

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, № 1, 2025

ARCTIC AND ANTARCTIC RESEARCH

Volume 71, No. 1, 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

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

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

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

Околюдов 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, Чанчунь, Китай

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

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

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

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

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

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

Префикс DOI: 10.30758

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

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

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи и массовых коммуникаций:

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

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

Адрес учредителя и издателя:

199397 Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38.

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

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт.

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

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

© ГНЦ РФ ААНИИ, 2025

© Росгидромет, 2025

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 № ФЦ 77-73644 of September 7, 2018.

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

Contacts:

199397 Saint Petersburg, Bering str, 38; 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

© Roshydromet, 2025

The Journal is not marked with the Information Product label

Содержание

ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ГИДРОСФЕРЫ

Features of small-scale artificial irregularities in the high latitude ionospheric F-region from remote sensing observations	6
<i>I.M. Egorov, N.F. Blagoveshchenskaya, A.S. Kalishin, T.D. Borisova, G.A. Zagorskiy</i>	

ГИДРОЛОГИЯ СУШИ И ГИДРОХИМИЯ

Испарение со снежного покрова на арх. Шпицберген в весенний период	17
<i>И.И. Василевич, И.Л. Калюжный, А.С. Масловский</i>	

ГЕОМОРФОЛОГИЯ И ЭВОЛЮЦИОННАЯ ГЕОГРАФИЯ

Голоценовые колебания относительного уровня Ладожского озера в районе Тайпаловского залива.....	32
<i>А.О. Аксенов, Д.Ю. Большиянов, С.А. Правкин, Г.Б. Лебедев</i>	

ЛЕДОТЕХНИКА

Модернизированный комплекс ледовых бассейнов ФГБУ «ААНИИ». К 35-летию со дня ввода в строй	46
<i>П.В. Пацева, А.В. Савицкая, Н.А. Крупина, А.В. Чернов, И.А. Свистунов, В.А. Лихоманов</i>	

Об определении эффективного давления сжатия льда по данным натурных измерений параметров движения судов	63
<i>К.Е. Сазонов, А.А. Добродеев</i>	

ГЕОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА

Натурное моделирование георадиолокационного зондирования дна р. Колымы для поиска костных остатков животных мамонтовой фауны	74
<i>И.В. Горохов, И.И. Христофоров, К.П. Данилов, Е.С. Петухова</i>	

СТРАНИЦЫ ИСТОРИИ

История и проблемы формирования зеленой инфраструктуры городов, расположенных в криолитозоне Западной и Центральной Сибири.....	87
<i>Р.Ю. Федоров</i>	

Contents

ATMOSPHERE AND HYDROSPHERE PHYSICS

Features of small-scale artificial irregularities in the high latitude ionospheric F-region from remote sensing observations	6
<i>I.M. Egorov, N.F. Blagoveshchenskaya, A.S. Kalishin, T.D. Borisova, G.A. Zagorskiy</i>	

HYDROLOGY OF LAND AND HYDROCHEMISTRY

Snow cover sublimation on the Svalbard during spring	17
<i>I.I. Vasilevich, I.L. Kalyuzhny, A.S. Maslovskii</i>	

GEOMORPHOLOGY AND EVOLUTIONARY GEOGRAPHY

Holocene relative level fluctuations of Lake Ladoga in the Taipalovskii Bay area	32
<i>A.O. Aksenov, D.Yu. Bolshiyarov, S.A. Pravkin, G.B. Lebedev</i>	

ICE TECHNOLOGY

Modernized complex of FSBI “AARI” ice tanks.	
On the 35 th anniversary of its commissioning	46
<i>P.V. Patseva, A.V. Savitskaya, N.A. Krupina, A.V. Chernov, I.A. Svistunov, V.A. Likhomanov</i>	
Determining effective pressure in ice compressions based on full-scale measurements of ship motion parameters	63
<i>K.E. Sazonov, A.A. Dobrodeev</i>	

GEOLOGY AND GEOPHYSICS

Full-scale modelling of GPR sounding of Kolyma River bottom in searching for bone remains of mammoth fauna animals	74
<i>I.V. Gorokhov, I.I. Khristoforov, K.P. Danilov, E.S. Petukhova</i>	

PAGES OF HISTORY

The history and problems of developing the green infrastructure of cities located in the cryolithic zone of Western and Central Siberia	87
<i>R.Yu. Fedorov</i>	

ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ГИДРОСФЕРЫ ATMOSPHERE AND HYDROSPHERE PHYSICS

Оригинальная статья / Original paper

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-1-6-16>

УДК 533.951



Features of small-scale artificial irregularities in the high latitude ionospheric F-region from remote sensing observations

Ivan M. Egorov[✉], Nataly F. Blagoveshchenskaya, Aleksey S. Kalishin,
Tatiana D. Borisova, Gleb A. Zagorskiy

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

[✉]imegorov@aari.ru

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

Abstract. Powerful HF radio waves interacting with the ionosphere accelerate or heat electrons, pushing the ionospheric plasma out of equilibrium and leading to the creation of various non-linear phenomena. One of the most prominent phenomena discovered from HF heating experiments is the generation of small-scale artificial field-aligned irregularities (AFAI). AFAI induce bi-static scattering of HF and VHF signals, providing their propagation in the frequency range and over distances unattainable in the natural ionosphere. This makes it possible to create HF-driven radio communication channels. We present results from an EISCAT/Heating (Tromsø, Norway) experiment on 18 February 2013, concerning the features and behaviors of AFAI in the high latitude ionospheric F-region induced by high power HF radio waves with O- and X-mode polarization using the bi-static scatter method. Joint use of various remote diagnostics tools, including the multichannel HF Doppler equipment, oblique sounding and the CUTLUSS backscatter radar provides a more comprehensive and complete AFAI study, including the size of the artificially disturbed region occupied with AFAI, the frequency band of bi-static scatter signals (BSS), the fine structure of BSS, the intensity, growth and decay times of AFAI. It has been found that O- and X-mode AFAI have different characteristics and generation mechanisms.

Keywords: high latitude ionosphere, remote sensing, artificial field-aligned irregularities, powerful HF radio wave, heating facility, bi-static radio scatter

© Авторы, 2025

© Authors, 2025

For citation: Egorov I.M., Blagoveshchenskaya N.F., Kalishin A.S., Borisova T.D., Zagorskiy G.A. Features of small-scale artificial irregularities in the high latitude ionospheric F-region from remote sensing observations. *Arctic and Antarctic Research*. 2025;71(1):6–16. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-1-6-16>

Received 09.10.2024

Revised 15.11.2024

Accepted 18.11.2024

Introduction

The diagnostics and forecasting of phenomena occurring in near-Earth space and produced by solar-terrestrial connections is becoming an increasingly urgent task since automatic spacecraft operate there and astronauts work at manned space stations. In addition, the ionosphere is a medium that influences radio wave propagation, thereby affecting the performance of radio communication, navigation and telecommunications systems. One of the methods for studying the ionosphere is to radiate into it powerful HF radio waves using special high-power ground-based HF radio transmitters, so-called HF heating facilities. Powerful HF radio waves interacting with the ionosphere accelerate or heat electrons, pushing the ionospheric plasma out of equilibrium. Investigations of the artificially disturbed local region of the ionosphere that arises in this case are of considerable interest to scientists due to the possibility of studying the physical features of variations in ionospheric parameters that are not fully understood today compared with their observations in natural conditions. The interaction of high-power HF radio waves with the ionosphere leads to a variety of non-linear phenomena in the ionosphere that can be studied on a controlled and repeatable basis.

One of the most prominent phenomena discovered from HF heating experiments is the generation of small-scale artificial field-aligned irregularities (AFAI), which were profitably investigated at all HF heating facilities in the world [1–4]. AFAI induce bi-static scattering of short-wave and ultra-short-wave (HF and VHF) signals, providing their propagation in the frequency range and at ranges unattainable in the natural ionosphere. This makes it possible to create HF-driven radio communication channels.

The modification of the ionospheric F-region by powerful HF radio waves is commonly produced by using ordinary (O-mode) polarized radio waves. In this case, radio waves effectively interact with ionosphere plasma of F2 layer at altitudes between the upper hybrid resonance and the HF wave's reflection point. This leads to thermal parametric (resonance) instability excitation, which, in turn, leads to the generation of AFAI [2, 3].

It is well known that the ordinary mode of the HF radio wave reflects from the ionosphere at an altitude where the plasma frequency f_o is equal to the frequency of the HF radio wave f_H , $f_o^2 = f_H^2$.

The extraordinary (X-mode) HF radio wave reflects from the ionosphere at the point where the local plasma frequency is determined as $f_o^2 = f_H(f_H - f_{ce})$, where f_{ce} is the electron gyro frequency. Hence, the extraordinary mode wave reflection point is lower than the height of the upper hybrid resonance and the height of the ordinary wave reflection point. Accordingly, the extraordinary polarized (X-mode) high power HF radio wave is not able to cause AFAI generation via thermal parametric (resonance) instability.

However, the results of recent experiments at the EISCAT (European Incoherent Scatter Scientific Association) HF heating facility have conclusively demonstrated that the X-mode HF pump wave is also able to excite AFAI in the ionospheric F-region [5–7].

In this article, we present comparative results of AFAI features and behaviors induced by O- and X-mode high power HF radio waves (HF pump waves) by the bi-static scatter method using multichannel HF Doppler equipment, oblique sounding and CUTLUSS backscatter radar observations.

Experiment

The experiment was carried out on 18 February 2013 at evening hours in quiet magnetic conditions. The modification of the high latitude ionospheric F-region was produced by the HF heating facility (EISCAT/Heating) placed in Tromsø, Norway (69.58° N; 19.21° E) [8]. The high power O- or X-polarized HF radio wave was radiated in the field-aligned direction, or towards the magnetic zenith (the HF heater beam was tilted by 12° south of the vertical) at a frequency of $f_H = 4544$ kHz. HF pumping was done in the CW mode by cycles of 10 minutes “ON” and 5 minutes “OFF”. For radiation, phased array antenna number 2 was used with a pattern width of about 12–14° at — 3 dB level. The effective radiated power (ERP) was about 190 MW. In the course of the O-mode HF pumping, the heater frequency f_H was close to the critical frequency of the F2 layer f_{OF2} ($f_H \approx f_{OF2}$), while the X-mode pumping was done when $f_H > f_{OF2}$.

For remote sensing of HF-induced phenomena in the ionospheric F-region by the bi-static scatter method, multichannel HF Doppler equipment was used. It was installed at the AARI Gorkovskaya (GRK) Observatory near St. Petersburg, located at a distance of about 1,200 km away from the HF Heating facility at Tromsø. As diagnostic transmitters, the world HF AM broadcasting stations at Issoudun (France) and Vatican City, operated at frequencies of 15,180 kHz and 15,535 kHz respectively, were used. The AARI’s mobile multichannel HF Doppler equipment was also installed at the Roshydromet station at Lovosero (LOZ) in the Murmansk region (68.00° N; 35.02° E). The distance between the EISCAT/Heating facility and the LOZ station is 660 km [9].

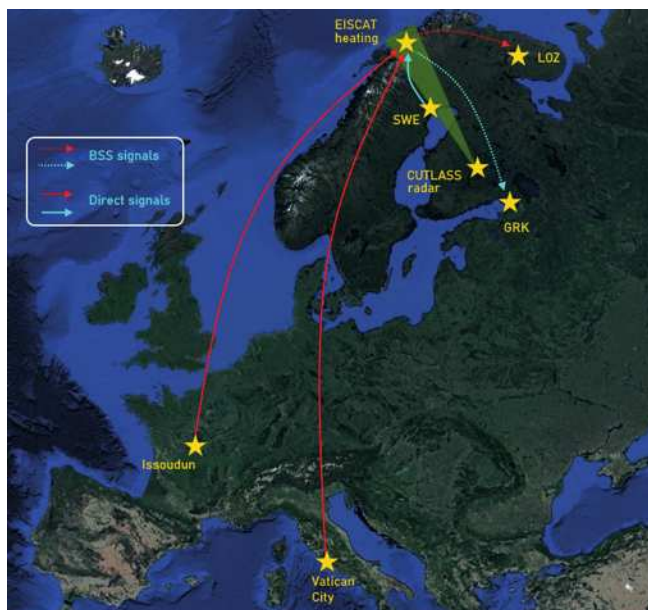


Fig. 1. The geometry of the experiment on 18 February 2013 with the use of the EISCAT HF heating facility, the CUTLASS HF coherent radar, an oblique sounder on the Sweden — Tromsø — St. Petersburg radio path and AM HF broadcasting stations with receivers at GRK and LOZ stations

Рис. 1. Геометрия эксперимента 18 февраля 2013 г. с использованием нагревного стенда EISCAT, КВ радара CUTLASS, трассы наклонного ионозонда Швеция — Тромсё — Санкт-Петербург и КВ вещательных станций с приемниками на станциях «Горьковская» и «Ловозеро»

The CUTLASS (Collaborative UK Twin Located Auroral Sounding System) HF coherent radar [10], located at Hankasalmi, Finland (62.31° N; 26.61° E), was also utilized for AFAI diagnostics by the backscatter method. It is about 1,000 km to the south of the Tromsø EISCAT/heating facility. The CUTLASS radar runs in a stereo mode with range resolution of 15 km and temporal resolution of 3 s. Beam 5 was chosen with a narrow pattern of about 3.3° directed to the artificially disturbed region over Tromsø. The measurements were made simultaneously at frequencies of 9.9–10 MHz and 13.2–13.3 MHz. This allowed us to investigate AFAI behavior and features with a size across the geomagnetic field of $l_{\perp} \sim 15$ m and $l_{\perp} \sim 11,1$ m ($l_{\perp} = c/2f$, where f is the CUTLUSS radar operating frequency, c is the velocity of light). The choice and control of the heater frequencies were made in accordance with the Tromsø Ionosonde.

Apart from that, an automatic chirp ionospheric oblique sounder with linear frequency modulation (LFM) [11] ran on the Sweden — St. Petersburg radio path to receive the signals scattered from the AFAI. The LFM signals were received from Sweden (65.82° N; 21.70° E). The transmitter power was about 200 W. The reception point of the oblique sounder was located at the AARI Gorkovskaya Observatory. Oblique ionograms provide information concerning the regular propagation modes on the Sweden — St. Petersburg direct path. In the course of the experiment, signals scattered by the AFAI on the Sweden — Tromsø — St. Petersburg path were also observed on the ionograms.

Thus, in the course of the experiment on 18 February 2013, three different methods of AFAI diagnostics were utilized to provide different data sets related to the AFAI features and behaviors. The geometry of the experiment is shown in Fig. 1.

Results and discussion

The bi-static signals scattered from the AFAI (BSS) were recorded by multichannel HF Doppler equipment. On the dynamic Doppler spectra, they appeared as additional spectral components (scattered signals) shifted by a frequency to a positive or a negative range relative to the “zero” frequency, corresponding the HF signal carrier, which propagates along the great circle path (a direct signal). The additional spectral components appeared in the heater-on cycles and disappeared when the HF pumping was switched off. The value and the sign of the Doppler frequency shift is determined by the AFAI velocity vector in the artificially disturbed region.

Fig. 2 presents the dynamic Doppler spectra taken in the course of alternating O/X-mode HF pumping towards the magnetic zenith (MZ) at $f_H = 4544$ kHz on 18 February 2013. As seen in Fig. 2, the AFAI behavior differed during the O- and X-mode heating cycles. In the course of the O-mode HF pumping, the BSS were registered almost simultaneously with the heating facility turned-on and disappeared just after the heating was turned-off (see Fig. 2, left panel). By contrast, on X-mode cycles the AFAI growth time was about 1 min in the first cycle from the “cold” start and the decay reached a few minutes through the whole 5 min pause between the heater-on cycles (see Fig.2 right panel). In both cases, signals scattered by the AFAI with a size across the geomagnetic field of $l_{\perp} \sim 10$ m occurred.

Fig. 3 presents the CUTLUSS radar data received on the same day on 18 February 2013 from 14:30 to 18:00 UT with O- and X-mode HF pumping towards the magnetic zenith (MZ). It is important to emphasize that the size of the artificially perturbed region occupied by the AFAI was much larger when observed with O-heating than with X-heating. As seen from Fig. 3, under O-mode HF heating it reached an extension of 120–150 km (8–10 gates between 28–38 range gates), while the size of the perturbed region with X-mode the

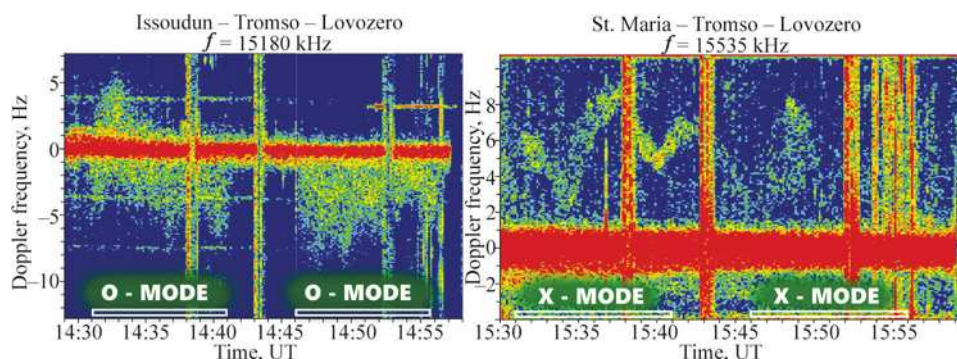


Fig. 2. BSS received on Issoudun — Tromsø — Lovozero and Vatican City — Tromsø — Lovozero radio paths during the alternative O/X-mode HF heating experiment on 18 February 2013. The HF pump wave radiated towards the magnetic zenith at frequency $f_H = 4544$ kHz by cycles 10 min on, 5 min off. The effective radiated power was ERP ~190 MW. The pump cycles and polarization are marked on the time axis

Рис. 2. Ракурсно-рассеянные сигналы на радиотрассах Исудён — Тромсё — Ловозеро и Ватикан — Тромсё — Ловозеро во время О-/Х-нагрева 18 февраля 2013 г. Мощная КВ радиоволна излучалась в направлении магнитного зенита на частоте $f_H = 4544$ кГц циклами 10 минут нагрев и 5 минут пауза. Эффективная мощность излучения ERP ~190 МВт. Циклы нагрева и моды поляризации указаны на временных осях

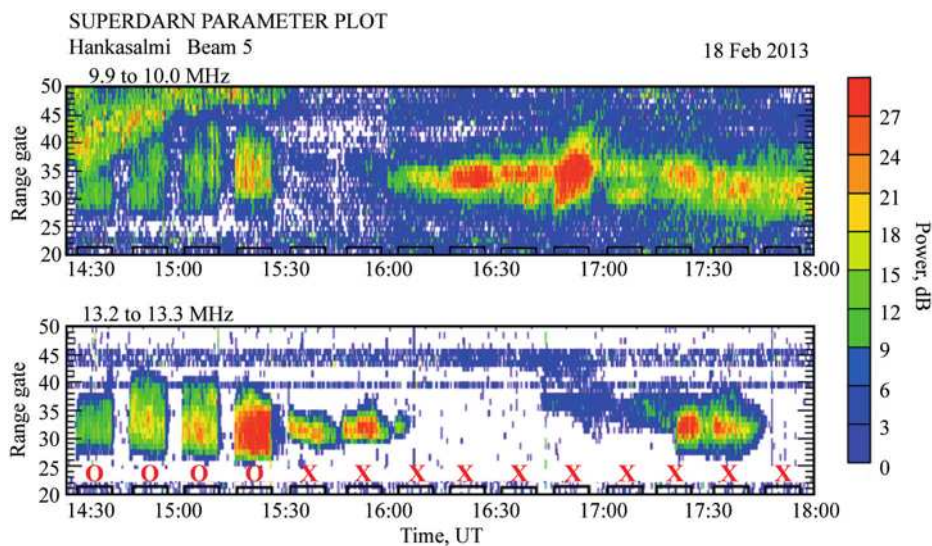


Fig. 3. CUTLASS radar data (beam 5) at frequencies of about 10 and 13 MHz during the alternative O/X-mode HF heating experiment on 18 February 2013. The HF pump wave radiated towards the magnetic zenith at frequency $f_H = 4544$ kHz by cycles 10 min on, 5 min off. The effective radiated power was ERP ~190 MW. The pump cycles and polarization are marked on the time axis

Рис. 3. Данные радара CUTLASS (луч 5) на частотах около 10 и 13 МГц во время О-/Х-нагрева 18 февраля 2013 г. Мощная КВ радиоволна излучалась в направлении магнитного зенита на частоте $f_H = 4544$ кГц циклами 10 минут нагрев и 5 минут пауза. Эффективная мощность излучения ERP ~190 МВт. Циклы нагрева и моды поляризации указаны на временных осях

AFAI was only 60–105 km (4–7 gates between 28–35 range gates) from the CUTLASS measurements. The AFAI growth and decay times significantly differ for O- and X-mode HF pumping. The characteristic feature of the AFAI behavior upon X-mode heating is a large decay time that exceeds pauses between heater-on cycles (~5 min). Thus, the back scattered signals are continuously received, with the intensity increasing during the heater-on cycles.

The effects produced by the O- and X-mode HF pumping in the high-latitude ionospheric F-region, from the oblique ionograms on the Sweden — Tromsø — St. Petersburg radio path are demonstrated in Fig. 4. They are displayed as an additional track with the group delay time of scattered signals relatively to the regular propagation modes. This difference in the group delay time is caused by the different propagation lengths from the transmitter to the receiver for direct signals, propagating along the great circle path and signals scattered by the AFAI, generated above Tromsø, which propagated on the Sweden — Tromsø — St. Petersburg path. The duration of one oblique transmitting session was 2 minutes. Both oblique ionograms were recorded at the beginning of the turn-on cycles. The left ionogram was taken at the beginning of the O-mode heater-on cycle at 14:31 UT. The right ionogram was recorded at the beginning of the X-mode heater-on cycle at 16:46 UT. As seen in Fig. 4, BSS upon O-mode heating were registered in the frequency band between 10 and 15 MHz. It corresponds to the AFAI size across the geomagnetic field from $l_{\perp} \sim 10$ m to $l_{\perp} \sim 15$ m. Upon X-mode HF pumping the AFAI size was larger as compared with the O-mode heating. BSS were registered in the frequency band between 9 and 11.5 MHz, which corresponds to the size of the AFAI across the geomagnetic field from $l_{\perp} \sim 13$ m to $l_{\perp} \sim 17$ m. Despite the fact that the AFAI were generated both during O- and X-mode heating, the power of the X-mode AFAI observed at $f_H > f_{OF2}$ was ~6–9 dB

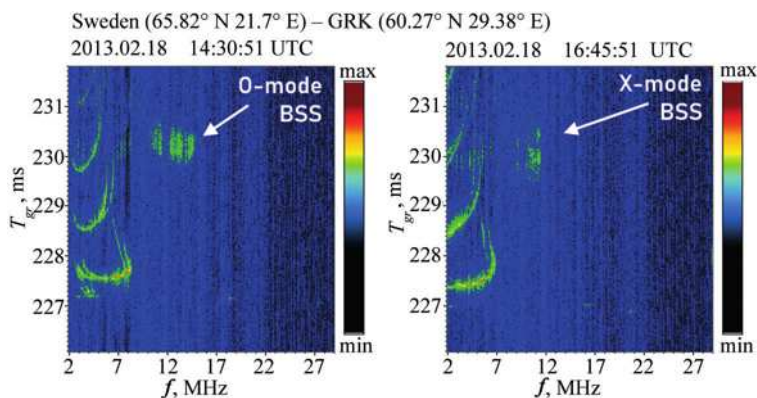


Fig. 4. The oblique ionograms with signals scattered from the AFAI on the Sweden — Tromsø — St. Petersburg radio path during the O- and X-mode HF pumping on 18 February 2013. The HF pump wave radiated towards the magnetic zenith at frequency $f_H = 4544$ kHz by cycles 10 min on, 5 min off. The effective radiated power was ERP ~190 MW. The BSS signals are marked with arrows

Рис. 4. Ионограммы наклонного зондирования ионосферы с сигналами, рассеянными от мелкомасштабных искусственных неоднородностей на радиотрассе Швеция — Тромсё — Санкт-Петербург во время О-/Х-нагрева 18 февраля 2013 г. Мощная КВ радиоволна излучалась в направлении магнитного зенита на частоте $f_H = 4544$ кГц циклами 10 минут нагрев и 5 минут пауза. Эффективная мощность излучения ERP ~190 МВт. Ракурсно-рассеянные сигналы указаны стрелками

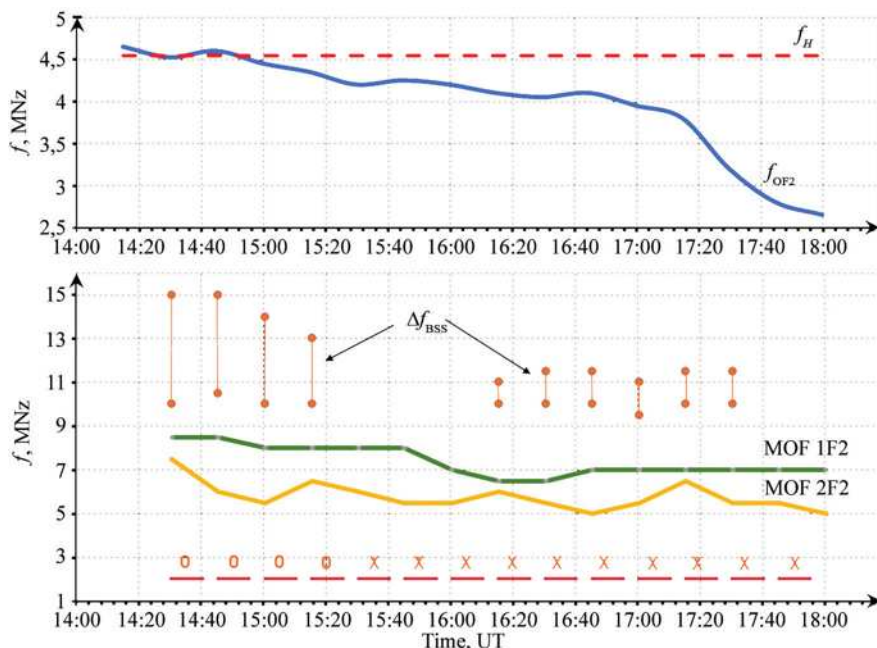


Fig. 5. The behavior in time of the critical frequency of the F2 layer (f_{OF2}), and the heater frequency f_H (top panel) and the maximum observable frequencies with one and two reflections from the F2 layer (modes MOF 1F2 and MOF 2F2) and the frequency band, in which the AFAI are generated (Δf_{BSS}) (bottom panel), in the course of the EISCAT Heating experiment on 18 February 2013

Рис. 5. Ход критических частот F2 слоя ионосферы (f_{OF2}) и частота нагревного комплекса f_H (верхний график), максимально наблюдаемые частоты однократного и двукратного отражения от F2 слоя ионосферы (моды MOF 1F2 и MOF 2F2) и частотный диапазон, в котором появлялись мелкомасштабные ионосферные искусственные неоднородности (Δf_{BSS}) (нижний график), в ходе нагревного эксперимента на стенде EISCAT 18 февраля 2013 г.

lower compared to the O-mode AFAI with the conditions of $f_H = f_{OF2}$. It is important to note that during the experiment the critical frequency of the F2-layer (f_{OF2}) dropped from 4.6 to about 2.5 MHz (see Fig. 5).

