пингвины, что объясняет его относительно высокие концентрации в материале гуано [43]. В связи с этим процессы переноса биоаккумулированных металлов в наземные экосистемы в виде материала гуано птиц следует изучить более подробно, чтобы выбрать адекватные параметры для описания уровня загрязнения почвы. С другой стороны, повышенное содержание цинка на некоторых участках исследования, вероятно, связано с возведением стальных инфраструктурных конструкций станций, а также может указывать на загрязнение почв за счет попадания на его поверхность топлива или осаждения выхлопных газов.

Компонент 2 (PC2) объясняет 19,8 % общей вариации и показывает наиболее значительные положительные факторные нагрузки по содержанию меди, хрома, никеля и свинца, что указывает на предположительно единый источник накопления данных металлов и подтверждает гипотезу об антропогенном происхождении. Часто накопление этих металлов в почвах антропогенно-нарушенных территорий в Антарктиде связывают с разливами топлива, попаданием лакокрасочных изделий (в случае Pb и Cd) и металлическими конструкциями из нержавеющей стали [44].

Самые высокие содержания Pb и Cu были найдены в поверхностных горизонтах почв станции Мирный и, вероятно, связаны с интенсивным загрязнением ландшафтов, связанным с разливом топлива, а также открытым складированием отходов. Принято считать, что на накопление хрома и никеля особенно сильное влияние оказывают геохимические факторы среды [38], поэтому необходимы дальнейшие исследования геохимического режима почв оазисов Восточной Антарктиды. Однако мы не можем исключать антропогенный характер источников поступления никеля в почвы (выхлопные газы и другие источники атмосферного загрязнения). Компонент 3 (PC3) объясняет 5,25 % общей вариации и показывает значительные положительные факторные нагрузки по содержанию ртути и значениям рН. Ранее было показано, что изменения рН оказывают сильное влияние как на концентрацию тяжелых металлов, так и на их выщелачиваемость [38, 44].

Заключение

Нами были изучены биогенно-абиогенные взаимодействия и биогенно-аккумулятивные процессы в почвах Берега Правды и острова Хасуэлл. Морфологически изученные почвы обладают высокоскелетными и маломощными профилями с незначительным накоплением органического вещества. Однако в условиях активного влияния орнитогенного фактора происходит обогащение верхних горизонтов почвы органическим веществом.

В почвах, не подверженных прямому орнитогенному влиянию, в микростроении преобладает грубообломочный скелет, в нем отмечается высокая порозность, глинистые же частицы распределены в мелкоземе в основном диффузно. Отдельные минеральные зерна покрыты тонкими глинистыми кутанами и пленками, что также показывает подвижность глинистого материала. В микростроении орнитогенных и посторнитогенных почв широко представлена гумусоподобная плазма, которая может накапливаться на поверхности крупных зерен в виде гуано и плохо разложившегося орнитогенного материала, а также в виде органической коллоидной плазмы.

Анализ взаимосвязей между почвенными параметрами и уровнями аккумуляции тяжелых металлов показал, что некоторое увеличение аккумуляции поллютантов наблюдается в орнитогенных местообитаниях, а также на поверхности верхних оторфованных горизонтов (в основном по кадмию, цинку и мышьяку), что, предположительно, вызвано накоплением этих элементов в наземных экосистемах вследствие биотранспорта из морских экосистем по пищевым цепям.

Конфликт интересов. Конфликт интересов отсутствует.

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-27-00361, <https://rscf.ru/project/24-27-00361/>.

Благодарности. Авторы выражают благодарность участникам 69-й Российской антарктической экспедиции за помощь в проведении полевых исследований.

Competing interests. Authors declare no conflict of interests.

Funding. This study was supported by Russian Science Foundation, grant № 24-27-00361, <https://rscf.ru/project/24-27-00361/>.

Acknowledgments. Authors wish to express their gratitude to the expedition members (69th Russian Antarctic expedition) for their crucial help in performing fieldwork.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Глазовская М.А. Биогеохимическое выветривание вулканических пород андезитового состава в субантарктических перигляциальных условиях. *Изв. РАН. Сер. геогр.* 2002;3:39–48. Glazovskaya M.A. Biogeochemical weathering of volcanic rocks of andesitic composition in Sub-Antarctic conditions. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya.* 2002;3:39–48. (In Russ.).
2. Глазовская М.А. Выветривание и первичное почвообразование в Антарктиде. *Научные доклады высшей школы. Геол.-геогр. науки.* 1958;1:63–76.
3. Bockheim J., Hall K. Permafrost, active-layer dynamics and periglacial environments of continental Antarctica. *South African Journal of Science.* 2002;98:82–90.
4. Alekseev I., Abakumov E. Soil organic matter and biogenic-abiogenic interactions in soils of Larsemann Hills and Bunger Hills, East Antarctica. *Polar Science.* 2024;40:101040. <https://doi.org/10.1016/j.polar.2023.101040>
5. Lupachev A., Abakumov E., Goryachkin S., Veremeeva A. Soil cover of the Fildes Peninsula (King George Island, West Antarctica). *Geoderma.* 2020;193:104613. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104613>
6. Dolgikh A.V., Mergelov N.S., Abramov A.A., Lupachev A.V., Goryachkin S.V. Soils of Enderby Land. In: Bockheim J.G. (ed.) *The soils of Antarctica.* Cham, Switzerland: Springer; 2015. P. 45–63.
7. Mergelov N., Konyushkov D., Lupachev A., Goryachkin S. Soils of Mac Robertson land. In: Bockheim J.G. (ed.) *The soils of Antarctica.* Cham, Switzerland: Springer; 2015. P. 65–86.
8. Орлов Д.С. *Гумусовые кислоты почв и общая теория гумификации.* М.: Изд-во МГУ; 1990. 325 с.
9. Abakumov E.V. Particle-size distribution in soils of West Antarctica. *Eurasian Soil Sc.* 2010;43:297–304. <https://doi.org/10.1134/S1064229310030075>
10. Blais J.M., Kimpe L.E., McMahon D., Keatley B.E., Mallory M.L., Douglas M.S., Smol J. Arctic seabirds transport marine-derived contaminants. *Science.* 2005;309:445. <https://doi.org/10.1126/science.1112658>
11. Brimble S.K., Foster K.L., Mallory M.L., MacDonald R.W., Smol J.P., Blais J.M. High arctic ponds receiving biotransported nutrients from a nearby seabird colony areal so subject to potentially toxic loadings of arsenic, cadmium, and zinc. *Environmental Toxicology and Chemistry.* 2009;28:2426–2433. <https://doi.org/10.1897/09-235.1>
12. Pereira J.L., Pereira P., Padeiro A., Gonçalves F., Amaro E., Leppe M., Verkulich S., Hughes K.A., Peter H.-U., Canário J. Environmental hazard assessment of contaminated soils in Antarctica: using a structured tier 1 approach to inform decision-making. *Science of the Total Environment.* 2017;574:443–454. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.091>
13. Parnikoza I., Abakumov E., Korsun S., Klymenko I., Netsyk M., Kudinova A., Kozeretska I. Soils of the Argentine islands, Antarctica: Diversity and characteristics. *Polarforschung.* 2016;86:83–96.
14. Марков К.К. Некоторые данные о перигляциальных явлениях в Антарктиде (предварительное сообщение). *Вестн. Моск. ун-та. Сер. География.* 1956;1:139–148.
Markov K.K. Some data on periglacial phenomena in Antarctica (preliminary report). *Vestnik of Moscow State University. Geography.* 1956;1:139–148. (In Russ.).
15. Сыроечковский Е.Е. Роль животных в образовании первичных почв в условиях приполярной области Земного Шара (на примере Антарктики). *Зоологический журнал.* 1959;38(12):1770–1775.
16. Simas N., Schaefer C., Mendonca E., Silva I., Ribeiro A. Organic carbon stocks in permafrost-affected soils from Admiralty Bay, Antarctica. *Journal of research of the U. S. Geological Survey.* 2007;1047:76–79. <https://doi.org/10.3133/ofr20071047SRP076>

17. IUSS Working Group WRB. *World reference base for soil resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps (4th ed.)*. Vienna, Austria: International Union of Soil Sciences (IUSS); 2022. 236 p.
18. Michel R., Schaefer C., Dias L., Simas F., Benites V., Mendonca E. Ornithogenic gelsols (cryosols) from Maritime Antarctica: pedogenesis, vegetation and carbon studies. *Soil Science Society of America Journal*. 2006;70:1370–1376. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0178>
19. Starck W. The avifauna of Haswell Island (East Antarctica) in summer of 1978/79. *Polish Polar Research*. 1980;1:183–196.
20. Secretariat of the Antarctic Treaty. *The Protocol on Environmental Protection to the Antarctic Treaty*. 1991. URL: <https://www.ats.aq/e/ep.html> (accessed 15.11.2024).
21. Голубев С.В. История изучения авифауны архипелага Хасуэлл (Восточная Антарктида). *Русский орнитологический журнал*. 2020;29:5967–5994.
Golubev S.V. The History of investigation of avifauna of Haswell archipelago (East Antarctica). *Russian Ornithological journal*. 2020;29:5967–5994. (In Russ.).
22. Golubev S. Diet and feeding behavior of the South Polar skuas *Stercorarius maccormicki* in the Haswell Islands, East Antarctica. *Birds*. 2024;5(2):240–254. <https://doi.org/10.3390/birds5020016>
23. Растворова О.А., Андреев Д.П., Гагарина Э.И., Касаткина Г.А., Федорова Н.Н. *Химический анализ почв*. СПб.: Изд-во СПбГУ; 1995. 264 с.
24. Качинский Н.А. *Физика почв*. М.: Высшая школа; 1970. 358 с.
25. Anderson J.P. Soil respiration. In: *Methods of soil analysis Part 2, 2nd Edition*. Madison: ASDA and SSA; 1982. P. 831–871.
26. Stoops G. Evaluation of Kubiena's contribution to micropedology. At the occasion of the seventieth anniversary of his book "Micropedology". *Eurasian Soil Science*. 2009;42(6):693–698. <https://doi.org/10.1134/S1064229309060155>
27. Stoops G. *Guidelines for analysis and description of soil and regolith thin section*. Madison, Wisconsin: Sci. Soc. America; 2003. 256 p.
28. Гагарина Э.И. *Микроморфологический метод исследования почв*. СПб.: Изд-во СПбГУ; 2004. 155 с.
29. Gerasimova M.I., Kovda I.V., Lebedeva M.P., Tursina T.V. Micromorphological terms: the state of the art in soil microfabric research. *Eurasian Soil Science*. 2011;44(7):804–817. <https://doi.org/10.1134/S1064229311070052>
30. Muller G. Schwermetalle in den sediment des Rheins: Veranderungem seit 1971. *Umschau*. 1979;79:778–783.
31. Reimann C., de Caritat P. Distinguishing between natural and anthropogenic sources for elements in the environment: regional geochemical surveys versus enrichment factors. *Science of the Total Environment*. 2005;337(1–3):91–107. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.06.011>
32. Blaser P., Zimmermann S., Luster J., Shotyk W. Critical examination of trace element enrichments and depletions in soils: As, Cr, Cu, Ni, Pb and Zn in Swiss forest soils. *Science of the Total Environment*. 2000;249(1–3):257–280. [https://doi.org/10.1016/s0048-9697\(99\)00522-7](https://doi.org/10.1016/s0048-9697(99)00522-7)
33. Abakumov E.V., Parnikoza I.Y., Zhianski M., Yaneva R., Lupachev A.V., Andreev M.P., Vlasov D., Riano J., Jaramillo N. Ornithogenic factor of soil formation in Antarctica: a review. *Eurasian soil science*. 2021;54(4):528–540. <https://doi.org/10.1134/S1064229321040025>
34. Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И., Герасимова М.И. *Классификация и диагностика почв России*. Смоленск: Ойкумена; 2024. 341 с.
35. Горячкин С.В. *Почвенный покров Севера (структура, генезис, экология, эволюция)*. М.: ГЕОС; 2010. 414 с.

36. Smith V.R. The influence of seabird manuring on the phosphorus status of Marion Island (Subantarctic) soils. *Oecologia (Berl)*. 1979;41:123–126.
37. Abakumov E., Lupachev A., Andreev M. Trace element content in soils of the King George and Elephant Islands, maritime Antarctica. *Chemistry and Ecology*. 2017;33(9):856–868. <https://doi.org/10.1080/02757540.2017.1384821>
38. Giordano R., Lombard G., Ciaralli L., Beccaloni E., Sepe A., Ciprotti M., Costantini S. Major and trace elements in sediments from Terra Nova Bay, Antarctica. *Science of the Total Environment*. 1999;227:29–40. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(98\)00402-1](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(98)00402-1)
39. Cai M.H., Lin J., Hong Q.Q., Wang Y., Cai M.G. Content and distribution of trace metals in surface sediments from the northern Bering Sea, Chukchi Sea and adjacent Arctic areas. *Marine Pollution Bulletin*. 2011;63:523–527. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.02.007>
40. Wasserman J.C., Oliveira F.B.L., Bidarra M. Cu and Fe associated with humic acids in sediments of a tropical coastal lagoon. *Organic Geochemistry*. 1998;28:813–822. [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(98\)00044-8](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(98)00044-8)
41. Metcheva R., Yurukova L., Teodorova S. Biogenic and toxic elements in feathers, eggs, and excreta of Gentoo penguin (*Pygoscelis papua ellsworthii*) in the Antarctic. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2011;182:571–585. <https://doi.org/10.1007/s10661-011-1898-9>
42. Padeiro A., Amaro E., dos Santo M., Araujo M., Gomes S., Leppe M., Verkulich S., Hughes K., Peter H.U., Canario J. Trace element contamination and availability in the Fildes Peninsula, King George Island, Antarctica. *Environmental Science: Processes and Impacts*. 2016;8(6):648–57. <https://doi.org/10.1039/c6em00052e>
43. Krol A., Mizerna K., Bozym M. An assessment of pH-dependent release and mobility of heavy metals from metallurgical slag. *Journal of Hazardous Materials*. 2020;384:121502. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121502>
44. Espejo W., Celis J., Sandoval M., Gonzalez-Acuna D., Barra D., Capulin J. The impact of penguins on the content of trace elements and nutrients in coastal soils of North Western Chile and the Antarctic Peninsula area. *Water, Air and Soil Pollution*. 2017;228:116. <https://doi.org/10.1007/s11270-017-3303-y>

Оригинальная статья / Original paper

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-2-201-214>

УДК 574.5



Гидробиоценозы малого арктического озера в условиях урбанизации

Е.С. Савосин[✉], Я.А. Кучко, Д.С. Савосин

*Институт биологии Карельского научного центра Российской академии наук,
Петрозаводск, Россия*

[✉]esavosin@krc.karelia.ru

ЕСС, 0000-0003-0650-1829; ЯАЛ, 0000-0003-1221-2740; ДСС, 0000-0003-1350-2766

Аннотация. Проблема сохранения и изучения малых урбанизированных водоемов в арктических регионах России стоит достаточно остро, так как они имеют хозяйственное, биологическое и рекреационное значение. Как правило, городские водоемы являются излюбленным местом отдыха жителей, служат местом обитания различных животных и растений, играют значительную роль в сохранении биоразнообразия. Статья посвящена изучению гидробиологических особенностей озера Контотки, на восточном берегу которого расположен моногород Костомукша (северная Карелия), главное промышленное предприятие которого — Костомукшский горно-обогатительный комбинат — вносит значительный вклад в экономическое развитие Республики Карелия и Северо-Запада России. Для решения поставленной задачи в вегетационный период 2024 г. было проведено исследование современного состояния сообществ зоопланктона, макрозообентоса и ихтиофауны водоема. Основные динамические факторы воздействия на экосистему водоема связаны с ростом населения и расширяющейся городской инфраструктурой. К ним можно отнести возрастающую рекреационную нагрузку, а также увеличение коммунальных, ливневых стоков и талых вод с территории города. По уровню количественного развития зоопланктона и макрозообентоса озеро Контотки характеризуется как олиготрофный водоем. Биомасса зоопланктона колеблется в пределах 0,6–0,8 г/м³, бентоса — 0,6–2,0 г/м². Сообщество зоопланктона сформировано представителями двух доминирующих групп (коловатки, ракообразные), которые в равных долях формируют видовое богатство (44 таксона). Более 70 % таксонов макробеспозвоночных в составе бентоса представлено личинками насекомых (Ephemeroptera, Diptera, Trichoptera). По видовому составу ихтиофауны (8 видов) озеро относится к водоемам первой рыбохозяйственной категории. Полученные результаты могут дать дополнительную информацию при проведении комплексного экологического мониторинга урбанизированных водоемов северных регионов таежной зоны.

Ключевые слова: урбанизированный водоем, зоопланктон, макрозообентос, ихтиофауна, эвтрофикация, арктические экосистемы, антропогенные факторы, моногород Костомукша

Для цитирования: Савосин Е.С., Кучко Я.А., Савосин Д.С. Гидробиоценозы малого арктического озера в условиях урбанизации. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2025;71(2):201–214. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-2-201-214>

Поступила 18.03.2025

После переработки 26.05.2025

Принята 09.06.2025

© Авторы, 2025

© Authors, 2025

Hydrobiocenoses of a small arctic lake under urbanization conditions

Evgeny S. Savosin✉, Yaroslav A. Kuchko, Denis S. Savosin

*Institute of Biology, Karelian Scientific Center, Russian Academy of Sciences,
Petrozavodsk, Russia*

✉esavosin@krc.karelia.ru

ID ESS, 0000-0003-0650-1829; YAK, 0000-0003-1221-2740; DSS, 0000-0003-1350-2766

Abstract. The problem of conservation and study of small urbanized water bodies in the Arctic regions of Russia is quite acute, given their economic, biological and recreational significance. The article is devoted to the study of the hydrobiological features of Lake Kontokki, on the eastern coast of which the single-industry town of Kostomuksha (northern Karelia) is located, the main industrial enterprise of which, the Kostomuksha Mining and Processing Plant, makes a significant contribution to the economic development of the Republic of Karelia and north-west Russia. To solve the problem, a study of the current state of zooplankton communities, macrozoobenthos and ichthyofauna of the reservoir was conducted in 2024. The main dynamic factors affecting the ecosystem of the reservoir are associated with population growth and expanding urban infrastructure. These include increasing recreational load, as well as an increase in municipal, storm water runoff and melt water from the city. The object of the study is a small urban reservoir located within the Arctic zone of Russia. To achieve the goal, comprehensive hydrobiological studies were conducted using generally accepted laboratory techniques. The quantitative characteristics and species composition of the planktonfauna, benthofauna and ichthyofauna of the reservoir under modern conditions were determined. Features of the development of the plankton fauna and macrozoobenthos of Lake Kontokki are primarily due to the geographical location of the object, its hydrological features, and the influence of anthropogenic factors. According to the level of quantitative development of zooplankton and macrozoobenthos, Lake Kontokki is characterized as an oligotrophic reservoir. The zooplankton biomass fluctuates within 0.6–0.8 g/m³, benthos 0.6–2.0 g/m². The zooplankton community is formed by representatives of two dominant groups (rotifers, crustaceans), which in equal shares form the species richness (44 taxa). A significant number of oligochaetes and chironomid larvae tolerant to habitat conditions were found in the lake sediments. More than 70 % of the macroinvertebrate taxa in the benthos are represented by insect larvae (Ephemeroptera, Diptera, Trichoptera). According to the species composition of the ichthyofauna (8 species), the lake belongs to the water bodies of the first fishery category. The results obtained can provide additional information for complex environmental monitoring of urbanized water bodies in the northern regions of the taiga zone.

Keywords: urbanized water body, zooplankton, macrozoobenthos, ichthyofauna, eutrophication, arctic ecosystems, anthropogenic factors, single-industry town Kostomuksha

For citation: Savosin E.S., Kuchko Ya.A., Savosin D.S. Hydrobiocenoses of a small arctic lake under urbanization conditions. *Arctic and Antarctic Research*. 2025;71(2):201–214. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-2-201-214>

Received 18.03.2025

Revised 26.05.2025

Accepted 09.06.2025

Введение

Город Костомукша расположен в северотаежной подзоне Карелии на восточном берегу озера Контокки вблизи границы России и Финляндии. Он основан в 1977 г. в связи с разработкой железорудного месторождения. В 1982 году введен в строй крупный промышленный объект — Костомукшский горно-обогатительный комбинат (ГОК), который стал градообразующим предприятием. Промышленная площадка комбината находится на расстоянии в 10 км к северо-востоку от города [1]. Население города, по оценке Росстата, на 1 января 2024 г. составляло 25878 человек.

В силу своей повышенной уязвимости экосистемы Арктики, подвергающиеся антропогенному загрязнению, при незначительных колебаниях воздействующих факторов отвечают значительными изменениями биоты и абиотических характеристик [2–5].

В арктических регионах небольшие водоемы служат местами обитания различных организмов. Процесс урбанизации привносит загрязняющие, токсические вещества, увеличивает приток биогенов, что приводит к изменениям в гидрологическом и гидрохимическом режимах водоема [6].

Изучение городских водоемов является актуальным и имеет практическое применение, особенно в условиях увеличения урбанизованных территорий как одного из результатов деятельности человека [7, 8]. Главные источники антропогенного влияния на исследованный водный объект — промышленность, транспорт и сельское хозяйство [9, 10].