It was found that the X-mode AFAI are generated under quiet conditions (no precipitation of particles, longitudinal currents, or electrojet), when the HF pump is radiated towards MZ at frequencies that are both lower and much higher (up to 2 MHz) than the critical frequency of the F2 layer.

The features and physical driving mechanisms of AFAI are significantly different for O- and X-mode HF pumping, presenting challenges for understanding the relevant processes. It is well known that O-mode AFAI are excited at the pump frequencies of $f_H \leq f_{OF2}$ through the thermal (resonance) parametric instability [12, 13]. What is the origin of X-mode AFAI? The results from the EISCAT incoherent scatter radar (ISR) measurements have demonstrated that the emergence of strong Ne ducts with field-aligned electron density enhancements observed in a wide altitude range from 280–300 km up to about 600 km is a typical phenomenon for X-mode pulses [14]. In the course of O-mode pulses Ne enhancements did not usually occur. Note that Ne ducts induced by X-mode HF pumping were created at pump frequencies both below and above the f_{OF2} . Moreover, it was found

that the extent of the patch occupied by X-mode AFAI corresponded to the transverse size of the Ne duct [15]. The results obtained give grounds for believing that the Ne duct gives rise to X-mode AFAI. Strong horizontal gradients in the electron density exist on the boundaries of the Ne duct. The gradient drift instability can be excited on electron density gradients in the presence of the electric field of the X-mode HF pump wave, producing a wide spectrum of irregularities [16].

Summary

The paper presents results of research and comparison of AFAI features and behavior upon O- and X-mode HF heating in the high latitude F-region of the ionosphere using different diagnostic tools and methods. They include the following: the bi-static scatter method using HF multichannel Doppler equipment and an oblique sounder and the backscatter method of the coherent CUTLASS (SuperDARN) radar.

The joint use of various remote diagnostics tools provides a more comprehensive and complete study of the behavior and characteristics of the AFAI induced by the O- and X-mode HF pumping in the high-latitude F-region of the ionosphere, including the size of the artificially disturbed region occupied with the AFAI, the frequency band of BSS signals, the fine structure of BSS, the intensity, growth and decay times. It was shown that O- and X-mode AFAI have different characteristics and generation mechanisms.

It was found that X-mode AFAI are generated under quiet conditions, when the HF pump wave was radiated towards MZ at frequencies that are both below and above (up to 2 MHz) the critical frequency of the F2 layer. The results obtained give grounds for believing that the strong horizontal gradients in the electron density on the boundaries of the Ne duct in the presence of the electric field of the X-mode HF pump wave give rise to the excitation of gradient drift instability, producing a wide spectrum of irregularities.

Competing interests. No conflict of interest involved.

Funding. This work was supported by the Russian Science Foundation, project no. 22-17-00020.

Acknowledgments. The authors express their gratitude to EISCAT, which is an international scientific association supported by research organizations in China (CRIRP), Finland (SA), Japan (NIPR and STEL), Norway (NFR), Sweden (VR), and the United Kingdom (NERC). The authors are thankful to prof. T. Yeoman for the CUTLASS radar data provided.

Конфликт интересов. Конфликт интересов отсутствует.

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-17-00020.

Благодарности. Авторы благодарят международную научную ассоциацию EISCAT, которая поддерживается научными организациями Китая (CRIRP), Финляндии (SA), Японии (NIPR и STEL), Норвегии (NFR), Швеции (VR) и Великобритании (NERC). Авторы благодарны проф. Т. Йоману за предоставленную CUTLASS информацию.

REFERENCES

1. Erukhimov L.M., Metevlev S.A., Myasnikov E.N., Mityakov N.A., Frolov V.L. Artificial ionospheric turbulence (review). *Radiophysics and Quantum Electronics*. 1987;30(2):156–171. <https://doi.org/10.1007/bf01034489>
2. Robinson T.R. The heating of the high latitude ionosphere by high power radio waves. *Physics Reports*. 1989;179(2–3):79–209. [https://doi.org/10.1016/0370-1573\(89\)90005-7](https://doi.org/10.1016/0370-1573(89)90005-7)

3. Gurevich A.V. Nonlinear effects in the ionosphere. *Physics–Uspekhi*. 2007;50(11):1091–1121. <https://doi.org/10.1070/pu2007v050n11abeh006212>
4. Frolov V.L., Bakhmet'eva N.V., Belikov V.V., Vertogradov G.G., Vertogradov V.G., Komrakov G.P., Kotik D.S., Mityakov N.A., Polyakov S.V., Rapoport V.O., Sergeev E.N., Tereshchenko E.D., Tolmacheva A.V., Uryadov V.P., Khudukon B.Z. Modification of the earth's ionosphere by high-power high-frequency radio waves. *Physics–Uspekhi*. 2007;50:315–324. <https://doi.org/10.1070/pu2007v050n03abeh006282>
5. Blagoveshchenskaya N.F., Borisova T.D., Yeoman T., Rietveld M.T., Ivanova I.M., Baddeley L.J. Artificial field-aligned irregularities in the high-latitude F region of the ionosphere induced by an X-mode HF heater wave. *Geophysical Research Letters*. 2011;38(L08802). <https://doi.org/10.1029/2011GL046724>
6. Blagoveshchenskaya N.F., Borisova T.D., Yeoman T.K., Rietveld M.T. The effects of modification of a high-latitude ionosphere by high-power HF radio waves. Part 1. Results of multi-instrument ground-based observations. *Radiophysics and Quantum Electronics*. 2011;53(9–10):512–531. <https://doi.org/10.1007/s11141-011-9247-y>
7. Blagoveshchenskaya N.F., Borisova T.D., Yeoman T.K., Häggström I., Kalishin A.S. Modification of the high latitude ionosphere F region by X-mode powerful HF radio waves: Experimental results from multi-instrument diagnostics. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2015;135:50–63. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2015.10.009>
8. Rietveld M.T., Senior A., Markkanen J., Westman A. New capabilities of the upgraded EISCAT high-power HF facility. *Radio Science*. 2016;51(9):1533–1546. <https://doi.org/10.1002/2016RS006093>
9. Kalishin A.S., Blagoveshchenskaya N.F., Borisova T.D., Rogov D.D. Remote diagnostics of effects induced by high-latitude heating facilities. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2021;46:231–240. <https://doi.org/10.3103/S1068373921040038>
10. Lester M., Chapman P.J., Cowley S.W.H., Crooks S.J., Davies J.A., Hamadyk P., Barnes R.J. Stereo CUTLASS — A new capability for the SuperDARN HF radars. *Annales Geophysicae*. 2004;22(2):459–473. <https://doi.org/10.5194/angeo-22-459-2004>
11. Rogov D.D., Blagoveshchenskaya N.F., Yeoman T.K. Features of artificial ionospheric irregularities induced by powerful HF radio waves from bi-static scatter measurements. *Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW)*. 2019:80–83. <https://doi.org/10.1109/RSEMW.2019.8792727>
12. Grach S.M., Trakhtengerts V.Y. Parametric excitation of ionospheric irregularities extended along the magnetic field. *Radiophysics and Quantum Electronics*. 1975;18:951–957. <https://doi.org/10.1007/BF01038190>
13. Vas'kov V.V., Gurevich A.V. Nonlinear resonant instability of a plasma in the field of an ordinary electromagnetic wave. *Soviet Physics JETP*. 1976;42:91–97.
14. Blagoveshchenskaya N.F., Borisova T.D., Kalishin A.S., Egorov I.M., Zagorskiy G.A. Disturbances of electron density in the high latitude upper (F-region) ionosphere induced by X-mode HF pump waves from EISCAT UHF radar observations. *Arctic and Antarctic Research*. 2022;68(3):248–257. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-3-248-257>
15. Blagoveshchenskaya N.F., Borisova T.D., Kalishin A.S., Egorov I.M. Artificial ducts created via high-power HF radio waves at EISCAT. *Remote Sensing*. 2023;15 (9):2300. <https://doi.org/10.3390/rs15092300>
16. Guzdar P. N., Goncharenko N. A., Chaturvedi P. K., Basu, S. Three dimensional nonlinear simulations of the gradient drift instability in the high-latitude ionosphere. *Radio Science*. 1988;33(6):1901–1913. <https://doi.org/10.1029/98RS01703>

Характеристики мелкомасштабных искусственных неоднородностей в высокоширотной F-области ионосферы по данным дистанционных методов наблюдений

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

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

✉imegorov@aari.ru

IME, 0009-0004-7062-6161; НФБ, 0000-0003-1752-3273; АСК, 0000-0001-7299-6546;
ТДБ, 0000-0003-1727-5310; ГАЗ, 0000-0002-4342-7907

Расширенный реферат

Диагностика и прогноз явлений, происходящих в околоземном космическом пространстве и обусловленных солнечно-земными связями, становятся все более актуальной задачей, поскольку там функционируют автоматические космические аппараты, работают космонавты на пилотируемых космических станциях. Кроме того, ионосфера — среда, оказывающая влияние на распространение радиоволн, с чем связана работоспособность систем радиосвязи, навигации и телекоммуникаций.

Одним из методов изучения ионосферы является воздействие на нее мощным коротковолновым (КВ) радиоизлучением с помощью специальных наземных КВ радиопередатчиков большой мощности, так называемых КВ нагревных стендов. Мощные КВ радиоволны, взаимодействуя с ионосферой, ускоряют или «разогревают» электроны, выводя ионосферную плазму из состояния равновесия. Исследования возникающей при этом искусственно возмущенной локальной области ионосферы привлекают значительное внимание ученых возможностью изучения не до конца понятных на сегодняшний день физических особенностей вариаций параметров ионосферы по сравнению с их наблюдениями в естественных условиях. Взаимодействие мощной КВ радиоволны с ионосферой вызывает возникновение разнообразных нелинейных явлений в ионосфере, которые могут изучаться на контролируемой и повторяемой основе.

Одним из наиболее выдающихся явлений, обнаруженных в экспериментах по воздействию мощных КВ радиоволн на ионосферу, является генерация мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей (МИИН). МИИН вызывают ракурсное рассеяние коротковолновых и ультракоротковолновых (КВ и УКВ) сигналов, обеспечивая их распространение в диапазоне частот и на дальностях, недостижимых в естественной ионосфере. Таким образом, появляется возможность создания управляемых каналов радиосвязи. Для генерации МИИН, как правило, на всех КВ нагревных стендах мира используются мощные КВ радиоволны обыкновенной (О-мода) поляризации, которые эффективно взаимодействуют с ионосферной плазмой на высотах отражения и высотах верхнего гибридного резонанса. Радиоволны необыкновенной (Х-мода) поляризации отражаются ниже этих высот, поэтому не должны вызывать генерацию МИИН. Однако результаты наших недавних экспериментов на нагревном стенде EISCAT/Heating убедительно продемонстрировали, что генерация МИИН происходит и при Х-нагреве высокоширотной F-области ионосферы.

В данной работе представлены результаты сравнения характеристик МИИН при О- и Х-нагреве на основе использования метода ракурсного рассеяния диагностических КВ сигналов на МИИН с помощью станций наклонного зондирования ионосферы, когерентного КВ доплеровского радара CUTLASS (SuperDARN) и многоканального доплеровского комплекса «Спектр». Для модификации высокоширотной F-области ионосферы использовался нагревной стенд EISCAT/Heating, расположенный в г. Тромсё, Северная Норвегия. Результаты были получены в период эксперимента 18 февраля 2013 г. в вечерние часы при спокойных магнитных условиях. Мощная КВ радиоволна излучалась в направлении магнитного зенита на частоте 4,445 МГц. О-нагрев проводился на частотах вблизи f_{OF2} , а Х-нагрев при $f_{\text{H}} > f_{\text{OF2}}$. Показано, что совместное использование различных средств дистанционной диагностики МИИН позволило получить новые данные о характеристиках МИИН при О- и Х-нагреве, включая размер искусственно

возмущенной области ионосферы, занятой МИИН, диапазон частот, в котором наблюдаются ракурсно-рассеянные сигналы РРС, и их тонкую структуру, интенсивности, времена нарастания и релаксации МИИН в высокоширотной F-области ионосферы. Показано, что МИИН при О- и Х-нагреве имеют различные характеристики и механизмы генерации. Характерной особенностью МИИН при Х-нагреве, является возможность их генерации не только на частотах ниже критической частоты слоя F2 ($f_H \leq f_{OF2}$), как это происходит при О-нагреве, но и на частотах существенно выше (до 2 МГц) критической частоты F2 ($f_H > f_{OF2}$). Результаты выполненных исследований дают основания полагать, что сильные горизонтальные градиенты электронной концентрации при наличии электрического поля мощной Х-волны, перпендикулярного магнитному полю, приводят к генерации градиентно-дрейфовой неустойчивости, ответственной за возбуждение МИИН.

Ключевые слова: высокоширотная ионосфера, дистанционная диагностика, мелкомасштабные искусственные ионосферные неоднородности, мощная КВ радиоволна, нагревной стэнд, ракурсное рассеяние

Для цитирования: Egorov I.M., Blagoveshchenskaya N.F., Kalishin A.S., Borisova T.D., Zagorskiy G.A. Features of small-scale artificial irregularities in the high latitude ionospheric F-region from remote sensing observations. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2025;71(1): 6–16. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-1-6-16>

Поступила 09.10.2024

После переработки 15.11.2024

Принята 18.11.2024

ГИДРОЛОГИЯ СУШИ И ГИДРОХИМИЯ HYDROLOGY OF LAND AND HYDROCHEMISTRY

Оригинальная статья / Original paper

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-1-17-31>

УДК 556; 551.573



Испарение со снежного покрова на арх. Шпицберген в весенний период

И.И. Василевич¹✉, И.Л. Калюжный², А.С. Масловский¹

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

² ФГБУ Государственный гидрологический институт, Санкт-Петербург, Россия

✉ vasilevich@aari.ru

ИИВ, 0000-0002-0918-0576; ИЛК, 0009-0001-3653-1538; АСМ, 0009-0003-0572-9255

Аннотация. Испарение с поверхности снежного покрова играет значимую роль в водном балансе водных объектов арктических архипелагов. ФГБУ «АНИИ» проводит сезонные наблюдения за испарением с поверхности снежного покрова на арх. Шпицберген с 2021 г. Цель работы — обобщить результаты произведенных наблюдений. Натурные инструментальные наблюдения производятся с использованием испарителей ГГИ-500-6, в непосредственной близости от метеостанции п. Баренцбург. Установлено, что в весенний период среднесуточное испарение с поверхности снега составляет 0,60 мм, днем — 0,43 мм, ночью — 0,17 мм, что составляет 40 % от дневного. Наибольшее влияние на процесс испарения оказывают скорость ветра ($r = 0,822$), дефицит влаги ($r = 0,670$) и температура воздуха ($r = 0,724$). Разработаны полуэмпирический метод и модель множественной регрессии, что позволяет восполнять пробелы в прямых наблюдениях и оценить испарение при наличии метеорологических данных. При сравнении результатов расчета использован метод П.П. Кузьмина. Средняя величина испарившейся влаги в предвесенний и весенний период в районе метеостанции п. Баренцбург, определенная этими методами, равна 35,6 мм и изменяется в пределах от 30,9 (по Кузьмину) до 40,2 мм (полуэмпирический метод).

Ключевые слова: испарение, снежный покров, методы измерения и расчета, Шпицберген

Для цитирования: Василевич И.И., Калюжный И.Л., Масловский А.С. Испарение со снежного покрова на арх. Шпицберген в весенний период. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2025;71(1):17–31. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-1-17-31>

Поступила 19.09.2024

После переработки 13.11.2024

Принята 15.11.2024

© Авторы, 2025

© Authors, 2025

Snow cover sublimation on the Svalbard during spring

Igor I. Vasilevich¹✉, Igor L. Kalyuzhny², Aleksander S. Maslovskii¹

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

² Federal State Budgetary Institution of the State Hydrological Institute, St. Petersburg, Russia

✉vasilevich@aari.ru

ID IIV, 0000-0002-0918-0576; ILK, 0009-0001-3653-1538; ASM, 0009-0003-0572-9255

Abstract. Snow plays an essential role in mass balance of different water objects on the Arctic archipelagos, such as rivers, glaciers and lakes. Snow cover sublimation has a significant effect on the amount of water stored in the snow. The Arctic and Antarctic research institute (AARI) has been performing sublimation observations on the Svalbard archipelago as a part of mass-balance research since 2021. The aim of the paper is to summarize and process observation results. Estimates of daily sublimation were obtained based on direct observations using GGI-500-6 weighing evaporimeters with an evaporating surface area of 500 cm² and monolithic snow 6 cm thick. It was found that during the spring period the average daily sublimation rate from snow is 0.60 mm w. e., during the day it is 0.43 mm, at night it is 0.17 mm, which is 40 % of the daytime value. There is a strong correlation between daytime sublimation and total daily sublimation, with the correlation coefficient $r = 0.924$. Between night-time and daytime sublimation rates, the correlation decreases to $r = 0.742$. The greatest influence on the sublimation process comes from wind speed ($r = 0.822$), moisture deficit ($r = 0.670$), and air temperature ($r = 0.724$). Based on the observations carried out from April to May of 2021–2024, a semi-empirical calculation method and a multiple regression model have been developed. These methods allow one to fill gaps in direct observations or to estimate sublimation when meteorological data are available. The methods were compared with the calculation methodology proposed by P.P. Kuzmin. A significant correlation was established between the results calculated using these methods ($r = 0.776$). The average amount of sublimated moisture as determined by these methods near the Barentsburg weather station in pre-spring and spring periods is 35.6 mm, ranging from 30.9 (according to Kuzmin) to 40.2 mm (semi-empirical method). The seasonal sublimation value according to the multiple regression model is close to the average — 35.7 mm. The daily sublimation intensity values, calculated from reconstructed series of 119 days and determined using Kuzmin's methodology and the multiple regression model, are respectively equal to 0.63 and 0.66 mm/day. The results obtained can be used to assess the contribution of sublimation to the water balance of land surface waters in the Arctic archipelagos and the continental part of the Arctic.

Keywords: sublimation, snow cover, measurement methods, calculation methods, Spitsbergen

For citation: Vasilevich I.I., Kalyuzhny I.L., Maslovskii A.S. Snow cover sublimation on the Svalbard during spring. *Arctic and Antarctic Research*. 2025;71(1):17–31. (In Russ). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-1-17-31>

Received 19.09.2024

Revised 13.11.2024

Accepted 15.11.2024

Введение

Испарение со снежного покрова является важной составляющей водного баланса снежной толщи. Процесс испарения в основном определяется величиной и направлением притока энергии к испаряющей поверхности, диффузионным переносом водяного пара в толще снега, турбулентным его оттоком в приземный слой атмосферы и продолжительностью залегания. В южных районах России на процесс испарения может расходоваться до 30 % запасов воды в снеге, в северных — нет аналогичных оценок, но недоучет приводит к некорректной оценке снегозапасов.

В ряде работ показано, что наибольшие величины испарения со снежного покрова, как в пределах суток, так и за весь предвесенний и весенний период, наблюдаются при снеготаянии. В этот период интенсивно испаряется квазижидкая пленка воды, образующаяся на кристаллах льда. Интенсивность ее испарения в основном зависит от притока тепла к испаряющей поверхности. Оценки, выполненные расчетным путем А.С. Постниковым [1] (по метеоданным, полученным до современного изменения климата), показывают достаточно большие величины испарения в северных регионах России. Для Кольского полуострова годовая величина испарения со снежного покрова равна 35–40 мм (здесь и далее идет речь о мм в. э.), в западной части Новой Земли — до 50 мм. По модельным оценкам, испарение в Арктике может составлять от 10 до 50 % [2] от объема осадков за холодный период, для горных районов эта величина может достигать 10–90 % [3, 4]. Отметим при этом, что и в суровых условиях Антарктики также происходит испарение (сублимация) снежного покрова [5, 6]. Инструментальные наблюдения за испарением со снежного покрова в условиях Арктики, в том числе и на островах архипелага Шпицберген и Северной Земли, полностью отсутствуют. В то же время комплексные наблюдения проводятся на территории США — в горных районах Аляски [7] и Колорадо [8] — и на территории Российской Федерации на некоторых водно-балансовых станциях Росгидромета, расположенных преимущественно в умеренных широтах [9]. Отсюда возникает основная цель работы: определить инструментальным путем величины испарения за предвесенний и весенний период года на о. Шпицберген, углубить наши знания о процессе формирования испарения со снежного покрова, в том числе и в условиях Арктики, а также усовершенствовать методику определения и расчета этой составляющей водного баланса.

Производство наблюдений за испарением со снежного покрова в условиях Арктики

Наблюдения испарения со снежного покрова производились на специально оборудованной снегоиспарительной площадке (размером 10×10 м) вблизи метеорологической станции п. Баренцбург. Станция располагается на пологом склоне, на южной окраине поселка на высоте 75 м. К западу от станции в 300 м протекает залив Грэн-фьорд, с восточной стороны на расстоянии 400 м с юго-востока на север простирается горный хребет с крутым подъемом и высотой 250–500 м. Краткое описание окрестностей метеостанции приведено в [10]. На площадке были установлены 2 испарителя ГГИ-500-6 для определения испарения с поверхности снега, термометры ТМ-03, снегомерная рейка М-46 и снегозащитная будка для взвешивания испарителей морозоустойчивыми весами “Ohaus Valor V71P30T”. Основным прибором является взвешиваемый снеговой испаритель ГГИ-500-6 с площадью испаряющей поверхности 500 см² и высотой корпуса 6 см. Все детали прибора изготовлены из металла.

Конструктивно испаритель состоит из цилиндра, в котором располагается монолит снежного покрова, съемного дна, на которое устанавливается цилиндр, и крышки, которая закрывает его при транспортировке к месту взвешивания. В комплект прибора входит гнездо в виде емкости, в которую помещается цилиндр со снегом на период определения величины испарившейся влаги.

На снегоиспарительной площадке устанавливают два прибора таким образом, чтобы каждый был погружен в снег заподлицо с поверхностью снежного покро-

ва. Взвешивание приборов производят два раза в сутки — в 8:00 (ночной период) и 20:00 (дневной период). Потери снега на испарение определяют по разности массы испарителя в начале и конце опыта с учетом выпавших осадков. Необходимо учесть, что при измерении испарения со снега методом испарителей не учитываются величины испарения при переносе снега ветровым потоком. Производство работ по определению испарения со снежного покрова в системе Росгидромета регламентированы Методическими рекомендациями¹. Инструментальные наблюдения за испарением охватывали предвесенний и весенний периоды, от конца апреля до конца мая, с 2021 по 2024 г. Ежегодно средняя толщина снежного покрова в начальный период была в пределах от 60 до 140 см при плотности от 0,32 до 0,45 г/см³.

Наблюдения за испарением заканчиваются преимущественно после устойчивого перехода среднесуточной температуры воздуха выше 0 °С, когда в испарителях образуется значительное количество талой воды. Снежный покров в это время значительно уплотняется и состоит из крупных ледяных кристаллов размером 5–8 мм. Температура поверхности снежного покрова в эти периоды, как правило, держится около 0 °С.

Анализ результатов инструментальных наблюдений

Испарители типа ГГИ-500-6 не обеспечивают получение непрерывной информации из-за пропусков в наблюдениях, обусловленных снегопадами и ветровым переносом снега [11]. Так, по наблюдениям зимой 2024 г. успешными оказались 43 суток измерения из 86, среди которых только в 10 случаях были выполнены полные двухсрочные измерения в одни сутки. Данный результат является следствием погодных условий — за период наблюдения регулярно регистрировались осадки, оттепели и сильные ветра (из 43 суток 20 были без осадков).

Таблица 1

Статистические характеристики наблюдений за испарением на арх. Шпицберген за период с 2021 по 2024 г.

Table 1

Statistical characteristics of sublimation observations on Svalbard archipelago for the period from 2021 to 2024

Годы	Период наблюдений		Сроки наблюдений в сутках	
	Календарный	Продолжительность, сутки	Два срока	Один срок
2021	с 21.04 по 26.05	36	10	13
2022	с 06.05 по 20.05	15	8	4
2023	с 26.04 по 24.05	24	7	4
2024	с 15.04 по 27.05	43	10	22
Итого		118	35	55

Оценка количества выполненных измерений за период 2021 по 2024 г. приведена в табл. 1. В среднем только 28,8 % из 118 суток наблюдений без каких-либо помех были успешными. Согласно табл. 1 в 55 случаях результаты наблюдений представлены одним сроком.

¹ Методические рекомендации по производству наблюдений за испарением с почвы и снежного покрова. Л.: Гидрометеиздат; 1991. 234 с.
Metodological recommendations for conducting observations of evaporation from soil and snow cover. L.: Gidrometeoizdat; 1991. 234 p.

Обсуждение полученных результатов

Анализ массива данных показал (табл. 2), что среднесуточная величина испарения с поверхности снега в предвесенний период равна 0,60 мм; в дневное время 0,43 мм и в ночное время — 0,17 мм, что составляет 40 % от дневного.

Таблица 2

Массив данных инструментальных определений испарения с поверхности снега в дневное и ночное время по данным наблюдений на метеостанции п. Баренцбург

Table 2

Dataset of instrumental determinations of snow sublimation during daytime and nighttime based on observations at the Barentsburg weather station

Год	Дата	Испарение с поверхности снега, мм		
		Ночь	День	Сутки
2021	4 мая	0,05	0,02	0,07
	6 мая	0,16	0,28	0,44
	7 мая	0,01	0,48	0,40
	8 мая	0,16	0,29	0,45
	15 мая	0,06	0,42	0,48
	16 мая	0,05	0,31	0,36
	19 мая	0,00	0,35	0,35
	23 мая	0,29	0,44	0,73
	24 мая	0,10	0,51	0,61
2022	25 мая	0,35	0,53	0,88
	10 мая	0,18	0,46	0,64
	11 мая	0,10	0,28	0,38
	12 мая	0,01	0,41	0,42
	13 мая	0,06	0,37	0,43
	14 мая	0,09	0,52	0,61
	15 мая	0,20	0,44	0,64
	18 мая	0,02	0,29	0,31
	20 мая	0,38	0,54	0,92
2023	30 апреля	0,40	0,84	1,24
	1 мая	0,11	0,47	0,58
	2 мая	0,01	0,16	0,17
	8 мая	0,12	0,23	0,35
	9 мая	0,09	0,30	0,39
	12 мая	0,21	0,50	0,71
2024	19 мая	0,08	0,37	0,45
	24 апреля	0,09	0,20	0,29
	27 апреля	0,09	0,28	0,37
	03 мая	0,22	0,45	0,67
	05 мая	0,13	0,13	0,26
	06 мая	0,18	0,38	0,56
	08 мая	0,58	1,47	2,05
	17 мая	0,42	0,45	0,87
	21 мая	0,32	0,55	0,87
	22 мая	0,21	0,66	0,87
	27 мая	0,35	0,74	1,09
Среднее		0,17	0,43	0,60

Установлено, что между величинами ночного (E_n) и дневного (E_d) испарения с поверхности снега существует корреляционная зависимость вида

$$E_d = 1,295E_n + 0,2145, \quad (1)$$

при коэффициенте корреляции $r = 0,742$. Зависимость приведена на рис. 1.

Отсюда возникает тесная корреляционная зависимость между величинами дневного испарения (E_d) и испарением за сутки (E_c). Зависимость (рис. 2) возможно представить в виде уравнения

$$E_c = 1,423E_d + 0,0171, \quad (2)$$

при $r = 0,924$.

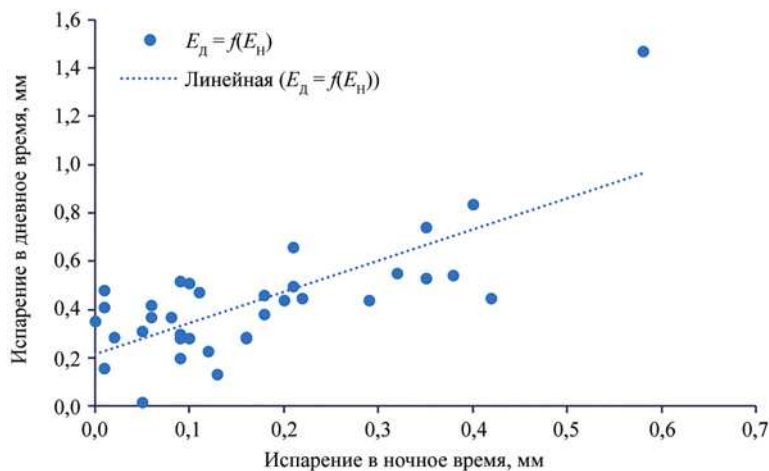


Рис. 1. Корреляционная зависимость между испарением с поверхности снега в ночное и дневное время

Fig. 1. Correlation between snow sublimation at night and during the day

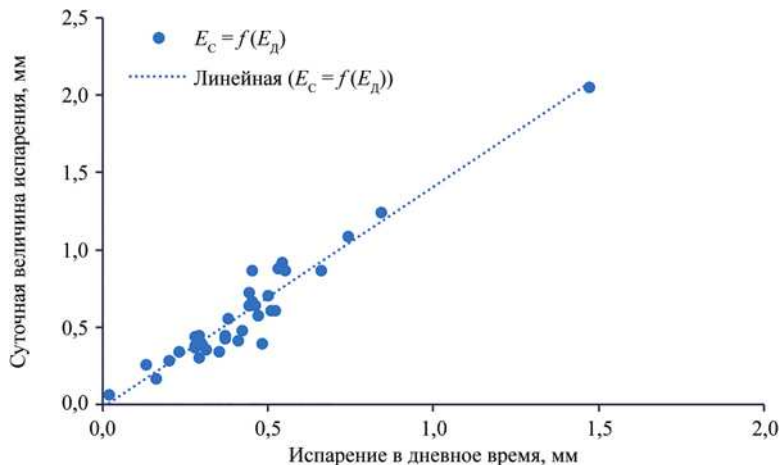


Рис. 2. Корреляционная зависимость между испарением с поверхности снега в дневное время и суточными величинами испарения. Наблюдения охватывают предвесенний период с 24 апреля по 27 мая

Полученные зависимости (1), (2) и другие используются для устранения пропусков наблюдений при расчетах суточных величин испарения с поверхности снега. При полном отсутствии наблюдений за испарением (в ночной и дневной периоды суток) представляется возможным использовать данные наблюдений по одной из приведенных ниже моделей испарения.

Факторы, определяющие испарение со снежного покрова

На основе наблюдений над элементами метеорологического режима, выполненных на метеостанции п. Баренцбург в 2024 г., методом линейного регрессионного анализа построена таблица факторов (табл. 3), влияющих на процесс испарения со снежного покрова.

В качестве независимых переменных были выбраны следующие (их среднесуточные значения): температура воздуха (T_B , [°C]), температура поверхности снега (T_{Π} , [°C]), относительная влажность воздуха (H , [%]), дефицит влажности (D , [гПа]), скорость ветра на высоте 10 м (U , [м/с]); разность $P = e_0 - e_{200}$ (разность между значениями давления насыщения водяного пара по температуре поверхности снега и абсолютной влажности воздуха), [гПа], а также суммарной солнечной коротковолновой радиацией (Q , [Вт/м²]). Испарение представлено составляющими: E_H , E_D , E_C — испарения в ночной, дневной период и суммарная составляющая в мм слоя испарившейся влаги.

На этапе выбора оптимальной модели применялись разные сочетания независимых переменных уравнения множественной линейной регрессии. Выбор модели осуществлялся по следующим характеристикам — коэффициент детерминации r^2 , F -критерий Фишера, t -критерий Стьюдента, p -уровень, стандартная погрешность модели (равная СКО погрешностей модели, далее погрешность). Также при детальном рассмотрении модели внимание обращалось на величину стандартизированного регрессионного коэффициента (b^*), показывающего относительный вклад в расчет зависимой переменной, а также частные оценки t -критериев и p -уровней для каждой

Таблица 3

Корреляционная таблица факторов, обуславливающих испарение с поверхности снега

Table 3

Correlation matrix of factors causing snow sublimation

	E_H	E_D	E_C	T_B	T_{Π}	H	U	Q	D	P
E_H	1	0,861	0,929	0,324	0,079	−0,322	0,402	0,125	0,429	−0,049
E_D	—	1	0,988	0,381	0,117	−0,504	0,633	0,396	0,587	0,156
E_C	—	—	1	0,724	0,228	−0,463	0,822	0,212	0,670	−0,225
T_B	—	—	—	1	0,861	0,118	0,335	−0,013	0,554	−0,113
T_{Π}	—	—	—	—	1	0,158	0,178	0,010	0,428	0,307
H	—	—	—	—	—	1	−0,266	−0,458	−0,747	−0,500
U	—	—	—	—	—	—	1	−0,181	0,472	−0,058
Q	—	—	—	—	—	—	—	1	0,360	0,335
D	—	—	—	—	—	—	—	—	1	0,339
P	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1

Примечание. Полужирным выделены значения с уровнем значимости 0,05.
Note. Values with a significance level of 0.05 are shown in bold.

независимой переменной. Все статистические характеристики рассчитывались для уровня значимости $\alpha = 0,05$. Из ряда моделей (табл. 4) была отобрана одна, чья совокупность характеристик была наиболее качественной, — $E_c = f(D, U)$.

В ряде работ при построении метода расчета суточных величин испарения в качестве основных предикторов отдают предпочтение дефициту влажности и скорости ветра. В частности, анализ результатов наблюдений на леднике Чхота Шигри в Гималаях (Индия, 2009–2020 гг.) показывает, что использование в качестве предикторов скорости ветра и дефицита давления пара является достаточно высоким показателем сублимации (испарения). Коэффициент корреляции связи суточных величин $E_c = f(U, D)$ равен 0,93 [12]. Но сочетание U и D с рядом других предикторов позволяет увеличить коэффициент корреляции до 0,96. Комплекс выполненных наблюдений на леднике Яла (Непальские Гималаи) [4] также показал, что сочетание предикторов скорость ветра и дефицит давления пара, при определении среднесуточных величин испарения, имеет коэффициент корреляции 0,88. При введении в расчет дополнительного предиктора, температуры приземного слоя, коэффициент корреляции повышается до 0,90. В работе [5] на основании 800 измерений, выполненных в условиях Антарктиды, установлено, что интенсивность сублимации снега в основном зависит от температуры воздуха и скорости ветра. В работе [2] расчет

Таблица 4

Модели расчета суточных величин испарения со снежного покрова

Table 4

Calculation models of daily snow sublimation values					
Модель	Независимые переменные	Коэффициент детерминации r^2	Среднее значение b^*	p -уровень	Погрешность модели
1	U, D	0,765	0,645	$8,8 \cdot 10^{-11}$	0,181
2	$T_{в}, U, D$	0,804	0,468	$4,4 \cdot 10^{-11}$	0,168
3	P, U	0,586	0,585	$8,8 \cdot 10^{-7}$	0,240
4	$T_{п}, U, D$	0,816	0,496	$1,6 \cdot 10^{-11}$	0,163
5	D, U, Q	0,749	0,370	$3,9 \cdot 10^{-9}$	0,184
6	U, Q	0,456	0,348	$3,4 \cdot 10^{-4}$	0,271
7	$T_{в}, Q, U, P$	0,694	0,394	$3,8 \cdot 10^{-8}$	0,206

Таблица 5

Характеристики модели суточных величин испарения от дефицита влажности и скорости ветра

Table 5

Characteristics of the model of daily sublimation values based on humidity deficit and wind speed						
Элемент	b^*	Стандартная ошибка b^*	b	Стандартная ошибка b	$t(5)$	p -уровень
Свободный член	—	—	−0,674	0,146	−4,61	$6,2 \cdot 10^{-5}$
U , м/с	0,742	0,086	0,177	0,021	8,61	$7,7 \cdot 10^{-10}$
D , гПа	0,548	0,086	0,718	0,113	6,35	$3,9 \cdot 10^{-7}$

Примечание. $r = 0,875$; $r^2 = 0,765$; $F(2,32) = 52,0$; $p < 8,8 \cdot 10^{-11}$; погрешность модели = 0,181 мм.
 Note. $r = 0,875$; $r^2 = 0,765$; $F(2,32) = 52,0$; $p < 8,8 \cdot 10^{-11}$; STD of model residuals = 0.181 mm

испарения производят по модели SnowModel [13], используя данные о температуре воздуха, дефиците влажности, скорости ветра и также некоторых других элементов энергетического баланса поверхности снега.

Таким образом, модель, построенная на зависимости испарения от дефицита влажности и скорости ветра, является наиболее качественной по всем рассматриваемым характеристикам. Ключевым же при выборе данной модели являлось сочетание высокого коэффициента детерминации (0,765), низких значений p -уровня ($8,8 \cdot 10^{-11}$) и погрешности модели (0,181). Подробные характеристики модели приведены в табл. 5.

Согласно табл. 5, зависимость суточных величин испарения (E_c) от среднесуточного дефицита влажности воздуха (D) и скорости ветра (U) выражается уравнением линейной регрессии вида

$$E_c = 0,718D + 0,177U - 0,674 \text{ (мм)}, \quad (3)$$

при коэффициенте корреляции $r = 0,875$ (рис. 3).

В предвесенний период увеличивается приток тепла к испаряющей поверхности. Однако общая зависимость, $E_c = f(Q)$, полученная на основе обработки данных наблюдений с 2021 по 2024 г., имеет крайне низкий коэффициент корреляции. Согласно табл. 3, он равен 0,212, и подобная зависимость не может быть использована в качестве основной в расчетных схемах. Но, по данным конкретного года, 2024 г., коэффициент корреляции этой зависимости увеличивается до уровня 0,795. Уравнение зависимости суточных величин испарения (E_c) от суточной величины коротковолновой солнечной радиации (Q), построенное по данным 2024 г., имеет вид

$$E_c = 0,0029Q + 0,1431 \quad (4)$$

Зависимость испарения от температуры воздуха, как показателя притока тепла к испаряющей поверхности, имеет коэффициент корреляции 0,724. Скорость ветра, формирующая турбулентный поток воздушной массы над этой поверхностью, имеет

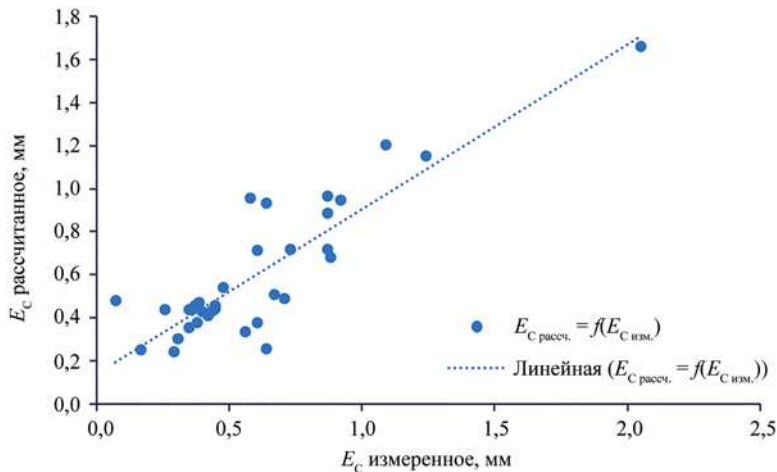


Рис. 3. Зависимость измеренных и рассчитанных суточных величин испарения со снежного покрова по модели $E_c = f(D, U)$

Fig. 3. Correlation of measured and calculated daily values of snow sublimation according to the model $E_c = f(D, U)$

более высокий коэффициент корреляции с суточной величиной испарения $r = 0,822$. Зависимость $E_c = f(U)$ описывается уравнением вида

$$E_c = 0,1901U + 0,115 \quad (5)$$

и может быть использована в расчетных схемах.

В системе Росгидромета применяют локальные, для конкретного района, методы расчета суточных величин испарения, в частности метод П.П. Кузьмина [14]. Согласно его методу, суточную величину испарения рассчитывают по формуле

$$E = (a + bu)(e_n - e_2), \quad (6)$$

где u — среднесуточная скорость ветра на высоте 10 м, [м/с]; e_n — давление насыщения водного пара по температуре поверхности снежного покрова, [гПа]; e_2 — абсолютная влажность воздуха на высоте 2 м, [гПа]; a и b — параметры, определяемые по данным суточных наблюдений испарения и соответствующим им среднесуточным значениям u_{10} , e_n и e_2 .

Определение параметров a и b производилось на основе измеренных суточных величин испарения и соответствующих метеорологических характеристик по данным метеостанции п. Баренцбург. Согласно методике П.П. Кузьмина, параметр a принят равным 0,18; параметр b равен 0,09. Расчетная формула для метеостанции п. Баренцбург принимает вид:

$$E_c = (0,18 + 0,09u)(e_n - e_2). \quad (7)$$

Таким образом, устранение пропусков наблюдений, а также расчет величин испарения со снежного покрова по наблюдаемым метеорологическим характеристикам возможно произвести следующими методами:

- используя комплекс уравнений (1), (2), (4) и (5) — полуэмпирический метод;
- расчет по модели $E_c = f(D, U)$ с использованием среднесуточной величины дефицита влажности и скорости ветра;
- расчет по региональному уравнению (7), основанный на методике П.П. Кузьмина.

Используя в качестве опорных данных наблюдаемые суточные величины испарения, приведенные в табл. 1, определим погрешности расчета по модели $E_c = f(D, U)$ и методу П.П. Кузьмина, а также натурных и восстановленных наблюдений за период с 2021 по 2024 г. Результаты расчета приведены в табл. 6.

Анализ результатов сравнения методов расчета испарения со снежного покрова по опорному ряду, приведенному в табл. 1, показывает, что наиболее близкие результаты свойственны модели $E_c = f(D, U)$. Достоинство полуэмпирического метода заключается в том, что он, наряду с моделью, позволяет дополнить ряд натурных измерений, что невозможно осуществить, применяя метод П.П. Кузьмина. Регрессионная модель, основанная на связи суточного испарения и средних скорости ветра и дефицита влажности, достаточно хорошо описывает исследуемый процесс (погрешность модели 0,18 мм, $r = 0,874$). Существенным недостатком модели является получение отрицательных значений испарения в дни, когда средняя скорость ветра меньше 1 м/с. Это вытекает из самого уравнения модели и является следствием отсутствия наблюдаемых величин ветра со скоростью ниже 1 м/с среди суток, использованных при разработке модели. Метод П.П. Кузьмина, в свою очередь, имеет большую погрешность (0,29 мм), чем регрессионная модель, и менее точно описывает процесс испарения ($r = 0,590$), а также требует для расчета данные о температуре поверхности снежного покрова.

Таблица 6

Результаты сравнения методов расчета и восстановления
величин испарения с поверхности снежного покрова

Table 6

Results of comparison of methods for calculating and restoring sublimation values

Характеристика	Статистические характеристики 2-срочного ряда (табл. 1).			Расчет по данным натурных наблюдений за период 2021–2024 г.		
	Опорный ряд	Модель	Метод П.П. Кузьмина	Полуэмпири- ческий метод	Модель	Метод П.П. Кузьмина
Среднее, мм/сут	0,60	0,60	0,62	0,76	0,66	0,63
СКО, мм	0,36	0,32	0,22	0,48	0,47	0,30
C_v	0,61	0,30	0,47	0,63	0,71	0,48
Погрешность абс., мм	–	0,18	0,29	–	–	–
Погрешность отн., %	–	29	49	–	–	–
Количество членов ряда	35	35	35	120	120	120

Примечание. Относительная погрешность рассчитывалась как частное абсолютной погрешности и средней величины испарения опорного ряда.

Note. The relative residual was calculated as the quotient of the absolute error and the average sublimation value of the reference series.

Таблица 7

Результаты расчетов суточных величин испарения
по данным метеостанции п. Баренцбург, 2024 г.

Table 7

Results of calculations of daily sublimation values
according to Barentsburg weather station data in 2024

Характеристика	Методы расчета			Среднее значение
	Полуэмпири- ческий метод	Модель	Метод П.П. Кузьмина	
Среднее, мм/сут	0,93	0,83	0,72	0,83
СКО, мм	0,60	0,64	0,36	0,53
Сумма за период с 15.04 по 27.05	40,2	35,7	30,9	35,6

Однако применение этих трех рассматриваемых методов позволяет получить достаточно полное представление о величинах испарения со снежного покрова в конкретном регионе.

В табл. 7 приведены результаты наблюдаемых и восстановленных данных по испарению с использованием упомянутых методов (метеостанция п. Баренцбург, 2024 г.). По данным таблицы, средняя величина суточных значений испарения со снежного покрова в предвесенний период составила 0,83 мм/сут. Наибольшая разность суточных величин, определенных рассматриваемыми методами, составляет 0,20 мм/сут. Средняя величина испарившейся влаги, определенная этими методами, равна 35,6 мм, изменяясь в пределах от 30,9 до 40,2 мм. Измеренные инструментальным путем ночные (7,16 мм) и дневные (13,0 мм) результаты наблюдений составляют в сумме 20,2 мм влаги, что составляет 56,7 % от среднего значения в 35,6 мм за

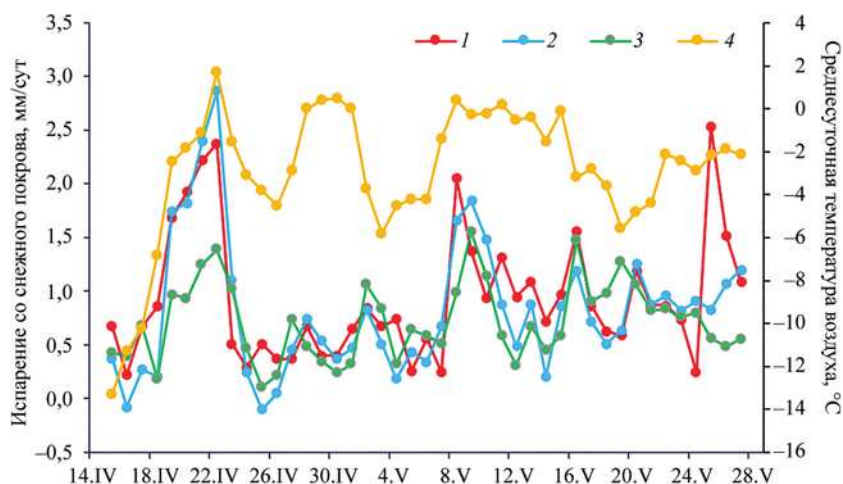


Рис. 4. Результаты наблюдений и расчета испарения за 2024 г. 1 — расчет по полуэмпирическому методу; 2 — расчет по регрессионной модели $E_c = f(U, D)$; 3 — расчет по методу П.П. Кузьмина; 4 — среднесуточная температура воздуха

Fig. 4. Results of observations and calculations of sublimation for 2024. 1 — calculation using the semi-empirical method; 2 — calculation using the regression model $E_c = f(U, D)$; 3 — calculation using the P.P. Kuzmin's method; 4 — average daily air temperature

рассматриваемый период. В работе [7] средняя суточная величина испарения для северной горной части Аляски (за 11 лет наблюдений, с 2010 по 2021 г.) составляла 0,08–0,10 мм/сут, а среднее годовое значение — 20–26 мм. При этом на апрель и май приходится 9,0 мм (3 мм в апреле и 6 в мае). Значительная разница в сезонных величинах испарения Аляски и Шпицбергена, вероятно, обусловлена климатическими условиями — несмотря на одинаковую продолжительность периода залегания снежного покрова (254 дня), средняя многолетняя годовая температура воздуха исследуемого района Аляски составляет $-7,4^{\circ}\text{C}$ [7] против $-3,1^{\circ}\text{C}$ в п. Баренцбург.

На рис. 4 приведена динамика величин испарения с поверхности снега, интенсивность которой определялась по приведенным методам. Значительное увеличение суточных величин испарения обусловлено временными изменениями температуры приземного слоя атмосферы. Так, с 18.04 по 22.04.2024 г. наблюдалось потепление от -10 до $1,7^{\circ}\text{C}$. Оно вызвало увеличение испарения до 2,0–2,5 мм/сут. Аналогичное увеличение температуры от $-4,0$ до $0,3^{\circ}\text{C}$, увеличило суточные потери влаги до 1,5–2,0 мм.

Одним из факторов, способствующих увеличению количества испарившейся влаги, является продолжительность предвесеннего периода и запас воды в снеге. В 2024 г. продолжительность этого периода достигла 43 суток, а запас воды в снеге — 360 мм. Из-за конструктивных недостатков испарителя ГТИ-500-6 и высокой интенсивности таяния снега измерение испарения становится невозможным.

Сезонная динамика испарения, рассчитанная тремя методами, имеет определенную корреляцию суточных величин. На рис. 5 показана взаимная корреляция между данными полуэмпирического метода и расчетом по модели. Коэффициент корреляции равен 0,776.

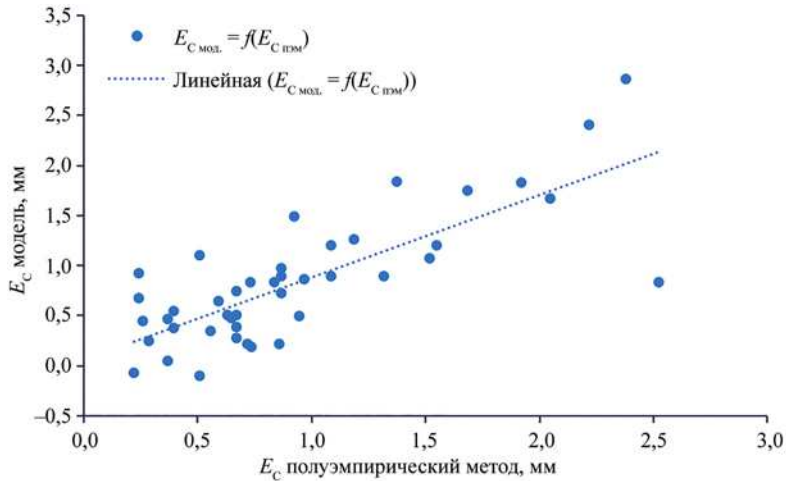


Рис. 5. Взаимная корреляция величин испарения со снежного покрова, рассчитанных полуэмпирическим методом и по модели $E_C = f(D, U)$

Fig. 5. Correlation of the values of snow sublimation calculated by a semi-empirical method and according to the model $E_C = f(D, U)$

Аналогичная взаимная корреляция между полуэмпирическим методом и расчетом испарения по П.П. Кузьмину значительно ниже ($r = 0,466$).

Выводы

Путем проведения инструментальных наблюдений определена интенсивность испарения со снежного покрова в условиях Арктики (о. Шпицберген, п. Баренцбург, 2021–2024 гг.). Из 118 суток наблюдений только 28,8 % были двухсрочными и не имели каких-либо ограничений. На основе наблюдений сформирована опорная база двухсрочных (ночные и дневные) данных, состоящая из 35 членов ряда, в период определения которых отсутствовали осадки. Анализ выделенного массива показал, что среднесуточная величина испарения с поверхности снега в предвесенний период равна 0,60 мм; в дневное время 0,43 мм и в ночное время — 0,17 мм, что составляет 40 % от дневного. Установлено, что между дневным испарением и испарением за сутки существует зависимость с коэффициентом корреляции 0,924. Взаимная корреляция испарения за ночной и дневной периоды снижается до уровня $r = 0,742$. Зависимости выражены уравнениями, которые используются для восстановления пропусков в наблюдениях. Методом линейного регрессионного анализа построена таблица, позволяющая оценить воздействия метеорологических факторов на процесс испарения. Ее анализ показал, что наибольшее влияние на процесс испарения оказывают скорость ветра ($r = 0,822$), дефицит влажности ($r = 0,670$) и температура воздуха ($r = 0,724$). При выборе оптимальной модели испарения применялись различные сочетания независимых переменных. Из ряда моделей была отобрана одна, чья совокупность характеристик была наиболее качественной, — $E_C = f(D, U)$. Коэффициент корреляции суточных сумм испарения от скорости ветра и дефицита влажности при применении этой модели равен 0,875. Ликвидацию пропусков в наблюдениях и расчет суточных величин испарения предлагается осуществлять: 1) полуэмпирическим методом, который основан на использовании соотношений между ночной,

дневной и суммарной суточной величинами испарения; 2) применением модели $E_c = f(D, U)$. При сравнении результатов расчета использован метод П.П. Кузьмина. Средняя величина испарившейся влаги, определенная этими методами, равна 35,6 мм и изменяется в пределах от 30,9 (по Кузьмину) до 40,2 мм (полуэмпирический метод). Рассмотрены достоинства и недостатки методов и возможности их применения при наличии и отсутствии наблюдений. Установлена высокая степень корреляции суточных величин испарения, рассчитанных тремя рассматриваемыми методами. Взаимная корреляция суточных величин по полуэмпирическому методу и расчетом по модели равна 0,776.

Конфликт интересов. У авторов исследования нет конфликта интересов.

Финансирование. Исследование выполнено в рамках темы 5.1.4 Плана НИТР Росгидромета на 2020–2024 гг. Регистрационный номер НИТР АААА-А20-120041590009-7.

Благодарности. Коллектив авторов выражает благодарность руководству и сотрудникам Российской научной арктической экспедиции на арх. Шпицберген, ее зимовочным и сезонным составам, а также сотрудникам лаборатории экспериментальной климатологии Арктики отдела взаимодействия океана и атмосферы за предоставленные данные о солнечной радиации.

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

Financing. The research was funded within project 5.1.4 of Roshydromet RTW Plan 2020–2024. RTW registration number АААА-А20-120041590009-7.