Основным загрязнителем района исследования является МКП «Горводоканал Костомукшского городского округа» (г. Костомукша). Так, за период с 2016 по 2022 г., в соответствии с государственными докладами о состоянии окружающей среды Республики Карелия, объем сточных вод, содержащих загрязняющие вещества, варьировал от 4,399 млн м³ (2016) до 4,977 млн м³ (2022).

Наиболее уязвимыми природными объектами для антропогенного влияния являются водоемы и водотоки урбанизованной среды. В результате процессов эвтрофирования и химического загрязнения поверхностные воды городских территорий, как правило, относятся к категории вод низкого качества. Данная проблема исследуется в разных субъектах России, имеется множество работ, посвященных городским водоемам [11–13].

Цель данного исследования — оценить особенности современного состояния гидробиоценозов озера Контокки в условиях влияния антропогенного фактора.

Район и объекты исследования

На территории Костомукшского городского округа основой промышленности является добыча железной руды, что, как известно, приводит к повышенной техногенной нагрузке на окружающую среду [14–19].

Контокки — озеро на территории Костомукшского городского округа Республики Карелия. Исследования проводились в подверженных загрязнению районах, ввиду присутствия в прибрежной зоне строительного сектора и туристических объектов. На картосхеме представлены точки отбора проб (рис. 1).

Водоем принадлежит к бассейну Белого моря, расположен на водосборе реки Кеми, в верховье реки Контокки, которая связывает водоем с озером Лувозеро. Высота над уровнем моря — 202 м. Координаты центра озера: 64°35' с. ш., 30°34' в. д. Общая площадь зеркала озера — 5,2 км², длина береговой линии — 13,3 км. Длина озера — 3,8 км, ширина — 2,5 км, средняя глубина — 3,5 м, максимальная — 5 м [20]. Форма озера лопастная. Берега изрезанные, каменисто-песчаные. Площадь водосбора — 26,1 км². Общая площадь островов — 0,02 км². Контокки — мелководный, хорошо прогреваемый проточный водоем, показатель условного водообмена составляет 0,72.

Вода озера Контокки характеризуется слабокислой реакцией (рН — 6,6), имеет цветность 23–66°, перманганатную окисляемость — от 6,0 до 10,2 мг О₂/л, содержание кислорода варьирует от 46 до 100 % (в среднем 85). По химическому составу воды относится к сульфатно-гидрокарбонатному классу группы Са. Минерализация

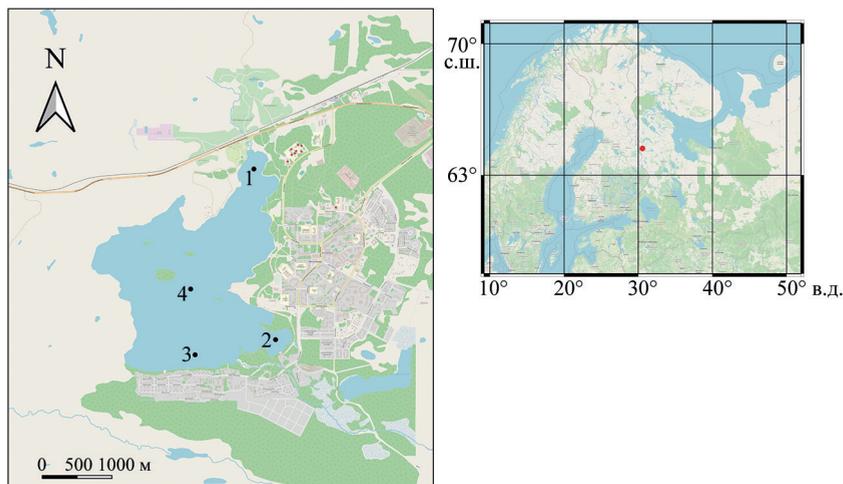


Рис. 1. Картограмма района исследования (оз. Контокки, Карелия) с точками отбора проб

Fig. 1. Map of the study area (Lake Kontokki, Karelia) with sampling points

воды невысокая, по многолетним данным, колеблется в пределах 14,5–23,4 мг/л. Содержание биогенных элементов незначительное: концентрация минерального фосфора составляет 0,002–0,003 мгP/л, органического азота — 0,45–0,52 мгN/л [20, 21].

Высшая водная растительность водоема развита слабо и представлена ежеголовником, рдестом плавающим, кубышкой, кувшинкой и лютиком водным.

В составе ихтиофауны отмечено 8 видов рыб, относящихся к четырем фаунистическим комплексам: сиг, ряпушка, окунь, плотва, щука, лещ, язь и голяян. По числу видов доминирует бореальный равнинный комплекс — 50,0 % (щука, язь, плотва, окунь). На арктический пресноводный комплекс приходится 25 % (сиг, ряпушка), по 12,5 % — на бореальный предгорный (обыкновенный голяян) и понтический пресноводный комплексы (лещ).

Ихтиофауна водоема не отличается большим разнообразием, однако позволяет отнести Контокки к высшей рыбохозяйственной категории, так как в нем обитают ценные виды рыб (ряпушка и сиг). Сиговые рыбы одними из первых реагируют на изменения в водных экосистемах и могут служить индикаторами их современного состояния. Сиг в водоеме представлен среднетычинковой формой (30–34 жаберных тычинок), отличающейся малыми размерами (средняя длина не превышает 17 см), замедленным ростом и относительно ранним созреванием (в возрасте 2+) [22]. По срокам нереста в водоеме представлены осенне-нерестующие и весенне-летне-нерестующие виды рыб.

Промысловое значение в нисходящем порядке имеют следующие виды: ряпушка, сиг, окунь, щука, плотва, лещ, язь и голяян. Практически все виды в составе рыбного населения водоема характеризуются более низкими показателями линейно-весагого роста по сравнению с популяциями из водоемов, расположенных южнее [22]. Это, по-видимому, обусловлено кратковременностью вегетационного периода и ограниченностью кормовых ресурсов в условиях северных широт.

В настоящее время озеро Контокки, расположенное в границах г. Костомукши, используется для любительского рыболовства.

Материалы и методы

Изучение гидробиоценозов озера Контокки проводилось в рамках комплексного исследования сотрудниками Института биологии Карельского научного центра Российской академии наук летом 2024 г. по программе биологического мониторинга водных объектов Республики Карелия. Отбор проб в середине июля и августа проводился на комплексных гидробиологических станциях (№ 1–4), расположенных в центральной и прибрежной частях водоема. Глубина варьировала от 1–3 м (литоральная зона) до 7 м в зоне профундали, температура воды достигала 13–15 °С. Для отбора проб зоопланктона использовался 2-литровый батометр Руттнера. Облавливались все слои воды с интервалом 1 м с 3-кратной повторностью. Комплексные пробы (поверхность–дно) фильтровались через газ № 70, концентрировались до 100 мм³ и фиксировались 4 % формалином. Пробы обрабатывались в соответствии со стандартными методами [23, 24]. Биомасса определялась расчетным методом. Для анализа структуры зоопланктоценоза использовались следующие индексы: $V_{\text{crus}}/V_{\text{rot}}$, $N_{\text{clad}}/N_{\text{cop}}$ и $V_{\text{cycl}}/V_{\text{cal}}$. Также рассчитывались индексы видового разнообразия Шеннона и сапробности Пантле–Букка [25]. Трофический статус вод оценивался по шкале С.П. Китаева [26]. Таксономия коловраток и низших ракообразных приводится согласно «Определителю зоопланктона и зообентоса пресных вод Европейской России» [27]. Для количественного отбора проб зообентоса использовался дночерпатель Экмана–Берджа (площадь захвата 0,025 м²). Грунт промывался через сито (размер ячеек 0,5 мм) и фиксировался в 8%-ном растворе формалина. Камеральные процедуры проводились в лаборатории с использованием бинокулярного микроскопа Micromed MC-2-ZOOM, беспозвоночные сортировались по таксономическим группам и взвешивались на весах DA-124C (BEL Engineering) с точностью до 0,1 мг. Виды классифицировались в соответствии с последними рекомендациями [28, 29]. Названия видов были приведены на основе базы данных Global Biodiversity Information Facility (GBIF.org) и Fauna Europea [30]. Трофический статус водоема определялся по шкале С.П. Китаева [26]. Оценка качества вод и степени органического загрязнения проводилась с использованием олигохетного индекса Гуднайта–Уитлея и индекса сапробности Пантле–Букка. Видовое разнообразие на станциях изучалось с помощью индекса Шеннона (H), рассчитанного по формуле: $H = -\sum(p_i \cdot \ln p_i)$, где p_i — доля особей i -го вида [25, 31, 32]. Расчеты проводились с помощью программы PAST 3.18 [33].

Ихтиофауну оз. Контокки изучали на основе сетных уловов, осуществлявшихся на различных глубинах. Ихтиологический материал обрабатывали по общепринятым методикам [34–37]. Видовой состав рыб (русские и латинские названия) приводится по книге «Атлас пресноводных рыб России» [38].

Для интерпретации результатов и их анализа также привлекались архивные данные за предыдущие периоды исследования водоема.

Результаты исследований

Список организмов зоопланктона, отмеченных нами в 2024 г., насчитывает 44 вида. Из них коловратки (Rotifera) — 15 (34 %), ветвистоусые ракообразные (Cladocera) — 17 (39 %), веслоногие ракообразные Copepoda — 12 (27 %) (Calaniformes — 2, Cyclopiformes — 9, Harpacticiformes — 1). Таким образом, видовое разнообразие достигается за счет 3 основных групп в примерно одинаковых соотношениях. В составе планктонной фауны преобладают о- и оβ-мезосапробные организмы, которые являются доминантами и превалируют над β-мезосапробами.

К массовым видам коловраток относятся *Asplanchna priodonta*, *Kellicottia longispina*, *Conochilus unicornis*; *Keratella cochlearis* и *Bipalpus hudsoni*. Основу группы пелагических планктонных ракообразных составляет бореальная фауна, широко распространенная в карельских озерах (*Holopedium gibberum*, *Daphnia cristata*, *Bosmina coregoni*, *Eudiaptomus gracilis*, *Heterocope appendiculata*, *Thermocyclops oitonooides*, *Cyclops scutifer*) и ряд эвритопных организмов (*D. longispina*, *B. longirostris*, *Mesocyclops leuckarti*). Зарослево-литоральный планктонный комплекс представлен *Sida crystallina*, *Acroperus harpae*, *Chydorus sphaericus*, *Megacyclops viridis*. Межгодовые различия в видовом составе планктона незначительны и обусловлены редкими видами.

В таблице 1 приводятся общие показатели развития планктонной фауны и ряд структурных индексов, отражающих количественное соотношение основных групп в сообществе за все периоды изучения.

Таблица 1

Общая характеристика зоопланктона оз. Контокки за периоды исследований

Table 1

General characteristics of zooplankton of Lake Kontokki for the periods of research

Показатель	1970*	1972*	1984*	1997*	2024**
Число видов	30	20	41	42	44
N, численность, т. экз./м ³	17,6	28,9	20,0	11,8	24,6
B, биомасса, г/м ³	0,660	0,667	0,764	0,610	0,759
$B_{\text{crus}}/B_{\text{rot}}$	99,0	11,5	32,3	19,0	4,4
$N_{\text{clad}}/N_{\text{cop}}$	0,78	1,16	0,56	3,42	1,91
$B_{\text{cycl}}/B_{\text{cal}}$	2,57	0,67	0,70	0,10	3,92
Индекс Шеннона	—	—	—	—	2,1
Индекс сапробности	1,18	1,42	—	—	1,48
Доминирующие виды	<i>H. gibberum</i> , <i>Bosmina spp.</i> , <i>D. cristata</i>	<i>E. gracilis</i> , <i>H. gibberum</i> , <i>A. priodonta</i>	<i>Bosmina spp.</i> , <i>Daphnia spp.</i> , <i>E. gracilis</i>	<i>E. gracilis</i> , <i>H. gibberum</i> , <i>Bosmina spp.</i>	<i>Bosmina spp.</i> , <i>A. priodonta</i> , <i>Daphnia spp.</i>

Примечание. * — по [44]; ** — наши данные.

Note. * — by [44]; ** — our data.

Исследования донной фауны озера Контокки проводились начиная с 1970-х гг., по результатам этих работ озеро было отнесено к мезотрофному типу с богатой и разнообразной фауной, в последующие годы (1984, 1994) значительных изменений в бентоценозах не произошло [39]. Донные отложения представлены коричневыми илами.

По итогам исследования в донном сообществе были отмечены 19 таксонов надвидового и видового ранга водных беспозвоночных. Из них Oligochaeta — 5, Chironomidae — 7 (табл. 2).

Значения биомассы (B) исследованных районов озера варьировали от 0,02 г/м² до 0,23 г/м², численности (N) — от 420 до 760 экз/м². В составе зообентоса озера также отмечены представители моллюсков (Gastropoda, Bivalvia) на песчаных биотопах литорали и профундали. Более 70 % таксонов макробеспозвоночных в составе бентоса представлено личинками насекомых (Ephemeroptera, Diptera, Trichoptera).

Таблица 2

Таксономический состав макрозообентоса оз. Конткокки

Table 2

Taxonomic composition of the macrozoobenthos of Lake Kontokki

Таксоны	Виды
Nematoda	<i>Nematoda</i> sp.
Oligochaeta	<i>Tubifex newaensis</i> (Michaelsen, 1903), <i>Limnodrilus hoffmeisteri</i> (Claparede, 1862), <i>Cognettia glandulosa</i> (Michaelsen, 1888), <i>Spirosperma ferox</i> (Eisen, 1879), <i>Lumbriculus variegatus</i> (Müller, 1774)
Hirudinea	<i>Glossiphonia complanata</i> (Linnaeus, 1758)
Gastropoda	<i>Lymnaea</i> sp.
Bivalvia	<i>Pisidium</i> sp.
Insecta	
Ephemeroptera	<i>Ephemera vulgata</i> (Linnaeus, 1758)
Trichoptera	<i>Stenophylax</i> sp.
Diptera	
Ceratopogonidae	<i>Bezzia</i> sp.
Chironomidae	<i>Demicyptochironomus vulneratus</i> (Zetterstedt, 1838), <i>Cladotanytarsus mancus</i> (Walker, 1856), <i>Chironomus plumosus</i> (Linnaeus, 1758), <i>Stictochironomus crassiforceps</i> (Kieffer, 1922), <i>Pseudochironomus prasinatus</i> (Staeger, 1839), <i>Psectrocladius septentrionalis</i> (Chernovsky, 1949), <i>Procladius</i> sp.

Таблица 3

Макрозообентос оз. Конткокки за многолетний период

Table 3

Macrozoobenthos of Lake Kontokki over a long period

Таксоны	1970*		1972*		1984*		1994*		2024**	
	N	B	N	B	N	B	N	B	N	B
Oligochaeta	177	0,20	248	0,31	218	0,12	90	0,15	387	0,28
Mollusca	114	0,21	173	0,23	93	0,06	90	0,09	82	0,07
Chironomidae	1057	0,57	748	0,74	752	0,15	260	0,42	270	0,12
Прочие	39	0,34	64	0,68	57	0,42	—	—	60	0,11
Всего	1387	1,32	1233	1,96	1120	0,75	440	0,75	799	0,58

Примечание. * — по [20]; ** — наши данные; N — численность, экз./м²; B — биомасса, г/м².
Note. * — by [20]; ** — our data; N — sample size, copies/m²; B — biomass, g/m².

Индекс видового разнообразия Шеннона (H) для исследованного водоема варьировал от 0,99 на профундали до 1,61 в прибрежной зоне, в среднем он составил 1,27, что свидетельствует о незначительном видовом обилии донных организмов и сложившейся структуре доминирующих таксонов. Олигохетный индекс Гуднайта–Уитлея (OI = 75,9 %), основанный на соотношении численности олигохет

и общей численности всех организмов макрозообентоса, позволяет отнести водоем к 4–5 классу качества вод. Максимальных значений индекс Гуднайта–Уитлея достигал на станции № 1 в заиленной литорали. Согласно показателю индекса сапробности Пантле–Букка ($S = 2,93$), полученному с использованием 7 таксонов макрозообентоса (видов-индикаторов), водоем относится к α -мезосапробному типу.

В табл. 3 приводятся общие количественные показатели развития донной фауны, охватывающие периоды изучения оз. Контокки.

Обсуждение

По мнению ряда авторов, видовой состав зоопланктона является одним из консервативных признаков и может сохранять относительную стабильность в течение десятилетий даже в условиях эвтрофирования [40–43]. Анализ полученных нами материалов свидетельствует в пользу этой точки зрения.

Сравнение полученных результатов показывает значительное сходство качественного состава, структуры и количественных показателей зоопланктона с 1970 г. [44]. Доминирующий комплекс видов практически не изменился и состоит из бореальной фауны и космополитных видов, распространенных в большинстве озер северной Карелии. Это подтверждается значением индекса сапробности, который отражает количественное соотношение организмов-индикаторов и характеризует воды озера как слабо загрязненные (табл. 1.).

По значениям численности и биомассы зоопланктона озеро Контокки относится к олиготрофным водоемам [26].

Для сообществ макробентоса малых арктических и субарктических озер характерно отсутствие многих таксонов, что приводит к снижению общего разнообразия, а также низким показателям общей биомассы ввиду малой представленности или полного отсутствия крупных моллюсков. Кроме того, в таких водоемах, как правило, слабо развита водная растительность, что дополнительно уменьшает количество видов, которые могли быть обнаружены в составе зарослевых сообществ. Закономерно, что роль сем. Chironomidae и мелких двустворчатых моллюсков (семейств Pisidiidae и Sphaeriidae) значительно возрастает [45].

В озере Контокки прослеживается сходная тенденция, низкая минерализация не способствует развитию фауны ракообразных и крупных моллюсков, основу макрозообентоса водоема формируют личинки амфибиотических насекомых (более 70 % от всех обнаруженных таксонов).

Как правило, промышленность часто играет значительную роль в экономике города, а зоопланктон и макрозообентос городских озер отражают ее негативное воздействие на природную среду. В случае с оз. Контокки одним из дополнительных факторов может служить наличие Костомукшского горно-обогачительного комбината, хотя прямого воздействия на водоем он не оказывает [46]. Однако такие случаи нередки. Так, исследование озер Мурманской области вблизи медно-никелевого металлургического комбината выявило снижение видового разнообразия сообществ и ряда других показателей [47]. Последние исследования водоемов в черте г. Мурманска показали, что органическое загрязнение и загрязнение тяжелыми металлами находятся в тесном взаимодействии, вызывая кумулятивный эффект [48].

В исследуемом районе в разные годы проводились комплексные работы по оценке качества и состояния поверхностных вод: до строительства города и комбината (1970–1976 гг.), в период наращивания мощности комбината и функционирования

города (1982–1993 гг.) и в период аварийных сбросов воды из хвостохранилища Костомукшского ГОКа (1994–2004 гг.). Обобщенные результаты были опубликованы в монографии «Природные воды района Костомукшского железорудного месторождения», в ней отмечалось, что во второй период произошли изменения в химическом составе воды системы реки Контокки под влиянием сброса хозяйственно-бытовых сточных вод города [49].

По результатам анализа данных установлено, что на протяжении длительного периода (более 50 лет) состав доминирующих групп бентофауны не претерпел существенных изменений [20, 39]. По результатам ранних исследований (1970–1972, 1984–1994) численность зообентоса была не более чем в 1,5–2 раза выше по сравнению с нашими данными, биомассы — в 3,3 раза соответственно (табл. 3), что согласуется с аналогичными исследованиями небольших арктических водоемов [50]. По итогам проведенных нами исследований озеро Контокки относится к ультраолиготрофному типу.

О необходимости мониторинга состояния арктических пресноводных объектов, подверженных воздействию загрязняющих веществ, связанному с воздействием сбросов сточных вод, промышленными, сельскохозяйственными, коммунально-бытовыми и иными предприятиями, а также аэротехногенным переносом, указывают недавние публикации [51–53].

Учитывая, что в Арктическую зону РФ в настоящее время входит около 40 % территории Республики Карелия, существует множество неисследованных водоемов, которые нуждаются в изучении.

Заключение

Арктическая зона РФ богата значительным количеством водных объектов и длительное время находится в состоянии промышленного освоения. Ввиду слабой изученности водоемов, особенно малых, расположенных на урбанизированных и техногенно преобразованных местностях, существует риск катастрофических изменений пресноводных биоценозов.

Получены данные о современном состоянии экосистемы малого урбанизированного арктического водоема в условиях хозяйственного использования. Рассмотрены основные структурно-функциональные показатели сообществ гидробионтов (зоопланктон, зообентос, иктиофауна) спустя длительный период после научного изучения водного объекта. Установлено, что сообщество зоопланктона характеризуется присутствием в доминирующем комплексе широко распространенных видов, относящихся к группе α - и β -мезосапробных организмов, по уровню количественного развития планктона озеро является олиготрофным. В составе макрозообентоса отмечены виды-индикаторы олиготрофии, а также, согласно индексам, основанным на таксономическом составе, сделан вывод о соответствии оз. Контокки α -мезосапробным водам (4–5 класса качества). За период, предшествовавший настоящим исследованиям, общая численность макрозообентоса уменьшилась в 1,5 раза, биомасса — в 3,3 раза.

В связи с активными строительными процессами по берегам оз. Контокки и растущим антропогенным влиянием в результате рекреационного освоения территории мониторинговые исследования целесообразно продолжить.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Работа выполнена за счет средств госбюджетной темы Института биологии Карельского научного центра РАН № FMEN-2022-2007 «Структурно-функциональная организация сообществ гидробионтов разнотипных водоемов Северо-Запада России».

Благодарности. Авторы благодарят всех сотрудников лаборатории экологии рыб и водных беспозвоночных ИБ КарНЦ РАН (г. Петрозаводск), участвовавших в экспедиционных работах.

Вклад авторов. Авторы внесли равные вклады в исследование и публикацию. Авторами сформулированы цель исследования; проведена подготовка гидробиологических проб к их анализу; получены и интерпретированы результаты определения качественного и количественного состава сообществ зоопланктона (Я.А. Кучко) и макрозообентоса (Е.С. Савосин) и ихтиофауны (Д.С. Савосин). Все авторы участвовали в обсуждении результатов исследования, а также написании, оформлении/форматировании и пересмотре текста статьи.

Competing interests. The authors declare no conflict of interest.

Funding. The work was carried out with the funding of the state budget theme of the Institute of Biology of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences No. FMEN-2022-2007 “Structural and functional organization of hydrobiont communities of different types of reservoirs in the North-West of Russia”.

Acknowledgments. The authors thank all the staff of the Laboratory of Ecology of Fish and Aquatic Invertebrates of the Institute of Biology of the Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences (Petrozavodsk) who participated in the expedition work.

Authors contribution. The authors made equal contributions to the study and publication. The authors formulated the aim of the study; prepared hydrobiological samples for their analysis; obtained and interpreted the results of determining the qualitative and quantitative composition of zooplankton (Ya.A. Kuchko) and macrozoobenthos (E.S. Savosin) communities and ichthyofauna (D.S. Savosin). All authors participated in the discussion of the study results, as well as in writing, designing/formatting and revising the text of the article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Кравченко А.В., Гнатьюк Е.П., Крышень А.М. Основные тенденции формирования флоры молодого таежного города (на примере г. Костомукши, Республика Карелия). *Труды Карельского научного центра Российской академии наук.* 2003;4:59–74.
Kravchenko A.V., Gnatyuk E.P., Kryshen A.M. Main trends in the formation of flora of a young taiga town (using the town of Kostomuksha, Republic of Karelia as an example). *Transactions of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences.* 2003;4:59–74. (In Russ.).
2. Roberts K.E., Lamoureux S.F., Kyser K., Muir D.C.G., Lafrenière M.J., Iqaluk D., Pieńkowski A.J., Normandeau A. Climate and permafrost effects on the chemistry and ecosystems of high Arctic Lakes. *Scientific Reports.* 2017;7:13292. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-13658-9>
3. Meltofte H. (Ed.) *Arctic biodiversity assessment, status and trends in Arctic biodiversity.* Iceland: Conservation of Arctic Flora and Fauna; 2013. 128 p.
4. Яковлев В.А. *Пресноводный зообентос Северной Фенноскандии (разнообразие и антропогенная динамика).* Апатиты: КНЦ РАН; 2005. Ч. 1. 161 с.
5. Кашулин Н.А., Даувальтер В.А., Скуфьина Т.П., Котельников В.А. Устойчивое водопользование в Арктике. Новые подходы и решения. *Арктика: экология и экономика.* 2018;4(32):15–29. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2018-4-15-29>
Kashulin N.A., Dauvalter V.A., Skuf'ina T.P., Kotelnikov V.A. Sustainable water use in the Arctic. New approaches and solutions. *Arctic: ecology and economy.* 2018;4(32):15–29. (In Russ.). <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2018-4-15-29>
6. Моисеенко Т.И., Гашкина Н.А., Дину М.И. Распределение форм металлов и оценка их биодоступности в водах суши Арктического региона (предложения к нормативам качества воды). *Геохимия.* 2021;66:630–645. <https://doi.org/10.31857/S0016752521070050>
Moiseenko T.I., Gashkina N.A., Dinu M.I. Distribution of metal forms and assessment of their bioavailability in land waters of the Arctic region (proposals for water quality standards). *Geochemistry.* 2021;66:630–645. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0016752521070050>

7. Алимов А.Ф., Иванова М.Б. (ред.) *Закономерности гидробиологического режима водоемов разного типа*. М.: Научный мир; 2004. 296 с.
8. Persson J. Urban lakes and ponds. In: Bengtsson L., Herschy R.W., Fairbridge R.W. (Eds.). *Encyclopedia of lakes and reservoirs. Encyclopedia of Earth sciences series*. Dordrecht: Springer; 2012. P. 836–839.
9. Mecray E.L., King J.W., Appleby P.G., Hunt A.S. Historical trace metal accumulation in the sediments of an urbanized region of the Lake Champlain watershed, Burlington, Vermont. *Water, Air, and Soil Pollution*. 2001;125:201–230. <https://doi.org/10.1023/A:1005224425075>
10. Zhu Y.Z., He T.R., Gao Z., Guo Y.N. Distribution of heavy metals in sediment and its impact on zoobenthos community of Lake Caohai in Guizhou. *China Environmental Science*. 2016;36(6):1859–1866.
11. Ахмедова Г.А., Расулова М.М. Состояние малых озер в урбанизованных ландшафтах и их защита в условиях антропогенной нагрузки (на примере озер Ак-Гель и Большое Турали). *Юг России: экология, развитие*. 2009;4(4):157–161. <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2009-4-157-161>
Akhmedova G.A., Rasulova M.M. The condition of small lakes in urban landscapes and their protection in conditions of anthropogenic load (by the example of the lakes Ak-Gel and Bolshoe Turali). *South of Russia: ecology, development*. 2009;4(4):157–161. (In Russ.). <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2009-4-157-161>
12. Ромашкова Ю.А. Малые озера урбанизованных территорий г. Тольятти: таксономический состав, структура донных сообществ. *Самарская Лука: Проблемы региональной и глобальной экологии*. 2015;24(4):32–47. <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2015-4-32-47>
Romashkova Yu.A. Small lakes of urbanized areas of Tolyatti: taxonomic composition, structure of bottom communities. *Samarskaya Luka: Problems of regional and global ecology*. 2015;24(4):32–47. (In Russ.). <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2015-4-32-47>
13. Беляков В.П., Бажора А.И., Сотников И.В. Мониторинг экологического состояния городских водоемов Санкт-Петербурга по показателям зообентоса. *Известия Самарского научного центра РАН*. 2015;17(6):51–56.
14. Юркевич Н.В., Ельцов И.Н., Гуреев В.Н., Мазов Н.А., Юркевич Н.В., Еделева А.В. Техногенное воздействие на окружающую среду в Российской Арктике на примере Норильского промышленного района. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2021;332(12):230–249.
Yurkevich N.V., Eltsov I.N., Gureev V.N., Mazov N.A., Yurkevich N.V., Edeleva A.V. Man-made impact on the environment in the Russian Arctic on the example of the Norilsk industrial region. *Bulletin of Tomsk Polytechnic University. Georesources Engineering*. 2021;332(12):230–249. (In Russ.).
15. Соколов Ю.И. Арктика: к проблеме накопленного экологического ущерба. *Арктика: экология и экономика*. 2013;2(10):18–27.
Sokolov Yu.I. Arctic: on the problem of accumulated environmental damage. *Arctic: ecology and economics*. 2013;2(10):18–27. (In Russ.).
16. Lukman L. Anthropogenic impact on Lake ecosystem In: Assani A. (ed.) *Science of lakes — multidisciplinary approach*. [Internet]. Environmental Sciences. IntechOpen; 2024. Available at: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.112179> (accessed 26.05.2025).
17. Шишелова Т.И., Щербаков А.А., Янулевич А.С. Влияние БЦБК на Байкал. *Успехи современного естествознания*. 2010;10:63–64.
Shishelova T.I., Shcherbakov A.A., Yanulevich A.S. Influence of the Baikal pulp and paper mill on Lake Baikal. *Advances in Modern Natural Science*. 2010;10:63–64. (In Russ.).

18. Ульрих Д.В. Экологическая нагрузка на окружающую среду предприятиями по добыче и переработке меди в Южно-Уральском регионе. XXI век. *Техносферная безопасность*. 2016;1(1):49–59.
Ulrich D.V. Ecological burden on the environment by copper mining and processing enterprises in the South Ural region. XXI century. *Technosphere safety*. 2016;1(1):49–59. (In Russ.).
19. Новиков С.Г. Оценка уровня загрязнения тяжелыми металлами почв г. Кондопога и г. Костомукша (Республика Карелия). *Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева*. 2022;111:157–184. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2022-111-157-184>
Novikov S.G. Assessment of the level of heavy metal pollution of soils in Kondopoga and Kostomuksha (Republic of Karelia). *Dokuchaev Soil Bulletin*. 2022;111:157–184. (In Russ.). <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2022-111-157-184>
20. *Озера Карелии*. Филатов Н.Н., Кухарев В.И. (ред.). Петрозаводск: КарНЦ РАН; 2013. 464 с.
21. *Биологические ресурсы водоемов бассейна реки Каменной*. Петрозаводск: Карельский филиал АН СССР; 1986. 183 с.
22. Первозванский В.Я. *Рыбы водоемов района Костомукшского железорудного месторождения (экология, воспроизводство, использование)*. Петрозаводск: Карелия; 1986. 216 с.
23. Sardet C. *Plankton: Wonders of the drifting world*. Chicago: University of Chicago Press; 2015. 224 p. <https://doi.org/10.7208/chicago/9780226265346.001.0001>
24. Кучко Я.А., Ильмаст Н.В., Кучко Т.Ю. *Методы сбора и обработки проб зоопланктона на пресноводных водоемах: учебное пособие для студентов эколого-биологического и агротехнического факультетов*. Петрозаводск: ПетрГУ; 2016. 28 с.
25. Мэгарран Э. *Экологическое разнообразие и его измерение*. М.: Мир; 1992. 181 с.
26. Китаев С.П. *Основы лимнологии для гидробиологов и ихтиологов*. Петрозаводск: КарНЦ РАН; 2007. 390 с.
27. *Определитель зоопланктона и зообентоса пресных вод Европейской России*. Т. 1. Зоопланктон. М.: Товарищество научных изданий КМК; 2010. 495 с.
28. Timm T. A guide to the freshwater Oligochaeta and Polychaeta of Northern and Central Europe. *Lauterbornia*. 2009;66:1–235.
29. *Определитель зоопланктона и зообентоса пресных вод Европейской России*. Т. 2. Зообентос. М.: Товарищество научных изданий КМК; 2016. 457 с.
30. De Jong Y., Verbeek M., Michelsen V., Bjørn P.P., Los W., Steeman F., Bailly N., Basire C., Chylarecki P., Stloukal E., Hagedorn G., Wetzel F.T., Glöckler F., Kroupa A., Korb G., Hoffmann A., Häuser C., Kohlbecker A., Müller A., Güntsch A., Stoev P., Penevet L. Fauna Europaea — all European animal species on the web. *Biodiversity Data Journal*. 2014;2:e4034. <https://doi.org/10.3897/BDJ.2.e4034>
31. *Руководство по гидробиологическому мониторингу пресноводных экосистем*. Под ред. В.А. Абакумова. СПб.: Гидрометеиздат; 1992. 318 с.
32. Вшивкова Т.С., Иваненко Н.В., Якименко Л.В., Дроздов К.А. *Введение в биомониторинг пресных вод*. Владивосток: Изд-во ВГУЭС; 2019. 240 с.
33. Hammer Ø., Harper D., Ryan P. PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. *Palaeontologia Electronica*. 2001;4(1):1.
34. Дгебуадзе Ю.Ю., Чернова О.Ф. *Чешия костистых рыб как диагностическая и регистрирующая структура*. М.: КМК; 2009. 313 с.
35. Мина М.В. *Задачи и методы изучения роста рыб в природных условиях. Современные проблемы ихтиологии*. М.: Наука; 1981. С.177–195.
36. Правдин И.Ф. *Руководство по изучению рыб*. М.: Пищ. пром-сть; 1966. 376 с.

37. Решетников Ю.С. *Экология и систематика сиговых рыб*. М.: Наука; 1980. 300 с.
38. *Атлас пресноводных рыб России*. В 2 т. Решетников Ю.С. (ред.). М.: Наука; 2002.
39. *Современное состояние водных объектов Республики Карелия. По результатам мониторинга 1992–1997*. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН; 1998. 188 с.
40. Андроникова И.Н. Изменения в сообществе зоопланктона в связи с процессом эвтрофирования. В: *Эвтрофирование мезотрофного озера*. Л.: Наука; 1980. С. 78–99.
41. Андроникова И.Н. *Структурно-функциональная организация зоопланктона озерных экосистем разных трофических типов*. СПб.: Наука; 1996. 189 с.
42. Леонова Г.А., Бобров В.А. *Геохимическая роль планктона континентальных водоемов Сибири в концентрировании и биоседиментации микроэлементов*. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео»; 2012. 314 с.
43. Li Y., Geng M., Yu J., Du Y., Xu M., Zhang W., Wang J., Su H., Wang R., Chen F. Eutrophication decreases compositional dissimilarity in freshwater plankton communities. *Science of The Total Environment*. 2022;821:153434. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153434>
44. Куликова Т.П. *Зоопланктон водных объектов бассейна Белого моря*. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН; 2010. 325 с.
45. Чертопруд М.В., Крыленко С.В., Лукиных А.И. Особенности сообществ макрозообентоса малых арктических озер Евразии. *Биология внутренних вод*. 2021;4:378–391. <https://doi.org/10.31857/S0320965221030050>
46. Лозовик П.А., Маркканен С.Л., Морозов А.К., Платонов А.В., Кравченко И.Ю., Калмыков М.В., Куринная А.А., Ефременко Н.А. *Поверхностные воды Калевальского района и территории Костомукши в условиях антропогенного воздействия*. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН; 2001. 165 с.
47. Denisov D., Terentjev P., Valkova S., Kudryavtzeva L. Small lakes eco-systems under the impact of non-ferrous metallurgy (Russia, Murmansk Region). *Environments*. 2020;7(4):29. <https://doi.org/10.3390/environments7040029>
48. Guzeva A.V., Slukovskii Z.I., Dauvalter V.A., Denisov D.B., Cherepanov A.A. Trace element fractions in sediment of urbanised lakes of the arctic zone of Russia. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2021;193:378. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09166-z>
49. Зобков М.Б., Сабылина А.В., Бородулина Г.С., Рыжаков А.В., Галахина Н.Е., Ефременко Н.А., Ефремова Т.А., Зобкова М.В. История развития и основные научные достижения лаборатории гидрохимии и гидрогеологии ИВПС КарНЦ РАН. *Труды Карельского научного центра РАН*. 2021;4:169–192. <https://doi.org/10.17076/lim1371>
Zobkov M.B., Sabylina A.V., Borodulina G.S., Ryzhakov A.V., Galakhina N.E., Efremenko N.A., Efremova T.A., Zobkova M.V. History of development and main scientific achievements of the Laboratory of Hydrochemistry and Hydrogeology of the Institute of Water Problems and Problems of the Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences. *Transactions of the Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences*. 2021;4:169–192. (In Russ.). <https://doi.org/10.17076/lim1371>
50. Maximov A.A., Berezina N.A., Maximova O.B. Interannual changes in benthic biomass under climate-induced variations in productivity of a small northern lake. *Fundamental and Applied Limnology*. 2021;194(3):187–199. <https://doi.org/10.1127/fal/2020/1291>
51. Румянцев В.А., Измайлова А.В., Крюков Л.Н. Состояние водных ресурсов озер Арктической зоны Российской Федерации. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2018;64(1):84–100. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2018-64-1-84-100>
Rumyantsev V.A., Izmailova A.V., Kryukov L.N. State of lake water resources in the Russian Arctic zone. *Problemy Arktiki i Antarktiki = Arctic and Antarctic Research*. 2018;64(1):84–100. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2018-64-1-84-100>

52. Румянцев В.А., Измайлова А.В. Районирование Арктической зоны РФ как основа разработки системы наблюдений за пресными водами. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2022;68(2):173–190. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-2-173-190>
Rumyantsev V.A., Izmailova A.V. Zoning of the Arctic zone of the Russian Federation as the basis for the development of a fresh water observation system. *Problemy Arktiki i Antarktiki = Arctic and Antarctic Research*. 2022;68(2):173–190. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-2-173-190>
53. Румянцев В.А. Концептуальные и методологические подходы к организации системы контроля поверхностных вод Арктической зоны Российской Федерации. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2024;70(2):210–221. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-2-210-221>
Rumyantsev V.A. Conceptual and methodological approaches to the organisation of a signal system for controlling the ecological state of surface fresh waters in the territory of the Arctic zone of the Russian Federation. *Problemy Arktiki i Antarktiki = Arctic and Antarctic Research*. 2024;70(2):210–221. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-2-210-221>

СТРАНИЦЫ ИСТОРИИ PAGES OF HISTORY

Оригинальная статья / Original paper

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-2-215-233>

УДК 629.561.5



Создание теории моделирования движения судов во льдах К 70-летию первого в мире ледового опытового бассейна

К.Е. Сазонов^{1,2}✉

¹ Крыловский государственный научный центр, Санкт-Петербург, Россия

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

✉ K_Sazonov@ksrc.ru

 КЕС, 0000-0003-3364-1309

Аннотация. Семьдесят лет тому назад, в 1955 г. в Арктическом институте в Ленинграде был создан первый в мире ледовый опытовый бассейн, позволяющий определять сопротивление льда движению судна с помощью моделей. Его созданию предшествовал двадцатилетний этап попыток применения модельного эксперимента к ледовым условиям. Для создания ледового бассейна потребовалось разработать физическую модель льда, а также теорию моделирования и пересчета модельных данных на натурные условия. Теория моделирования и необходимые критерии подобия были созданы трудами профессора Л.М. Ногиды и академика Ю.А. Шиманского. В настоящее время они используются во всех ледовых бассейнах мира. Окончательный выбор критериев моделирования стал возможен только после разработки В.В. Лавровым методики приготовления моделированного льда и изучения его свойств. В работе на основе архивных документов и малодоступных из-за наличия грифа секретности публикаций рассматривается история разработки критериев подобия процесса движения судна во льдах в модельных и натуральных условиях.

Ключевые слова: ледовый бассейн, критерий подобия, ледовое сопротивление, свойства льда, моделированный лед, Л.М. Ногиды, Ю.А. Шиманский, В.В. Лавров

Для цитирования: Сазонов К.Е. Создание теории моделирования движения судов во льдах. К 70-летию первого в мире ледового опытового бассейна. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2025;71(2):215–233. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-2-215-233>

Поступила 02.02.2025

После переработки 23.05.2025

Принята 02.04.2025

© Авторы, 2025

© Authors, 2025

Developing a theory of modeling ship motion in ice For the 70th anniversary of the world's first experimental ice basin

Kirill E. Sazonov^{1,2}✉

¹ *Krylov State Research Institute, St. Petersburg, Russia*

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

✉ K_Sazonov@ksrc.ru

 KES, 0000-0003-3364-1309

Abstract. Seventy years ago, in 1955, the world's first experimental ice basin was built at the Arctic and Antarctic Research Institute in Leningrad, enabling model-based analysis of ice resistance to ships sailing in ice-infested waters. The ice basin construction was preceded by a twenty-year period of attempts to adapt model experiments to ice conditions. These studies were undertaken by V.I. Neganov, L.M. Nogid and V.S. Nazarov. It became clear that in order to design and build an ice basin it was necessary to develop a physical ice model, as well as a theory of modeling and extrapolation of model scale data to full size. The theory of modeling and the necessary similarity criteria were developed by Professor L.M. Nogid and Academician Yu.A. Shimansky. Now these criteria are used in all the ice basins of the world. The paper considers the difference in approaches to modeling suggested by the above-mentioned researchers. The development of modeling criteria and test data scaling methods was not a short story because the choice of one or another version of theory was substantially dependent on the physical model of ice applied in the ice basin. Initially, L.M. Nogid and AARI administration thought of using an artificial ice cover made of paraffin mixed with animal oil. The final choice of modeling criteria became possible only after V.V. Lavrov had developed procedures for preparing simulated ice followed by exploration of its properties, and the feasibility of icebreakers' model tests in such ice had been proved in the Vedeneev VNIIG water tank. Based on archival documents and publications that are difficult to access due to security classification, the paper examines the history of similarity criteria development for the ship motion in ice in model and full scale. The elaboration of these criteria enabled AARI to develop and commission the first ice basin in the world.

Keywords: ice basin, similarity criterion, ice resistance, ice properties, model ice, L.M. Nogid, Yu.A. Shimansky, V.V. Lavrov

For citation: Sazonov K.E. Developing a theory of modeling ship motion in ice. For the 70th anniversary of the world's first experimental ice basin. *Arctic and Antarctic Research*. 2025;71(2):215–233. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-2-215-233>

Received 02.02.2025

Revised 23.05.2025

Accepted 02.04.2025

Введение

В середине XIX в. в судостроении произошла научно-техническая революция, которая характеризовалась переходом к железу в качестве основного корпусного материала и отказом от парусов в пользу паровой машины. При этом перед судостроителями всего мира встала крайне сложная задача определения мощности энергетической установки, которая бы обеспечивала судну заданную скорость движения на чистой воде. Кроме этого, предпринимались тщетные попытки найти оптимальную по сопротивлению форму обводов корпуса судна. Только в Англии с 1838 по 1870 г. работало 8 технических комитетов, пытавшихся решить эти задачи. Ими было проведено большое количество натуральных испытаний, анализ результатов которых не позволил определить искомую форму.