Acknowledgments. The team of authors expresses gratitude to the management and staff of the Russian Scientific Arctic Expedition in the archipelago of Spitsbergen, as well as its wintering and seasonal teams, and to the employees of the Laboratory of Experimental Climatology of the Arctic in the Department of Ocean-Atmosphere Interaction for the data they provided on solar radiation.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Постников А.Н. Испарение с поверхности снежного покрова за период его залегания на территории России. *Ученые записки РГГМУ*. 2016;42:55–63.
Postnikov A.N. Evaporation from the surface of snow cover during the period of its occurrence on the territory of Russia. *Scientific notes of RSHU*. 2016;42:55–63. (In Russ.)
2. Liston G.E., Sturm M. The role of winter sublimation in the Arctic moisture budget. *Nordic Hydrology*. 2004;35:4–5:325–334. <https://doi.org/10.2166/nh.2004.0024>
3. Strasser U., Bernhardt M., Weber M., Liston G.E., Mauser W. Is snow sublimation important in the alpine water balance? *Cryosphere*. 2008;2:53–66. <https://doi.org/10.5194/tc-2-53-2008>
4. Stigter E.E., Litt M., Steiner J.F., Bonekamp P.N.J., Shea J.M., Bierkens M.F.P., Immerzeel W.W. The importance of snow sublimation on a Himalayan glacier. *Frontiers in Earth Science*. 2018;6:1–16. <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00108>
5. Екайкин А.А., Заровчатский В.Н., Липенков В.Я. Измерение скорости сублимации снега на станции Восток, Центральная Антарктида. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2015;4:20–25.
Ekajkin A.A., Zarovchatskij V.N., Lipenkov V.Ya. Measuring the rate of snow sublimation at Vostok Station, Central Antarctica. *Problemy Arktiki i Antarktiki=Arctic and Antarctic Research*. 2015;4:20–25. (In Russ.)
6. Palm S.P., Kayetha V., Yang Y., Pauly R. Blowing snow sublimation and transport over Antarctica from 11 years of CALIPSO observations. *The Cryosphere*. 2017;11:2555–2569. <https://doi.org/10.5194/tc-2017-45>
7. Spehlmann K., Euskirchen E., Stuefer S. Sublimation measurements of tundra and taiga snowpack in Alaska. *The Cryosphere Discussions*. 2023. <https://doi.org/10.5194/tc-2023-153> [preprint]

8. Lundquist J.D., Vano J., Gutmann E., Hogan D., Schwat E., Haugeneder M., Mateo E., Oncley S., Roden C., Osenga E., Carver L. Sublimation of snow. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2024;105:E975–E990. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-23-0191.1>
9. Журавин С.А. *Исследование процессов влагооборота на воднобалансовых станциях в России*. СПб.: ООО «РИАЛ»; 2022. 224 с.
Zhuravin S. A. *Study of water at the water balance stations in Russia*. St. Petersburg: RIAL ltd; 2022. 224 p. (In. Russ.)
10. Демин В.И., Иванов Б.В., Ревина А.Д. Восстановление ряда приземной температуры воздуха на Российской станции в поселке «Баренцбург» (Шпицберген). *Российская Арктика*. 2020;9:30–40. <https://doi.org/10.24411/2658-4255-2020-12093>
Demin V.I., Ivanov B.V., Revina A.D. Reconstruction of a series of surface air temperatures at the Russian station in the settlement of Barentsburg (Spitsbergen). *Russian Arctic*. 2020;9:30–40. (In. Russ.). <https://doi.org/10.24411/2658-4255-2020-12093>
11. Калюжный И.Л., Скороспехова Т.В. Оценка современного состояния методов измерения и расчета испарения со снега. *Труды ГГО*. 2022;605:109–137.
Kalyuzhny I.L., Skorospekhova T.V. Assessment of the modern state of methods for measurement and calculation of evaporation value from the snow cover surface. *Proceedings of SGO*. 2022;605:109–137. (In. Russ.)
12. Mandal A., Angchuk T., Azam M. F., Ramanathan A., Wagnon P., Soheb M., Singh C. An 11-year record of wintertime snow-surface energy balance and sublimation at 4863 m a. s. l. on the Chhota Shigri Glacier moraine (western Himalaya, India). *The Cryosphere*. 2022;16:3775–3799. <https://doi.org/10.5194/tc-16-3775-2022>
13. Liston G.E., Elder K. A meteorological distribution system for high-resolution terrestrial modeling (MicroMet). *Journal of Hydrometeorology*. 2006;7:217–234. <https://doi.org/10.1175/JHM486.1>
14. Кузьмин П.П. К методике исследования и расчета испарения с поверхности снежного покрова. *Труды ГГИ*. 1953;241(95):34–52.
Kuzmin P.P. On the methodology of studying and calculating evaporation from the surface of snow cover. *Proceedings of the State Hydrological Institute*. 1953;241(95):34–52. (In. Russ.)

ГЕОМОРФОЛОГИЯ И ЭВОЛЮЦИОННАЯ ГЕОГРАФИЯ GEOMORPHOLOGY AND EVOLUTIONARY GEOGRAPHY

Оригинальная статья / Original paper

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-1-32-45>

УДК 551.89



Голоценовые колебания относительного уровня Ладожского озера в районе Тайпаловского залива

А.О. Аксенов^{1,2,3✉}, Д.Ю. Большианов¹, С.А. Правкин¹, Г.Б. Лебедев¹

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

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

³ ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского», Санкт-Петербург, Россия

✉ aoaksenov@aari.ru

ID АОА, 0000-0002-4950-4571; ДЮБ, 0000-0001-6974-3150; САП, 0000-0001-8521-7708

Аннотация. В течение голоцена уровень Ладожского озера неоднократно менялся. Вследствие этого побережье водоема характеризуется наличием аккумулятивных форм рельефа, образующих береговую морфосистему. Исследование этих палеомаркеров позволяет детализировать историю развития озера. В статье представлены результаты исследования участка побережья Ладожского озера в районе Тайпаловского залива. В работе представлены как новые данные, полученные методами геоморфологического профилирования, ОСЛ и радиоуглеродного датирования, так и интерпретация материалов предыдущих исследований, выполненных по разрезам отложений первой надпойменной террасы реки Вьюн. В результате были идентифицированы две фазы подъема относительного уровня озера — бореал-атлантическая и суббореал-субатлантическая. Первая включает в себя две стадии, соотносимые соответственно с Анциловой и Литориновой трансгрессиями Балтийского моря. Во второй фазе, соотносимой с Ладожской трансгрессией, также выделены две стадии с временными рамками 3700–2600 л. н. и около 2500 л. н. Установлено, что береговая морфосистема Тайпаловского залива формировалась на протяжении всего голоцена под влиянием перечисленных фаз колебаний уровня.

Ключевые слова: Ладожское озеро, голоцен, геоморфологическое профилирование, колебания относительного уровня воды, ОСЛ-датирование, радиоуглеродное датирование

Для цитирования: Аксенов А.О., Большианов Д.Ю., Правкин С.А., Лебедев Г.Б. Голоценовые колебания относительного уровня Ладожского озера в районе Тайпаловского залива. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2025;71(1):32–45. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-1-32-45>

Поступила 13.11.2024

После переработки 17.01.2025

Принята 10.02.2025

© Авторы, 2024

© Authors, 2024

Holocene relative level fluctuations of Lake Ladoga in the Taipalovskii Bay area

Aleksei O. Aksenov^{1,2,✉}, Dmitriy Yu. Bolshiyarov¹, Sergei A. Pravkin¹,
Georgii B. Lebedev¹

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

² Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia

³ A.P. Karpinsky Russian Geological Research Institute, Saint-Petersburg, Russia

✉aoaksenov@aari.ru

 AOA, 0000-0002-4950-4571; DYB, 0000-0001-6974-3150; SAP, 0000-0001-8521-7708

Abstract. During the Holocene, the level of Lake Ladoga was constantly changing. As a result, the coastal area of the water basin is characterized by the presence of accumulative landforms creating coastal morphosystems. The study of these paleomarkers allows us to detail the history of the lake's development. This paper presents the results of a study of the Lake Ladoga Taipalovskii Bay coastal area. To achieve the aim geomorphological profiling of the Taipalovskii Bay coastal morphosystem was executed. It was supported with sediment sampling from sand landforms (beach ridges, barrier ridges, strandplains) and peatbogs for age determination using OSL and radiocarbon dating techniques. In summary, three peat cores and three coastal landforms were sampled during the fieldwork. It resulted in three OSL-datings and nine radiocarbon datings, which are presented in this paper. In addition, the materials of previous studies carried out on the sediment sections of the Vyun River first terrace were correlated with the data obtained. As a result, two phases of the relative lake-level rising were identified — Boreal-Atlantic and Subboreal-Subatlantic. The first one includes two stages corresponding with the Ancylus and Littorina transgressions of the Baltic Sea. During the Boreal (Ancylus) stage the relative lake-level reached its maximum around 8100 years BP. Its shoreline is marked at the altitude of 17–18 m above sea-level (a. s. l.). The Atlantic (Littorina) maximum shoreline, with an age around 6500 BP, is assumed to be at 14–15 m a. s. l. The end of the Atlantic-onset of the Subboreal climatic phase is characterized by lake-level decline. The second phase of lake-level rising started 3600–3700 years BP. This stage is correlated with the Ladoga transgression. The maximum rising of the transgression is defined at the altitude of 14 m with an age around 2600 years BP. After the maximum stage a second one is reported as well, which is determined at 2500 years BP. A shoreline at 11,5 m a. s. l. marks this event. As a result, it was established that the coastal morphosystem of Taipalovskii Bay was formed throughout the Holocene under the influence of the level fluctuation phases listed.

Keywords: Lake Ladoga, the Holocene, geomorphological profiling, relative water-level fluctuations, OSL-dating, radiocarbon dating

For citation: Aksenov A.O., Bolshiyarov D.Yu., Pravkin S.A., Lebedev G.B. Holocene relative level fluctuations of Lake Ladoga in the Taipalovskii Bay area. *Arctic and Antarctic Research*. 2025;71(1):32–45. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-1-32-45>

Received 13.11.2024

Revised 17.01.2025

Accepted 10.02.2025

Введение

Проблема колебаний уровня Ладожского озера в голоцене является одним из фундаментальных вопросов палеогеографии северо-запада России. Несмотря на более чем вековую историю исследований, единой концепции об истории изменения уровня этого водоема до сих пор не существует. Наиболее распространенная модель изменений уровня предполагает две фазы его повышения и три фазы снижения [1]. Первая регрессия произошла на рубеже позднего неоплейстоцена и голоцена.

Предполагается, что уровень в это время опустился ниже современного. Об этом свидетельствуют признаки древних береговых линий, выделенные на дне озера [2]. После этого началась фаза подъема уровня, вызванная подпором со стороны Балтики Анциловым озером, максимум которой пришелся на 8500 л. н. [3]. В среднем голоцене уровень вновь понизился. Предполагается, что береговая линия в этот период находилась примерно на современном уровне [4] или ниже [5]. Около 5000 л. н. начался этап поднятия уровня, известный как Ладожская трансгрессия. Его начало связано с прорывом Сайменской системы озер и образованием стока в Ладожское озеро через реку Вуоксу [6]. Предполагается, что в это же время сток из озера в Балтийское море через Хейниокский пролив (цепочка озер и рек на Карельском перешейке) прекратился вследствие изостатического поднятия суши в районе северного Приладожья [7]. В интервале 3100–2800 л. н. уровень достиг максимальной отметки, которая различными авторами оценивается в интервале от 14 до 22 м абсолютной высоты [8]. В дальнейшем произошел прорыв вод озера в его юго-восточной части (Мгинско-Тосненский водораздел) в Балтийское море с образованием реки Невы. В результате уровень постепенно понижался вплоть до современного [9].

Авторами данной работы были проведены полевые исследования на побережье Тайпаловского залива. Залив расположен в западной части Ладожского озера, в него впадает река Бурная (рис. 1а, б). Побережье представляет собой береговую морфосистему, которая сформирована серией параллельных хорошо выраженных валов. Последний и наиболее высокий из них представляет собой береговой бар. Ю. Айлио, первым исследовавший этот участок, предположил, что эта форма рельефа возникла во время максимальной стадии Ладожской трансгрессии [10]. За ним сформированы два болота: эвтрофное Умпалампи и олиготрофное Тройное. Западные края болот ограничены древним береговым уступом, выполненным во флювиогляциальных отложениях позднего неоплейстоцена.

Река Бурная, впадающая в залив, возникла в 1818 г., после прорыва узкого перешейка между Ладожским и Суходольским (Суванто) озерами. В результате уровень Суходольского озера, сток из которого шел в направлении Вуоксы, опустился с 17,6 до 10 м [11]. Направление стока изменилось в сторону Ладожского озера. Второе понижение уровня Суходольского озера произошло в 1857 г. вследствие искусственного прорыва Лосевской протоки. Тогда уровни воды Вуоксы и Суходольского уравнились на абсолютной высоте 8,7 м и к настоящему времени опустились до 6,5 м [11].

Целью данной работы является детализация истории развития Ладожского озера, в том числе определение трансгрессивно-регрессивных событий, повлиявших на формирование береговой морфосистемы побережья Ладожского озера, определение влияния неотектонических движений на положение береговых линий. Для этого использованы новые геолого-геоморфологические данные, а также выполнено обобщение материалов предыдущих исследователей по этому району.

Методы

В рамках полевых работ на побережье Тайпаловского залива были выполнены геоморфологическое профилирование береговой морфосистемы, а также бурение скважин в болоте Тройное. Бурение осуществлено при помощи торфяного бура в 3 точках. Скважины 3264 и 3265 выполнены у западного края болота рядом с древним береговым уступом. Скважина 3267 заложена у восточного края, сильно заросшего лесом.



Рис. 1. Карта фактического материала.

a — местоположение Тайпаловского залива (белый прямоугольник), спутниковый снимок Earthstar Geographics [12]; *б* — побережье Тайпаловского залива, спутниковый снимок Maxar [12]; 1 — контуры Суходольского озера до 1818 г., 2 — древний береговой уступ, 3 — береговой бар, 4 — местоположение разрезов террасы реки Выюн, по литературным данным, 5 — район работ; *в* — геоморфологическая схема и фактический материал: 1 — акватория Ладожского озера, 2 — береговые бары, 3 — геоморфологический профиль, 4 — точки отбора образцов; I — современный пляж и 5,7–6,4-метровая поверхность береговой террасы; II — 7,2–8-метровая поверхность береговой террасы, осложненная береговыми валами и торфяниками в межваловых понижениях; III — 8–11,5-метровая поверхность береговой террасы, осложненная береговыми валами и торфяниками в межваловых понижениях; IV — 11,5–16,1-метровая поверхность береговой террасы, осложненная береговыми валами; V — 15–16-метровая поверхность береговой террасы, осложненная холмисто-западинным микрорельефом; VI — верховой торфяник, 16,5 м; VII — флювиогляциальная гряда, осложненная береговым уступом

Fig. 1. Map of factual material.

a — location of Taipalovsky Bay (white rectangle), satellite image by Earthstar Geographics [12]; *б* — Taipalovsky Bay coastline, satellite image by Maxar [12]; 1 — contours of Sukhodolskoye Lake before 1818, 2 — ancient cliff, 3 — barrier ridge, 4 — location of terrace sections of the Vyun River based on literature data, 5 — research area; *в* — geomorphological map and factual material: 1 — water area of Lake Ladoga, 2 — barrier ridges, 3 — geomorphological profile, 4 — sampling points; I — modern beach and the 5.7–6.4-meter surface of the coastal terrace; II — 7.2–8-meter surface of the coastal terrace complicated by beach ridges and peat bogs in inter-ridge depressions; III — 8–11.5-meter surface of the coastal terrace complicated by beach ridges and peat bogs in inter-ridge depressions; IV — 11.5–16.1-meter surface of the coastal terrace complicated by beach ridges; V — 15–16-meter surface of the coastal terrace complicated by hummocky-depression microrelief; VI — raised peat bog, 16.5 m; VII — fluvio-glacial ridge complicated by a cliff

Геоморфологическое профилирование проведено с помощью оптического нивелира ГЕОБОХ № 8-26 со стандартным квадратным отклонением $\pm 2,0$ мм на 1 км. Профиль проведен от уреза воды Ладожского озера до бровки древнего берегового уступа через вышеописанные скважины с привязкой к пункту геодезической сети (рис. 1в).

Для возрастной привязки были отобраны образцы песка береговых форм рельефа для оптически стимулированного люминесцентного датирования (ОСЛ) и органогенных отложений из скважин для радиоуглеродного датирования. ОСЛ-датирование по зернам кварца выполнено в лаборатории оптически стимулированной люминесценции Института Карпинского. Его результаты представлены в табл. 1. Радиоуглеродное датирование произведено в Лаборатории геоморфологических и палеогеографических исследований полярных регионов и Мирового океана Института наук о Земле СПбГУ [13] (табл. 2). Значения календарного возраста приведены на основании калибровочной программы “OxCal 4.4.4” (калибровочная кривая “IntCal 20”) [14].

Полученные геоморфологические, литостратиграфические и геохронологические данные в дальнейшем были сопоставлены с опубликованными материалами по строению отложений первой надпойменной террасы реки Вьон (рис. 1б). Последняя является притоком реки Бурной. Используются разрезы Г.Ц. Лака [15], И.В. Делюсиной [16], О.М. Знаменской [17] и Э. Хюппя [18, 19]. Абсолютная высота террасы точно не определена, в разных источниках она варьируется от 12 до 16 м. За высоту кровли рассматриваемых разрезов взята средняя отметка 14 м, при этом стоит учитывать, что, вероятно, это значение не постоянно и меняется от разреза к разрезу. Геохронологические и литологические данные по разрезу III Г.Ц. Лака подкреплены диатомовым анализом, разрезы IV, V, VI И.В. Делюсиной, О.М. Знаменской и Э. Хюппя также изучены спорово-пыльцевым методом.

Таблица 1

Результаты ОСЛ-датирования кварцевых зерен отложений береговых форм

Table 1

OSL-dating results of quartz minerals from coastal deposits

№ лаб.	№ полевой	Глубина отбора от поверхности, м	Фракция, мкм	Мощность дозы, Гр/тыс. лет	Кол-во навесок принятых/отклоненных	Палеодоза, Гр pIR OSL	Возраст, тыс. л. н.
RGI-1172	3398-1	1,1	90–250	1,50±0,07	13/5	12,2±1,1	8,1±0,8
RGI-1173	3397-1	1,1	180–250	1,59±0,07	5/13	7,9±0,5	5,0±0,4
RGI-1174	23-014-1	1,45	180–250	1,65±0,08	18/0	4,1±0,3	2,5±0,2

Таблица 2

Результаты радиоуглеродного датирования отложений болота Тройное

Table 2

Results of radiocarbon dating of peatbog Troinoie depoists

№ лаб.	№ полевой	Материал датирования	Глубина отбора от поверхности, м	Радиоуглеродный возраст, ¹⁴ С л. н.	Калиброванный возраст, кал. л. н.
ЛУ-9566	3264-1	Торф	1,2	1260±70	1180±80
ЛУ-9567	3264-2	Торф	1,93–2,03	1470±110	1390±110
ЛУ-9568	3264-3	Торф с гиттией	2,68–2,78	2600±110	2660±150
ЛУ-9569	3264-4	Торф с гиттией	3,5–3,6	4750±140	5450±180
ЛУ-9570	3264-5	Торф	4,0–4,1	6480±160	7370±150
ЛУ-9571	3264-6	Гиттия	4,12–4,22	6910±120	7760±110
ЛУ-9572	3267-1	Торф	1,4	4660±100	5370±150
ЛУ-9573	3265-2	Пески с гиттией	4,03–4,08	6510±160	7400±150
ЛУ-9574	3265-3	Гиттия	3,88–4,03	2590±90	2650±130

Результаты

На рис. 2 представлен геоморфологический профиль, пройденный от уреза озера до бровки флювиогляциального уступа. На нем выделяются несколько генетически однородных поверхностей (рис. 1в). У уреза озера фиксируются современный пляж и терраса, высота которой составляет 5,7–6,4 м. Терраса ограничена абразионным уступом, выполненным в береговом баре. Ее уклон составляет 0,76°.

Выше расположена относительно субгоризонтальная поверхность на высоте 7,2–8 м, осложненная береговыми валами и низовыми торфяниками в межваловых понижениях. На ее бровке сформирован береговой бар, высота его дистального подножия составляет 7,8 м, высота гребня — 9,4 м. Относительная высота береговых валов составляет 1–1,5 м.

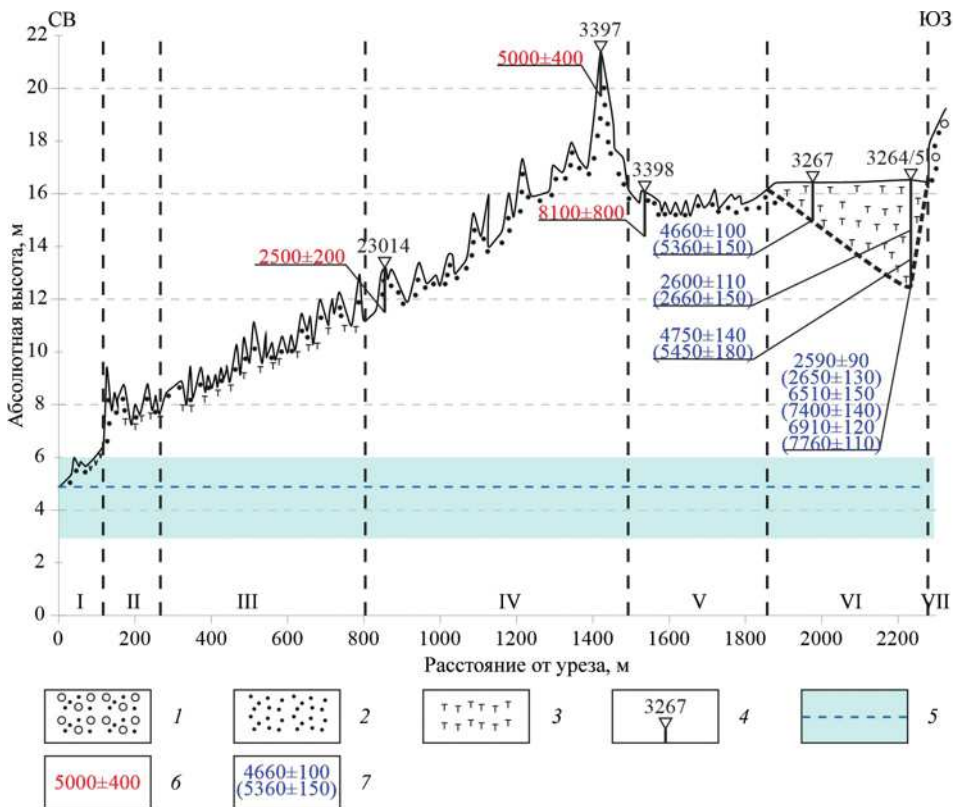


Рис. 2. Геоморфологический профиль через береговую морфосистему Taipalovskogo залива: 1 — галечно-гравийно-песчаные отложения, 2 — пески, 3 — торфа, 4 — точки и глубины отбора образцов, 5 — уровень озера в день измерений, 6 — ОСЛ-возраст отобранных образцов (л. н.), 7 — радиоуглеродный возраст отобранных образцов (^{14}C л. н.), в скобках — калиброванные (кал. л. н.); I–VII — см. рис. 1в

Fig. 2. Geomorphological profile through the coastal morphosystem of Taipalovsky Bay: 1 — pebble-gravel-sand deposits, 2 — sands, 3 — peat, 4 — sampling points and depths, 5 — lake level on the day of measurements, 6 — OSL age of sampled materials (kyr BP), 7 — radiocarbon age of sampled materials (^{14}C BP), calibrated ages (cal. BP) in parentheses; I–VII — see fig. 1в

На высотах 8–11,5 м расположена следующая поверхность. Она также осложнена береговыми валами и низовыми торфяниками, при этом ее уклон становится больше и достигает 0,4°. Относительная высота валов увеличивается с повышением поверхности, от 0,5 до 2 м. Межваловое расстояние довольно небольшое, около 15–20 м.

Следующая поверхность расположена на 11,5–16,1 м, при этом в межваловых понижениях исчезают торфяники. Средняя относительная высота валов и расстояние между ними больше — 1,5–2 м и 40–100 м соответственно. Уклон оценивается в 0,57°. По первому валу (ТН-23014), с глубины 1,45 м от поверхности его гребня, получен ОСЛ-возраст, который составил 2500 ± 200 кал. л. н. (RGI-1174). Высота подножия вала составляет 11,5 м. У дистального края поверхности расположен

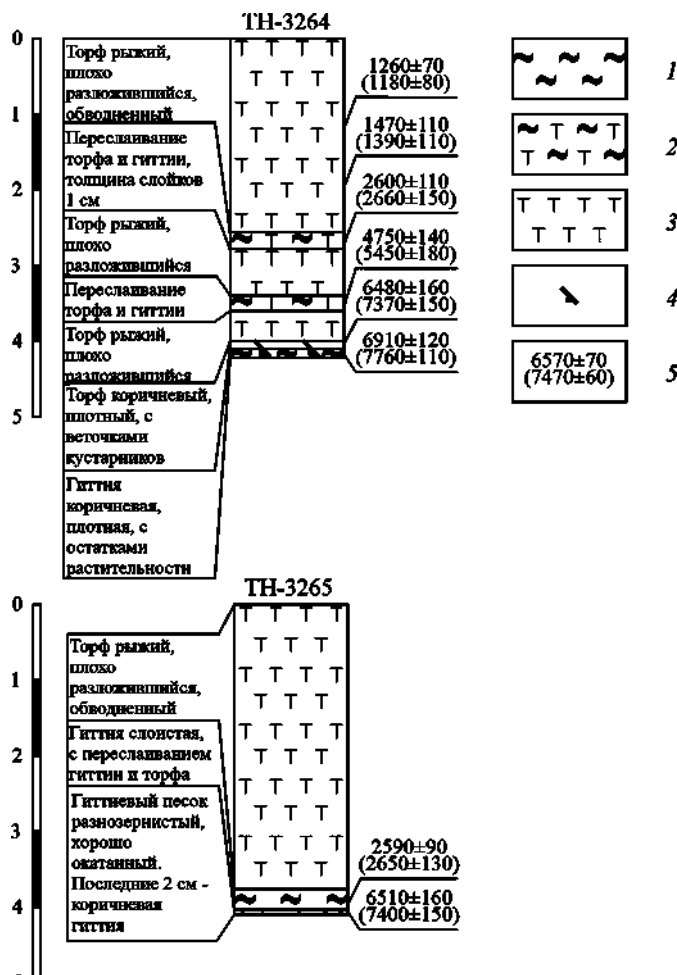


Рис. 3. Литологическое строение кернов 3264 и 3265: 1 — гиттия, 2 — гиттия торфянистая, 3 — торф, 4 — растительные макроостатки, 5 — радиоуглеродные датировки (^{14}C л. н.), в скобках — калиброванные (кал. л. н.)

Fig. 3. Lithological structure of cores 3264 and 3265: 1 — gyttja, 2 — peaty gyttja, 3 — peat, 4 — plant macrofossils, 5 — radiocarbon dates (^{14}C BP), calibrated ages (cal. BP) in parentheses

высокий береговой бар. Абсолютная высота его проксимального подножия составляет 17,0 м, дистального — 16,1, гребня — 21,4 м. На гребне бара, с глубины 1,1 м (ТН-3397), отобран образец для ОСЛ-датирования, возраст которого составил 5000 ± 400 кал. л. н. (RGI-1173).

Далее от берегового бара поверхность террасы приобретает холмисто-западинную морфологию, уклон ее становится близким к нулю. Средняя абсолютная высота варьируется в пределах 15–16 м. В 30 м от берегового бара (ТН-3398) из песков, слагающих эту поверхность, получен ОСЛ-возраст 8100 ± 800 кал. л. н. (RGI-1172).

Террасовую поверхность перекрывает верховой торфяник (болото Тройное). Абсолютная высота его поверхности составляет 16,5 м. Мощность его, по данным бурения, увеличивается по направлению от озера. Максимальная мощность вскрытого торфа равна 4,2 м. В его проксимальной части были вскрыты 1,4 м торфа (ТН-3398), радиоуглеродный возраст подошвы которого оценивается в 4660 ± 100 ^{14}C л. н.

У дистального края торфяника пробурены две скважины (ТН-3264 и ТН-3265), глубина которых составляет 4,2 и 4,1 м соответственно. Описание литологического строения кернов представлено на рис. 3.

Болото ограничено абразионным уступом, сформированным на склоне гряды, сложенной флювиогляциальными отложениями (валуны, галька, гравий, песок). Абсолютная высота его бровки составляет 17,9 м. Нижняя часть уступа перекрыта болотными отложениями. Абсолютная высота тылового шва соответствует уровню забоя скважины ТН-3264, то есть 11,3 м.

Обсуждение результатов

В результате корреляции полученных данных с литературными источниками выделены несколько фаз колебаний относительного уровня Ладожского озера в районе Тайпаловского залива (рис. 4). Эти фазы соотнесены с климатическими периодами, выделяемыми по схеме Блитта–Сернандера [20].

Голоценовая история изменений уровня Ладожского озера начинается с глубокой регрессии в пребореальном периоде [2, 5]. Судя по данным спорово-пыльцевого анализа разреза V (рис. 4), развитие Ладожского озера при уровне ниже современного продолжалось и в начале бореального периода [17]. Этой фазе соответствуют аллювиальные и подстилающие их озерные осадки, залегающие на абсолютной высоте 3–5 м. Субаэральные обстановки в этот период подтверждаются и датировками погребенных торфов, вскрытых в обнажениях реки Бурной на 8–9 м абсолютной высоты [21, 22]. Возраст подошвы органогенной толщи составляет 9430 ± 60 ^{14}C л. н. (10690 ± 130 кал. л. н., ГИН-11438), кровли — 8460 ± 100 ^{14}C л. н. (9430 ± 110 кал. л. н., ЛУ-3527). 8400 л. н. относительный уровень воды превышает отметку 8–9 м. Схожие датировки получены по древесным остаткам из песков в рядом расположенном разрезе — 8490 ± 230 ^{14}C л. н. (9510 ± 320 кал. л. н., ГИН-11436) и 8370 ± 150 ^{14}C л. н. (9320 ± 180 , ГИН-11437) [22].

Отложения первой голоценовой трансгрессии отмечены во всех изученных разрезах присутствием озерных отложений, представленных песками, алевролитами, гиттиями. Спорово-пыльцевые и геохронологические данные позволяют отнести эту фазу к бореал-атлантическому периоду [16–18]. Диатомовый анализ отложений террасы реки Выюн свидетельствует о мелководных, лагунных обстановках осадконакопления в этот период [15]. Возраст максимальной стадии этой трансгрессии определяется ОСЛ-датировкой песков, отобранной из второй террасы побережья Тайпаловского

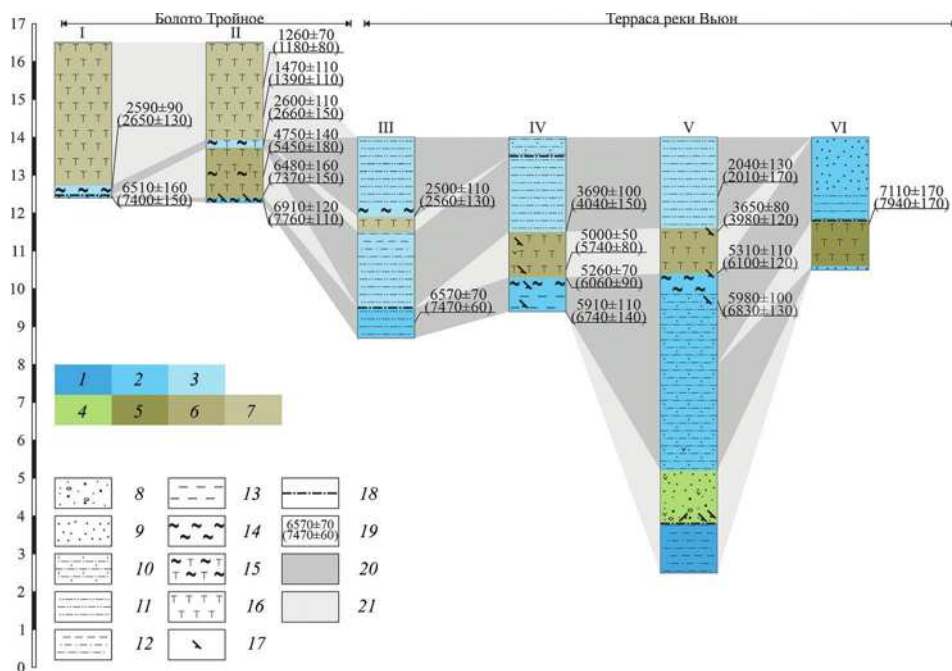


Рис. 4. Литолого-генетическая корреляция разрезов болота Тройное и террасы реки Вьюн: I — керн 3264, II — керн 3265, III — разрез Г.Ц. Лака [15], IV — разрез И.В. Делюсиной [16], V — разрез О.М. Знаменской [17], VI — разрез Э. Хюппя [18, 19]. 1 — озерные отложения пребореального и бореального периодов, IHPb-br(?); 2 — озерные отложения бореального и атлантического периодов, IHat; 3 — озерные отложения бореального периода, IHSb; 4 — аллювиальные отложения пребореального и бореального периодов, aHPb-br(?); 5 — болотные отложения бореального и атлантического периодов, pHbr-at; 6 — болотные отложения атлантического и суббореального периодов, pHat-sb; 7 — болотные отложения субатлантического периода, pHsa; 8 — пески разнозернистые с галькой и гравием; 9 — пески мелко- и среднезернистые; 10 — песчанистые алевроиты; 11 — алевроиты; 12 — глинистые алевроиты, алевроитистые глины; 13 — глины; 14 — гиттии; 15 — торфянистые гиттии; 16 — торфа; 17 — растительные макроостатки; 18 — эрозионный горизонт; 19 — радиоуглеродные датировки (^{14}C л. н.), в скобках — калиброванные (кал. л. н.); 20 — трансгрессивные фазы; 21 — регрессивные фазы

Fig. 4. Lithological-genetic correlation of sections from the Troinoe bog and the terrace of the Vyun River: I — core 3264, II — core 3265, III — section by G.Ts. Lak [15], IV — section by I.V. Delusina [16], V — section by O.M. Znamenskaya [17], VI — section by E. Hyypä [18, 19]. 1 — Preboreal-Boreal lake deposits, IHPb-br(?); 2 — Boreal-Atlantic lake deposits, IHat; 3 — Subboreal lake deposits, IHSb; 4 — Alluvial deposits of the Preboreal-Boreal, aHPb-br(?); 5 — Boreal-Atlantic bog deposits, pHbr-at; 6 — Peat deposits of the Atlantic-Subboreal, pHat-sb; 7 — Peat deposits of the Subatlantic, pHsa; 8 — Sands with pebbles and gravel; 9 — Fine- and medium-grained sands; 10 — Sandy silts; 11 — Silts; 12 — Clayey silts and silty clays; 13 — Clays; 14 — Gytija; 15 — Peaty gytija; 16 — Peat; 17 — Plant macrofossils; 18 — Erosion horizon; 19 — Radiocarbon dates (^{14}C BP), calibrated ages (cal. BP) in parentheses; 20 — Transgressive phases; 21 — Regressive phases

залива на высоте 15–16 м — 8100 ± 800 кал. л. н. (RGI-1172), поскольку прочие датировки отобраны с более низких уровней. Существование трансгрессивной фазы (Анциловой) в этот период подтверждается и предыдущими исследованиями. Ее развитие связывается с проникновением вод Анцилового озера в котловину Ладожского [1, 18].

Особый интерес представляет разрез VI, изученный Ю. Айлио. В нем две пачки озерных отложений описанной выше трансгрессии разделяет пласт погребенного торфа на высоте 11–12 м. Палинологические данные относят накопление этого торфа к концу бореального периода и началу атлантического [18]. По кровле толщи получен радиоуглеродный возраст 7110 ± 170 ^{14}C л. н. (7940 ± 170 кал. л. н., SU-28) [19]. Близкая по возрасту датировка получена по разрезу на реке Бурной, где на высоте около 13,5 м обнаружен погребенный торф, возраст кровли которого составил 7560 ± 50 ^{14}C л. н. (8360 ± 60 кал. л. н., ЛУ-3528) [21]. Исходя из этого, можно сделать вывод о том, что бореал-атлантическая трансгрессия включала в себя две стадии — бореальную и атлантическую. После бореального максимума около 8100 л. н. уровень опустился до 11 м как минимум. В атлантическом периоде вновь началось повышение уровня, в результате чего 7500–7100 ^{14}C л. н. торфяники были затоплены водами второй стадии. Понижение уровня началось около 6900–6500 ^{14}C л. н., что отмечено в разрезах I и II (скважины 3265 и 3264) изменением литологического состава с гиттий и песков на торф. Максимальный уровень второй стадии сложно определить ввиду отсутствия прямой корреляции с береговыми формами. Поскольку пески возраста 8100 ± 800 кал. л. н. не перекрыты более молодыми толщами, ее высоту можно оценить в пределах 14–15 м.

Стоит отметить, что временные рамки атлантической (второй) стадии совпадают с Литориновой трансгрессией Балтийского моря. По результатам исследования малых озер Карельского перешейка возраст начала трансгрессии оценивается 7700–7600 ^{14}C л. н. [23]. Максимальный относительный уровень, высота которого составляет около 10 м, был достигнут около 6500 ^{14}C л. н. Такая хорошая корреляция с атлантической трансгрессией Ладожского озера позволяет утверждать, что ее причина заключается в подпоре водоема со стороны Балтийского моря. Тем не менее отложения этой фазы почти не встречаются Южном Приладожье. Озерные осадки атлантического возраста известны в разрезе урочища Калач [8, 16, 24, 25]. Кровля этой толщи находится на абсолютной высоте 8 м. В юго-западной части Приладожья, в донных отложениях озера Волеярви, урез которого находится на 16 м абс. высоты, возрастным интервалом от 6200 до 5200 ^{14}C л. н. датирован переход от обстановок осадконакопления в крупном бассейне к условиям малого озера [26].

К бореал-атлантической трансгрессии следует отнести и 5-метровый береговой бар. ОСЛ-возраст 5000 ± 400 кал. л. н. (RGI-1173), полученный по его отложениям, соответствует периоду регрессии (см. ниже). Это вызывает сомнения в достоверности полученной датировки. Вероятнее всего, возраст бара соотносится с возрастом холмисто-западинной поверхности, которая представляет собой результат штормового заплеска наносов через бар. Следовательно, образование последнего относится к первой (бореальной) стадии трансгрессии. Проксимальное подножие вала находится на высоте 17 м, дистальное — 17,7 м. Уровень воды не мог подняться выше бровки абразионного уступа, высота которой составляет 17,9 м. Отсюда можно сделать вывод, что максимальный относительный уровень первой стадии бореал-атлантической трансгрессии достиг высоты 17–18 м.

В интервале от 6500 до 5300 ^{14}C л. н. субаквальное осадконакопление сменилось субэзральным болотным. Отложения атлантического регрессивного этапа представлены в разрезах II, IV, V погребенными торфами. Непрерывное накопление торфа в интервале 5300–3600 ^{14}C л. н. на абсолютных высотах около 10–12 м, пред-

ставленное в разрезах IV и V, свидетельствует о том, что в этот период уровень озера опустился ниже этих высотных отметок, если биогенные отложения в этих разрезах (рис. 4) действительно накапливались в болотных обстановках, а не в условиях подтопления озером. По данным исследований погребенных торфов Южного Приладожья, уровень озера в это время опускался примерно до уреза современного водоема [4]. Материалы изучения донных отложений озера позволяют предполагать и более низкое положение береговой линии [5]. В то же время в разрезе II, в толще торфяных отложений на абсолютной высоте 13,7–14,0, фиксируются прослой гиттии с возрастом 4750 ± 140 ^{14}C л. н. (5450 ± 180 кал. л. н., ЛУ-9569). Поскольку установлено, что уровень Ладожского озера в этот момент находился значительно ниже, накопление гиттий, вероятно, связано с более влажным периодом, что привело к обводнению торфяника. Близкий возраст получен и по подошве торфа в ТН-3267 — 4660 ± 100 ^{14}C л. н. (5360 ± 150 кал. л. н., ЛУ-9572), что также свидетельствует о субаэральных условиях на этом участке.

Около 3700–3600 ^{14}C л. н. происходит смена торфяного осадконакопления субаквальным. Этот этап соотносится с началом Ладожской трансгрессии. Отложения данной фазы подъема уровня с суббореально-субатлантическими спорово-пыльцевыми спектрами [16, 17] представлены во всех исследованных разрезах за исключением разреза Э. Хюппя (VI). Состав диатомовых характеризует в целом лагунные обстановки осадконакопления [15]. Стратиграфия исследованных разрезов позволяет разделить этот этап на две стадии. В разрезе III между отложениями, коррелируемыми с осадками Ладожской трансгрессии, расположен прослой торфа. Радиоуглеродный возраст его кровли составляет 2500 ± 110 ^{14}C л. н. (2560 ± 130 кал. л. н., ТА-514). В IV разрезе этой пачке соответствует эрозионный горизонт между двумя толщами озерных отложений. Таким образом, можно прийти к выводу, что около 2500 л. н. началась вторая стадия Ладожской трансгрессии. ОСЛ-возраст песков берегового вала, высота подножия которого 11,5 м, составляет 2500 ± 200 кал. л. н. (RGI-1174), что позволяет соотнести его с береговой линией максимального уровня второй стадии. Двухстадийное развитие Ладожской трансгрессии предполагалось и ранее на других участках побережья [1]. По материалам исследований террас Восточного Приладожья также предположено существование поздней фазы подъема уровня. Там был обнаружен погребенный аллохтонный торф, возраст которого оценивается в 2200 ^{14}C л. н. [1].

Высоту и возраст первой стадии трансгрессии можно определить по отложениям, вскрытым в разрезах I и II. Эти толщи представлены гиттиями, возраст которых составил 2590 ± 90 ^{14}C л. н. и 2600 ± 110 ^{14}C л. н. Высота кровли этих осадков в разрезе II составляет 13,9 м. Эту отметку и следует принять за максимальную высоту первой стадии Ладожской трансгрессии. О том, что уровень воды не превышал 14 м в этом районе, свидетельствует непрерывное осадконакопление торфа в ТН-3267 с 4700–4600 ^{14}C л. н. Высота подошвы разреза составляет 14,0 м. Данный вывод не согласуется с общепринятыми представлениями об увеличении высотного положения береговых линий Ладожской трансгрессии с юга на север. По представлениям Ю. Айлио, максимальная высота относительного уровня трансгрессии в районе Тайпаловского залива составляет 20,6 м [10], по данным Э. Хюппя — 16 м [18]. Оценки высоты поднятия относительного уровня на южном побережье варьируются от 14 до 19 м [1,8,27]. Следовательно, можно утверждать, что береговая

линия Ладожской трансгрессии на побережье Тайпаловского залива находится на одной высоте или даже ниже в сравнении с палеоуровнями Южного Приладожья. В результате последующей регрессии сформировались террасовые поверхности на более низких высотах.

Заключение

В результате проведенного исследования был детализирован ход изменений относительного уровня Ладожского озера в районе Тайпаловского залива. Подтверждено существование двух трансгрессий — бореал-атлантической и суббореал-субатлантической (Ладожской). Бореал-атлантический подъем относительного уровня воды включал в себя две стадии — бореальную и атлантическую. Максимум первой фазы пришелся на 8100 л. н., высота уровня при этом достигла 17–18 м. В это же время был сформирован береговой бар побережья Тайпаловского залива. В атлантическую стадию относительный уровень достиг высоты около 14 м в интервале 6900–6500 л. н. После этого в конце атлантической климатической фазы уровень опустился, что привело к формированию торфяников на рассматриваемом участке.

Также установлено и двухстадиальное развитие Ладожской трансгрессии. Первая стадия подъема воды достигла максимума около 2600 л. н. Ее береговая линия прослеживается на абсолютной высоте 14 м. Такой вывод противоречит принятым представлениям об увеличении высоты положения древних береговых линий Ладожской трансгрессии с юга на север вследствие гляциоизостатического перекоса Приладожья. Вторая стадия началась после 2500 л. н. Ее максимальный уровень оценивается в 11,5 м. При последующем снижении уровня сформировались нижележащие поверхности береговых террас, морфология которых осложнена береговыми валами.

Таким образом, в результате проведенных исследований определены многократные колебания уровня воды Ладожского озера в голоцене, которые и привели к формированию всей береговой системы побережья Тайпаловского залива.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-27-00273 «Оценка темпов снижения уровня Ладожского озера за последние 3000 лет по результатам абсолютного датирования береговых форм рельефа», <https://rscf.ru/project/23-27-00273/>.

Вклад авторов. Аксенов А.О. составил основной текст статьи, подготовил графический материал, проинтерпретировал полученные данные, участвовал в полевых работах. Большианов Д.Ю. участвовал в написании и обсуждении текста статьи, а также в полевых работах. Правкин С.А. участвовал в написании и обсуждении текста статьи, а также в полевых работах. Лебедев Г.Б. участвовал в полевых работах.

Competing interests. Authors declare no conflict of interests.

Funding. The study was conducted with the support of a grant from the Russian Science Foundation № 23-27-00273 “An assessment of Lake Ladoga level decrease rate in the last 3000 years obtained from results of coastal landforms absolute dating”, <https://rscf.ru/project/23-27-00273/>.

Authors' contribution. Aksenov A.O. wrote the major part of the manuscript, prepared graphic illustrations, interpreted the material used, took a part in the fieldwork. Bolshiyanov D.Yu. participated in writing and discussing the manuscript, and in the fieldwork. Pravkin S.A. participated in writing and discussing the manuscript, and in the fieldwork. Lebedev G.B. participated in the fieldwork.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Кошечкин Б.И., Экман И.М. Голоценовые трансгрессии Ладожского озера. В кн. *Эволюция природных обстановок и современное состояние геосистемы Ладожского озера*. СПб.: РГО; 1993. С. 49–60.
2. Aksenov A.O., Krastel S., Rybalko A.E., Fedorov G.B. Geomorphological evidence of Lake Ladoga Holocene regressions after the Baltic Ice Lake drainage (derived from sediment echosounder data). *Limnology and Freshwater Biology*. 2022;(4):1378–1380. <https://doi.org/10.31951/2658-3518-2022-A-4-1378>
3. Кошечкин Б.И. Основные этапы развития береговой зоны. В кн. Квасов Д.Д. (ред.). *История Ладожского, Онежского, Псковско-Чудского озер, Байкала и Ханки*. Л.: Наука; 1990. С. 35–36.
4. Бобровникова Е.М., Шитов М.В. Свирская лагунно-баровая система (поздний голоцен, юго-восточное Приладожье). *Труды Кольского Научного центра*. 2019;6(1):42–51. <https://doi.org/0.25702/KSC.2307-5252.2019.6.006>
Bobrovnikova E.M., Sheetov M.V. Svir Lagoon-Bar System (Late Holocene, South-Eastern Ladoga Area). *Transactions of the Kola Science Centre of RAS*. 2019;6(1): 42–51. (In Russ.). <https://doi.org/10.25702/KSC.2307-5252.2019.6.006>
5. Subetto D.A., Davydova N.N., Rybalko A.E. Contribution to the lithostratigraphy and history of Lake Ladoga. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 1998;140:113–119. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(98\)00032-7](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(98)00032-7)
6. Delusin I., Donner J. Additional evidence of the Holocene transgression in Lake Ladoga on the basis of an investigation of the beach deposits on the island Mantsinsaari. *Bulletin of the Geological Society of Finland*. 1995;67(2):39–50. <https://doi.org/10.17741/bgsf/67.2.003>
7. Лудикова А.В. Свидетельства среднеголоценовой трансгрессии Ладожского озера по данным диатомового анализа. *Известия Русского Географического общества*. 2015;147(4):38–51.
Ludikova A.V. Diatom evidences for the Mid-Holocene Lake Ladoga transgression. *Proceedings of the Russian Geographical Society*. 2015;147(4):38–51. (In Russ.)
8. Малаховский Д.Б., Арсланов Х.А., Гей Н.А., Джиноридзе Р.Н., Козырев М.Г. Новые данные по голоценовой истории Ладожского озера. В кн. *Эволюция природных обстановок и современное состояние геосистемы Ладожского озера*. СПб.: РГО; 1993. С. 61–73.
9. Malachovskij D.B., Delusin I.V., Gej N.A., Dginoridze R.N. Evidence from the Neva River valley, Russia, of the Holocene history of Lake Ladoga. *Fennia*. 1996;174(1):113–123.
10. Ailio J. Geographische entwicklung des Ladogasees in postglazialer zeit und ihre beziehung zur steinzeitlichen besiedelung. *Fennia*. 1915;45:157.
11. Исаченко Г.А. Вуоксинская эпопея. *Приозерский краеведческий альманах*. 2001;2(1):7–33.
12. World Imagery: [Electronic resource]. URL: https://services.arcgisonline.com/ArcGIS/rest/services/World_Imagery/MapServer (accessed: 25.10.2024).
13. Арсланов Х.А. *Радиоуглерод: геохимия и геохронология*. Л.: Изд-во Ленинградского государственного университета; 1987. 300 с.
14. Reimer P.J., Austin A.W.E.N., Bard E., Bayliss A., Blackwell P.G., Bronk Ramsey C., Butzin M., Cheng H., Edwards R.L., Friedrich M., Grootes P.M., Guilderson T.P., Hajdas I., Heaton T.J., Hogg A.G., Hughen K.A., Kromer B., Manning S.W., Muscheler R., Palmer J.G., Pearson C., Van Der Plicht J., Reimer R.W., Richards D.A., Scott E.M., Southon J.R., Turney C.S.M., Wacker L., Adolphi F., Büntgen U., Capano M., Fahrni S.M., Fogtmann-Schulz A., Friedrich R., Köhler P., Kudsk S., Miyake F., Olsen J., Reinig F., Sakamoto M., Sookdeo A., Talamo S. The IntCal20 Northern Hemisphere Radiocarbon Age Calibration Curve (0–55 cal kBP). *Radiocarbon*. 2020;62(4):725–757. <https://doi.org/10.1017/RDC.2020.41>

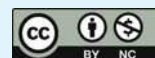
15. Лак Г.Ц. *Диатомовая флора морских и озерных надморенных отложений в котловине Ладожского озера*. Петрозаводск: Карелия; 1976. 64 с.
 16. Delusin I. *The Holocene Pollen Stratigraphy of Lake Ladoga and the Vegetational History of Its Surroundings*. Helsinki: Suomalainen Tiedekatemia; 1991. 67 p.
 17. Знаменская О.М., Ананова Е.Н. Новые данные по истории западного побережья Ладожского озера. В кн. *История озер северо-запада*. Л.: Наука; 1967. С. 132–140.
 18. Hyypä E. Beitrage zur Kenntnis der Ladoga- und Ancylustransgressionen. *Bulletin de la Comission Geologique de Finlande*. 1943;128(15):139–178.
 19. Hyypä E., Toivonen A.V.P., Isola A. Geological survey of Finland radiocarbon measurements. *Radiocarbon*. 1964;6:110–111.
 20. Mangerud J., Andersen S.T., Berglund B.E., Donner J.J. Quaternary stratigraphy of Norden, a proposal for terminology and classification. *Boreas*. 1974;3:109–126. <https://doi.org/10.1111/j.1502-3885.1974.tb00669.x>
 21. Верзилин Н.Н., Клейменова Г.И., Севастьянов Д.В. Трансформация гидрографической сети и лимногляциальных комплексов Карельского перешейка в поздне-последлениковье. *Вестник Санкт-Петербургского Университета. Серия 7. Геология. География*. 2001;(2):40–50.
 22. Nikonov A.A., Shlyukov A.I. Timing of deglaciation on the Karelian isthmus (based on physical methods). *Doklady Earth Sciences*. 2002;387(9): 1048–1051.
 23. Miettinen A., Savelieva L., Subetto D., Dzhinoridze R., Arslanov Kh., Hyvärinen H. Palaeoenvironment of the Karelian Isthmus, the easternmost part of the Gulf of Finland, during the Litorina Sea stage of the Baltic Sea history. *Boreas*. 2007;36(4):441–458. <https://doi.org/10.1080/03009480701259284>
 24. Арсланов Х.А., Делюсина И.В., Козырева М.Г., Кошечкин Б.И. Возраст береговых образований по радиоуглеродным и палинологическим данным. В кн. Квасов Д.Д. (ред.). *История Ладожского, Онежского, Псковско-Чудского озер, Байкала и Ханки*. Л.: Наука; 1990. С. 26–33.
 25. Бискэ Ю.С., Сумарева И.В., Шитов М.В. Позднеголоценовое сейсмическое событие в юго-восточном Приладожье. I. Принципы исследования и деформационные текстуры. *Вестник Санкт-Петербургского Университета. Серия 7. Геология. География*. 2009;(1):3–25.
 26. Кузнецов Д.Д., Субетто Д.А. *Стратиграфия донных озер Карельского перешейка*. М.: ГЕОС; 2019. 117 с.
 27. Шитов М.В., Бискэ Ю.С., Плешивцева Э.С., Потапович А.А. Сумарева И.В. Стоянки А.А. Иностранцева и голоценовая тектоника Южного Приладожья. Геологический контекст. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*. 2019;64(4):628–650. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2019.408>
- Sheetov M.V., Biske Yu.S., Pleshivtseva E.S., Potapovitch A.A., Sumareva I.V. Archaeological sites of A.A. Inostrantsev and Holocene tectonics of South Ladoga region: Geological context. *Vestnik of Saint-Petersburg University. Earth Sciences*. 2019;64(4):628–650. (In Russ.). <https://doi.org/10.21638/spbu07.2019.408>

ЛЕДОТЕХНИКА ICE TECHNOLOGY

Оригинальная статья / Original paper

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-1-46-62>

УДК 629.5.018



Модернизированный комплекс ледовых бассейнов ФГБУ «АНИИ» К 35-летию со дня ввода в строй

П.В. Пацева[✉], А.В. Савицкая, Н.А. Крупина, А.В. Чернов,
И.А. Свистунов, В.А. Лихоманов

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

[✉]pvpatseva@aari.ru

ПВП, 0000-0002-5218-3756; НАК, 0000-0002-3043-5713; АВЧ, 0000-0001-8462-7270;
ИАС, 0009-0002-9436-4288

Аннотация. Модернизация комплекса ледовых бассейнов ААНИИ, открытых в 1990 г., была выполнена в 2022–2023 гг. в рамках гранта, выделенного Министерством науки и высшего образования РФ. В процессе модернизации была выполнена замена холодильных установок большого и малого ледовых бассейнов, организован теплоизолированный комплекс помещений с кернохранилищем, закуплено новое измерительное оборудование, обновлен станочный парк модельной мастерской. Проведенная модернизация позволяет расширить диапазон исследований, которые могут выполняться в комплексе ледовых бассейнов ААНИИ. В статье приведен краткий обзор современных ледовых бассейнов, существующих в России и за рубежом. Рассмотрены результаты модернизации и возможности комплекса ледовых бассейнов ААНИИ. Представлены наиболее интересные и значимые экспериментальные работы, выполненные за последние 10 лет. Описаны самоходные испытания моделей судов, оснащенных дистанционно управляемыми винторулевыми колонками, в том числе испытания нового научно-экспедиционного судна «Иван Фролов», строящегося для ААНИИ. Рассмотрены результаты испытаний ледостойкой самодвижущейся платформы (ЛСП) — НЭС «Северный полюс» в условиях интенсивного сжатия льда. Представлены работы по физическому моделированию взаимодействия льда с гидротехническими сооружениями.