Решение проблемы было найдено выдающимся английским инженером, автором первой теории бортовой качки судов Вильямом Фрудом, который создал первый в мире опытовый бассейн для проведения опытов с моделями судов [1]. Испытания моделей судов проводились до Фруда неоднократно, однако они носили качественный, сравнительный характер и не могли быть непосредственно использованы для нужд судостроения. Заслуга Фруда заключается не в том, что он построил первый опытовый бассейн, а в том, что он разработал методику проведения в нем модельных испытаний и определил порядок пересчета полученных результатов на натурное судно. Он первым понял, что не все составляющие сопротивления воды движению судна могут быть смоделированы в бассейне. Поэтому он предложил методику частичного моделирования изучаемых явлений, при использовании которой составляющие сопротивления, зависящие от силы тяжести, моделировались, а составляющие, связанные с трением жидкости о корпус, пересчитывались. Более подробно о работах В. Фруда написано в [1, 2].

Постепенно метод модельных испытаний стал распространяться в среде судостроителей. В Европе начали создаваться опытовые бассейны, четвертый в мире опытовый бассейн был создан в России в 1894 г. [3]. От этой даты отсчитывает свою историю Крыловский государственный научный центр. К 30-м гг. XX в., когда рассматриваемая в данной статье история берет свое начало, проведение модельных испытаний при проектировании судов стало в судостроении практически обязательной практикой.

Поэтому, когда в 1930-х гг. судостроители столкнулись с проблемой определения мощности или ледопроеходимости создаваемых ледоколов, возникла идея исследования процессов их движения во льдах с помощью моделей. Довоенные попытки ее реализации оказались в основном неудачными. Специалистам стало понятно, что необходимо разработать физическую модель льда, а также теорию моделирования и пересчета модельных данных на натурные условия. За прошедшие 70 лет сотрудниками ледовых бассейнов всего мира неоднократно предпринимались попытки корректировки, дополнения или изменения критериев моделирования для улучшения качества проводимых экспериментов [4]. Так что вопрос разработки теории моделирования взаимодействия различных инженерных сооружений со льдом остается актуальным. Автор надеется, что освещение истории создания существующей теории может представлять некоторый интерес и оказаться в чем-то полезным в этой работе.

Предыстория создания ледового бассейна

В начале 30-х гг. прошлого века, особенно после появления 17 декабря 1932 г. Главного управления Северного морского пути (ГУСМП) во главе с О.Ю. Шмидтом [5], активизировался процесс создания новых ледоколов для Северного морского пути (СМП). Еще до окончания челюскинской эпопеи вышло постановление ГУСМП о строительстве ледокола мощностью 18 тыс. л. с., технические характеристики этого ледокола приведены в работе [6]. Выводы, сделанные из анализа челюскинской эпопеи, показали, что для транспортного освоения СМП необходимо создание новых ледоколов и судов ледового плавания. В июле 1934 г. вышло постановление СНК СССР и ЦК ВКП(б) «О мероприятиях по развитию Северного морского пути и северного хозяйства» [7], в соответствии с которым руководство ГУСМП поставило перед судостроителями задачу создания советских ледоколов мощностью 12 и 18–24 тыс. л. с. Наблюдение за проектированием ледоколов и судов ледового

плавания осуществлялось созданной ГУСМП экспертной комиссией, в которую входили академик А.Н. Крылов, члены-корреспонденты АН СССР Ю.А. Шиманский и П.Ф. Папкович и многие другие видные судостроители.

Проектированием ледоколов занималась организация «Судопроект». При выполнении работы проектанты столкнулись с проблемой, которая аналогична описанной выше проблеме середины XIX в., а именно: не имелось никаких способов определить, какую толщину льда смогут преодолевать новые ледоколы с увеличенной, по сравнению с построенными на то время судами, мощностью. Наиболее четко эта проблема была озвучена на заседании экспертного совета ГУСМП, которое состоялось 15 июня 1935 г. в Ленинграде и было посвящено рассмотрению результатов эскизного проекта ледокола мощностью 18–24 тыс. л. с. Подробно об этом совещании нами было написано ранее [8]. Здесь же будут рассмотрены только те вопросы, которые имеют отношение к данной статье.

В заседании приняли участие два руководителя ГУСМП: С.А. Бергавинов, начальник Политического управления и заместитель О.Ю. Шмидта, и Э.Ф. Крастин, начальник управления морского и речного транспорта ГУСМП. Кроме них в совещании участвовали А.Н. Крылов, Ю.А. Шиманский, Л.М. Ногид, Э.Э. Папмель, Н.К. Кен и другие, всего 29 человек.

Одним из главных вопросов, обсуждавшихся на совещании, был вопрос о ледовых качествах нового ледокола. Выступавшие представители «Судопроекта» и других организаций указали на невозможность их определения. Это мнение поддержали А.Н. Крылов и Ю.А. Шиманский. А.Н. Крылов отметил: «...нельзя дать никаких расчетов о ледокольном качестве. Какие будут — такие и окажутся»¹.

Представитель «Судопроекта» Е.С. Толоцкий в своем выступлении сказал, что специалисты его организации хорошо понимают необходимость определения ледовых качеств проектируемого ледокола, однако имеющаяся теоретическая база не позволяет выполнить необходимые расчеты. Далее в его выступлении прозвучали слова, которые можно считать первым публичным высказыванием о необходимости создания ледового бассейна. «Мы хотели попробовать в бассейне создать искусственный лед и попробовать его ломать с помощью модели и посмотреть, как влияет изменение элементов модели». Далее Е.С. Толоцкий сообщает, что «Судопроект» «имел разговоры» по этому поводу с научно-исследовательским институтом судостроения (НИСС), который «сказал, что попробовать он сможет, но взять на себя выполнение полностью этой модели он не может, а сможет взять только вопрос исследования реальности этого задания»².

Описываемое совещание интересно еще тем, что во время его проведения А.Н. Крылов применил теорию подобия, а именно критерий Ньютона, для оценки толщины льда, которую будет преодолевать новый ледокол. По его расчетам получилось, что возрастание мощности проектируемого ледокола приведет лишь к 20–25 % увеличению толщины разрушаемого им льда. Академик так прокомментировал полученный результат: «Это следует из закона механического подобия. Если вы выразите все линейные размеры, то получите, то же самое. Если вы подсчитаете, то увидите, что громадное увеличение мощности и размеров ледокола дает ничтожный эффект в смысле его ледовых качеств»³.

¹ ЦГАНТД СПб. Ф. Р-369. Оп. 11. Д. 123. Л. 17.

² Там же. Л. 34.

³ Там же. Л. 35.



Рис. 1. Профессор Лев Маркович Ногид (1892–1972)

Fig. 1. Professor Lev Markovich Nogid (1892–1972)

Вопрос о возможности применения модельного эксперимента для определения ледовых качеств проектируемых ледоколов по целому ряду причин не получил дальнейшего развития. Возобновление интереса к модельным испытаниям произошло в 1941 г., когда Министерство судостроительной промышленности выдало задание на проектирование мощного ледокола, который должен был иметь «возможность форсировки... двухметрового льда непрерывным устойчивым ходом»⁴. Работы по проектированию ледокола проводились в ЦКБ-32 (бывший «Судопроект») и ЦКБ-4 (конструкторское бюро при Балтийском судостроительном заводе). В ЦКБ-32 ими руководил Л.М. Ногид [9], а в ЦКБ-4 активное участие в проектировании принимал В.И. Неганов, в будущем главный конструктор атомного ледокола «Ленин».

Перед проектировщиками стала сложная задача определения необходимой мощности главных механизмов ледокола для обеспечения его ледопроходимости в 2 м. Для решения этой задачи специалисты обоих КБ решили прибегнуть к модельному эксперименту. Об экспериментах, выполненных В.И. Негановым, имеется очень мало информации. Известно, что они проводились в естественном льду уменьшенной толщины. Эксперименты закончились неудачей, т. к. лед оказался слишком прочным и поэтому модель не разрушала лед, а вылезала на него [10].

Больше известно об экспериментах Л.М. Ногида (рис. 1), которые были им детально описаны: «Определение мощности механизмов этого ледокола, который предназначался для необычных условий эксплуатации, явилось одной из наиболее сложных задач, подлежащих решению в этом проекте. Для проверки предпосылок, положенных в основу расчета сопротивления ледяного поля движению ледокола, выяснилась необходимость воспроизвести внешнюю картину механизма ломки льда. Было решено прибегнуть к модельным экспериментам, которые были успешно проведены инженером бюро А.С. Фишером» [9, с. 5].

⁴ ЦГАНТД СПб. Ф. Р-369. Оп. 14. Д. 314. Л. 149.

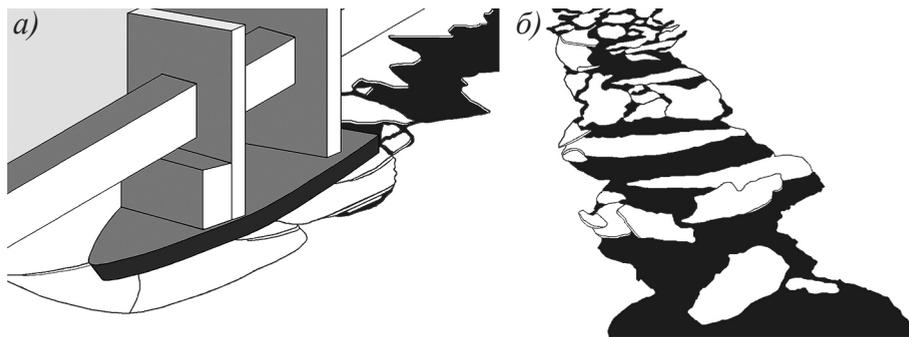


Рис. 2. Прорисовка фотографий экспериментов Л.М. Ногид и его сотрудников, выполненных в 1941 г., по [9, с. 14–15]: *a* — разрушение модельного ледяного покрова носовой оконечностью; *b* — канал, оставшийся после прохождения модели

Fig. 2. Drawing of photographs of experiments by L.M. Nogid and his colleagues, carried out in 1941 according to [9, p. 14–15]: *a* — destruction of the model ice cover by the bow end; *b* — channel left after the model passed

Для имитации в экспериментах ледяного покрова Л.М. Ногид с сотрудниками использовали новый материал — смесь стеарина с пищевым жиром в соотношении 1:2, что позволило получить качественную картину разрушения ледяного покрова корпусом ледокола. Эксперименты проводились в небольшом самодельном деревянном лотке $2 \times 1,5 \times 0,2$ м, который изнутри был выложен оцинкованным железом. Для опытов использовалась только модель носовой оконечности ледокола в масштабе 1:200. Передвижение модели выполнялось вручную. Основное внимание при проведении экспериментов уделялось фиксации картины разрушения моделированного льда носовой оконечностью модели. На рис. 2 представлены прорисовки некоторых фотографий, полученные в ходе выполнения исследований. Л.М. Ногид считал, что выполненные эксперименты реалистично отражают реальную картину разрушения ледяного покрова корпусом ледокола. Это обстоятельство позволило ему описать идеализированную схему движения ледокола во льдах, на которой он во многом основывал свои дальнейшие исследования (рис. 3). Он считал, что форштевень ледокола последовательно выламывает сектора 1–3, после чего борта начнут соприкасаться со стенками канала, в результате чего будут выломаны сектора I. Далее процесс повторяется. На основании этой схемы он ввел следующее разбиение работы, затрачиваемой на преодоление ледового сопротивления, на составляющие:

- 1) работы, затрачиваемой на разрушение ледяного покрова;
 - 2) работы, затрачиваемой на поворачивание льдин на ребро;
 - 3) работы, затрачиваемой на преодоление сопротивления воды движению льдин, перемещаемых ледоколом к стенкам канала;
 - 4) работы, затрачиваемой на придание льдинам живой силы;
 - 5) работы, затрачиваемой на затапливание льдин;
 - 6) работы, затрачиваемой на преодоление сопротивления воды движению ледокола;
 - 7) работы, затрачиваемой на преодоление трения льда о лед и льда о корпус...»
- [9, с. 7–8].

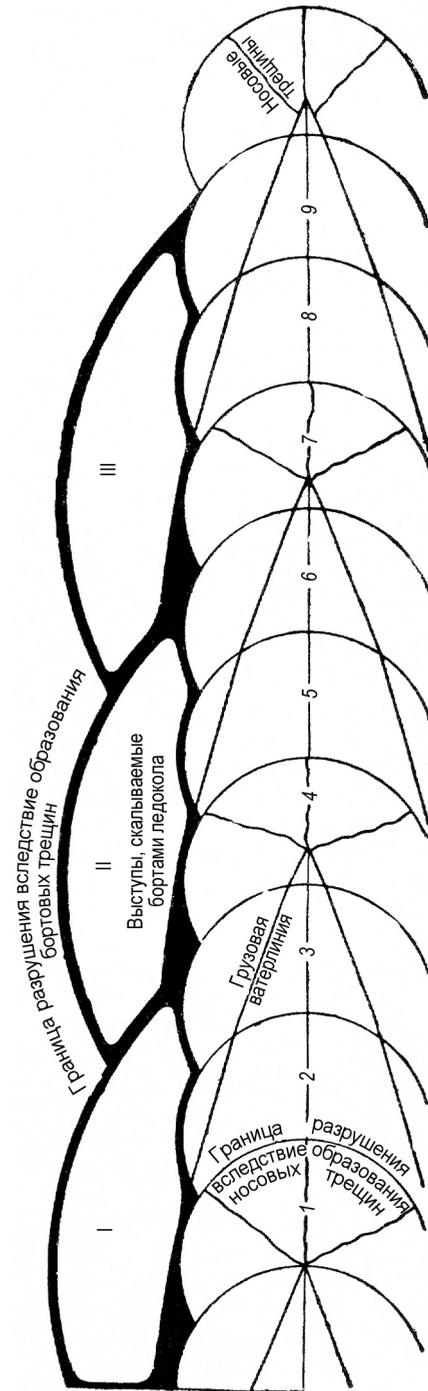


Рис. 3. Идеализованная схема движения ледокола во льдах [9, с. 8]
Fig. 3. Idealized scheme of icebreaker motion in ice [9, p. 8]

Начало войны остановило проектирование ледокола и дальнейшее проведение модельных исследований.

Необходимо отметить, что в 1939–1941 гг. был проведен ряд модельных испытаний движения судна во льдах, не связанных с проектированием новых мощных ледоколов. Такие испытания проводились для изучения характеристик новой формы носовой оконечности ледокола (обратный клин). Вначале в 1939–1940 гг. модельные исследования, благодаря содействию В.В. Шулейкина, были выполнены в бассейне Московского гидрометеорологического института. Там проводились сравнительные испытания моделей ледоколов «Ермак» и нового типа. Масштаб моделей составлял 1:100. Лед имитировался парафином. Затем в 1940–1941 гг. опыты были продолжены в опытовом бассейне Одесского института инженеров водного транспорта с парафиновыми моделями в масштабе 1:25. Лед также имитировался парафином [11]. Эти исследования не оказали существенного влияния на дальнейшее развитие теории моделирования движения судна во льдах.

Первая работа Л.М. Ногиды по моделированию

В 1945 г. в АНИИ был воссоздан кораблеисследовательский отдел⁵, который был в 1946 г. переведен из Москвы в Ленинград. Начальник этого отдела Н.П. Шандриков после возвращения начал налаживать связи с конструкторскими бюро, заводами и судостроительными научно-исследовательскими организациями города, в том числе с Ленинградским кораблестроительным институтом (ЛКИ)⁶. Можно предположить, что Ногид предложил кораблеисследовательскому отделу исследовательскую работу по лабораторному изучению ледового сопротивления ледокола в искусственных льдах в опытовом бассейне ЛКИ, которая должна была стать продолжением его экспериментов, выполненных в 1941 г. Эта работа была включена в план исследований АНИИ на 1946 г.⁷, ее начало планировалось на март, а окончание на декабрь 1946 г. В кораблеисследовательском отделе не хватало квалифицированных кадров, поэтому Л.М. Ногид начал в нем работать по совместительству.

Экспериментальную часть поставленной работы выполнить не удалось из-за того, что модель искусственного льда, предложенную в 1941 г. и хорошо себя зарекомендовавшую при испытаниях в маленьком лотке, оказалась невозможным воспроизвести в опытовом бассейне ЛКИ. Поэтому для закрытия темы Л.М. Ногидом был выполнен ряд теоретических исследований. Они были посвящены разработке теории моделирования движения судов в сплошных ровных льдах; исследованию задачи об изгибе пластины, лежащей на упругом основании, применительно к теории сопротивления льда движению ледокола; разработке практической формулы для определения ледового сопротивления ледокола. В 1948 г. эти исследования были изданы отдельной брошюрой [12].

В некоторых публикациях в Интернете⁸ можно прочитать, что Л.М. Ногид создал теорию моделирования движения судов во льдах в 1941 г. По нашему мнению, это утверждение ошибочно. Модельный эксперимент был осуществлен перед самым началом войны (на одной из фотографий в работе [12, с. 45–55] указана одна из дат

⁵ ЦГАНТД СПб. Ф. Р-369. Оп. 11. Д. 490. Л. 2, 4.

⁶ ЦГАНТД СПб. Ф. Р-369. Оп. 11. Д. 501. Л. 177, 177 об.

⁷ ЦГАНТД СПб. Ф. Р-369. Оп. 11. Д. 547. Л. 10.

⁸ См. статью «Ногид, Лев Маркович» в Википедии, Циклопедии, Руниверсалисе и др.

проведения эксперимента — 27 мая). Времени на его детальную обработку и тем более на разработку теории моделирования уже не было. Кроме этого, сами опыты выполнялись для изучения картины разрушения ледяного покрова носовой оконечностью ледокола, никаких измерений силовых параметров не проводилось, поэтому не было необходимости в разработке критериев моделирования. Необходимость разработки теории моделирования возникла только в 1946 г. в связи с необходимостью экспериментального определения ледового сопротивления.

В выполненной работе Л.М. Ногид предпринимает попытку найти критерии подобия при движении ледокола в сплошных ровных льдах. При их определении он использует вышеприведенное разделение ледового сопротивления на составляющие, что «дает основание, при установлении критериев подобия, базироваться на теории размерностей, не прибегая к составлению и анализу уравнений движения ледокола» [9, с. 16]. Основной составляющей ледового сопротивления он считает составляющую, связанную с разрушением ледяного покрова, который он уподобляет однородной пластине, лежащей на упругом основании. Упругие свойства такой пластины определяются модулем упругости E и коэффициентом Пуассона m . К этим параметрам он добавляет удельный вес воды ρg и толщину льда t , ρ — плотность воды. Искомой величиной является сила P . Безразмерными комплексами, обеспечивающими подобие двух рассматриваемых явлений, в этом случае будут m , $E/\rho g t$ и P/E^2 . Их анализ сразу же приводит к выводу о невозможности моделирования при использовании для этого льда, физические свойства которого идентичны естественному льду. Поэтому следующим шагом Л.М. Ногида стала формулировка требований, которым должен удовлетворять материал пластины, имитирующей ледяной покров в модельном эксперименте. С учетом сформулированных требований к материалу пластины и постоянства ускорений для модельных и натуральных условий он приходит к следующему набору критериев:

$$\frac{t}{t_0} = \frac{E}{E_0} = \frac{\sigma}{\sigma_0}; \quad v = \sqrt{\lambda} v_0; \quad m = idem; \quad \rho = idem, \quad (1)$$

здесь σ — прочность льда; λ — геометрический масштаб модели; v — скорость движения. Индекс «0» относится к модели. При выполнении критериев (1) силы сопротивления для модели и натурального объекта связаны соотношением $R = \lambda^3 R_0$. Эти соотношения удовлетворяют критерию Фруда, который используется при проведении модельных испытаний на чистой воде. Таким образом, Л.М. Ногид сформулировал «строгий» набор критериев моделирования, которые до сих пор используются в работе ледовых бассейнов мира.

Соотношения (1) были получены только для одной из составляющих ледового сопротивления — прямого сопротивления, которое связано с разрушением льда. Далее в работе автор приводит правдоподобные рассуждения о том, что и другие составляющие сопротивления, может быть за исключением сопротивления воды, должны удовлетворять этим соотношениям. Для того чтобы силы трения в модельных и натуральных условиях могли бы пересчитываться по общему правилу, Л.М. Ногид вводит дополнительное требование об идентичности коэффициентов трения модели и натурального судна. Он отмечает, что, пока не разработана физическая модель моделированного льда, невозможно выяснить применимость критериев (1). Тем не менее он предлагает возможную схему проведения модельных экспериментов.