Ключевые слова: ледовая ходкость судна, ледовый бассейн, моделированный лед, модельный эксперимент, толщина льда

Для цитирования: Пацева П.В., Савицкая А.В., Крупина Н.А., Чернов А.В., Свистунов И.А., Лихоманов В.А. Модернизированный комплекс ледовых бассейнов ФГБУ «АНИИ». К 35-летию со дня ввода в строй. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2025;71(1):46–62. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-1-46-62>

Поступила 19.11.2024

После переработки 03.02.2025

Принята 10.02.2025

© Авторы, 2024

© Authors, 2024

Modernized complex of FSBI “AARI” ice tanks On the 35th anniversary of its commissioning

Polina V. Patseva✉, Anna V. Savitskaya, Nina A. Krupina, Alexey V. Chernov,
Ivan A. Svistunov, Vladimir A. Likhomanov

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

✉pvpatseva@aari.ru

✉ PVP, 0000-0002-5218-3756; NAK, 0000-0002-3043-5713; AVC, 0000-0001-8462-7270;
IAS, 0009-0002-9436-4288

Abstract. The current AARI complex of ice tanks was commissioned in 1990. Its modernization was carried out in 2022–2023 within the framework of a grant allocated by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation. In the course of the modernization, the refrigeration units of the large and small ice basins were renewed, a thermally insulated complex of rooms with a core storage facility was built, new measuring equipment was purchased, and the machine park of the model workshop was updated. The article discusses the results of the modernization and the capabilities of the complex of ice basins. 30 m long, 5 m wide and 1.8 m deep, the large tank allows ship models and offshore structures to be tested in various ice conditions. The ice basin has a deep-water part with a depth of 6 m, which is used to model the surfacing of underwater objects from under the ice. The small ice tank, 5 m in length, 5 m in width, and 2.5 m in depth is used to perform a wide range of studies on naturally frozen ice in the field of mechanics of deformation and fracture of sea ice. The small tank can also be used as a low-temperature laboratory to study the properties of various coatings and materials. The paper presents the most interesting and significant experimental studies carried out at the AARI complex of ice basins over the past 10 years. The studies include: self-propelled testing of ship models equipped with new remotely controlled rudder propellers including the testing of the new scientific expedition vessel «Ivan Frolov», currently being built for the AARI; physical modeling of the behavior of the ice-resistant self-propelled platform (IRSP) “North Pole” under conditions of intense ice compression; physical modeling of the interaction of ice with hydraulic structures: bridge piers and shore reinforcement structures. The modernization of equipment and measuring devices contributes to a significant increase in the range of studies that can be performed using the AARI complex of ice tanks and enhances the quality of studies.

Keywords: ice capability of ship, ice basin, modeled ice, model experiment, ice thickness

For citation: Patseva P.V., Savitskaya A.V., Krupina N.A., Chernov A.V., Svistunov I.A., Likhomanov V.A. Modernized complex of FSBI “AARI” ice tanks. On the 35th anniversary of its commissioning. *Arctic and Antarctic Research*. 2025;71(1):46–62. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-1-46-62>

Received 19.11.2024

Revised 03.02.2025

Accepted 10.02.2025

Введение

Первый в мире опытовый ледовый бассейн был открыт 1955 г. в здании Арктического и антарктического научно-исследовательского института (АНИИ), располагавшегося тогда в Шереметевском дворце на набережной реки Фонтанки (рис. 1) в Ленинграде. Создание ледового бассейна было обусловлено необходимостью получения данных о ледовом сопротивлении для последующего успешного проектирования судов ледового плавания. Здесь прошли испытания первого в мире атомного ледокола «Ленин» и атомных ледоколов типа «Арктика» (в начале 1970-х гг.).

В 1986 г. АНИИ переехал в новое здание на улице Беринга на Васильевском острове, а в 1990 г. был запущен в эксплуатацию новый комплекс ледовых бассейнов АНИИ, который включал: большой и малый ледовые бассейны, низкотемператур-



Рис. 1. Первый в мире опытовый ледовый бассейн, открытый в ААНИИ в 1955 г.
 Fig. 1. The world’s first ice tank, opened at the AARI in 1955

ные камеры и собственную мастерскую по изготовлению моделей. При постройке большой ледовый бассейн был снабжен крышками-батареями, предназначенными для охлаждения воздуха. В 2008 г. крышки-батареи были демонтированы и заменены на новую холодильную автоматизированную установку с тремя воздухоохладителями, расположенными по периметру бассейна.

Опыт создания и эксплуатации первого ледового бассейна вызвал большой научный и практический интерес к ледовой проблематике многих зарубежных исследователей. Подобные экспериментальные установки стали появляться и в других странах начиная с 1958 г. На данный момент всего в мире около 30 действующих ледовых опытовых бассейнов [1].

В табл. 1 приведены данные о современных ледовых бассейнах, введенных в эксплуатацию или модернизированных после 2000 г., включая бассейн ААНИИ, который прошел последнюю модернизацию в 2022–2023 гг. по гранту, выделенному Министерством науки и высшего образования РФ на техническое обновление ком-

Таблица 1

Современные опытовые ледовые бассейны

Table 1

Modern experimental ice basins

Организация (место нахождения)	Год постройки (модернизации)	Длина, м	Ширина, м	Глубина, м
ААНИИ (Россия, Санкт-Петербург)	1990 (2008, 2023)	30,0	5,0	1,8/5,8
КГНЦ (Россия, Санкт-Петербург)	2013	100/80	10	2,0/4,0
Aker Arctic (Финляндия, Хельсинки)	2006	75,0	8,0	2,1
Университет Аалто (Финляндия, Эспоо)	1988 (2019)	40,0	40,0	2,1
Исследовательский институт MOERI (Южная Корея)	2009	42,0	32,0	2,5
Тяньцзиньский университет (Китай, Тяньцзинь)	2016	40,0	6,0	2,0

плекса ледовых опытовых бассейнов. Помимо ледового бассейна ААНИИ в России функционирует большой ледовый бассейн в Крыловском государственном научном центре (КГНЦ) [2]. Также в нашей стране распространены лаборатории, лед в которых намораживается естественным способом при отрицательных температурах окружающего воздуха. Однако они имеют небольшие размеры, что накладывает некоторые ограничения при проведении испытаний. Такие лаборатории находятся в НГТУ им. Р.Е. Алексеева в Нижнем Новгороде [3] и в Приамурском государственном университете имени Шолом-Алейхема в г. Биробиджане [4].

Ледовый бассейн ААНИИ имеет средние размеры и позволяет проводить различные виды исследований в области ледотехники. Для того чтобы поддерживать возможность проведения исследований на современном уровне, в рамках гранта в 2022–2023 гг. была выполнена модернизация холодильных установок и помещений, возобновлена работа малого ледового бассейна, организован теплоизолированный комплекс помещений, включающий зернохранилище, закуплено новое измерительное оборудование, обновлен станочный парк модельной мастерской.

За 35 лет деятельности ледового бассейна было проведено большое количество испытаний судов и гидротехнических сооружений, а также работ, которые не являются традиционными для опытовых бассейнов. Описание измерительного оборудования и ряд исследований, выполненных до 2015 г., представлены в статье [5]. Далее приведено описание модернизированного комплекса ледовых бассейнов, охарактеризованы его назначение и наиболее значимые работы, выполненные за последние 10 лет, в том числе после модернизации.

Большой ледовый бассейн

Большой ледовый бассейн ААНИИ предназначен для проведения модельных испытаний судов и инженерных сооружений в ледовых условиях. Основные виды работ, выполняемых в ледовом опытовом бассейне:

- исследование ледовой ходкости судов в различных ледовых условиях с возможностью проведения как буксировочных, так и самоходных испытаний [5, 6];
- исследование воздействий льда на инженерные гидротехнические сооружения (опоры мостов, причалов, буровые платформы, различные ледозащитные сооружения), в том числе определение глобальной ледовой нагрузки на морские инженерные сооружения при их взаимодействии с ледяными образованиями [5, 7];
- исследование процессов всплытия подводных объектов из-под льда и т. д. [8].

В бассейне возможно моделирование широкого спектра ледовых условий и ледяных образований, в том числе: сплошной ровный неподвижный и дрейфующий лед, битый лед с заданными размерами и сплоченностью, торосистый лед различных видов, ледовые каналы различного возраста [9, 10].

На рис. 2 показан общий вид большого ледового бассейна ААНИИ после проведения модернизации, а в табл. 2 приведены его основные характеристики.

Чаша бассейна представляет собой канал с поперечным сечением в виде трапеции. В канале имеется глубоководная часть, которая используется для моделирования процессов всплытия. В чашу вмонтированы боковые иллюминаторы с прожекторами для освещения подводной части, что позволяет вести наблюдение и видеосъемку экспериментов под водой. Бассейн оснащен самоходной буксировочной тележкой с обогреваемой кабиной, которая имеет массу около 9 т и может передвигаться со скоростью до 1,5 м/с. Тележка предназначена как для проведения модельных испы-



Рис. 2. Общий вид большого ледового бассейна ААНИИ в 2024 г. после модернизации
 Fig. 2. General view of the AARI large ice basin in 2024 after modernization

Таблица 2

Основные характеристики большого ледового бассейна ААНИИ

Table 2

Main characteristics of the AARI large ice tank	
Параметр	Значение
Длина	30 м
Ширина	5 м
Длина доковой камеры	8 м
Общая площадь ледяного поля	150 м ²
Глубина	1,8 м
Параметры глубоководной части (Д×Ш×Г)	7 × 1,2 × 6 м
Минимальная температура воздуха	–20 °С
Максимальная толщина моделированного льда	70 мм
Максимальная толщина льда естественного намерзания	70 см
Скорость движения модели	до 1,5 м/с
Предельные размеры испытуемой модели	длина — до 7 м ширина — 1 м

таний, размещения различного измерительного оборудования, так и для выполнения технологических функций — уборка остатков льда после эксперимента, очистка водного зеркала бассейна от естественно намерзшего льда, равномерное распыление водного раствора вдоль чаши бассейна для приготовления моделированного льда.

В рамках модернизации большого ледового бассейна была выполнена замена холодильной установки. Вместо трех воздухоохладителей теперь используется шесть, что позволяет добиться более равномерного распределения холодного воздуха по помещению бассейна. В качестве хладагента используется фреон. Работа холодильной системы автоматизирована. Управление системой может осуществляться через интернет. Система управления позволяет выбирать и устанавливать режимы намораживания льда и сохранять данные о температурном режиме в процессе на-

морозки. Для дополнительного контроля за температурой воздуха в помещении ледового бассейна установлена метеостанция. Для отслеживания температуры воды в чаше бассейна используется термокоса, установленная на горизонте 90 см от дна и измеряющая температуру каждые 0,5 м по длине бассейна. Такие технологические решения позволяют управлять параметрами льда и его качеством и обеспечивают равномерное намерзание толщины льда по длине бассейна.

Согласно общим положениям моделирования, лед для проведения испытаний должен удовлетворять соотношениям геометрического, кинематического и динамического подобия [11, 12]. В мировой практике используются два типа моделированного льда: столбчатый и гранулированный¹. Методика приготовления моделированного столбчатого льда была предложена специалистами ААНИИ [11]. В настоящее время в ледовом бассейне института намораживается столбчатый поликристаллический ослабленный лед NaCl-ice, который образуется с помощью внесения мелких кристаллов льда при распылении над спокойным зеркалом воды бассейна небольшого количества воды. Образующаяся структура позволяет льду иметь заниженную изгибную прочность по сравнению с естественно образовавшимся льдом. Изменение концентрации соли NaCl, растворимой в чаше бассейна, позволяет варьировать величину предела прочности льда на уровне масштаба моделирования. Способ и устройство для моделирования ледяного покрова в ледовом опытовом бассейне ААНИИ защищены патентом РФ № 2535398 [13].

В ледовом бассейне ААНИИ могут проводиться как буксировочные, так и самоходные испытания судов. Буксировка модели может выполняться с помощью самоходной тележки. В рамках модернизации были проведены мероприятия по восстановлению прямолинейности рельсового пути, по которому движется тележка, и выполнен ремонт ее ходовой части. Это сделано для минимизации вибраций тележки в процессе движения. Также было модернизировано буксирно-измерительное устройство, в котором реализована схема односточной буксировки: изготовлена регулируемая по высоте рама с кронштейном, и приобретены новые датчики продольного усилия, которые крепятся к раме, выполненные на базе одноосевых динамометров сжатия-растяжения с различными диапазонами измерений.

Также буксировочные испытания могут выполняться с помощью системы «бесконечного троса», когда модель приводится в движение падающим грузом — то есть задается тяга модели и измеряется развиваемая скорость, либо устройство освобождается от троса падающего груза, модель подсоединяется к тросу через динамометр и буксируется с заданной скоростью, при этом измеряется сопротивление. Схема данного устройства представлена на рис. 3. Модель включается в нижнюю ветвь «бесконечного троса» буксировочной системы. Для сохранения возможности свободного изменения дифферента и всплытия модели на ходу, а также для исключения рыскания на курсе используется специальная запряжка. Динамометр прикрепляется к настилу в районе геометрического центра модели и соединяется с запряжкой через шарнир.

Модернизация системы «бесконечного троса» заключалась в установке нового электродвигателя с цифровым управлением по моменту и оборотам, что позволило повысить точность задаваемой скорости. При этом измерение скорости производится

¹ ITTC — Recommended Procedures and Guidelines, General Guidance and Introduction to Model Testing. 2017. URL: <https://www.ittc.info/media/8051/75-02-04-01.pdf> (accessed 02.12.2024).

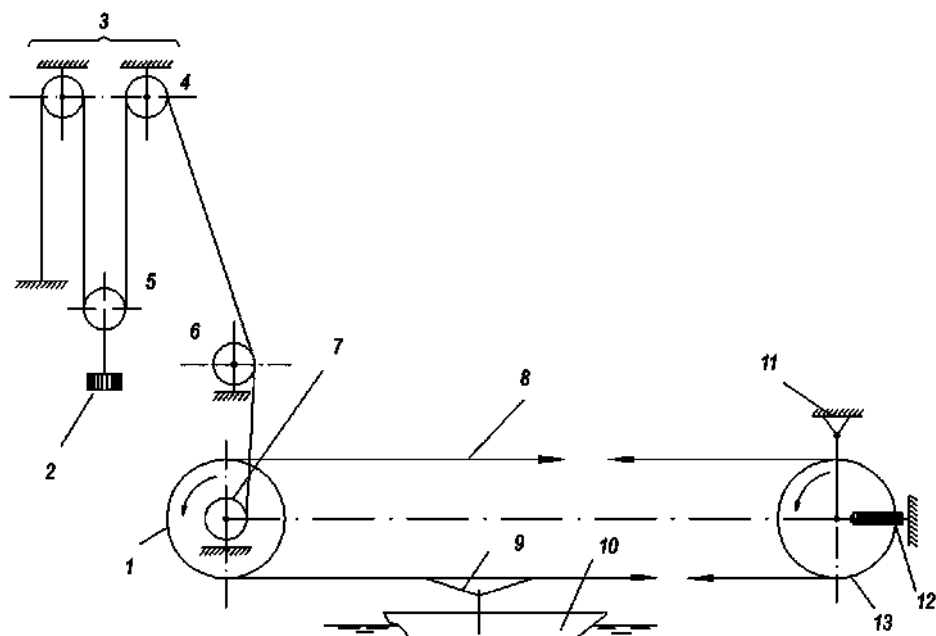


Рис. 3. Схема устройства для буксировки модели:

1, 13 — колеса; 2 — рабочий груз; 3 — полиспаст; 4, 6 — направляющие ролики; 5 — подвижный ролик полиспаста; 7 — барабан; 8 — буксировочный трос; 9 — запряжка модели; 10 — модель; 11 — шарнир подвески колеса; 12 — натяжное устройство

Fig. 3. Diagram of the device for towing the model:

1, 13 — wheels; 2 — plummet; 3 — polyspast; 4, 6 — fixed pulley; 5 — movable pulley; 7 — drum; 8 — tow rope; 9 — device for fixing the model; 10 — model; 11 — wheel suspension hinge; 12 — tension device

с помощью инфракрасного щелевого оптического датчика на базе оптопары, установленного на щелевом кольце колеса, жестко соединенном с приводным колесом буксировочного устройства.

Для проведения самоходных испытаний судов с различными типами движителей был приобретен модельный движительный комплекс (рис. 4), который включает в себя: 3 полноповоротные винторулевые колонки (ВРК), 3 валопровода, 2 пера руля, блок управления, аккумуляторный блок и виртуальный пульт управления на базе ноутбука. Программное обеспечение комплекса позволяет задавать и отображать в реальном времени частоту и направления вращения для валопроводов и ВРК, а также углов поворота ВРК. При этом отображается крутящий момент и упор для каждого пропульсивного элемента. Запись параметров выполняется в процессе всего эксперимента.

Такое оснащение большого ледового бассейна позволяет разнообразить спектр выполняемых исследований и повысить качество проводимых экспериментов. Ниже представлены наиболее интересные работы, которые были выполнены до и после модернизации в ледовом бассейне за последнее десятилетие.

Одним из наиболее значимых событий в российской полярной науке является постройка ледостойкой самодвижущейся платформы (ЛСП) — НЭС «Северный полюс». Платформа прошла в АНИИ полный цикл создания [14]: от идеи за-



Рис. 4. Двигательный комплекс, установленный на модель НЭС «Иван Фролов»

Fig. 4. Propulsion system installed on the model of the research vessel “Ivan Frolov”



Рис. 5. Модель ЛСП (масштаб 1:40) во время проведения эксперимента по воздействию интенсивных ледовых сжатий на корпус

Fig. 5. Model of the IRSPP (scale 1:40) during the experiment on the effect of intense ice compression on the hull

мены дрейфующих ледовых станций «Северный полюс» на плавучее сооружение в 1970-х гг. и разработки технико-экономического обоснования в 2010 г. до первого дрейфа ЛСП в 2022–2024 гг. Перед постройкой судна в 2018 г. была выполнена обширная программа модельных испытаний ЛСП в масштабе 1:40 по заказу АО КБ «Вымпел» [6]. По результатам испытаний была определена ледопроечность в сплошном льду, в битом льду и канале, которая была подтверждена в ходе натурных ледовых испытаний.

Так как основной режим эксплуатации ЛСП — дрейф в ледовых условиях, в бассейне также был выполнен новый тип испытаний — эксперименты по воздействию интенсивных ледовых сжатий на корпус ЛСП и оценке параметров остойчивости платформы [10]. При этом выполнялась оценка воздействия льда на борт модели с помощью пленочного датчика контактных давлений и регистрация кинематических параметров модели (ускорений и углов наклона платформы) в процессе взаимодействия со льдом. На рис. 5 показана модель ЛСП во время проведения таких испытаний.

По результатам модельных испытаний была определена оптимальная форма корпуса ЛСП для успешной эксплуатации в ледовых условиях. В частности, было

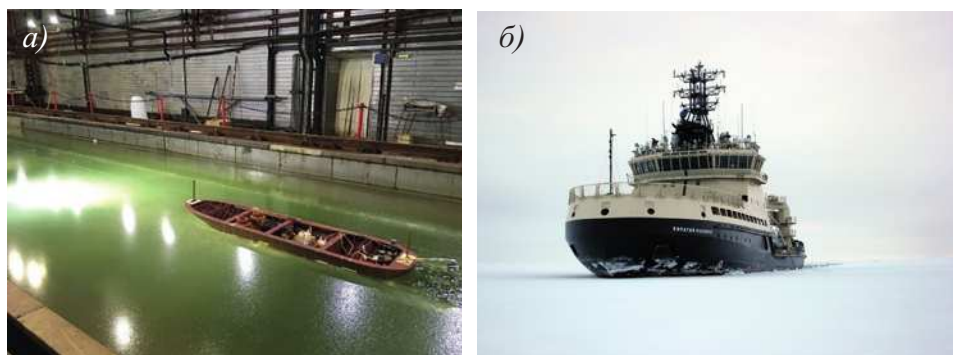


Рис. 6. Ледокол «Евпатий Коловрат» (проект 21180М): *а* — модельные испытания в ледовом бассейне ААНИИ, *б* — натурные ледовые испытания

Fig. 6. Icebreaker “Evpatiy Kolovrat” (project 21180M): *a* — model tests in the AARI ice tank, *b* — full-scale ice trials

высказано предложение по корректировке формы кормовой оконечности с целью предотвращения попадания льда к ВРК. Данное предложение было принято заказчиком, и обводы кормы были модифицированы. Благодаря наблюдениям в ходе экспериментов за качественной картиной ломки льда и образования навалов у борта платформы, были определены районы, которые требуется оборудовать датчиками системы мониторинга ледовых нагрузок [15]. Еще одним важным итогом выполненных исследований стали создание и отработка новой экспериментально-аналитической методики проведения модельного эксперимента по определению ледовой нагрузки от ледовых сжатий на суда и специализированные сооружения судового типа. Данная методика использует математическую модель описания физических процессов, сопровождающих взаимодействие плавучего объекта, имеющего наклонные борта в средней части корпуса, с толстым однолетним или многолетним ледяным полем при ледовых сжатиях, а также прямые измерения изменений угла крена и осадки судна в процессе модельного эксперимента [7].

ААНИИ имеет все возможности для проведения комплекса ледовых испытаний судов — от модели до натуры. Так, в 2017 г. были выполнены модельные испытания ледокола проекта 21180М «Евпатий Коловрат» (рис. 6а), а в 2023 г. состоялись его натурные испытания (рис. 6б). Стоит отметить, что такой же комплекс испытаний был выполнен и для ледокола «Илья Муромец» предыдущего проекта 21180 [16].

В 2024 г. уже в модернизированном бассейне были проведены испытания будущего флагмана полярного флота, который в настоящее время строится для ААНИИ на Адмиралтейских верфях, — НЭС «Иван Фролов». Были выполнены буксировочные и самоходные испытания в сплошном ровном льду и в битых льдах разной сплоченности. Наличие управляемых винторулевых колонок, установленных на модели, позволило провести эксперименты по исследованию ледопроходимости при движении кормой вперед, по оценке возможности выхода судна из канала при разных углах поворота ВРК, а также испытания по форсированию торосов (рис. 7а). Эксперименты по движению задним ходом осуществлялись методом самоходного движения при условии подбора тяги на швартовах. Отработка методики проведения самоходных испытаний при движении задним ходом будет продолжена.



Рис. 7. Испытания моделей судов в ледовом бассейне: *a* — модель НЭС «Иван Фролов» (масштаб 1:50) во время проведения эксперимента по форсированию тороса передним ходом; *б* — эксперимент по выходу из канала модели контейнеровоза ледового класса Arc8 (масштаб 1:60) при движении носом вперед

Fig. 7. Testing of ship models in the ice basin: *a* — model of the research vessel “Ivan Frolov” (scale 1:50) during an experiment on crossing a hummock at ahead motion; *б* — experiment on exiting the channel of a model of an Arc8 ice-class container ship (scale 1:60) while moving forward

Одной из интересных работ также являются экспериментальные исследования ледовой ходкости и маневренности контейнеровоза ледового класса Arc8, проведенные в 2022 г. по заказу ООО «МИБ-дизайн-СПб». Для проведения испытаний была изготовлена модель судна в масштабе 1:60, оснащенная тремя винторулевыми колонками. В рамках данной работы выполнен стандартный комплекс испытаний в сплошных и битых льдах, а также испытания по форсированию торосов и по выходу из канала (рис. 7б). Результаты испытаний позволили сделать вывод, что при исходной форме кормовой оконечности изгибающее воздействие корпуса на лед невелико, что приводит к резкому росту сопротивления и снижению ледопроеходимости. В связи с этим было рекомендовано оптимизировать обводы кормовой оконечности для улучшения ходкости на заднем ходу при проектной осадке.

В качестве примера работ по исследованию взаимодействия льда с гидротехническими сооружениями можно привести испытания по воздействию дрейфующего льда на опоры мостового перехода через р. Обь в районе г. Салехарда, выполненные по заказу ООО «ИЦ “МиТ”» в 2017 г. В результате данной работы получены оценки параметров ледовой нагрузки на опоры моста при различных направлениях и скоростях дрейфа льда, разработаны рекомендации по определению расчетных ледовых воздействий на опоры и по конструированию ледорезной части опор моста с целью снижения ледового воздействия. Было испытано 6 различных вариантов опор проектируемого моста. В данном случае был реализован метод обращенного движения, когда лед неподвижен, а модель сооружения, закрепленная на буксировочной тележке, движется сквозь лед.

В 2023 г. по заказу АО «ЛЕНМОРНИИПРОЕКТ» была выполнена оценка воздействия льда на берегоукрепление нефтяного терминала в порту «Бухта Север». Основной задачей физического моделирования являлось определение конфигурации ледозащитной стенки берегоукрепления, которая бы предотвратила наползание льда на территорию нефтяного терминала со стороны акватории порта. Для проведения

испытаний поверхность изготовленной модели была покрыта слоем щебня, который в свою очередь сверху был закреплен двойным слоем цементных кубиков размером 40×40 мм, моделирующего материал, из которого изготавливаются элементы бе-



Рис. 8. Модель берегоукрепления с исходным углом откоса 1:4, подготовленная к испытаниям
Fig. 8. The model of the bank protection with an initial slope angle of 1:4, prepared for testing

регоукрепления в природных условиях (рис. 8). Моделирование взаимодействия сооружения со льдом здесь осуществляется методом прямого движения, когда ледяной покров надвигается с требуемой скоростью на модель сооружения, закрепленную в заданной точке бассейна.

При проведении экспериментов с откосом с исходным уклоном 1:4 было зафиксировано воздействие льда на ледозащитную стенку и попадание льда за нее. Поэтому было рекомендовано увеличить уклон до 1:2,5, что создает предпосылки для более эффективной фрагментации льда и накопления его на горизонтальном участке (берме).

Малый ледовый бассейн

Для проведения научных и практических исследований не всегда требуются поля моделированного льда длиной более 20 м. Иногда достаточно ограничиться небольшим объемом охлаждаемого помещения для решения локальных задач. Для проведения таких работ в АНИИ существует малый ледовый бассейн — это относительно небольшое теплоизолированное помещение размером (Д × Ш × В) $11,2 \times 8,2 \times 6,2$ м, в котором расположена чаша бассейна размером (Д × Ш × Г) $5 \times 5 \times 2,5$ м (рис. 9). Эксперименты в малом бассейне проводятся на льду естественного намерзания. В рамках модернизации в бассейне установлена новая холодильная установка, которая позволяет поддерживать температуру в помещении до -30 °С и намораживать естественный лед толщиной до одного метра.

Также был обновлен измерительный комплекс для исследования физико-механических свойств льда: гидростанция и пресс для исследования прочности льда при одноосном сжатии, термометры, весы, кондуктометр и др.

Такое оснащение малого бассейна позволяет проводить большой спектр исследований на льду естественного намерзания [17]:



Рис. 9. Общий вид малого ледового бассейна

Fig. 9. General view of the small ice tank

- механики деформации и разрушения морского льда;
- физических свойств льда: температуры, солёности и плотности льда;
- пределов прочности и модулей деформации льда при сжатии малых образцов перпендикулярно и параллельно поверхности покрова;
- прочностных характеристик ровного льда при изгибе по результатам испытания консолей, выпиленных на всю толщину льда, и по результатам испытания малых образцов.

Помещение малого бассейна может использоваться в качестве низкотемпературной лаборатории для исследования свойств различных покрытий и материалов:

- исследования свойств материалов с целью прогнозирования возможности их длительной работоспособности в экстремальных условиях низких температур, статических, циклических и динамических нагрузжений, в сочетании с воздействием агрессивных коррозионных сред и физических полей (коррозия);
- исследования износостойкости металлизационных покрытий при взаимодействии со льдом и физическое моделирование истирающего воздействия льда (рис. 10);
- оценки эффективности протекторных покрытий для наружной защиты металлоконструкций объектов гражданского и промышленного строительства от обледенения;
- исследования по определению адгезии льда к различным покрытиям и т. д.

При проведении подобных испытаний специалисты ААНИИ принимают участие в создании методик имитации воздействия льда на образцы покрытий и материалов, разрабатывают экспериментальные установки, проводят эксперименты, выполняя необходимые измерения, и передают образцы заказчику для оценки последствий ледового воздействия на испытанное покрытие или материал.

Отдельно стоит упомянуть возможность предоставления комплекса ледовых бассейнов для испытаний различных спасательных средств, которые неоднократно проводились в ААНИИ в интересах МЧС и Министерства обороны РФ.

Все приведенные выше виды испытаний ранее проводились в большом ледовом бассейне. После модернизации их стало возможно проводить в малом бассейне, что, во-первых, позволяет сохранять рабочий режим в большом бассейне под задачи



Рис. 10. Установка для проведения испытаний по определению истирающего воздействия льда на образцы материалов

Fig. 10. A test facility for determining the corrosion rate of steel samples using the gravimetric method, which can also be used to determine the abrasive effect of ice on samples

физического моделирования, а во-вторых, существенно снижает как трудоемкость, так и энергозатраты на проведение таких испытаний. Так, в 2024–2025 гг. в малом бассейне в рамках договора с ИПФ РАН проводятся исследования физических и механических свойств пресного льда во время цикла намораживания-таяния, включающие описание текстуры и структуры полученного льда, измерения толщины льда, температуры, плотности, прочности на изгиб и на сжатие.

Модельный цех

В состав комплекса ледовых бассейнов ААНИИ входит также модельный цех, где изготавливаются все испытываемые в ледовом бассейне модели судов и сооружений. В рамках модернизации в цех было закуплено современное оборудование, которое позволяет использовать новые технологические возможности, такие как 3D-фрезерование, 3D-печать, 3D-сканирование, лазерный раскрой листовых материалов.

Традиционно в ААНИИ модели для испытаний изготавливали из фанеры. В соответствии с теоретическим чертежом выполнялся раскрой конструктивных элементов корпуса — шпангоутов, стрингеров, днища, планширя и т. д. Все детали вырезались из фанеры с помощью гидроабразивной или лазерной резки. Далее собирался каркас модели (рис. 11а), который обшивался тонкими полосками фанеры. Затем каркас обклеивался стеклотканью для придания прочности и герметичности корпусу, а потом выполнялась шпаклевка и покраска. Такой способ позволял получить проч-



Рис. 11. Изготовление модели судна в ААНИИ: *а* — изготовление деревянной каркасной модели по традиционной технологии; *б* — изготовление модели на пятиосевом фрезерном станке
Fig. 11. Making a ship model at AARI: *a* — manufacturing the wooden frame model according to traditional technology; *b* — cutting out the model on a five-axis milling machine

ную модель, которая выдерживала многократные испытания в моделированном льду, не получая повреждений. Однако этот способ имел высокую трудоемкость, а также при укладке слоев эпоксидной смолы, стеклоткани и других покрытий иногда появлялись отклонения от требуемых характеристик формы корпуса.

В рамках модернизации в модельный цех был приобретен пятиосевой фрезерный станок производства фирмы «Моделист» с числовым программным управлением, который позволил сократить трудозатраты и время на изготовление моделей, размеры которых не превышают $4 \times 1 \times 1$ м. Модели могут изготавливаться из пенопласта или фанеры, при этом точность их изготовления составляет 0,5 мм. На рис. 11б показан пример изготовления модели НЭС «Иван Фролов» в масштабе 1:50 с помощью данного станка.

Для контроля качества изготавливаемых моделей был приобретен набор ручных 3D-сканеров Calibri и Calibri Mini российской компании Thor3D. Кроме этого, в арсенале модельного цеха также появились станки лазерной резки 1500×1500 мм и 900×600 мм и 3D-принтер PICASO 3D Designer XL PRO S2 с областью печати $360 \times 360 \times 610$ мм. Это оборудование позволяет изготавливать все необходимые для моделей детали непосредственно в модельном цехе, в частности, с помощью 3D-принтера возможно изготовление моделей гребных винтов.

Комплекс низкотемпературных камер

Благодаря проведенной модернизации, в комплексе ледовых бассейнов появился теплоизолированный комплекс помещений размерами (Д $\times$ Ш $\times$ В) $11 \times 11 \times 3$ м. В состав комплекса входит коридор площадью $49,4 \text{ м}^2$, охлаждаемый до -10°C , две камеры площадью 16 м^2 и $13,6 \text{ м}^2$, охлаждаемые до температуры -20°C , а также кернохранилище площадью 42 м^2 , охлаждаемое до температуры -10°C , которое используется в том числе для хранения кернов многолетнемерзлых грунтов в рамках программы создания системы мониторинга многолетней мерзлоты. Кернохранилище оснащено системой дистанционного контроля за температурой в холодильных камерах. Комплекс может быть использован для хранения образцов льда и их подготовки для дальнейших исследований.

Заключение

Проведенная модернизация оборудования и приборной базы способствовала существенному расширению диапазона исследований, которые могут выполняться в комплексе ледовых бассейнов ААНИИ. Новое холодильное оборудование позволяет выполнять работы со льдом круглогодично. Оборудование низкотемпературных камер и зернохранилища расширило спектр исследований по изучению как мерзлых грунтов, так и образцов замороженного льда (зернов). Значительно повышена точность изготовления моделей судов со сложными обводами корпуса, при этом уменьшена трудоемкость таких работ. Внедрение дистанционно управляемых винторулевых колонок позволило корректно выполнять физическое моделирование самоходного движения судна кормой вперед и моделировать процесс маневрирования судна во льдах. Наряду с традиционными работами, освоены принципиально новые направления, такие как моделирование поведения стоечного судна в условиях ледовых сжатий и другие. Усовершенствование холодильных мощностей малого ледового бассейна позволит больше внимания уделить исследованию фундаментальных проблем физики и механики льда. В частности, в настоящее время подано несколько заявок на гранты РФФИ, в которых предполагается использовать возможности малого бассейна.

Конфликт интересов. Конфликт интересов отсутствует.

Финансирование. Обновление приборной базы проведено по грантам 2022 и 2023 гг. в рамках федерального проекта «Развитие инфраструктуры для научных исследований и подготовки кадров» национального проекта «Наука и университеты».

Благодарности. Авторы выражают благодарность инженерам отдела ледовых качеств судов ААНИИ, которые осуществляли контроль на всех этапах модернизации, а также техническое обеспечение проведения всех экспериментальных работ в комплексе ледовых бассейнов.

Competing interests. The authors have no competing interests.

Funding. The instrumentation base was updated under the 2022 and 2023 grants within the framework of the Federal project “Development of Infrastructure for Scientific Research and Personnel Training” of the national project “Science and Universities”.

Acknowledgments. The authors are grateful to the engineers of the AARI Department of ship performance in ice who maintained control at all stages of modernization and provided technical support for all the experimental work in the complex of ice basins.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Боруевич В.О., Русецкий А.А., Сазонов К.Е., Соловьев И.А. *Современные гидродинамические лаборатории*. СПб.: ФГУП «Крыловский государственный научный центр»; 2019. 316 с.
2. Денисов В.И., Сазонов К.Е., Тимофеев О.Я. Новые экспериментальные возможности Крыловского государственного научного центра по изучению ледовых воздействий на объекты морской техники. *Арктика: экология и экономика*. 2015;3(19):76–81.
Denisov V.I., Sazonov K.E., Timofeev O.Ya. New experimental capabilities of the Krylov State Research Center for study of ice impact on marine equipment. *Arctic: Ecology and Economy*. 2015;3(19):76–81. (In Russ.)
3. Золотов Н.В., Калинина Н.В. Модернизация измерительного комплекса ледового опытового бассейна НГТУ. *Транспортные системы*. 2019;2(12):16–24.
Zolotov N.V., Kalinina N.V. Modernization of the measuring complex of the NNSTU ice tank. *Transport systems*. 2019;2(12):16–24. (In Russ.)

4. Земляк В.Л., Баурин Н.О., Курбацкий Д.А. Лаборатория «Ледотехники». *Вестник Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема*. 2013;1(12):68–77.
Zemlyak V.L., Baurin N.O., Kurbachiy D.A. Laboratory "Ice technology". *Vestnik Priamurskogo gosudarstvennogo universiteta imeni Sholom-Aleichema*. 2013;1(12):68–77. (In Russ.)
5. Крупина Н.А., Лихоманов В.А., Максимова П.В., Николаев П.М., Савицкая А.В., Свистунов И.А., Чернов А.В. Итоги работы Большого ледового бассейна ААНИИ (к 25-летию со дня ввода в строй). *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2015;1(103):101–110.
Krupina N.A., Likhomanov V.A., Maksimova P.V., Nikolaev P.M., Savitskaya A.V., Svistunov I.A., Chernov A.V. Results of work of large ice tank of AARI (to the 25th anniversary of the commissioning). *Problemy Arktiki i Antarktiki = Arctic and Antarctic Research*. 2015;1(103):101–110. (In Russ.)
6. Лихоманов В.А., Крупина Н.А., Свистунов И.А., Чернов А.В. Модельные испытания ледостойкой самодвижущейся платформы «Северный полюс» в ледовом бассейне ААНИИ. *Российские полярные исследования*. 2018;3(33):39–40.
Likhomanov V.A., Krupina N.A., Svistunov I.A., Chernov A.V. Model tests of the ice-resistant self-propelled platform "North Pole" in the AARI's ice tank. *Russian polar researches*. 2018;3(33):36–37. (In Russ.)
7. Свистунов И.А. Экспериментально-аналитическая методика определения глобальной ледовой нагрузки от ледовых сжатий на суда и плавучие платформы, используемые в качестве полярных дрейфующих обсерваторий. *Арктика: экология и экономика*. 2023;13(1):85–96.
<https://doi.org/10.25283/2223-4594-2023-1-85-96>
Svistunov I.A. Experimental-analytical method for determining the global ice load from ice compression on ships and floating platforms used as polar drifting observatories. *Arctic: Ecology and Economy*. 2023;13(1):85–96. (In Russ.). <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2023-1-85-96>
8. Свистунов И.А., Чернов А.В., Крупина Н.А., Лихоманов В.А., Максимова П.В. Физическое моделирование статического всплытия подводной лодки из-под льда в ледовом бассейне ААНИИ. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2016;3(109):85–93.
Svistunov I.A., Maksimova P.V., Chernov A.V., Krupina N.A., Likhomanov V.A. Physical modeling of surfacing underwater object from under the ice in the AARI's ice tank. *Problemy Arktiki i Antarktiki = Arctic and Antarctic Research*. 2016;3(109):85–93. (In Russ.)
9. Krupina N.A., Chernov A.V., Likhomanov V.A., Maksimova P.V., Savitskaya A.V. The ice tank study of ice performance of a large LNGS in the old channel. In: *Proceedings of the 22nd International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC)*, 9–13 June, Espoo, Finland. 2013. Curran Associates Inc, Red Hook, NY: 2014; 1:211–220.
10. Свистунов И.А. Определение кренящего момента, действующего при ледовом сжатии на ледостойкую самоходную платформу «Северный полюс», методом модельных испытаний. *Арктика: экология и экономика*. 2019;3(35):97–106. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2019-3-97-106>
Svistunov I.A. Determination of the heeling moment acting in ice compression on the ice-resistant selfpropelled platform "North Pole" by the model testing method. *Arctic: Ecology and Economy*. 2019;3(35):97–106. (In Russ.). <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2019-3-97-106>
11. Каштелян В.И., Позняк И.И., Рывлин А.Я. *Соппротивление льда движению судна*. Л.: Судостроение; 1968. 238 с.
12. Сазонов К.Е. *Модельный и натурный эксперименты в морской ледотехнике*. СПб.: Крыловский государственный научный центр; 2021. 308 с.
13. Патент РФ № 2013101426/13, 10.01.2013. Крупина Н.А., Чернов А.В., Николаев П.М. *Способ и устройство для моделирования ледяного покрова в ледовом опытовом бассейне*. Патент России № 2535398. 2014. Бюлл. № 34.

14. Макаров А.С., Лихоманов В.А., Соколов В.Т., Чернов А.В., Половинкин В.Н., Тимофеев О.Я., Могутин Ю.Б., Симонов Ю.А. Концептуальные принципы создания полярной дрейфующей исследовательской платформы. *Арктика: экология и экономика*. 2018;31:65–75. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2018-3-65-75>
Makarov A.S., Likhomanov V.A., Sokolov V.T., Chernov A.V., Polovinkin V.N., Timofeev O.Ya., Mogutin Yu. I., Simonov Yu. A. Conceptual principles for creation of the drifting polar research platform. *Arctic: ecology and economy*. 2018;31:65–75. (In Russ.). <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2018-3-65-75>
15. Чернов А.В., Максимова П.В., Лихоманов В.А., Свистунов И.А., Крупина Н.А., Савицкая А.В. Методика формирования архитектуры системы мониторинга ледовых нагрузок для ледостойкой самодвижущейся платформы. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2020;66(4):515–533. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-4-515-533>
Chernov A.V., Maksimova P.V., Likhomanov V.A., Svistunov I.A., Krupina N.A., Savitskaya A.V. Methodology for developing the configuration of an ice load monitoring system for an ice resistant self-propelled drifting platform. *Arctic and Antarctic Research*. 2020;66(4):515–533. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-4-515-533>
16. Чернов А.В. Испытания ледокола «Илья Муромец». *Российские полярные исследования*. 2018;2(32):27–29.
Chernov A.V. Trials of the icebreaker “Ilya Muromets”. *Russian Polar Researches*. 2018;2(32):27–29. (In Russ.)
17. Крупина Н.А., Иванов Б.В., Кубышкин Н.В., Лихоманов В.А., Николаев П.М., Чернов А.В., Шахов Е.Г. Комплексные исследования процессов нарастания и механики разрушения льда естественного намерзания в большом ледовом бассейне АНИИ. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2008;2(79):7–20.
Krupina N.A., Ivanov B.V., Kubyshkin N.V., Likhomanov V.A., Nikolaev P.M., Chernov A.V., Shakhov E.G. Combined experimental studies of growing up processes and failure mechanics of ice of natural freezing ice in AARI’S large ice tank. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. 2008;2(79):7–20. (In Russ.)

Оригинальная статья / Original paper

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-1-63-73>

УДК 551.467; 629.5

**Об определении эффективного давления сжатия льда
по данным натурных измерений параметров движения судов**К.Е. Сазонов^{1,2✉}, А.А. Добродеев^{1,2}¹ Крыловский государственный научный центр, Санкт-Петербург, Россия² Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, Россия

✉ K_Sazonov@ksrc.ru

ID КЕС, 0000-0003-3364-1309; ААД, 0000-0001-6305-5090

Аннотация. Сжатия льда относятся к опасным ледовым явлениям, препятствующим судоходству во льдах и в некоторых случаях приводящим к гибели судов. В изучении этого природного явления достигнуты значительные результаты, позволяющие осуществлять его прогнозирование и рекомендовать маршруты движения судов во льдах вне опасных зон. Воздействие ледовых сжатий на корпус судна изучено хуже. Основной причиной являются трудности в определении силового воздействия ледовых сжатий различной интенсивности, которая оценивается с помощью специальных шкал визуально, на корпус судна. В работе предлагается ввести понятие эффективного давления ледовых сжатий, которое, являясь маркером происходящих процессов, позволило бы оценивать дополнительное ледовое сопротивление, испытываемое судном. Аналогичный подход успешно применяется при определении глобальной ледовой нагрузки на инженерные сооружения. В работе предложен метод определения эффективного давления сжатия льда, основанный на измерении ходовых характеристик судна (мощности, скорости и частоты вращения движителей), а также на измерении скорости закрытия канала за судном. Такие измерения должны проводиться в близких ледовых условиях при наличии и отсутствии ледовых сжатий. Скорость закрытия канала за судном можно связать с интенсивностью ледовых сжатий. Для расчета дополнительного сопротивления судна используются специальные диаграммы ледовой ходкости, построение которых для конкретного судна осуществляется на основании данных стандартных модельных испытаний в гидродинамическом бассейне. Обсуждается возможность применения описанного метода и возможные ограничения. Данные об эффективном давлении сжатия представляют значительный интерес для прогнозирования работы морских арктических транспортных систем и, возможно, для изучения динамики ледяного покрова.

Ключевые слова: ледовые сжатия, эффективное давление, тяга движительного комплекса судна, коэффициент трения льда об обшивку корпуса

Для цитирования: Сазонов К.Е., Добродеев А.А. Об определении эффективного давления сжатия льда по данным натурных измерений параметров движения судов. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2025;71(1):63–73. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-1-63-73>

Поступила 15.11.2024

После переработки 28.12.2024

Принята 07.02.2025

© Авторы, 2024

© Authors, 2024

Determining effective pressure in ice compressions based on full-scale measurements of ship motion parameters

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

¹ Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

² Saint-Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

✉K_Sazonov@ksrc.ru

ORCID KES, 0000-0003-3364-1309; AAD, 0000-0001-6305-5090

Abstract. Ice compressions are among navigation hazards that impede navigation in freezing waters and sometimes result in loss of ships. Recent advances in the investigation of this ice feature enable its prediction and make it possible to recommend safe navigation routes for ships, bypassing hazardous zones. The effect of ice compression on hull structures is less understood. First of all, this is because ice compression actions are difficult to determine accurately and are currently estimated by means of special visual scales (marks) drawn on the hull. This paper proposes using the parameter of effective pressure for ice compressions. Effective pressure is always present in the case of ice compression phenomena, so it could be used as an assessment criterion for the added resistance of the ship. A similar approach has been successfully applied to determine the global ice load on engineering structures. This paper suggests a method for determining the effective pressure of ice compression based on ship propulsion performance data (engine power, movement speed and propeller RPM), as well as on the measured speed of ice channel closing behind the ship. These measurements must be taken in similar ice conditions with and without ice compressions. The speed of ice channel closing behind the ship could be used to quantify ice compression intensity. Added resistance of ships is calculated using the special diagrams of ice propulsion performance made which are made for specific ships based on the results of standard model tests in hydrodynamic tanks. The paper discusses the prospects and possible limitations of this method. Effective ice compression data would be very interesting for the prediction of operational conditions of Arctic transportation systems and, possibly, for the investigation of ice sheet dynamics.

Keywords: ice compression, effective pressure, thrust of ship propulsion system, ice/hull friction coefficient

For citation: Sazonov K.E., Dobrodeev A.A. Determining effective pressure in ice compressions based on full-scale measurements of ship motion parameters. *Arctic and Antarctic Research*. 2025;71(1):63–73. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-1-63-73>

Received 15.11.2024

Revised 28.12.2024

Accepted 07.02.2025

Введение

Ледовые сжатия относятся к числу наиболее опасных для судоходства в Арктике ледовых явлений [1]. Воздействие ледовых сжатий на судно приводит к снижению скорости его движения вплоть до полной остановки, а при весьма интенсивных сжатиях возможны локальные повреждения корпуса. Ранее ледовые сжатия неоднократно были причиной гибели судов во льдах. Попытки описания и изучения этого явления предпринимались начиная с момента начала ледового судоходства на Балтийском море. Тем не менее существенного прогресса в этом достигнуто не было. В одной из недавних работ, опубликованной финскими специалистами, отмечается, что исследования по этой теме проводятся относительно редко и надлежащих методов оценки связанного с этим риска недостаточно [2]. В то же время данные о влиянии ледовых сжатий на скорость движения судов на замерзающих акваториях являются крайне важными для прогнозирования параметров рейсов судов [3, 4].

Подавляющее большинство исследований, посвященных изучению ледовых сжатий, выполнено в натурных условиях. В этих условиях наличие ледовых сжатий и их интенсивность определяются «на глаз» в соответствии со шкалами ледовых сжатий. Эти шкалы не одинаковы в разных странах. Так, существует принятая в России шкала [1] и шкала, применяемая в Ботническом заливе Финляндией и Швецией [5]. Натурные наблюдения позволили установить многие важные характеристики ледовых сжатий, выполнять математическое моделирование зафиксированных случаев их возникновения и осуществлять прогнозирование возникновения этого природного явления [6]. Важным представляется подход, предложенный А.Т. Казаковым, в соответствии с которым одним из важнейших признаков для определения интенсивности ледовых сжатий является быстрота закрытия канала за судном. Им предложена некоторая эмпирическая зависимость между скоростью закрытия канала и степенью сжатия льда, представленная в виде таблицы (см. табл. 1) [7].

Таблица 1

**Скорость закрытия канала за ледоколом
в зависимости от степени сжатия ледяного покрова**

Table 1

**The speed of channel closure behind the icebreaker
depending on the degree of compression of the ice cover**

Степень сжатия, баллы	Скорость закрытия канала, м/с
0–1	0,01–0,02
1	0,04–0,05
1–2	0,07–0,08
2	0,15–0,20
2–3	0,23–0,27
3	> 0,30

Данные этой таблицы (средние значения) могут быть аппроксимированы следующим выражением [8]:

$$V_p = 0,005s + 0,0376s^2, \text{ м/с}, \quad (1)$$

V_p — скорость закрытия канала; s — степень сжатия льда в баллах.

Этот подход для оценки интенсивности ледовых сжатий представляется наиболее удобным потому, что он не зависит от направления действия сжатий. На скорость закрытия канала влияет лишь составляющая усилий сжатия, которая перпендикулярна оси канала. Эта же составляющая также вызывает появление дополнительного ледового сопротивления у судна, движущегося в зоне сжатия. Таким образом, по скорости закрытия канала за судном определяется лишь интенсивность сжатий, влияющих на параметры его движения. При этом общая интенсивность сжатия ледяного покрова может быть больше, т. к. судно, которое движется курсом, параллельным направлению действия ледовых сжатий, может практически не иметь дополнительного ледового сопротивления.

В настоящее время для регистрации скорости закрытия канала в условиях сжатия льда используется специализированная телевизионная система [9, 10], разработанная специалистами ААНИИ. К сожалению, в доступных авторам литературных источниках отсутствуют публикации, в которых бы излагались результаты

применения этой системы. Это обстоятельство послужило одной из причин написания данной работы, в которой излагается возможный подход к обработке данных измерений скорости закрытия канала для получения информации, важной для проведения расчетов ледовой ходкости судов.

Методы оценки влияния ледовых сжатий на характеристики ледовой ходкости

Одна из первых попыток определить дополнительное ледовое сопротивление судна ΔR , возникающее из-за действия на него ледовых сжатий, была предпринята А. Ассуром [11]. Он предложил формулу для вычисления этого сопротивления, которое, по его мнению, возникает на цилиндрической вставке судна L_p , попавшего в зону сжатий:

$$\Delta R = 2f_{ID}(\sigma + \sigma_0)L_p h, \quad (2)$$

где f_{ID} — коэффициент трения льда об обшивку корпуса, $\sigma_0 = 8$ кПа — эмпирический коэффициент, σ — напряжения сжатия в ледяном покрове, h — толщина льда. Применение этой формулы затруднено из-за неопределенности в задании напряжений сжатия в ледяном покрове и установлении соответствия между ними и степенью сжатия льда, выраженной в баллах. В настоящее время имеются лишь данные, полученные на основании анализа результатов численного моделирования дрейфа льда в различных регионах Арктики [12]. Эти данные (см. табл. 2, заимствованную из работы [12]) обладают большим диапазоном изменения нормального напряжения в ледяном покрове, что не позволяет эффективно использовать их для дополнительного ледового сопротивления судна, вызванного ледовыми сжатиями.

Предпринимались попытки изучения особенностей процесса взаимодействия судна со сжатыми льдами с помощью модельного эксперимента в ледовых бассейнах. Наиболее активно такие опыты проводили финские специалисты [13, 14], подобные исследования выполнялись также в ледовом бассейне Крыловского научного центра [8]. По результатам выполнения в финском ледовом бассейне совместного с Институтом проблем механики РАН научно-исследовательского проекта была предложена следующая методика расчета дополнительного сопротивления, возникающего при сжатии, основными допущениями которой являются предположения о перпендикулярности действия сжатий курсу судна и наличие прямых бортов на цилиндрической вставке [15]. Расчетные формулы этой методики следующие:

$$\begin{aligned} P_n &= P_0 \left\{ 1 - \frac{0,975hV_s^{2/3}}{L_p V_i} \left[\left(\frac{E}{\rho} \right)^{1/2} \frac{\sigma_f}{\sigma_c} \right]^{1/3} \right\}, \\ \Delta R_\alpha &= 2,5P_n \sin \left(\arctg \frac{V_s}{V_i} \right), \\ \Delta R_{fr} &= P_n f_{ID}, \\ \Delta R &= \Delta R_\alpha + \Delta R_{fr}, \end{aligned} \quad (3)$$

где V_s , V_i — скорости судна и льда в направлении, перпендикулярном движению судна соответственно; L_p — длина цилиндрической вставки; E — модуль упругости льда; σ_f , σ_c — прочность льда на изгиб и смятие; ρ — плотность льда; ΔR_α , ΔR_{fr} — составляющие дополнительного сопротивления, первая связана с непосредственным

Шкала перехода от среднего нормального напряжения к степени сжатия льда

Scale of transition from average normal stress to the degree of compression of ice

Среднее нормальное напряжение, $10^5/\text{Па}$	Степень сжатия, баллы
0,001–0,01	0–1
0,01–0,1	1
0,1–0,3	1–2
более 0,3	3

давлением на носовое заострение, вторая с трением по цилиндрической вставке. $P_0 = 1$ в случае, если судно потеряло ход из-за действия сжатий. Это соотношение показывает, что дополнительное ледовое сопротивление измеряется в условных единицах. По-видимому, P_0 можно трактовать как тягу движительного комплекса на швартовном режиме.

Авторы работы [15] отмечают, что приведенные соотношения являются весьма приблизительными и должны в дальнейшем быть уточнены и дополнены. Обращает на себя внимание то, что авторы работы используют безразмерные величины для описания воздействия ледовых сжатий на судно. Это означает, что они фактически пытаются использовать характеристики судна для определения интенсивности воздействия сжатия. Именно этот подход будет использован в данной работе для оценки численных, характеризующих интенсивность сжатия льда и позволяющих рассчитывать параметры ледовой ходкости судна.

Современные методы определения тяговых характеристик судна

Казалось бы, сопротивление воды движению натурального судна легко определить, приравняв его тягу движительного комплекса при заданной скорости. Однако хорошо известно, что при проведении натурных испытаний судов на чистой воде нельзя точно определить его сопротивление. Это связано с тем, что мы не имеем возможности измерить тягу движительного комплекса судна. В лучшем случае путем специальных измерений можно зарегистрировать лишь упор движителей. Расчетным путем определить по данным модельного гидродинамического эксперимента зависимость тяги от скорости движения на чистой воде для значительного диапазона изменения скорости представляется весьма затруднительным из-за существенного влияния масштабного эффекта как на само сопротивление, так и на коэффициенты взаимодействия корпуса и движителя. Удовлетворительные расчетно-экспериментальные схемы разработаны лишь для режимов движения судна, близких к полному ходу, для которых прогнозирование тяги вполне удовлетворительно.