В случае, если критерии (1) окажутся неприменимы, Л.М. Ногид рассматривает два варианта «частичного» моделирования. Первый вариант заключается в замене моделирования упругих характеристик пластины, имитирующих ледяной покров, моделированием характерной длины изгиба l , т. к. процессы изгиба играют главную роль в разрушении ледяного покрова корпусом ледокола:

$$l = \sqrt[4]{\frac{Et^3}{12(1-m^2)\rho g}}. \quad (2)$$

По его мнению, такая замена позволяет несколько смягчить требования к материалу модельной пластины, т. к. не требуется выполнение «строгих» условий (1) для модуля упругости и коэффициента Пуассона.

При формулировке второго варианта «частичного» подобия Л.М. Ногид предполагает, что упругие константы m и E натурального и модельного льда одинаковы. Тогда характерные длины изгиба натурального и модельного льда связаны соотношением $l \sim t^{0,75}$. Ногид считает, что если геометрические размеры модели ледокола изменять также пропорционально $t^{0,75}$, то силы сопротивления будут связаны соотношением $R = \lambda^2 R_0$. Этот вариант «частичного» подобия он считал наиболее удачным, поэтому на его основе предложил формулы для расчета ледового сопротивления [12]. При выводе математических соотношений автором был использован целый ряд необоснованных допущений, которые не позволили в дальнейшем использовать полученные результаты.

Перед закрытием темы она была представлена на отзыв нескольким ведущим специалистам, из архивных документов следует, что ее высоко оценили известные ученые-судостроители профессор И.Г. Ханович и Ю.В. Кривцов⁹. Однако в архиве содержится еще отзыв известного гидромеханика Л.Г. Лойцанского, который, отмечая актуальность и перспективность исследований Л.М. Ногиды, выдвинул ряд замечаний к теории моделирования¹⁰. Основные его замечания касались возможности применения критериев, полученных для упругой задачи, к моменту разрушения льда, а также возможности применения частичного метода моделирования с использованием характерной длины изгиба.

Создание физической модели льда

В 1935 г. во Всесоюзном арктическом институте было создано кораблеисследовательское бюро «в связи с передачей постановлением Главсевморпути тематики и средств на исследование корпусов и механизмов ледоколов во льдах»¹¹. Однако «бывшее до войны руководство Главсевморпути приняло решение о ликвидации кораблеисследовательского отдела Арктического института, и до 1945 г., по существу, вопросами полярного судостроения никто не занимался»¹². Этим же решением были практически остановлены работы института по изучению физических свойств льда, против чего на совещании по обсуждению изменений в структуре института высту-

⁹ ЦГАНТД СПб. Ф. Р-369. Оп. 11. Д. 547. Л. 10.

¹⁰ ЦГАНТД СПб. Ф. Р-369. Оп. 14. Д. 314. Л. 11, 11 об.

¹¹ ЦГАНТД СПб. Ф. Р-369. Оп. 11. Д. 121. Л. 2.

¹² ЦГАНТД СПб. Ф. Р-369. Оп. 14. Д. 31. Л. 26.

пил А.Ф. Лактионов¹³. Восстановление работы АНИИ в области ледоколостроения и исследований физических свойств льда произошло в 1945 г. после утверждения И.Д. Папаниным нового положения об институте¹⁴.

Вновь воссозданная ледоисследовательская лаборатория одним из перспективных направлений исследований рассматривала проведение работ по созданию моделированного льда, о чем свидетельствует «Перспективный план развития ледоисследовательской лаборатории и ее тематических работ в ближайшие годы», который был составлен 8 июня 1945 г. руководителем лаборатории И.С. Песчанским¹⁵.

Вскоре после окончания войны в СССР были активизированы работы по изучению и освоению Арктики. Интерес к этой тематике со стороны руководства страны был вызван геополитическими факторами [13]. Практически все работы были засекречены.

27 июля 1947 г. вышел приказ начальника ГУСМП при СМ СССР № 219с «Об организации строительства ледоколов для Северного Морского пути». В нем были даны следующие распоряжения: «§ 6. Сосредоточить в АНИИ всю научно-исследовательскую работу по изучению условий эксплуатации судов ледового плавания; с целью дальнейшего развертывания работ усилить Кораблеисследовательский Отдел и Ледоисследовательскую лабораторию. § 7. Заместителю Начальника Главсевморпути тов. Бурханову В.Ф. для обеспечения выполнения Арктическим научно-исследовательским институтом возложенных на него научно-исследовательских работ по изучению условий эксплуатации судов ледового плавания: а) принять меры к проведению через Ленинградский Обком ВКП(б) вопросов, связанных с расширением площади Арктического института для размещения ледоисследовательских лабораторий и Кораблеисследовательского бассейна и их строительством. б) Установить размер дополнительных средств, необходимых Арктическому институту на проведение испытаний ледоколов, проектирование ледоисследовательских лабораторий и кораблеисследовательского бассейна, на их строительство и оборудование и принять меры к выделению этих средств»¹⁶. С этого момента Арктический институт стал головной организацией в области проведения исследований, связанных с плаваниями судов в ледовых условиях. Необходимо отметить, что, как это следует из приведенного документа, вопросы арктического судостроения стали рассматриваться в единой связке с ледоисследовательскими работами. Этот документ послужил основой для развертывания комплекса работ, в результате выполнения которых был создан первый в мире ледовый бассейн.

В АНИИ начались работы по созданию указанных лабораторий. Задание на проектирование ледового бассейна невозможно было составить без принятия решения о том, какая модель ледяного покрова будет использоваться при проведении экспериментов. До 1949 г. в качестве основной модели предполагалась смесь парафина с жиром, предложенная в 1941 г. Л.М. Ногидом и его сотрудниками. Об этом свидетельствуют архивные документы по разработке первоначального технического задания на проектирование ледового бассейна, относящиеся к концу 1948 г.¹⁷. Л.М. Ногид принимал самое активное участие в разработке этого задания.

¹³ ЦГАНТД СПб. Ф. Р-369. Оп. 11. Д. 337. Л. 12.

¹⁴ ЦГАНТД СПб. Ф. Р-369. Оп. 11. Д. 490. Л. 2.

¹⁵ ЦГАНТД СПб. Ф. Р-369. Оп. 11. Д. 545. Л. 40.

¹⁶ ЦГАНТД СПб. Ф. Р-369. Оп. 14. Д. 2. Л. 20.

¹⁷ ЦГАНТД СПб. Ф. Р-369. Оп. 11. Д. 685. Л. 7 и др.

Ситуация резко изменилась, когда в 1949 г. решение задачи о создании моделированного льда было найдено старшим научным сотрудником ледоисследовательской лаборатории В.В. Лавровым. Занимаясь изучением вязкости льда, он обратил внимание на то, что разброс экспериментальных результатов существенно снижается при использовании образцов льда, имеющих однородное кристаллическое строение [14]. Это обстоятельство навело его на мысль, что неудачи при испытаниях моделей судов в тонких пленках естественного льда могут быть связаны с неоднородностью их кристаллического строения. Он пишет: «При прохождении модели в этом льду ни канала, ни обломков, похожих на те, какие образуются в естественных условиях, не получается. Более того, вследствие больших усилий, требующихся для разрушения столь прочного льда, модель иногда выходит на лед всем корпусом» [15, с. 188]. В.В. Лавров делает вывод, что размер кристаллов моделированного льда должен быть изменен в соответствии с принятым масштабом изучаемого явления. Для выполнения этого условия им была предложена оригинальная методика, один из первых вариантов которой изложен в приложении к письму во ВНИИ гидротехники им. Б.Е. Веденеева¹⁸. В шугоносном лотке этого института проводились экспериментальные исследования возможности создания моделированного льда и применимости его для испытаний моделей ледоколов [16].

Основные положения методики В.В. Лаврова сводились к следующему. Для создания однородного по кристаллическому составу льда необходимо управлять процессом замерзания воды. Для этого на охлажденную неподвижную поверхность воды вносятся ядра кристаллизации одного и того же размера, для чего используется сито с заданным размером ячейки, через которое просеивают снег, иней или мелко истолченный лед. В методике указывается, что на 1 м² водной поверхности необходимо просеять примерно 30 г зародышей. В.В. Лавров отмечает: «Помимо обеспечения кристаллической однородности, а следовательно, и однообразия в механических свойствах, мероприятие внесения искусственных центров кристаллизации обеспечивает воспроизводимость полей льда данного качества, а также способствует более правильному и ровному нарастанию льда по всей длине лотка. Снижение механической прочности льда может быть достигнуто посредством растворения в воде хлористого натрия: 1 грамм соли на литр воды понижает временное сопротивление до 15 кг/см², 2 грамма — до 6–7 кг/см², 3 грамма — до 4 кг/см² и т. д.»¹⁹.

Эксперименты, проведенные в шугоносном лотке, показали перспективность предложенной методики, хотя работы по ее усовершенствованию и уточнению продолжались еще довольно долго. Также проводились планомерные исследования физических свойств моделированного льда. Методика В.В. Лаврова получила довольно высокую оценку специалистов В.Л. Цурикова и П.А. Шумского²⁰, а также руководства АНИИ, которое выдвинуло ее автора на присуждении премии им. Д.И. Менделеева²¹.

Начиная с этого момента вопрос о физической модели льда считался решенным, поэтому дальнейшие исследования вопросов моделирования движения судна во льдах исходили из этого. Работы по совершенствованию физической модели льда продолжались вплоть до пуска в эксплуатацию ледового бассейна²², они продолжаются и до сих пор.

¹⁸ ЦГАНТД СПб. Ф. Р-369. Оп. 14. Д. 295. Л. 51–54.

¹⁹ Там же. Л. 52.

²⁰ Там же. Д. 300. Л. 1–4, 7–9.

²¹ Там же. Д. 295. Л. 126.

²² Там же. Д. 61. Л. 32–36; Там же. Д. 298. Л. 79–81.

Статьи Л.М. Ногида и Ю.А. Шиманского 1951 г.

Совместительство Ногида в АНИИ, по-видимому, закончилось в 1948 г., когда министром высшего образования ему это было запрещено. Попытки руководства института обратиться за помощью в решении этого вопроса к секретарю Ленинградского городского комитета ВКП(б) результата не дали²³. По всей видимости, в это время к работам, связанным с созданием ледового бассейна, был привлечен Ю.А. Шиманский [17]. В архиве имеется документ, датированный 1948 г., «Предварительный перечень работ по разработке технического задания на проектирование опытового ледового бассейна». Первый пункт этого документа — «Разработка методологии исследования движения моделей в опытовом ледовом бассейне (включая теорию подобия) и пересчета результатов испытания моделей на натуре»²⁴. Документ подписан и. о. начальника кораблеисследовательского отделения В. М. Бессудным и Ю.А. Шиманским (рис. 4).



Рис. 4. Академик Юлиан Александрович Шиманский (1883–1962)

Fig. 4. Academician Yulian Aleksandrovich Shimansky (1883–1962)

В своей работе Л.М.Ногид отмечает, что испытания моделей ледоколов в 1950 г. в шугоносном лотке проводились под руководством Ю.А.Шиманского. Начиная с 1951 г. Шиманский постоянно указывается в качестве научного руководителя большого количества научно-исследовательских тем, выполняемых кораблеисследовательским отделом АНИИ. Среди этих тем была работа, которой руководил И.И. Позняк, «Разработка методики проведения модельных испытаний ледоколов в моделированных льдах и усовершенствование технологии получения моделированного льда». В план-программе по этой теме в разделе «Состояние вопроса» было указано: «В 1949 г. Ю.А. Шиманским была создана теория моделирования движения ледокола в сплошных льдах, которая позволила приступить к модельным испытаниям в условиях опытового ледового бассейна. В 1949 г. к. т. н. В. В. Лавровым был создан моделированный лед натурального состава, разработана технология получения и изучены его физико-механические качества»²⁵.

²³ ЦГАНТД СПб. Ф. Р-369. Оп. 14. Д. 314. Л. 253–256.

²⁴ ЦГАНТД СПб. Ф. Р-369. Оп. 11. Д. 685. Л. 3.

²⁵ Там же. Д. 851. Л. 16, 17.

В 1951 г. в первом номере секретного выпуска журнала «Проблемы Арктики» Ю.А. Шиманский [18] и Л.М. Ногид [16] опубликовали статьи, посвященные теории моделирования движения судов во льдах. Статья Ю.А. Шиманского была подробно рассмотрена нами ранее [17], поэтому здесь будут отмечены только те ее аспекты, которые важны для развиваемой в данной статье темы.

Ю.А. Шиманский рассматривает свою работу как первое приближение к решению проблемы моделирования движения судов во льдах, в которое необходимо будет внести коррективы, основанные на данных модельных и натуральных экспериментов. В начале работы он получает условия строгого моделирования процесса движения ледокола во льдах, принимая постоянство для модели и натурального ледокола ускорения силы тяжести и плотности. Он показывает, что в этом случае силы относятся как λ^3 , кинетическая и потенциальная энергии как λ^4 и т. д. Требование удовлетворения закону куба масштаба для инерционных сил приводит к определению масштаба времени и скорости движения $\sqrt{\lambda}$. Применение условий строгого подобия ко льду приводит к требованию уменьшения прочности льда и его модуля упругости в λ раз. Этот вывод основан на предположении об упругом поведении льда вплоть до момента разрушения.

Именно это предположение в то время вызывало наибольшие сомнения. Сам Ю.А. Шиманский в рассматриваемой статье написал: «Строгое моделирование явления ломки льда ледоколом невозможно также и потому, что деформация льда не подчиняется закону Гука, причем разрушение льда сопровождается большой пластической деформацией и, следовательно, модуль упругости (E) не остается постоянным» [18, с. 100]. Поэтому в статье большое внимание уделено разработке методов приближенного моделирования, которые можно использовать в случае, если прочностные характеристики льда и его модуль упругости не удовлетворяют строгим критериям подобия. Предложенные им методики базируются на нарушении геометрического подобия для толщины льда, что позволяет сохранить соотношение сил, действующих на модель и натурное судно, равное λ^3 . Он получает следующие критерии моделирования:

$$\frac{t}{t_1} = \lambda^{4/3} \left(\frac{E_1}{E} \right)^{1/3}; \quad \frac{\sigma_p}{\sigma_{p1}} = \lambda^{1/3} \left(\frac{E}{E_1} \right)^{2/3}, \quad (3)$$

где индекс «1» относится к модели.

По мнению Ю.А. Шиманского, использование приближенного моделирования имеет свои преимущества и недостатки. Оно позволяет не подчинять прочностные свойства льда строгим критериям моделирования, так как при любых прочностных характеристиках льда соответствующим выбором толщины моделированного льда и масштаба модели можно удовлетворить заданному соотношению между силами. Главный же недостаток такого подхода заключается в отсутствии геометрического подобия для толщины льда.

В статье Ю.А. Шиманский, так же как и Л.М. Ногид, предлагает полуэмпирические соотношения для описания различных составляющих ледового сопротивления. Для описания составляющей, связанной с разрушением льда, он использует приближенное решение задачи об изгибе полубесконечной балки-полоски, отмечая при этом, что «хотя такая упрощенная схема деформации льда сильно отличается от действительных условий ломки льда корпусом ледокола, тем не менее она может быть использована

для настоящего исследования, имеющего целью изучить влияние главнейших факторов с последующим введением в полученные общие выражения поправочных коэффициентов в виде “условных измерителей”» [18, с. 102]. Сопротивление ломки определяется путем сопоставления потенциальной энергии изгиба льда с энергией его разрушения.

Ю.А. Шиманский также рассматривает составляющие ледового сопротивления, связанные с раздвиганием льда и сопротивлением воды. При этом он считает, что сопротивление воды намного меньше сопротивления раздвигания, и в дальнейшем его не учитывает. Предполагая, что сопротивление раздвигания пропорционально ширине ледокола в первой степени и обратно пропорционально коэффициенту ледорезности (коэффициент ледорезности является отношением суммарной поперечной ледовой силы к суммарной продольной силе, которые действуют на корпус судна), а также толщине льда и скорости движения ледокола в некоторых неизвестных степенях, он получает общее выражение для этой составляющей.

Особенностью этих статей являлось то, что их авторы знали о создании моделированного льда и старались представить полученные ими результаты с учетом этого обстоятельства. Физические свойства моделированного льда к моменту написания статей еще не были хорошо изучены, и возможность применения строгих критериев моделирования (1) еще оставалась под вопросом, поэтому оба автора рассматривали возможность применения частичного моделирования. Л.М. Ногид об этом прямо пишет в своей статье: «Актуальное значение в настоящее время имеет лишь вопрос о моделировании движения ледокола при частичном соблюдении критериев подобия» [16, с. 116].

Статья Л.М. Ногида в основном посвящена демонстрации несостоятельности подхода Ю.А. Шиманского, хотя в начале ее он заявляет, что «оба предложенных метода моделирования этого явления приближенны, мы считаем несвоевременным вступать в теоретическую полемику с Ю.А. Шиманским, хотя с многими положениями в его работе мы не согласны. Такая полемика была бы пока беспочвенной, так как пригодность той или иной методики моделирования в конечном счете определяется не степенью убедительности положенных в ее основу гипотез, а практическими результатами, к которым они приводят» [16, с. 117].

Возражения Л.М. Ногида базируются на результатах пересчета на натурные условия результатов испытаний одной из моделей ледокола, которые были выполнены в шутоносном гидротесте института гидротехники. Конкретный анализ этих результатов сейчас не имеет смысла, т. к. в расчетные выражения для прямого сопротивления у обоих авторов вкрались некоторые неточности. В статье Ногида, который был уверен в превалировании в полном ледовом сопротивлении ледокола составляющей, связанной с разрушением льда, показывает, что именно его подход демонстрирует нужный результат.

Анализ указанных статей показывает различие подходов их авторов к решению проблемы. При разработке теории моделирования Л.М. Ногид исходит из предположения, что «основное значение в полном сопротивлении льда движению ледокола имеют силы, разрушающие лед изгибом» [16, с. 116]. Ю.А. Шиманский же считает, что работа сил сопротивления льда пропорциональна потенциальной энергии балки-полоски, ширина которой равна ширине ледокола, в момент ее разрушения. Все эти различия касаются создания полуэмпирических моделей для различных составляющих ледового сопротивления и никак не влияют на формулировку строгих критериев моделирования, которые одинаковы у обоих авторов.

Общей чертой рассматриваемых работ является то обстоятельство, что и Л.М. Ногид, и Ю.А. Шиманский большое внимание уделяли влиянию модуля упругости E при анализе критериев моделирования. И тот, и другой включали этот механический параметр в полуэмпирические выражения для описания составляющей сопротивления, связанной с ломкой льда. Повышенное внимание к этой механической характеристике связано с неполнотой знаний о свойствах моделированного льда и большой ролью, которую она играет в свойствах конструкционных материалов. Впоследствии выяснилось, что, хотя удовлетворение строгим критериям моделирования для модуля упругости до сих пор представляет некоторую проблему [19], в определенной степени отклонениями этого параметра от критериев моделирования можно пренебречь, т. к. они не оказывают сильного влияния на итоговый результат.

Заключительный этап создания теории моделирования

В 1955 г. в АНИИ был запущен в эксплуатацию первый в мире ледовый бассейн. Это событие позволило не только сконцентрировать в нем работы по обеспечению проектирования новых ледоколов и судов ледового плавания, но и выполнить обширный комплекс методологических исследований, направленных на совершенствование методики моделирования и приготовления моделированного льда. Эта работа планомерно проводилась сотрудниками ледового бассейна и ледоисследовательской лаборатории АНИИ.

Примером такой работы может служить выполнение в 1958 г. темы «Проведение модельных испытаний ледоколов и судов ледового плавания» под руководством и при непосредственном участии Ю.А. Шиманского. В отчете об испытаниях отмечено: «...практика изготовления в ледовом бассейне моделированного льда показала, что отношение между временным сопротивлением льда и его модулем упругости остается постоянным при изменении толщины и прочности льда. В этом случае отпадает практическая возможность использования предусмотренного в работе 1950 г.²⁶ “приближенного моделирования”, при котором толщину моделированного льда можно изменять за счет соответствующего изменения между величинами его временного сопротивления и модуля упругости. В связи с этим в настоящей работе метод “приближенного моделирования” не излагается»²⁷.

Итог созданию теории моделирования движения судов во льдах подвели две статьи: Л.М. Ногида [19], опубликованная в 1959 г., и Ю.А. Шиманского [20], вышедшая в 1960 г. Последняя статья почти полностью воспроизводит первую главу отчета по теме «Проведение модельных испытаний ледоколов и судов ледового плавания» 1958 г.

Статья Л.М. Ногида [19] в среде судостроителей была наиболее известной, т. к. только эта публикация не имела грифа секретности. В этой работе излагается окончательный вариант строгой теории моделирования для сплошных и битых льдов. В ней исправлены недостатки предыдущих публикаций. Один из параграфов статьи

²⁶ В оригинале допущена опечатка. Возникновение этой опечатки, по-видимому, связано с тем, что в журнале, имеющем на титульном листе 1951 г. издания, в верхних колонтитулах ошибочно указан 1950 г.

²⁷ Шиманский Ю.А., Позняк И.И., Каштелян В.И., Рывлин А.Я. Проведение модельных испытаний ледоколов и судов ледового плавания (тема 3326). Ч. 1. 1958. Фонды Арктического и антарктического научно-исследовательского института. С. 1–2.

автор посвящает условному подобию, т. к. он считает, что существующая физическая модель льда неидеальна по своим механическим свойствам. Поэтому учет этой неидеальности может потребовать применения частичного моделирования.

Ю.А. Шиманский в своей статье [20] приводит подробный вывод строгих критериев моделирования, исходя из условия неизменности ускорения свободного падения, а также плотности для модели и натурального объекта. Кроме этого, предполагается, что выполняется геометрическое подобие. Условное подобие он не рассматривает. В его работе сформулированы четыре показателя ледовых качеств судна: статическая и динамическая ледокольные мощности, минимальная устойчивая скорость движения судна во льдах заданной толщины и динамическая ледокольная мощность при работе судна набегами.

Далее он получает математические выражения для каждого показателя, но, прежде чем это сделать, Ю.А. Шиманский описывает общий порядок использования модельных испытаний судна для их определения. При этом он формулирует важнейшее положение методики проведения модельных испытаний в ледовых бассейнах: «...практически не представляется возможным получить в ледовом бассейне моделированный лед, механические качества и толщина которого отвечали бы достаточно точно условиям его подобия с натурным льдом. Поэтому необходимо иметь аналитические зависимости между соответствующими величинами, участвующими в явлении продвижения судна в сплошном ледяном поле, для того чтобы с помощью этих зависимостей можно было бы учесть неизбежные отклонения этих величин от их значений, определяемых точным законом подобия» [20, с. 10]. Это указание дало толчок к разработке методов корректировки данных натуральных и модельных экспериментов с целью приведения их к некоторым заданным значениям. Такие работы ведутся практически во всех ледовых бассейнах мира [17].

Еще одним применением выведенных Ю.А. Шиманским зависимостей стало их использование для приближенной оценки ледового сопротивления ледоколов и судов без проведения испытаний в ледовом бассейне, т. е. они превратились в первый широко применяемый полуэмпирический метод расчета. Работа по подбору неизвестных коэффициентов в полученных формулах была выполнена В.И. Каштеляном под руководством Ю.А. Шиманского [10, 21].

Заключение

Приведенные в данной работе материалы показывают, что создание теории моделирования судов во льдах не было одномоментным событием. Хотя применяемые ныне критерии моделирования были получены еще в 1946 г., процесс совершенствования и принятия теории продолжался более десяти лет. Основной причиной этого было на начальном этапе развития теории отсутствие физической модели ледяного покрова, которую можно было бы использовать при проведении экспериментов в ледовом бассейне. Именно этим объясняется большое внимание, которое уделялось создателями теории частичному или приближенному моделированию, т. к. при его использовании смягчались требования к материалу, имитирующему ледяной покров.

После же разработки моделированного льда основным препятствием критериев строгого моделирования являлась неопределенность, связанная с неизученностью его физико-механических свойств. Эта неопределенность не позволяла отказаться от идеи применения приближенного моделирования.

Только в результате проведения целого комплекса исследований, которые были выполнены после введения в строй ледового бассейна, была показана слабая зависи-

мость результатов экспериментов при относительно небольших отклонениях параметров льда от строгих критериев моделирования во время проведения конкретного опыта. Это позволило проводить исследования, основываясь на строгих критериях, и вводить необходимую коррекцию результатов. В окончательном виде теория моделирования и методика приготовления моделированного льда были опубликованы в 1968 г. в первой монографии, посвященной ледовой ходкости судов [10]. Исследования, направленные на совершенствование методики приготовления моделированного льда и совершенствование и дополнение системы критериев моделирования, продолжаются до сих пор.

Важным фактором при создании теории моделирования движения судов во льдах было стремление Л.М. Ногида и Ю.А. Шиманского получить не только критерии подобия, но и расчетные выражения для нахождения ледового сопротивления. Так, Л.М. Ногид, основываясь на предложенной им частичной методике моделирования, получил расчетные формулы для ледового сопротивления [12]. Также формулы для расчета были предложены Ю.А. Шиманским в работе [18]. Попытка подбора значений неизвестных коэффициентов, содержащихся в этих формулах, была в 1951 г. предпринята В.И. Каштеляном²⁸ на основании результатов экспериментов, проведенных в шугоносном лотке. Эти работы положили начало созданию полуэмпирических методов расчета ледового сопротивления.

Конфликт интересов. Конфликт интересов отсутствует.

Финансирование. Исследование выполнено в инициативном порядке.

Благодарности. Автор выражает благодарность сотруднику ААНИИ И.А. Свистуну за ознакомление с рядом использованных в статье материалов и сотруднику КГНЦ Д.С. Дмитриеву за неоценимую помощь в подготовке рисунков.

Competing interests. There are no competing interests.

Funding. The study was carried out on an initiative basis.

Acknowledgments. The author expresses gratitude to the AARI employee I.A. Svistunov for the access to a number of materials used in the article and to the KSRC employee D.S. Dmitriev for invaluable assistance in preparing the figures.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Сазонов К.Е. Роль В. Фруда в создании теории корабля. *Судостроение*. 2010;5:61–66.
Sazonov K.E. The role of V. Froude in the creation of the theory of the ship. *Shipbuilding*. 2010;5:61–66. (In Russ.).
2. Готман А.Ш. К 200-летию Вильяма Фруда. *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2011;4(1):88–96.
Gotman A.Sh. On the 200th anniversary of William Froude. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2011;4(1):88–96. (In Russ.).
3. Гирс И.В. *Первый русский опытовый бассейн*. Л.: Судостроение; 1968. 184 с.
4. Сазонов К.Е. *Модельный и натурный эксперимент в морской ледотехнике*. СПб.: ФГУП «Крыловский государственный научный центр»; 2021. 306 с.
5. Белов М.И. *История открытия и освоения Северного морского пути. Т. IV. Научное и хозяйственное освоение Советского Севера*. Л.: Гидрометеоздат; 1969. 616 с.
6. Виноградов И.В. *Суда ледового плавания*. М.: Оборонгиз; 1946. 239 с.
7. *Решения партии и правительства по хозяйственным вопросам. 1917–1967. Т. 2. 1933–1940*. М.: Политиздат; 1967. 797 с.

²⁸ ЦГАНТД СПб. Ф. Р-369. Оп. 14. Д. 61. Л. 19–21.

8. Сазонов К. Е. «Царь-ледокол» академика А. Н. Крылова. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2021;67(2):208–221. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-2-208-221>
Sazonov K.E. “Tsar icebreaker” of academician A.N. Krylov. *Arctic and Antarctic Research*. 2021;67(2):208–221. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-2-208-221>
9. Ногид Л.М. Моделирование движения ледокола в ледяном поле. В: *Исследования по вопросам сопротивления льда движению ледокола*. Л.: Изд-во Главсевморпути; 1948. С. 5–32.
10. Каштелян В.И., Позняк И.И., Рывлин А.А. *Сопротивление льда движению судна*. Л.: Судостроение; 1968. 238 с.
11. Назаров В.С. Результаты сравнительных испытаний модели ледокола нового типа. *Морской флот*. 1946;5–6:12–15.
Nazarov V.S. Results of comparative tests of a new type icebreaker model. *Marine Fleet*. 1946;5–6:12–15. (In Russ.).
12. Ногид Л.М., Фишер А.С. *Исследования по вопросам сопротивления льда движению ледокола*. Л.: Изд-во Главсевморпути; 1948. 56 с.
13. Жуков Н.Ю. *Сталин. Проект «Арктика»*. М.: Концептуал; 2019. 480 с.
14. Лавров В.В. Вязкость льда в зависимости от температуры. *Журнал технической физики*. 1949;17(9):1027–1034.
Lavrov V.V. Ice viscosity depending on temperature. *Journal of Technical Physics*. 1949;17(9):1027–1034. (In Russ.).
15. Лавров В.В. *Деформация и прочность льда*. Л.: Гидрометеоздат; 1969. 206 с.
16. Ногид Л.М. О моделировании движения ледокола в ледяном поле. *Проблемы Арктики*. 1951;1:116–127.
Nogid L.M. On modeling the movement of an icebreaker in an ice field. *Problemy Arktiki = Arctic and Antarctic Research*. 1951;1:116–127. (In Russ.).
17. Сазонов К.Е. Вклад академика Ю.А. Шиманского в развитие арктического судостроения. *Вопросы истории естественных наук и техники*. 2021;42(3):501–521.
Sazonov K.E. Contribution of Academician Yu. A. Shimansky to the development of Arctic shipbuilding. *Issues in the History of Natural Science and Technology*. 2021;42(3): 501–521. (In Russ.).
18. Шиманский Ю.А. Методика моделирования движения ледокола в сплошном ледяном поле. *Проблемы Арктики*. 1951;1: 98–115.
Shimansky Yu. A. Methodology for modeling the movement of an icebreaker in a continuous ice field. *Problemy Arktiki = Arctic and Antarctic Research*. 1951;1:98–115. (In Russ.).
19. Ногид Л. М. Моделирование движения судна в сплошном ледяном поле и битых льдах. *Труды Ленинградского кораблестроительного института*. 1959;28:45–62.
Nogid L.M. Modeling of vessel motion in a continuous ice field and broken ice. *Proceedings of the Leningrad Shipbuilding Institute*. 1959;28:45–62. (In Russ.).
20. Шиманский Ю.А. Теория моделирования движения судна в сплошном ледяном поле. *Труды Арктического и Антарктического научно-исследовательского института*. 1960;237:9–29.
Shimansky Yu.A. Theory of modeling the motion of a vessel in a continuous ice field. *Transactions of the Arctic and Antarctic Research Institute*. 1960;237:9–29. (In Russ.).
21. Каштелян В.И. Использование модельных испытаний для определения сопротивления судна при движении в сплошных льдах. *Труды Арктического и Антарктического научно-исследовательского института*. 1960; 237:30–45.
Kashtelyan V.I. Use of model tests to determine the resistance of a vessel when moving in solid ice. *Transactions of the Arctic and Antarctic Research Institute*. 1960;237:30–45. (In Russ.).

Обзор / Review

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-2-234-249>

УДК 94:327(98)(09)



Активизация и диверсификация арктической политики: историографический обзор

Л.М. Медведева✉

*Институт истории, археологии и этнографии народов Дальнего Востока ДВО РАН,
Владивосток, Россия*

✉ lhae@eastnet.febras.ru

Аннотация. Смягчение климата и ледовой обстановки в Арктике в значительной степени повысило связанную с ней исследовательскую и деловую активность. Потенциал Арктики привлекает внимание государств, и они стремятся сформировать эффективную стратегию использования открывающихся ресурсов. Цель работы — выявить признаки активизации и диверсификации арктической политики государств в конце XX — первой четверти XXI в., которые нашли отражение в научных публикациях. Для анализа использованы труды специалистов, исследовавших проявления и динамику климатических изменений в Арктическом регионе, связанные с ними природные, политические и социально-экономические возможности и угрозы. Применен системный подход к рассмотрению интересов, связей и отношений государств. Посредством синтеза, анализа, сравнения и обобщения выявлялись тенденции освоения Арктики и эволюция арктических стратегий. Сделан вывод о том, что авторами активно рассматривалась климатическая повестка. В междисциплинарном поле выявлялись причины, характер климатических изменений, их влияние на природные экосистемы и условия жизни населения Арктического региона. С начала 2000-х гг. начинает набирать силу вектор научных исследований, связанный с возможностями, которые открываются в связи с таянием льдов в Арктике, — развитие путей сообщения и транспортной логистики, добыча полезных ископаемых и промышленное строительство в арктических широтах. Наряду со взаимодействием в области исследования и освоения Арктики, развивается международное соперничество. Стремление защитить свои интересы и расширить геополитическое влияние ведет к милитаризации арктической политики стран. Оценивая кризис доверия между странами и наличие угроз, исследователи констатируют недостаточность действенных инструментов и механизмов регулирования межгосударственных отношений и необходимость совместных усилий для достижения мира и безопасности. Интенсификация экономического освоения Арктического региона неизбежна, и ответственность стран состоит в предотвращении угроз разрушения ее природы посредством новых научно-технических и организационных средств.

Ключевые слова: Арктика, климатические изменения, арктические стратегии, Арктический совет, арктическое сотрудничество, арктическая политика, судоходные пути, Северный морской путь, Северо-Западный проход, безопасность

Для цитирования: Медведева Л.М. Активизация и диверсификация арктической политики: историографический обзор. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2025;71(2):234–249. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-2-234-249>

Поступила 28.04.2025

После переработки 10.06.2025

Принята 11.06.2025

Activation and diversification of Arctic policy: a historiographical review

Liudmila M. Medvedeva✉

*Institute of History, Archeology and Ethnography of the Peoples of the Far East FEB RAS,
Vladivostok, Russian Federation*

✉ihae@eastnet.febras.ru

Abstract. The softening climate and ice conditions in the Arctic have led to a significantly increase in the associated research and business activity. The Arctic potential attracts the attention of states, and they seek to formulate efficient strategies for using the emerging resources and opportunities. The purpose of this work is to identify signs of intensification and diversification of the Arctic policy of states in the late 20th — first quarter of the 21st century, which are reflected in scientific publications. The study uses the works of experts who have studied the manifestations and dynamics of climate change in the Arctic region, the associated natural, political and socio-economic opportunities and threats. A systematic approach is used to consider the interests, connections and relations of states. Through synthesis, analysis, comparison and generalization, trends in the development of the Arctic and the evolution of Arctic strategies are identified. It is concluded that the authors actively considered the climate agenda. In the interdisciplinary field, the causes, nature of climate change, their impact on natural ecosystems and living conditions of the population of the Arctic region are identified. Since the early 2000s, the vector of scientific research related to the opportunities that are opening up due to the melting of ice in the Arctic has begun to gain momentum — the development of communication routes and transport logistics, mining and industrial construction in the Arctic latitudes. Along with interaction in the field of Arctic research and development, international rivalry is developing. The desire to protect their interests and expand geopolitical influence leads to the militarization of the Arctic policy of various countries. Assessing the crisis of trust between countries and the presence of threats, researchers note the lack of effective instruments and mechanisms for regulating interstate relations and the need for joint efforts to achieve peace and security. The intensification of economic development of the Arctic region is inevitable, and the responsibility of countries is to prevent threats leading to the destruction of its nature through new scientific, technical and organizational means.

Keywords: Arctic, climate change, Arctic strategies, Arctic Council, Arctic cooperation, Arctic policy, shipping routes, Northern Sea Route, the Northwest Passage, security

For citation: Medvedeva L.M. Activation and diversification of Arctic policy: a historiographical review. *Arctic and Antarctic Research*. 2025;71(2):234–249. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-2-234-249>

Received 28.04.2025

Revised 10.06.2025

Accepted 11.06.2025

Введение

Смягчение климата и ледовой обстановки в Арктике в значительной степени повысило связанную с ней исследовательскую и деловую активность. Восемь арктических государств (Россия, Исландия, Канада, Королевство Дания, Норвегия, Соединенные Штаты Америки, Финляндия, Швеция) рассматривают примыкающую к Северному полюсу зону как объект, расширяющий возможности их внутреннего развития и международного влияния. Государства, не имеющие географической

принадлежности к Арктике, также проявляют к ней интерес, используя статус наблюдателей в Арктическом совете (Великобритания, Германия, Индия, Испания, Италия, Китай, Нидерланды, Польша, Сингапур, Франция, Швейцария, Южная Корея, Япония) и участие в осуществлении соответствующих проектов. Потенциал субъектов мирового сообщества в осуществлении намерений неравнозначен. Трансформация отношений на международной арене демонстрирует сложность среды, в которой предстоит решить множество возникающих в ходе освоения Арктики проблем, и существенным образом влияет на политику стран в регионе.

Исследователи обсуждают на страницах печатных изданий широкий спектр вопросов, связанных с освоением Арктики, отражая происходящие изменения в позиции государств. На фоне количественного роста публикаций возникает потребность проследить характер, общие черты и особенности содержащихся в них рассуждений и выводов, установить смену тематических приоритетов и обозначить дискуссионные вопросы. Цель данной работы — выявить признаки активизации и диверсификации арктической политики государств в конце XX — первой четверти XXI в., которые нашли отражение в научных публикациях.

Объект изучения предполагает рассмотрение позиции российских и зарубежных авторов по ключевым направлениям интенсификации деятельности и перераспределения активов субъектов международных отношений в Арктике в указанный период. Вследствие сложности и многообразия арктической тематики даются общие характеристики событий и наиболее показательные суждения и свидетельства, подтверждающие представленные в статье положения и выводы.

Для анализа использованы труды специалистов, исследовавших проявления и динамику климатических изменений в Арктическом регионе, связанные с ними природные, политические и социально-экономические возможности и угрозы в конце XX — первой четверти XXI в. Применен системный подход, позволивший определить первостепенные, переплетающиеся между собой интересы, связи и отношения государств, формирующие их политику. Посредством синтеза, анализа, сравнения, аналогии и обобщения выявлялись сходство и различия инструментов политического действия, ведущие тенденции освоения Арктики и эволюция арктических стратегий.

Результаты и обсуждение

Долгое время развитие арктических территорий определялось главным образом внутренними потребностями и возможностями циркумполярных стран. Они действовали в границах своего суверенитета, используя доступные им ресурсы и устраняя спорные или конфликтные ситуации отдельными соглашениями между участниками событий. Значимой предпосылкой к изменению положения стало резкое потепление климата в конце 1970-х гг. Научное сообщество было крайне озабочено резким повышением температуры в нижних слоях земной атмосферы и сконцентрировало внимание на его причинах и возможных последствиях. Их изучение расширило представления о влиянии антропогенных и естественных факторов на климат планеты и в то же время породило противоречивые оценки и выводы. Наряду с оптимистичными прогнозами авторы указывали на потенциальные опасности. В 1991 г. А.А. Минин писал, что изменения в природе происходят стремительно и, по-видимому, можно говорить о том, что пройден определенный рубеж, за которым экосистемы суши утрачивают способность в полном объеме выполнять стабилизирующие и регулирующие функции в биосфере [1, с. 3–4].

Со ссылкой на отсутствие достаточного эмпирического материала для анализа эксперты делали осторожные предположения относительно глобальных последствий климатических изменений. Потепление, при котором возможны такие грандиозные события, как разрушение многолетних льдов Северного Ледовитого океана или ледового щита Западной Антарктиды, в ближайшее столетие авторам представлялось маловероятным [2, с. 10]. Накопление в рамках международных исследовательских программ данных о климатических изменениях способствовало разработке сценариев их дальнейшего развития.

Повысить эффективность изучения состояния ледяного покрытия Арктики позволили результаты дистанционных измерений, начатые на спутнике Nimbus-7 в 1978 г. Благодаря многолетнему мониторингу, осуществлявшемуся независимо от погодных условий, исследователи получили более точные данные о сокращении морских льдов Северного полушария [3, с. 58]. Систематические океанографические измерения в высоких широтах Северного полюса, предпринятые с 1990-х гг., позволили создать трехмерную картину изменчивости характеристик притока и трансформации атлантических вод в Арктическом бассейне за последние несколько десятилетий [4, с. 23]. Пониманию механизмов, влияющих на климатические характеристики, способствовало развитие вычислительной техники. Совершенствование методов сбора и обработки данных, акцент на защиту окружающей среды и международное сотрудничество в 1990-е гг. сыграли положительную роль в изучении арктических проблем и способствовали разработке новых гипотез. Несмотря на это, в начале 2000-х гг. отмечалась недостаточная изученность климатических процессов в Арктическом регионе и их обратных связей. Соответственно и сценарии изменения климата Арктики характеризовались большей по сравнению с другими регионами мира степенью неопределенности [5, с. 17].

В качестве главного средства изучения климатической системы и протекающих в ней процессов выдвигается математическое моделирование. Современные климатические модели относят к классу высоких технологий и рассматривают как элементы государственной безопасности. При этом подчеркивается сложность воспроизведения и прогноза климата из-за невозможности прямого физического эксперимента [6, с. 227, 228, 235]. Проблему значительной неопределенности модельных оценок будущих изменений климата в Арктике поднимали А.В. Елисеев и В.А. Семенов [7]. Несмотря на прогресс в накоплении данных о состоянии Северного Ледовитого океана и криосферы, их недостаточно для надежных эмпирических оценок происходящих изменений [4, с. 28]. И это приводит к расхождению взглядов исследователей по ряду принципиальных вопросов.

К предметам наиболее острых научных дискуссий относятся причины потепления и степень влияния на климат природных факторов и последствий человеческой деятельности. Их объяснение критически важно для формирования стратегии реагирования на возможные последствия. Коллектив авторов из России и Норвегии пришел к заключению, что потепление конца XX в. не может быть объяснено одними лишь естественными факторами и, скорее всего, является следствием антропогенного влияния на процессы, происходящие в атмосфере. Модельные расчеты показывают, что при продолжении антропогенного воздействия площадь арктических льдов будет неуклонно уменьшаться [3, с. 61–62].

Г.В. Алексеев отмечает, что главной причиной изменений климата в настоящее время считается рост содержания CO_2 , вызванный антропогенной деятельностью.

Однако, по мнению автора, для повышения надежности прогнозов развития климатической обстановки актуально исследование роли естественных факторов в развитии современного потепления. Глобальные численные модели климатической системы Земли, настроенные на антропогенное потепление, оказываются не в состоянии воспроизвести наблюдаемые крупные аномалии климата [8, с. 220].

Несмотря на незавершенность и неопределенность прогнозов климатических тенденций в Арктике, очевидно, что они приведут к последствиям, требующим ответной реакции со стороны социума. Эксперты, анализируя направления развития глобального потепления, полагают, что они несут как угрозы, так и возможности [9–11 и др.].

К серьезным рискам относятся изменение режимов функционирования морских и наземных экосистем и появление природно-климатических аномалий (эрозия почв и снижение их микробиологической активности, наводнения и засухи, землетрясения, ураганы и т. д.). Более высокая интенсивность изменений климата в Арктике ведет к резкому увеличению угроз для населения, производственного комплекса и инфраструктуры [12, 13]. Авторы указывают на опасность колебаний объемов доступных водных ресурсов, разрушения сооружений и объектов в результате таяния вечной мерзлоты, техногенных загрязнений и их миграции в окружающей среде и т. д. Потепление влияет на хозяйственные и культурные практики коренных народов, которые тысячелетиями жили в вечно холодных районах Севера. Смещение ледяного покрова нарушает привычные условия разведения оленей и тем самым создает угрозу продовольственной безопасности [14, с. 9].

Другой аспект арктической тематики состоит в том, что таяние льдов в северных широтах умножит международные экономические возможности. Активно обсуждаются новые судоходные маршруты между Азией, Европой и Северной Америкой: Северный морской путь (СМП) вдоль российского северного побережья, Северо-Западный проход (СЗП) через Канадский Арктический архипелаг и трансполярный маршрут [15–18 и др.].

СЗП пока не привлекает особого внимания с точки зрения международных перевозок, поскольку находится в более тяжелых ледовых условиях, чем арктическая зона Восточного полушария, и не располагает навигационным обеспечением, портами, координационно-спасательными центрами, достаточным ледокольным флотом. В то же время географические особенности СЗП при нормальных судоходных условиях делают его весьма привлекательным вариантом транзитного морского пути, и эксперты предполагают, что в ближайшие два-три десятилетия он станет оживленной магистралью [19].

Динамика освоения Северного морского пути значительно выше, чем СЗП. Для его обслуживания имеются самый многочисленный в мире ледокольный флот (включая атомный), порты, навигационные, метеорологические, аварийно-спасательные, коммуникационные и информационные службы. Исследователи из России, Германии, Нидерландов, Португалии и других стран, объединив усилия в изучении опыта эксплуатации СМП, указали на то, что этот новый конкурентоспособный транспортный коридор между Европой и Россией позволил создать логистические системы и связанную с ними транспортную инфраструктуру, которые делают его коммерческую эксплуатацию предметом пристального внимания во многих странах, активно занимающихся морскими перевозками [20].

При всей притягательности, которую может демонстрировать СМП, имеется немало проблем, на которые также обращают внимание авторы. Они рассматривают

как преимущества, так и сложности развития СМП [21–25 и др.]. Транспортная линия проходит в экстремальных условиях: суровый климат; низкая плотность населения; высокая энергоёмкость; очаговость и слабость производственной базы; уязвимость окружающей среды; недостаточная изученность районов прохождения трассы; высокая потребность в финансовых вложениях. Модернизации СМП способствует сильная государственная поддержка. Реализация планов развития СМП к 2035 г. должна обеспечить инфраструктуру, гарантирующую конкуренцию с одним из ключевых мировых маршрутов грузоперевозок, проходящим через Суэцкий канал [26].

Китайские исследователи, осуществив систематическую оценку возможности навигации по СМП и разработав многофакторные модели эффективности перевозок по этому маршруту, сделали вывод, что с заметным сокращением морского льда и повышением доступности морей в Северном Ледовитом океане СМП постепенно станет энергоэффективным путем для торговли между Европой и Азией. Однако он не может в краткосрочной перспективе заменить Суэцкий маршрут. Осуществимость круглогодичного судоходства в Арктике, которое может трансформировать мировые торговые пути, остается крайне маловероятной до 2065 г. [27].

А.А. Волкова, Е.Н. Смольянинова и Д.Р. Асаёнок фиксируют изменения в организационно-управленческой структуре СМП, техническом обеспечении, наращивании грузоперевозок. Немало внимания уделяется работе транспортной линии в условиях санкций и принятия мер по их преодолению [28, 29]. Исследователи сходятся во мнении, что Северный морской путь как национальная транспортная коммуникация России в Арктике имеет исключительное значение для дальнейшего эффективного развития экономики северных регионов и государства в целом, включая новые возможности для инвестиций, бизнеса, малых и средних предприятий, создания новых рабочих мест и социально-экономического развития [9, 30, 31].

Кроме транспортных возможностей с новой силой разворачивается еще один вектор развития Арктики: добыча природных ресурсов, в первую очередь нефти и газа. В международном дискурсе об арктической политике постоянно признается, что энергетические ресурсы являются важным фактором при обсуждении вопросов управления Арктикой [32–34].

Есть мнение, что интерес к арктическим углеводородам в широком контексте был основательно мотивирован публикацией Информационного бюллетеня Геологической службы США в 2008 г., в котором был приведен прогноз о сосредоточении в Арктике значительных еще не открытых залежей нефти и природного газа. На американские данные ссылаются российские и зарубежные авторы. К.В. Доннелли и М.П. Бартельс согласны с тем, что некоторые политики используют последствия изменения климата для оправдания срочного расширения разведки и разработки месторождений нефти и газа. По их мнению, наука больше не служит отстаиванию научных ценностей, а вместо этого используется для достижения национальных интересов [35, с. 1, 9]. Арктические территории становятся одним из средств обеспечения безопасности и социально-экономического развития государств [22, с. 76]. Ученые считают необходимым создавать политическую культуру, которая ставит изменение климата в центр социальных приоритетов [36, с. xi].

На Рамочной конференции ООН по изменению климата в ноябре 2024 г. с участием делегаций почти 200 стран мира велись обсуждения относительно ограничения потребления ископаемого топлива. Договорились об увеличении финансирования

климатических программ до 300 млрд долл. ежегодно к 2035 г. В то же время был сделан вывод о том, что спрос на энергию значительно опережает мощности ее генерации из возобновляемых источников. Энергопотребление будет возрастать по мере роста численности населения, потребности в продовольствии, внедрения искусственного интеллекта и т. д. Вполне четко обозначился тезис о том, что глобальная позиция, заключающаяся в сокращении использования ископаемого топлива, в настоящее время не имеет большого смысла при нынешнем уровне научно-технического прогресса [37, с. 185, 186].

Изменение окружающей среды в Арктике — это не просто научная или региональная, это глобальная проблема [38, с. 1]. Ученые обращают внимание на необходимость адаптации арктического региона к последствиям изменений климата посредством внедрения новых организационных, технологических, экономических подходов к освоению территорий, базирующихся на принципах устойчивого развития и «зеленого» роста [11, с. 9; 13, с. 143]. Динамика изменения климата и адаптация к нему создают чрезвычайную нагрузку на все социальные системы. Эти стрессы обещают оказать глубокое влияние на управление, конфликты и преступность [39, с. i].

Деятельность в Арктике приводит к постановке таких важных задач, как защита окружающей среды, поддержка научных исследований и международное сотрудничество. Объединение ресурсов и опыта разных стран является одним из способов их решения. Суверенное и совместное использование территорий в Арктике регулируется нормативно-правовыми актами, соглашениями и организациями. Терминология и порядок использования морских пространств регламентируются принятой в 1982 г. Конвенцией ООН по морскому праву, вступившей в действие в 1994 г. В 1993 г. был учрежден Совет Баренцева/Евроарктического региона, в 1996 г. основан Арктический совет. В 2017 г. вступил в силу Полярный кодекс.

По мере повышения интереса к Арктике усилилось стремление государств определить свои долгосрочные цели. Оно оформилось в виде принятия документов стратегического планирования. Первой страной, утвердившей свою стратегию в Арктике, стала Норвегия (2006 г.). В дальнейшем все государства Арктического совета приняли соответствующие документы и обновляли их согласно меняющейся политической ситуации.

Россия в 2008 г. определила свои стратегические приоритеты в Арктической зоне до 2020 г. Они получили развитие в 2013 г., а затем в 2020 г. в «*Основах государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2035 года*», «*Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года*» и в 2021 г. в едином плане мероприятий по реализации арктической политики. Документы редактировались согласно новым обстоятельствам и потребностям. Они свидетельствуют о том, что для России стратегически важно поднять на новый уровень экономику Арктической зоны, обеспечить высокое качество жизни ее населения, развивать СМП в качестве национальной транспортной коммуникации и организовать охрану окружающей среды. Учитывая то напряжение, которое испытывала Россия с начала 2000-х гг. в результате дестабилизирующих ситуацию «цветных революций», русофобских и националистических режимов, продвижения НАТО на восток, а также возрастания конфликтного потенциала в Арктике, вполне объяснимы те задачи, которые ставились в сфере безопасности: повышение боевых возможностей войск общего назначения и воинских формирований в Арктической зоне Российской Федерации,

поддержание их боевого потенциала на уровне, гарантирующем отражение агрессии против Российской Федерации и ее союзников¹. В отечественной историографии отмечается конструктивность политики России, направленной на защиту национальных интересов в Арктике и при этом всегда открытой для международного сотрудничества и достижения разумных компромиссов [40, с. 86].

В принятой в 2013 г. США национальной арктической стратегии не выражалось особой озабоченности военной опасностью и говорилось о создании гарантий мира и стабильности в Арктике, продвижении экономического и энергетического развития, защите окружающей среды, решении проблемы изменения климата, уважении потребностей коренных народов и интересов арктических государств². К этому моменту американские эксперты уже писали об усилении милитаризации Арктики, которое может вызвать вопросы безопасности США и потенциальный конфликт с другими странами, соперничающими за власть в регионе³. По мере роста интереса к Арктике проблемы безопасности отклонялись от климатического вектора к военному. В 2018 г. министр военно-морских сил США Р. Спенсер выразил свою обеспокоенность растущей угрозой безопасности в Арктике и свое желание переориентировать внимание ВМС на циркумполярный Север [41, с. 226].

В 2022 г. США приняли новую национальную арктическую стратегию. Исследователь из Университета Индонезии Н. Селла указывает на то, что она ознаменовала возрастание военного присутствия в регионе. В международном политическом контексте фактором, побуждающим Соединенные Штаты усиливать арктическую политику, автор считает растущее присутствие России и Китая в Арктике, угрожающее гегемонистским устремлениям США в регионе [42, с. 297, 305].

В 2024 г. Министерство обороны США изложило Арктическую стратегию, в которой указано, что политика России и Китая представляет угрозу американской безопасности. Для отстаивания оборонных интересов США была предложена дальнейшая милитаризация арктической зоны через развитие систем вооружения, наземной и космической инфраструктуры, сил специальных операций и взаимодействие союзников по НАТО⁴.

Подобный курс получил отражение во внешнеполитической стратегии Канады в Арктике, принятой в 2024 г. В ней в качестве угрозы также названы Россия и Китай, которые, согласно домыслам авторов документа, едины в своем стремлении подорвать международную систему, «основанную на либеральных правилах». Обеспечение сильной политики в североамериканской Арктике Канада представила в более глубоком оборонном сотрудничестве с Соединенными Штатами и увеличении расходов на вооружение. Если новая стратегия Пентагона носит целеполагающий

¹ Указ президента РФ «Об Основах государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2035 года (с изменениями на 21 февраля 2023 г.)» <https://docs.cntd.ru/document/564371920#6560IO> (accessed: 24.04.2025).

² Arctic strategy. Department of Defense. 2013. 2013_Arctic_Strategy.pdf

³ American Security Project. Part two: climate change & global security. *American Security Project*. 2012;(1):22. [Electronic resource] URL: <http://www.jstor.org/stable/resrep05971> (accessed: 24.04.2025).

⁴ 2024 Arctic strategy. U.S. Department of Defense. <https://media.defense.gov/2024/Jul/22/2003507411/-1/-1/0/DOD-ARCTIC-STRATEGY-2024.PDF> (accessed: 24.04.2025).

характер, то канадская стратегия обращает на себя внимание конкретизацией инвестиций в милитаризацию северных территорий⁵.

Эксперты усматривают в содержании стратегий арктических государств выраженное сходство направлений деятельности и мотивации. Основные положения, которые фиксировали страны в определении своей политики в Арктике, сводились к проблемам климата, коренных народов, социальных приоритетов, международного сотрудничества, науки и безопасности [40]. От авторов не ускользнул тот факт, что подобная декларация приоритетов носит скорее ритуальный характер. В реальности первенство отдается экономическому развитию с опорой на ресурсы Арктики, а также защите национальных интересов в силовом измерении⁶.

Политика государств, не имеющих границ с Арктикой, строится на расширении возможностей за счет взаимодействия с арктическими странами. Заметных успехов в этом направлении добился Китай, объявивший себя в 2018 г. «приполярным» государством. Широкие возможности доступа к минеральным и энергетическим активам и преобразованию Северного морского пути для КНР открывает партнерство с Россией. В качестве важной основы контактов не только с Россией, но и со странами Северо-Восточной Азии и Скандинавии Китай предлагает строительство «Полярного шелкового пути». Китай реализует свои экономические и политические амбиции в Арктике посредством создания научных институтов, строительства ледокольного флота, заключения двусторонних соглашений с арктическими государствами [43, с. 179, 180, 181].

Следуя примеру Китая, Индия опубликовала в 2022 г. свой документ относительно арктической политики. Ее целями названы укрепление национального потенциала и компетенции в области науки, окружающей среды, экономического сотрудничества, понимания изменений климата [44]. Интерес к поставке углеводородов из Российской Арктики побудил Индию инвестировать в развитие инфраструктуры, расположенной в Российской Арктике, включая железные дороги, порты, аэродромы. Однако, по мнению Д.Н. Веселовой, отмечается низкий уровень фактического взаимодействия между двумя странами в области науки и техники. Основным партнером Индии в данной сфере остается Норвегия [45, с. 217, 220].

К ресурсам Арктической зоны значительный интерес проявляют страны Европейского Союза. Очевидным препятствием для того, чтобы ЕС взял на себя доминирующую роль в Арктике, не в последнюю очередь в отношении судоходства, является география. Ни одно из государств — членов ЕС не имеет береговой границы в Арктике, что не только ограничивает юрисдикцию ЕС в принятии законодательных или правоприменительных мер в регионе, но и ставит под сомнение его интересы [46, с. 240, 241]. Исследователи из Норвегии Ж. Лебель и А.Э. Нильссон полагают, что ЕС принятием стратегии 2021 г. подчеркнул свою волю к участию в арктической политике. Помимо традиционных проблем сотрудничества и борьбы с изменением климата, страны ЕС обратились к теме ресурсов и безопасности [47].

Арктика стала местом переплетения государственных интересов. Ряд вопросов международного взаимодействия урегулирован договоренностями и соглашениями.

⁵ Canada's Arctic Foreign Policy (2024) [Electronic resource]. <https://www.international.gc.ca/gac-amc/publications/transparency-transparence/arctic-arctique/arctic-policy-politique-arctique.aspx?lang=eng> (accessed: 24.04.2025).

⁶ Дмитриев Г. Международные стратегии развития Арктики. Экспертная записка. М.: Экспертный центр «Проектный офис развития Арктики»; 2024. 38 с.

Нет расхождения на предмет размежевания пределов осуществления суверенитета арктических государств над материковыми районами, а также над островами и скалами в Арктике. Арктические прибрежные государства установили актами своего национального права исключительные экономические зоны (ИЭЗ) и квалифицировали акваторию Северного Ледовитого океана за пределами их ИЭЗ как воды открытого моря⁷. Однако имеется ряд спорных вопросов. Основные правовые разногласия связаны с делимитацией континентального шельфа [48, с. 2]. Так, права на хребет Ломоносова предъявляют Россия, Канада и Дания. Кроме того, предметом притязаний России является хребет Менделеева, а Канады — хребет Менделеева-Альфа. Игнорируя запросы Канады, США заявляют претензии на значительную часть арктического шельфа, несмотря на то что не имеют на это формальных оснований, так как не ратифицировали Конвенцию ООН по морскому праву. Как отмечает Д.А. Володин, на фоне крайнего обострения отношений между Россией и Западом с 2022 г. раздел арктического шельфа между странами региона приобретает для них не столько экономическое, сколько военно-стратегическое значение [49, с. 57]. Также очевидны противоречия относительно правового статуса СМП и СЗП [41, 50]. Для России и Канады эти пути являются внутренними. Ряд стран выступает за присвоение им международного статуса как для коммерческого судоходства, так и для прохода военных кораблей.

Далеко в претензиях на расширение присутствия в Арктическом регионе зашли США. В 2019 г. президент страны Д. Трамп выступил с идеей покупки Гренландии. Замысел не отличался новизной. О его геостратегическом значении для США писал американский исследователь Арктики Р.Э. Пири в 1916 г. После Второй мировой войны Дания отказалась от поступившего от американцев предложения продать Гренландию, но молчаливо приняла постоянное военное присутствие США на острове. Авиабазы Туле была создана на северо-западе Гренландии, где она вторгалась в охотничьи угодья инуитов, сохраняя их прежние условия жизни и бросая вызов их общественной безопасности. Хотя многие высмеивали устаревшую идею, вскоре стало очевидно, что она отражает более глубокий сдвиг во взглядах США на безопасность Арктического региона как включенного в международное соперничество великих держав с Россией и особенно с Китаем [51, с. 107, 118, 123]. В 2024 г. после избрания на второй президентский срок Д. Трамп вновь озвучил предложение о покупке Гренландии. С.Н. Гриняев соотнес этот шаг с формирующейся новой геостратегической обстановкой в Северной Атлантике и Арктическом регионе в целом [52, с. 6]. Для Дании вопрос о принадлежности Гренландии чрезвычайно важен, так как остров определяет ее статус как арктической державы. Она, так же как Норвегия и Исландия, неспособные в одиночку отстаивать свои интересы в Арктике, надеется использовать для этих целей НАТО [40, с. 82, 84].

Исследователи выражают беспокойство по поводу того, что Арктика становится ареной геополитического соперничества [48, с. 8]. В условиях нарастающих угроз эксперты отмечают, что международная нормативная база в отношении Арктического региона не в полной мере отвечает требованиям настоящего времени [40, с. 85]. Арктические государства фактически укрепили правило структурной иерархии, которое позиционирует их как доминирующих агентов в международных отношениях и ограни-

⁷ А.Н. Вылегжанин. Статус Арктики: итоги 2024 года. [Electronic resource]. https://mgimo.ru/about/news/experts/arctic-2024/?utm_source=google.ru&utm_medium=organic&utm_campaign=google.ru&utm_referrer=google.ru (accessed: 24.04.2025).

чивает права коренных народов и государств-наблюдателей в Арктическом совете [53, с. 26, 27]. В 2022 г. семь стран Арктического совета приостановили взаимодействие с Россией в период ее председательства в организации в знак протеста против начала специальной военной операции на Украине. Было ограничено научное сотрудничество, иностранные компании вышли из ряда арктических проектов [54, с. 7]. В ответ на недружественные действия Россия в 2024 г. приостановила выплату ежегодных взносов в Арктический совет. Инициированная западными странами конфронтация нанесла значительный вред сотрудничеству в решении арктических проблем.

Заключение

Современная историография, посвященная проблемам Арктики, быстро пополняется новыми исследованиями, отражая динамику событий конца XX — первой четверти XXI в. и те изменения, которые произошли в политике государств и международных отношениях.

Авторами активно рассматривалась климатическая повестка. Для ее разработки объединялись усилия представителей разных стран, которые в междисциплинарном поле выявляли причины, характер и возможные последствия потепления климата. Большое значение придавалось влиянию климатических изменений на природные экосистемы и условия жизни населения Арктической зоны.

С начала 2000-х гг. начинает набирать силу еще один вектор научных исследований, связанный с возможностями, которые открываются в связи с таянием льдов в Арктике, — развитие путей сообщения и транспортной логистики, добыча полезных ископаемых и промышленное строительство в арктических широтах. В научном дискурсе все уверенней высказывалось мнение, что интенсификация экономического освоения Арктической зоны неизбежна и ответственность стран состоит в предотвращении угроз разрушения ее природы посредством новых научно-технических и организационных средств.

Потенциал Арктики привлекает все больше внимания, и соответственно государства стремятся сформировать эффективную стратегию использования открывающихся ресурсов и возможностей. Наряду со взаимодействием в области исследования и освоения Арктики, развивается международное соперничество. Стремление защитить свои интересы и расширить геополитическое влияние ведет к милитаризации арктической политики стран. Этот курс провоцирует обострение международной обстановки и ею же стимулируется.

Оценивая кризис доверия между странами и наличие угроз, исследователи констатируют недостаток действенных инструментов и механизмов регулирования межгосударственных отношений и необходимость совместных усилий международного сообщества для достижения мира и безопасности.

Конфликт интересов. У автора исследования нет конфликта интересов.

Финансирование. Исследование выполнено за счет темы государственного задания История Тихоокеанской России в контексте общероссийского и мирового цивилизационного процесса: определяющие факторы развития, роль и место в общероссийском и мировом пространстве. № гос. регистрации НИР: 121022500184-4 от 24.02.2021 г.

Competing interests. Author declares no conflict of interest.

Funding. The study was carried out within the framework of the state assignment History of Pacific Russia in the context of the all-Russian and world civilization process: determining factors of development, role and place in the all-Russian and world space. State registration number of research work: 121022500184-4 dated 02.24.2021.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Минин А.А. *Климат и экосистемы суши: взаимосвязи и пространственно-временная изменчивость состояний. Итоги науки и техники. Сер. Метеорология и климатология.* М.: ВИНТИ РАН; 1991. 171 с.
2. Клименко В.В., Клименко А.В., Сныгин С.Ю., Федоров М.В. Энергия и климат: что же в самом деле известно науке? *Теплоэнергетика.* 1994;1:5–11.
3. Йоханнессен О.М., Бобылев Л.П., Кузьмина С.И., Шалина Е.В., Хворостовский К.С. Изменчивость климата Арктики в контексте глобальных изменений. *Вычислительные технологии.* 2005;10(S2):56–62.
Iokhannessen O.M., Bobylev L.P., Kuz'mina S.I., Shalina E.V., Khvorostovskii K.S. Arctic climate variability in the context of global change. *Computational Technologies.* 2005;10(S2):56–62. (In Russ.).
4. Семенов В.А. Современные исследования климата Арктики: прогресс, смена концепций, актуальные задачи. *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана.* 2021;57(1):21–33. <https://doi.org/10.31857/S0002351521010119>
Semenov V.A. Modern research of the Arctic climate: progress, change of concepts, current tasks. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics.* 2021;57(1):21–33. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0002351521010119>
5. Катцов В.М., Вавулин С.В., Говоркова В.А., Павлова Т.В. Сценарии изменений климата Арктики в XXI веке. *Метеорология и гидрология.* 2003;10:5–19.
Kattsov V.M., Vavulin S.V., Govorkova V.A., Pavlova T.V. Scenarios of Arctic climate change in the 21st century. *Meteorologiya i gidrologiya.* 2003;10:5–19. (In Russ.).
6. Дымников В.П., Лыкосов В.Н., Володин Е.М. Моделирование климата и его изменений: современные проблемы. *Вестник Российской академии наук.* 2012;82(3):227–236.
Dymnikov V.P., Lykosov V.N., Volodin E.M. Modeling of climate and its changes: modern problems. *Vestnik Rossiiskoi akademii nauk.* 2012;82(3):227–236. (In Russ.).
7. Елисеев А.В., Семенов В.А. Изменения климата Арктики в XXI веке: ансамблевые модельные оценки с учетом реалистичности воспроизведения современного климата. *Доклады Академии наук.* 2016;471(2):214–218. <https://doi.org/10.7868/S0869565216320190>
Eliseev A.V., Semenov V.A. Arctic climate change in the 21st century: ensemble model assessments taking into account the realism of modern climate simulation. *Doklady Akademii nauk.* 2016;471(2):214–218. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0869565216320190>
8. Алексеев Г.В. Потепление климата Арктики: расхождения между глобальными моделями климата и наблюдениями и возможные причины. *Гидрометеорология и экология.* 2023;71:207–230. <https://doi.org/1033933/2713-3001-2023-71-207-230>
Alekseev G.V. Arctic climate warming: discrepancies between global climate models and observations and possible causes. *Gidrometeorologiya i ekologiya.* 2023;71:207–230. (In Russ.). <https://doi.org/1033933/2713-3001-2023-71-207-230>
9. Никитина Е.Н. Изменение климата в Арктике: адаптация в ответ на новые вызовы. *Контуры глобальных трансформаций: политика, экономика, право.* 2019;12(5):177–200. <https://doi.org/10.23932/2542-0240-2019-12-5-177-200>
Nikitina E.N. Climate change in the Arctic: adaptation in response to new challenges. *Outlines of global transformations: politics, economics, law.* 2019;12(5):177–200. (In Russ.). <https://doi.org/10.23932/2542-0240-2019-12-5-177-200>
10. Chircop A., Goerlandt F., Aporta C., Pelot R. (Editors). *Governance of Arctic Shipping: Rethinking Risk, Human Impacts and Regulation.* Springer Polar Sciences; 2020. 319 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-44975-9>
11. Дзись Ю.И. Экологическая повестка дня Арктики: обратимы ли изменения климата? *The Newman in Foreign Policy.* 2021;5(62):8–10.

- Dzis' Yu.I. The Arctic environmental agenda: Is climate change reversible? *The Newman in Foreign Policy*. 2021;5(62):8–10. (In Russ.).
12. Дроздов В.В., Макеев В.М., Глушковская Н.Б., Лисовский А.Я., Аликбирова Р.Р. Изменение климата в Арктике: новые вызовы экономике региона, проблемы, пути решения. *Арктика: инновационные технологии, кадры, туризм*. 2021;1:17–33.
Drozdov V.V., Makeev V.M., Glushkovskaya N.B., Lisovskii A. Ya., Alikbirova R.R. Climate change in the Arctic: new challenges to the region's economy, problems, solutions. *Arktika: innovatsionnye tekhnologii, kadry, turizm*. 2021;1:17–33. (In Russ.).
13. Терентьев Н.Е. О влиянии изменений климата в российской Арктике на перспективы социально-экономического развития и перехода к «зеленому» росту. *Экономика и управление: проблемы, решения*. 2021;1(7):142–147. <https://doi.org/10.36871/ek.up.p.r.2021.07.01.018>
Terent'ev N.E. On the impact of climate change in the Russian Arctic on the prospects for socio-economic development and the transition to “green” growth. *Ekonomika i upravlenie: problemy, resheniya*. 2021;1(7):142–147. (In Russ.). <https://doi.org/10.36871/ek.up.p.r.2021.07.01.018>
14. Сердитова Н.Е. Изменение климата в Арктике: локальное и глобальное воздействие на окружающую среду. *Вестник Тверского государственного университета. Серия: География и геоэкология*. 2020;1:7–16. <https://doi.org/10.26456/2226-7719-1-2020-7-16>
Serditova N.E. Climate change in the Arctic: local and global impacts on the environment. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geografiya i geoekologiya*. 2020;1:7–16. (In Russ.). <https://doi.org/10.26456/2226-7719-1-2020-7-16>
15. Solski J.J. The Northern Sea Route in the 2010s: Development and implementation of relevant law. *Arctic Review on Law and Politics*. 2020;11:383–410. <http://doi.org/10.23865/arctic.v11.2374>
16. Синиченко В.В., Ракитский В.В. Северный морской путь в геополитических планах Китая и позиция России. *Известия Иркутского государственного университета. Серия: Политология. Религиоведение*. 2020;33:50–57. <https://doi.org/10.26516/2073-3380.2020.33.50>
Sinichenko V.V., Rakitskii V.V. The Northern Sea Route in China's geopolitical plans and Russia's position. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Politologiya. Religiovedenie. = The Bulletin of Irkutsk State University*. 2020;33:50–57. (In Russ.). <https://doi.org/10.26516/2073-3380.2020.33.50>
17. Елисеев Д.О., Наумова Ю.В. Моделирование транзитных перевозок по Северному морскому пути в условиях климатических изменений. *Проблемы прогнозирования*. 2021;2:63–74. <https://doi.org/10.47711/0868-6351-185-63-74>
Eliseev D.O., Naumova Yu.V. Modeling of transit transportation along the Northern Sea Route under climate change conditions. *Problemy prognozirovaniya*. 2021;2:63–74. (In Russ.). <https://doi.org/10.47711/0868-6351-185-63-74>
18. Красулина О.Ю. Северный морской путь в условиях растущей торговли и последствий повышения уровня моря. *Экономика. Налоги. Право*. 2021;14(1):91–99. <https://doi.org/26794/1999-849X-2021-14-1-91-99>
Krasulina O.Yu. The Northern Sea Route in the context of growing trade and the consequences of rising sea levels. *Ekonomika. Nalogi. Pravo*. 2021;14(1):91–99. (In Russ.). <https://doi.org/10.26794/1999-849X-2021-14-1-91-99>
19. Ленгарёв А.А. Транзитное судоходство через Северо-западный проход: близкая реальность или утопия? *Транспортное дело России*. 2020;5:131–134.
Lentarev A.A. Transit shipping through the Northwest Passage: a near reality or a utopia? *Transportnoe delo Rossii*. 2020;5:131–134. (In Russ.).
20. Ilin I., Devezas T., Jahn C. (Eds.). *Arctic Maritime Logistics. The Potentials and Challenges of the Northern Sea Route*. Springer Nature Switzerland AG; 2022. 303 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-92291-7>

21. Волков Г.Ю. Перспективы использования Северного морского пути в международной транспортной системе. *Государственное и муниципальное управление. Ученые записки.* 2020;2:117–123. <https://doi.org/10.22394/2079-1690-2020-1-2-117-123>
Volkov G.Yu. Prospects for using the Northern Sea Route in the international transport system. *Gosudarstvennoe i munitsipal'noe upravlenie. Uchenye zapiski.* 2020;2:117–123. (In Russ.). <https://doi.org/10.22394/2079-1690-2020-1-2-117-123>
22. Зайков К.С., Кондратов Н.А., Липина С.А., Бочарова Л.К. Организационные механизмы реализации политики России в Арктике в XXI в. *Арктика и Север.* 2020;39:75–109. <https://doi.org/10.37482/issn2221-2698.2020.39.75>
Zaikov K.S., Kondratov N.A., Lipina S.A., Bocharova L.K. Organizational mechanisms for the implementation of Russia's Arctic policy in the 21st century. *Arktika i Sever.* 2020;39:75–109. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/issn2221-2698.2020.39.75>
23. Вериго С.А., Кудряшов А.Б. Северный морской путь как международный транспортный коридор. *Экономика: вчера, сегодня, завтра.* 2023;13(5A):63–70. <https://doi.org/10.34670/AR.2023.55.21.008>
Verigo S.A., Kudryashov A.B. The Northern Sea Route as an international transport corridor. *Ekonomika: vchera, segodnya, zavtra.* 2023;13(5A):63–70. (In Russ.). <https://doi.org/10.34670/AR.2023.55.21.008>
24. Ершиков Н.В., Черепанов И.В. Северный морской путь — транспортная артерия XXI века. *Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона.* 2023;3:46–57.
Ershikov N.V., Cherepanov I.V. The Northern Sea Route is a transport artery of the 21st century. *Transport Aziatsko-Tikhoookeanskogo regiona.* 2023;3:46–57. (In Russ.).
25. Рогачева В.В., Родионов А.В. Некоторые аспекты развития Северного морского пути в контексте обеспечения экономической безопасности России. *На страже экономики.* 2023;1:90–101. <https://doi.org/10.36511/2588-0071-2023-1-90-101>
Rogacheva V.V., Rodionov A.V. Some aspects of the Northern Sea Route development in the context of economic security of Russia ensuring. *Na strazhe ekonomiki.* 2023;1:90–101. (In Russ.). <https://doi.org/10.36511/2588-0071-2023-1-90-101>
26. Mahmoud M.R., Roushdi M., Aboelkhear M. Potential benefits of climate change on navigation in the northern sea route by 2050. *Scientific Reports.* 2024;14(1):2771. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-53308-5>
27. Wu A., Che T., Xu Q., Wang J., Chen J., Zhu X. Assessing the economic viability of the Arctic Northeast Passage from 2021 to 2065. *International Journal of Digital Earth.* 2024;17(1):2323182. <https://doi.org/10.1080/17538947.2024.2323182>
28. Волкова А.А. Перспективные направления развития транспортно-логистической инфраструктуры Северного морского пути. *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Экономика. Социология. Менеджмент.* 2024;14(1):133–142. <https://doi.org/10.21869/2223-1552-2024-14-1-133-142>
Volkova A.A. Promising directions for the development of transport and logistics infrastructure of the Northern Sea Route. *Proceedings of the Southwest State University. Series: Economics. Sociology. Management.* 2024;14(1):133–142. (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1552-2024-14-1-133-142>
29. Смольянинова Е.Н., Асаёнок Д.Р. Северный морской путь как одно из перспективнейших направлений разворота международного морского хаба на Дальнем Востоке. *Вестник Алтайской академии экономики и права.* 2024;10-1:113–120. <https://doi.org/10.17513/vaael.3784>
Smol'yaninova E.N., Asaenok D.R. The Northern Sea Route as one of the most promising directions for the development of an international maritime hub in the Far East. *Vestnik Altaiskoi akademii ekonomiki i prava.* 2024;10-1:113–120. (In Russ.). <https://doi.org/10.17513/vaael.3784>

30. Александров М.А., Бордученко Ю.Л. Перспективы атомного ледокольного флота по освоению Северного морского пути. *Морской вестник*. 2021;2:17–23.
Aleksandrov M.A., Borduchenko Yu.L. Prospects for the nuclear icebreaker fleet in the development of the Northern Sea Route. *Morskoi vestnik*. 2021;2:17–23. (In Russ.).
31. Chuy S., Ilin I., Jahn C., Devezas T. Northern Sea Route development concept. In: Ilin I., Devezas T., Jahn C. (eds). *Arctic Maritime Logistics. The Potentials and Challenges of the Northern Sea Route*. Switzerland AG: Springer Nature; 2022. P. 1–16. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-92291-7>
32. Natcher D.C., Koivurova T. (eds). *Renewable Economies in the Arctic Series: Routledge Research in Polar Regions*. London: Routledge; 2021. 296 p. <https://doi.org/10.4324/9781003172406>
33. Gunnarsson B., Lasserre F. Supply chain control and strategies to reduce operational risk in Russian extractive industries along the Northern Sea Route. *Arctic Review on Law and Politics*. 2023;14:21–45. <http://doi.org/10.23865/arctic.v14.4052>
34. Ерохин В.Л. Динамика грузоперевозок по Северному морскому пути (2013–2023 гг.). *Маркетинг и логистика*. 2023;6:14–22.
Erokhin V.L Dynamics of cargo transportation along the Northern Sea Route (2013–2023). *Marketing i logistika*. 2023;6:14–22. (In Russ.).
35. Wood-Donnelly C., Bartels M.P. Science diplomacy in the Arctic: Contributions of the USGS to policy discourse and impact on governance. *Polar Record*. 2022;58(e16):1–11. <https://doi.org/10.1017/S0032247422000134>
36. Sánchez E. G., Sorman A.H., Cabello V., Heidenreich S., Klöckner C. (eds). *Strengthening European climate policy: Governance recommendations from innovative interdisciplinary collaborations*. Switzerland: Springer Nature; 2024. 163 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-72055-0>
37. Краснополяский Б.Х., Фуз П. Изменение климата и экологические проблемы Арктики (по итогам Рамочной конференции ООН по изменению климата COP29). *Пространственная экономика*. 2024;20(4):184–188. <https://dx.doi.org/10.14530/se.2024.4.184-188>
Krasnopol'skii B.Kh., Fuz P. Climate change and environmental problems of the Arctic (based on the results of the UN Framework Conference on Climate Change COP29). *Prostranstvennaya Ekonomika = Spatial Economics*. 2024;20(4):184–188. (In Russ.). <https://dx.doi.org/10.14530/se.2024.4.184-188>
38. Ibarguch G., Rajdev V., Murray M.S. Are current research funding structures sufficient to address rapid Arctic change in a meaningful way? *Polar Research*. 2018;37(1):1–7. <https://doi.org/10.1080/17518369.2018.1540242>
39. Jones N., Sullivan J. P. Climate change and global security. *Journal of Strategic Security*. 2020;13(4):i–iv. <https://doi.org/10.5038/1944-0472.13.4.1899>
40. Гавриленко В.А., Головейко И.В., Уткин Н.И. Актуальные вопросы теории и практики правового регулирования политики Арктических государств в Арктическом регионе. *Юридический вестник Самарского университета*. 2024;10(3):80–88. <https://doi.org/10.18287/2542-047X-2024-10-3-80-88>
Gavrilenko V.A., Goloveiko I.V., Utkin N.I. Current issues of theory and practice of legal regulation of the policy of the Arctic states in the Arctic region. *Juridical Journal of Samara University*. 2024;10(3):80–88. (In Russ.). <https://doi.org/10.18287/2542-047X-2024-10-3-80-88>
41. Lajeunesse A., Huebert R. Preparing for the next Arctic sovereignty crisis: The Northwest Passage in the age of Donald Trump. *International Journal*. 2019;74(2):225–239. <https://doi.org/10.1177/0020702019849641>
42. Sella N. The changes of United States foreign policy in the Arctic in 2022. *International Journal of Humanities Education and Social Sciences (IJHES)*. 2024;4(1):297–308. <https://doi.org/10.55227/ijhess.v4i1.1136>
43. Артамонов В.С. Мусиенко Т.В. Углеводороды как основа и условие арктического сотрудничества России и Китая. *Юридическая наука: история и современность*. 2023;3:178–185.

- Artamonov V.S. Musienko T.V. Hydrocarbons as the basis and condition for Arctic cooperation between Russia and China. *Yuridicheskaya nauka: istoriya i sovremennost'*. 2023;3:178–185. (In Russ.).
44. Зиннатуллин Д.А. Сравнительный анализ политики Китая и Индии в Арктике на современном этапе. *Арктика XXI век*. 2024;1:78–95. <https://doi.org/10.25587/2310-5453-2024-1-78-95>
- Zinnatullin D.A. Comparative analysis of China and India's policy in the Arctic at the present stage. *Arctic XXI Century*. 2024;1:78–95. (In Russ.). <https://doi.org/10.25587/2310-5453-2024-1-78-95>
45. Веселова Д.Н. Сотрудничество России и Индии в Арктической зоне Российской Федерации. *Управленческое консультирование*. 2024;5:208–227. <https://doi.org/10.22394/1726-1139-2024-5-208-227>
- Veselova D.N. Cooperation between Russia and India in the Arctic zone of the Russian Federation. *Administrative Consulting*. 2024;5:208–227. (In Russ.). <https://doi.org/10.22394/1726-1139-2024-5-208-227>
46. Ringbot H. The European Union and Arctic shipping. In: Liu N., Kirk E.A., Henriksen T. (eds.). *The European Union and the Arctic*. Leiden: Brill; 2017. P. 239–273. <http://www.jstor.org/stable/10.1163/j.ctt1w8h3gv>
47. Lebel J., Nilsson A.E. EU engagement in the Arctic: Challenges to achieving ambitions in an area outside its jurisdiction. *Arctic Review on Law and Politics*. 2024;15:47–71. <http://doi.org/10.23865/arctic.v15.6271>
48. Dams T., van Schaik L. *The Arctic elephant: Why Europe must address the geopolitics of the high north*. Netherlands: Clingendael Institute; 2019. [Electronic resource]. <https://www.jstor.org/stable/resrep21334> (accessed: 24.04.2025).
49. Володин Д.А. Претензии Канады на континентальный шельф в Арктике. *США и Канада: экономика, политика, культура*. 2023;9: 46–60. <https://doi.org/10.31857/S2686673023090043>
- Volodin D.A. Canada's claim to the continental shelf in the Arctic. *USA & Canada: economics, politics, culture*. 2023;9:46–60. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S2686673023090043>
50. Шитиков В.Д., Гусейнов Г.М., Чирков А.Д. Сравнительно-правовой анализ особенностей правового статуса Северного морского пути и Северо-Западного прохода. *Вопросы российского и международного права*. 2019;9(4А):108–114.
- Shitikov V.D., Guseinov G.M., Chirkov A.D. Comparative legal analysis of the peculiarities of the legal status of the Northern Sea Route and the Northwest Passage. *Matters of Russian and International Law*. 2019;9(4A):108–114. (In Russ.).
51. Jacobsen M., Olsvig S. From Peary to Pompeo The History of United States' securitizations of Greenland. In: Jacobsen M., Waever O., Gad U.P. (eds.). *Greenland in Arctic Security: (De) securitization Dynamics under Climatic Thaw and Geopolitical Freeze*. Michigan: University of Michigan Press; 2024. P. 107–148. <http://www.jstor.org/stable/10.3998/mpub.12676130.1>
52. Гриняев С.Н. О позиции Гренландии в канун перехода председательства в Арктическом совете к Дании. *Аналитические записки Института Европы РАН*. 2025;1(369):5–9. <http://doi.org/10.15211/analytics1120250509>
- Grinyaev S.N. On position of Greenland on the eve of Danish presidency in the Arctic Council. *Analytical papers of the Institute of Europe RAS*. 2025;1(369):5–9. (In Russ.). <https://doi.org/10.15211/analytics1120250509>
53. Wood-Donnelly C. Responsibility of and for Structural (In)Justice in Arctic Governance. In: Wood-Donnelly C., Ohlsson J. (eds.). *Arctic Justice. Environment, Society and Governance*. Bristol: Bristol University Press; 2023. P. 21–35.
54. Журавель В.П. «Заморозка» арктического председательства России. *Современная Европа*. 2023;6:5–15. <https://doi.org/10.31857/S0201708323060013>
- Zhuravel' V.P. Freezing of Russia's Arctic chairmanship. *Sovremennaya Evropa = Contemporary Europe*. 2023;6:5–15. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0201708323060013>

Подписано в печать 30.06.2025
Формат 70×100 1/16
Тираж 85

Печать цифровая
Печ. л. 9,25
Заказ №

ООО «Тверская фабрика печати»,
170006, Россия, г. Тверь, Беляковский переулок, д. 46, пом. 25.

Signed to print 30.06.2025
Format 70×100 1/16
Edition 85

Digital Printing
P. s. 9,25
Order No

LLC “Tver Printing Factory”,
170006, Russia, Tver, Belyakovsky lane, 46, office 25.