Для судов, эксплуатирующихся в ледовых условиях, до недавнего времени ситуация была еще более сложной. При движении во льдах судно по сравнению с условиями чистой воды испытывает дополнительное ледовое сопротивление, что приводит к заметному снижению скорости движения и повышению гидродинамической нагрузки на движители. В этих условиях практически для всех судов не было возможности рассчитать их тяговые характеристики, как для модели, так и для натур, за исключением швартовного режима. Эта ситуация связана с тем, что в условиях, соответствующих движению во льдах, коэффициент попутного потока становится отрицательным и при снижении скорости стремится к минус бесконечности [16].

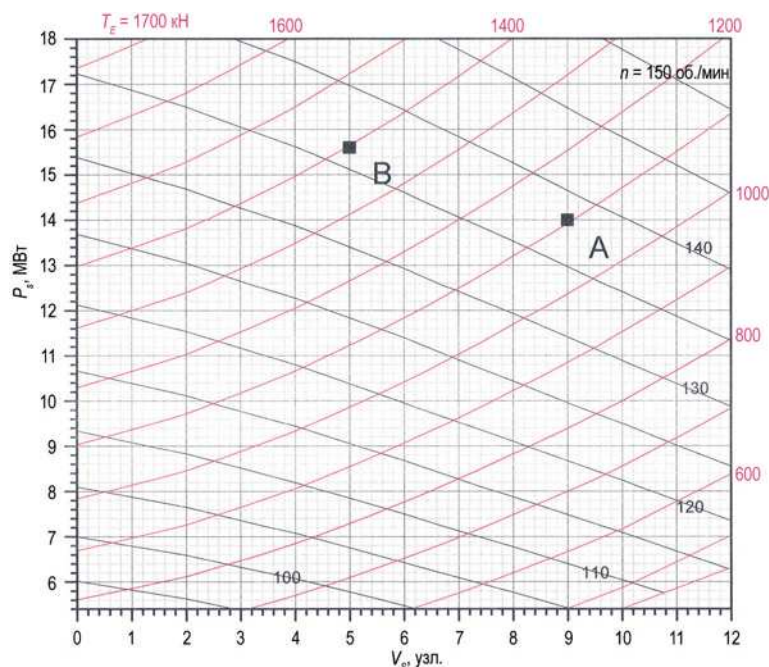


Рис. 1. Диаграмма тяговых и других гидродинамических характеристик ледокола проекта 21900М

Fig. 1. Diagram of thrust and other hydrodynamic characteristics of the icebreaker of project 21900M

Возможность полного расчета всех ходовых характеристик движущегося во льдах судна, включая тяговые, появилась относительно недавно, после разработки специалистами Крыловского центра новой системы коэффициентов взаимодействия, которая полностью эквивалентна ранее применявшейся, но позволяет обойти указанную выше трудность [16]. Теперь для любых скоростей движения судна во льдах, включая сколь угодно малые, можно выполнить все расчеты ходовых характеристик (мощность, частота вращения движителя, тяга и прочее). Особенно важно отметить, что при небольших скоростях движения влиянием масштабного эффекта на гидродинамические характеристики можно пренебречь. Результаты таких расчетов удобно представить в виде диаграммы ледовой ходкости [17] (см. рис.). Такие диаграммы можно построить для любого судна, для которого при проектировании выполнен стандартный набор гидродинамических модельных испытаний. В настоящее время диаграммы используются для анализа данных натурных испытаний судов [18].

Дополнительное сопротивление сжатия и эффективное давление

Представленные выше диаграммы дают возможность использования судна в качестве «пробного тела» для определения дополнительного ледового сопротивления, возникающего при действии на его корпус ледовых сжатий. В самом деле, рассмотрим ситуацию, представленную на рис. 1. Пусть в точке А судно движется в некоторых ледовых условиях, при этом ледовые сжатия отсутствуют. Затем судно попадает в зону ледовых сжатий, и его параметры движения соответствуют точке В на рис. 1. В соответствии с диаграммой тяга движительного комплекса в точке А была равна 1100 кН, в точке В — 1400 кН. Соответственно дополнительное со-

противление, вызванное сжатиями, будет равно $\Delta R = 300$ кН. Приведенные выкладки справедливы только в том случае, если ледовые условия, в первую очередь толщина ледяного покрова, сильно не изменились или их изменение можно трактовать как влияние наличия ледовых сжатий.

Если судно снабжено телевизионной системой измерения скорости закрытия канала, то в результате многократного применения описанной операции можно получить данные для построения усредненной зависимости $\Delta R = f(V_i)$, а используя формулу (1), и зависимости $\Delta R = f(s)$.

Полученные таким образом зависимости подходят для анализа движения конкретного судна, но не очень удобны для дальнейшего использования применительно к другим судам, т. к. довольно сильно зависят от особенностей формы корпуса судна, используемого как «пробное тело». Для уменьшения влияния формы корпуса судна удобно от силы дополнительного сопротивления перейти к понятию эффективного давления сжатия p_{eff} и номинальной площади S_{nom} . Эти понятия широко используются в морской ледотехнике для определения глобальной ледовой нагрузки на морские инженерные сооружения [19]. Для ее определения вводится понятие номинальной площади контакта, которая определяется произведением ширины сооружения в направлении дрейфа льда на толщину ледяного покрова. При таком подходе глобальная ледовая нагрузка вычисляется как произведение некоторого эффективного давления на номинальную площадь контакта. Эффективное давление определяется как некоторое условное давление, соответствующее моменту достижения глобальной нагрузкой максимального значения. При этом эффективное давление практически никогда нельзя отождествлять с каким-либо физическим процессом, происходящим при взаимодействии сооружения со льдом.

Для определения эффективного давления в случае действия на корпус судна ледовых сжатий, по-видимому, можно предложить целый ряд расчетных схем. Ниже в качестве примера приводятся две такие схемы.

Схема 1. Она полностью соответствует подходу, применяемому при определении ледовой нагрузки на морские инженерные сооружения. Номинальная площадь контакта определяется как сумма длины носового заострения судна L_b и длины цилиндрической вставки L_p , умноженная на толщину льда h :

$$S_{n1} = 2(L_b + L_p)h. \quad (4)$$

Множитель 2 указывает, что ледовые сжатия действуют на оба борта судна. В формуле (4) при определении номинальной площади используются длины носового заострения и цилиндрической вставки, т. к. обычно считается, что кормовая оконечность не взаимодействует со сжатым льдом, при любом сжатии канал не закрывается сразу за кормой судна. Но в принципе можно использовать и полную длину судна по ватерлинии L , это вопрос договоренности. Возможно, такое определение номинальной площади контакта будет более удобным при выполнении исследований и последующем использовании полученных результатов.

Сила дополнительного сопротивления от сжатия льда будет равна:

$$\Delta R = 2f_{ID}f_{eff}(L_b + L_p)h, \quad (5)$$

откуда находится выражение для эффективного давления:

$$p_{eff1} = \frac{1}{2h} \frac{\Delta R}{f_{ID}(L_b + L_p)}. \quad (6)$$

Схема 2. В этой схеме дополнительно вводится среднее значение угла наклона ватерлинии к диаметральной плоскости $\bar{\alpha}$ на носовом заострении судна. Этот угол задается следующим выражением:

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{L_b} \int_{L/2-L_b}^{L/2} \alpha(x) dx, \quad (7)$$

здесь $\alpha(x)$ — распределение углов наклона ватерлинии по длине носового заострения; L — длина судна. Начало оси OX находится на миделе, ось направлена в нос.

В рассматриваемой расчетной схеме учитывается, что действие ледовых сжатий проявляется не только в увеличении силы трения, но и в непосредственном давлении на носовую оконечность. Величина эффективного давления считается постоянной и задается следующим выражением:

$$p_{eff2} = \frac{1}{2h \sin \bar{\alpha} (1 + f_{ID}) L_b + f_{ID} L_p} \Delta R. \quad (8)$$

Итоговым результатом расчетов по формулам (6) или (8) должно стать накопление банка данных, на основании которых можно было бы получить зависимости типа $p_{eff} = f(V_i)$ или $p_{eff} = f(s)$.

Обсуждение и выводы

Выражения (6) и (8) позволяют по данным натурных измерений определить эффективное давление сжатия корпуса судна. Сравнение этих формул между собой показывает, что p_{eff1} превышает величину p_{eff2} не более чем на 30 %. Формально формула (8) лучше учитывает форму судна, и, казалось бы, ей необходимо отдать предпочтение при анализе данных. Однако решение этого вопроса не столь однозначно.

Основным достоинством формулы (6) является ее простота и возможность применения к любому судну. Необходимо отметить, что после получения эмпирических зависимостей эффективного давления от скорости закрытия канала или степени сжатия при их практическом использовании для расчета скорости движения судна в сжатых льдах необходимо будет использовать ту расчетную схему, для которой были получены зависимости. Здесь может возникнуть некоторая трудность, т. к. не всегда возможно для каждого судна определить среднее значение угла наклона ватерлинии.

Еще одна сложность в применении формулы (8) заключается в ледовых условиях, в которых движется судно при воздействии на него сжатий. Например, судно может двигаться по каналу, кромки которого смыкаются. В этом случае носовая оконечность практически не взаимодействует со льдом.

Можно, по-видимому, придумать еще ряд примеров, которые бы демонстрировали некорректность применения формулы (8). Поэтому, по мнению авторов, в качестве основной модели необходимо рассматривать схему 1. Эта схема из-за ее простоты подходит практически в любом случае. Здесь необходимо еще раз подчеркнуть, что нельзя рассматривать эффективные давления как некоторые физические величины. Это некий маркер, характеризующий ледовые сжатия и являющийся удобным инструментом для проведения расчетов ледовой ходкости.

Необходимо обратить внимание еще на одну особенность предложенного подхода. Возможность его реализации базируется на использовании диаграмм ледовой ходкости. Теоретически такие диаграммы могут быть построены для любого судна, для которого был выполнен стандартный набор модельных гидродинамических

испытаний в процессе его проектирования. Однако выполнить такую работу специалисты, проводящие наблюдения за динамикой ледяного покрова, скорее всего, не могут. Поэтому здесь необходима кооперация с специалистами-корабелями.

В настоящий момент применение диаграмм ледовой ходкости накладывает существенное ограничение на их использование для изучения ледовых сжатий. Все описанное выше справедливо для случая, когда движители судна интенсивно не взаимодействуют с притопленным корпусом льдом. Другими словами, диаграммами можно пользоваться только в случае, когда экспериментально зафиксированная частота вращения движителей не отличается более чем на 5–6 % от прогнозируемой диаграммами. В противном случае использование диаграмм для определения дополнительного сопротивления пока невозможно. Дело в том, что при интенсивном взаимодействии гребных винтов судна со льдом происходит довольно резкое снижение частоты их вращения из-за действия дополнительного ледового момента сопротивления вращению. Снижение частоты вращения приводит к уменьшению гидродинамической тяги движителей. Однако при интенсивном воздействии льда на винт возникает «ледовая тяга», которая частично компенсирует потери тяги гидродинамической [18]. В настоящее время существующие диаграммы этот факт не учитывают, хотя работа над их совершенствованием ведется. Поэтому для анализа воздействия ледовых сжатий на судно пока должны использоваться только те данные, которые получены при отсутствии существенного снижения частоты вращения движителей.

Авторы выражают надежду, что описанный подход и/или возможные его модификации будут использованы для анализа плавания судов в сжатых льдах. Что будут получены важные эмпирические зависимости $p_{eff} = f(V_i)$ или $p_{eff} = f(s)$ и это откроет возможность улучшить качество расчетов морских транспортных систем.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-00039, «Теоретические основы и прикладные инструменты для создания системы интеллектуального планирования работы флота и поддержки принятия решений в арктическом судоходстве», <https://rscf.ru/project/23-19-00039/>.

Competing interests. The authors declares that there is no conflict of interest.

Funding. The study was carried out with the support of the Russian Science Foundation grant No. 23-19-00039, “Theoretical foundations and applied tools for creating a system of intelligent fleet planning and decision support in Arctic shipping”, <https://rscf.ru/project/23-19-00039/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Опасные ледовые явления для судоходства в Арктике.* Миронов Е.У. (ред.). СПб.: ГНЦ РФ ААНИИ; 2010. 320 с.
2. Li F., Kujala P., Montewka J. A ship in compressive ice: an overview and preliminary analysis. In: *Proceedings of the 25th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic conditions*. POAC, 2019. June 9–13, 2019, Delft, The Netherlands. URL: <https://www.poac.com/Papers/2019/pdf/POAC19-068.pdf> (accessed: 25.12.2024).
3. Таровик О.В. Модели для прогнозирования параметров рейсов судов в Арктике: существующие подходы и возможные пути развития. *Арктика: экология и экономика*. 2021;11(3):422–435. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2021-3-422-435>
Tarovik O.V. Models for forecasting parameters of ship voyages in the Arctic: existing approaches and possible development paths. *Arktika: Ekologiya i Ekonomika = Arctic: ecology and economics*. 2021;11(3):422–435. (In Russ.). <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2021-3-422-435>

4. Li F., Goerlandt F., Kujala P., Lehtiranta J., Lensu M. Evaluation of selected state-of-the-art methods for ship transit simulation in various ice conditions based on full-scale measurement. *Cold Regions Science and Technology*. 2018;151:94–108. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2018.03.008>
5. Lu L., Kujala P., Toivola J., Helena J., Kuikka S. New approach to determine equivalent ice thickness for ships in dynamic compressive ice. In: *Proceedings of the 27th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions*. 12–16 June 2023, Glasgow, United Kingdom. URL: https://www.poac.com/Papers/2023/pdf/Paper83_Lu.pdf (accessed: 25.12.2024).
6. Бузин И.В., Клячкин С.В., Фролов С.В., Смирнов К.Г., Михальцева С.В., Соколова Ю.В., Гудошников Ю.П., Войнов Г.Н., Григорьев М.Н. Некоторые оценки тяжелых ледовых условий в Печорском море по данным наблюдений и моделирования (природное явление и его влияние на морские операции). *Арктика: экология и экономика*. 2022;12(4):500–512. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2022-4-500-512>
Buzin I.V., Klyachkin S.V., Frolov S.V., Smirnov K.G., Mikhaltceva S.V., Sokolova Yu.V., Gudoshnikov Yu.P., Voinov G.N., Grigoryev M.N. Some assessments of severe ice conditions in the Pechora Sea based on observations and modeling (natural phenomenon and its impact on marine operations). *Arktika: Ekologia i Ekonomika = Arctic: ecology and economics*. 2022;12(4):500–512. (In Russ.). <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2022-4-500-512>
7. Казаков А.Т. *Безопасная дистанция и выбор оптимальной скорости при ледокольной проводке*. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Л., 1986. 24 с.
8. Сазонов К.Е. *Модельный и натурный эксперимент в морской ледотехнике*. СПб.: ФГУП «Крыловский государственный научный центр»; 2021. 306 с.
9. Третьяков В.Ю., Фролов С.В., Клейн А.Э. Методика расчета скорости сложения канала в ледяном покрове по данным телевизионных снимков. *Метеорологический вестник*. 2010;3(2):12–29.
Tretyakov V.Yu., Frolov S.V., Klein A.E. Methodology for calculating the rate of channel formation in ice cover based on television images. *Meteorologicheskij vestnik = Meteorological Bulletin*. 2010;3(2):12–29. (In Russ.)
10. Миронов Е.У., Клячкин С.В., Смоляницкий В.М., Юлин А.В., Фролов С.В. Современное состояние и перспективы исследований ледяного покрова морей российской Арктики. *Российская Арктика*. 2020;10:13–29. <https://doi.org/10.24411/2658-4255-2020-12102>
Mironov E.U., Klyachkin S.V., Smolyanitsky V.M., Yulin A.V., Frolov S.V. Current state and prospects for research of the ice cover of the seas of the Russian Arctic. *Rossiyskaya Arktika = Russian Arctic*. 2020;10:13–29. (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/2658-4255-2020-12102>
11. Assur A. Problems in ice engineering. In: Frankenstein G.E. (ed.) *Proceedings of the 3rd IAHR International Symposium on ice problems, 18–21 August, 1975, Hanover, New Hampshire*. Hanover, New Hampshire, USA: International Association of hydraulic Research, Committee on Ice Problems; 1975. P. 361–372. URL: <https://www.iahr.org/library/technical?pid=520> (accessed: 25.12.2024).
12. Тимохов Л.А., Хейсин Д.Е. *Динамика морских льдов. Математические модели*. Л.: Гидрометеиздат; 1987. 272 с.
13. Suominen M., Kujala P. Ice model tests in compressive ice. In: Li and Lu (ed.). *Proceedings of the 21st IAHR International Symposium on Ice, Ice Research for Sustainable Environment, Dalian, China, June 11–15, 2012*. Dalian: Dailan University of Technology Press; 2012. P. 1046–1057. URL: <https://www.iahr.org/library/infor?pid=27016> (accessed: 25.12.2024).
14. Külaots R., Kujala P., von Bock und Polach R., Montewka J. Modelling of ship resistance in compressive ice channels. In: *Proceedings of the 22nd International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions*, June 9–13, 2013, Espoo, Finland. URL: https://www.poac.com/Papers/2013/pdf/POAC13_180.pdf (accessed: 25.12.2024).

15. La Prairie D., Wilhelmson V., Riska K. *A transit simulation model for ships in Baltic ice conditions, documentation of the calculation routing*. Otaniemi: Helsinki University of Technology; 1995. 38 p.
16. Каневский Г.И., Клубничкин А.М., Сазонов К.Е. *Прогнозирование характеристик ходкости многовальных судов*. СПб.: ФГУП «Крыловский государственный научный центр»; 2019. 160 с.
17. Каневский Г.И., Клубничкин А.М., Сазонов К.Е. Диаграммы ледовой ходкости судна. *Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова*. 2022;14(6):805–814. <https://doi.org/10.21821/2309-5180-2022-14-6-805-814>
Kanevsky G.I., Klubnichkin A.M., Sazonov K.E. Ice performance diagrams of a vessel. *Bulletin of the Admiral S.O. Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova = Makarov State University of Maritime and Inland Shipping*. 2022;14(6):805–814. (In Russ.). <https://doi.org/10.21821/2309-5180-2022-14-6-805-814>
18. Добродеев А.А., Сазонов К.Е. Применение диаграмм ледовой ходкости судов для анализа натурных испытаний. *Труды Крыловского государственного научного центра*. 2023;3(405):81–88. <https://doi.org/10.24937/2542-2324-2023-3-405-81-88>
Dobrodeev A.A., Sazonov K.E. Application of ice performance diagrams of ships for analysis of full-scale tests. *Trudy Krylovskogo gosudarstvennogo nauchnogo centra = Proceedings of the Krylov State Research Center*. 2023;3(405):81–88. (In Russ.). <https://doi.org/10.24937/2542-2324-2023-3-405-81-88>
19. Лосет С., Шхинек К.Н., Гудмestad О., Хойланд К. *Воздействие льда на морские и береговые сооружения*. СПб.: Лань; 2010. 272 с.

ГЕОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА GEOLOGY AND GEOPHYSICS

Оригинальная статья / Original paper

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-1-74-86>

УДК 621.396.969.1:637.652:569.614(282.256.86)



Натурное моделирование георадиолокационного зондирования дна р. Колымы для поиска костных остатков животных мамонтовой фауны

И.В. Горохов¹, И.И. Христофоров^{1,2✉}, К.П. Данилов^{1,2}, Е.С. Петухова¹

¹ ФГБУН ФИЦ «Якутский научный центр СО РАН», Якутск, Россия

² Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, Россия

✉ khristoforov@mpi.ysn.ru

ИД ИВГ, 0000-0001-6142-0103; ИИХ, 0000-0003-2478-4172; КПД, 0000-0003-3558-9655; ЕСП, 0000-0002-2091-725X

Аннотация. Исследования, описанные в данной работе, направлены на развитие георадиолокационного метода для поиска подводных местонахождений бивней мамонта. Затронута актуальность данного биогенного ресурса, а также выделены проблемы, связанные с его освоением. Геофизические работы выполнены в Арктической зоне Республики Саха (Якутия), на участке среднего течения реки Колымы в осенний период. Исследования проведены георадарной аппаратурой ОКО-3 с антенным блоком с частотой 150 МГц. Представлены результаты площадной георадиолокационной съемки в виде карты глубин и георадарных разрезов. Проанализирована эффективность применения метода георадиолокации при поисковых работах на местонахождениях подводных скоплений бивней мамонта. Предложены методические рекомендации внедрения метода георадиолокации в поисковые работы.

Ключевые слова: Арктика, бивни мамонта, георадиолокационное зондирование, донные отложения, криолитозона, местонахождения ископаемой мамонтовой кости, река Колыма, Республика Саха (Якутия)

Для цитирования: Горохов И.В., Христофоров И.И., Данилов К.П., Петухова Е.С. Натурное моделирование георадиолокационного зондирования дна р. Колымы для поиска костных остатков животных мамонтовой фауны. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2025;71(1):74–86. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-1-74-86>

Поступила 13.09.2024

После переработки 21.10.2024

Принята 23.10.2024

© Авторы, 2025

© Authors, 2025

Full-scale modelling of GPR sounding of Kolyma River bottom in searching for bone remains of mammoth fauna animals

Ivan V. Gorokhov¹, Ivan I. Khristoforov^{1,2✉}, Kencheri P. Danilov^{1,2},
Evgenia S. Petukhova¹

¹ FRC "The Yakut Scientific Centre of the SB RAS", Yakutsk, Russia

² Melnikov permafrost institute SB RAS, Yakutsk, Russia

✉khristoforov@mpi.ysn.ru

IVG, 0000-0001-6142-0103; IIK, 0000-0003-2478-4172; KPD, 0000-0003-3558-9655;
ESP, 0000-0002-2091-725X

Abstract. The fossil mammoth tusk is a unique biogenic material, which is widely used for the production of souvenirs and luxury goods. The burial of mammoth fauna animal's remains in permafrost ensured high preservation. Due to the complete ban on hunting African and Asian elephants introduced in 1990 by UNESCO, the demand for fossil ivory has increased. Today, up to 80 % of mammoth bone deposits is harvested in the Republic of Sakha (Yakutia), Russia. The paper describes some traditional techniques of mammoth tusk mining and proves the efficiency of the GPR (ground penetrating radar) for prospecting underwater accumulations of fossil mammoth bone. The aim of the survey was increasing the efficiency of the GPR sounding technique for the detection of mammoth bone under water. The comprehensive GPR area survey was used to identify areas promising to contain underwater accumulations of fossil mammoth bone. Because the release of bone material from productive layers is caused by river erosion and thermal erosion processes a meandering section of the Kolyma River was selected for the research. Thermal erosion plays a more prominent role in the release of bone material in the headwaters of small watercourses, in deltas, and in the bottoms of incipient gullies. Fossil mammoth bones are usually found on riverbanks (low floodplain, channel spits) — in areas where the river erodes the slopes of remnants composed of edomorphic complex formations or in close proximity to them. The GPR application makes it possible to study the bottom relief in detail and thus can identify areas promising in terms of the formation of secondary accumulations of mammoth bones. The key features of bone remain accumulations have been identified: natural depressions or obstacles that mammoth bone can get caught on when sinking to the bottom of the water body; accumulation of the heaviest fragments in the deepest depressions at the bottom of the water body; accumulation of smaller fragments on sedimentary shoals. An algorithm for the GPR surveying of water bodies promising in terms of mammoth bone detection has been developed.

Keywords: Arctic, bottom sediments, cryolithozone, GPR sounding, Kolyma River, locations of fossil mammoth bones, mammoth tusks, Republic of Sakha (Yakutia)

For citation: Gorokhov I.V., Khristoforov I.I., Danilov K.P., Petukhova E.S. Full-scale modelling of GPR sounding of Kolyma River bottom in searching for bone remains of mammoth fauna animals. *Arctic and Antarctic Research*. 2025;71(1):74–86. (In Russ.) <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-1-74-86>

Received 13.09.2024

Revised 21.10.2024

Accepted 23.10.2024

Введение

Ископаемая мамонтовая кость (ИМК) — уникальное биогенное сырье, нашедшее широкое применение на рынке сувенирной и ювелирной продукции как аналог слоновой кости. В настоящее время до 80 % ИМК добывают в арктической части территории Республики Саха (Якутия) (РС(Я)). Ежегодные объемы добычи за период с 2013 по 2021 г., согласно данным Федерального агентства по недропользованию Минприроды России (Роснедра) и Министерства промышленности и геологии Республики Саха (Якутия), повысились с 20,3 до 159,6 т/год. Высокая востребованность ископаемых бивней, обусловленная полным запретом на охоту на

современных слонов [1], привела к стремительному развитию частной добывающей промышленности ископаемой мамонтовой кости, а также активному внедрению различных современных технологий для наиболее эффективного поиска новых местонахождений и обследования ранее освоенных костеносных участков.

На сегодняшний день технологии разработки местонахождений ИМК не встречаются в патентных источниках. Однако в научных трудах А.Н. Смирнова, Н.Д. Кириллина, Р.Р. Ноговицына [1, 2] подробно описаны подготовительные, поисковые и промысловые работы, связанные со сбором вышедших на дневную поверхность ИМК, без существенного нарушения целостности недр. Лишь в некоторых случаях, при появлении прямых признаков («свежие» костные и трупные остатки, наличие одного свежего бивня из пары и т. д.), могут проводиться «горные» работы с применением механических способов перемещения горной массы. Оптимальный комплекс методов поиска включает наземное и водное обследование береговой зоны рек, озер по определенному маршруту с применением вездеходной и наводной техники, обеспечивающей визуальное наблюдение всей поверхности исследуемой территории, перспективной для обнаружения экспонированных на дневную поверхность ИМК и других костных остатков. В некоторых случаях может применяться аэровизуальное наблюдение с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [3, 4]. При поиске на дне водоемов или поднятии обнаруженных бивней с глубины применяют акваланги и гидрокостюмы. Для обнаружения бивней на небольшой глубине, как и при наземном поиске, применяют штыковой способ, с использованием металлической трости [5].

Опыт зарубежных и отечественных исследователей в области палеонтологии показал, что из обширного арсенала геофизических методов поиска и разведки полезных ископаемых для обнаружения костных и трупных остатков эффективны лишь некоторые вариации основных базисных методов. Так, в работе [6] показана возможность оконтуривания трупных остатков мамонтовой фауны с использованием электротомографии. Удельное электрическое сопротивление трупного остатка имеет отличное от вмещающих мерзлых пород значение, что создает контраст на фоне мерзлого грунта, однако эффективность оконтуривания существенно зависит от размеров и сохранности туши. Помимо методов электроразведки, в литературе описан опыт применения метода гидролокации, основанный на измерении акустических волн при поиске подводных скоплений ИМК [7]. Безусловно, данный метод перспективен для поиска бивней и крупных костей за счет возможности обнаружения инородных тел на поверхности дна и в маломощных донных отложениях, в том числе на высокоминерализованных водных объектах. Однако существенным недостатком гидролокаторов бокового обзора в рамках исследований, проводимых на пресноводных водоемах Арктики, является сложность в определении абсолютных высот структурных элементов рельефа дна, а также глубины залегания обнаруженных объектов, а с учетом мощности донных отложений, которая может превышать 6 м, применение данного метода будет малоэффективным.

Среди других методов геофизики для поиска ИМК наиболее распространен и подкреплен практическим опытом метод георадиолокации. В частности, в работе С.П. Лукьянова [8] обоснована эффективность применения георадиолокационного метода в палеонтологии, а в публикации Н.В. Керемасова [5] кратко упоминается возможность применения георадаров при поиске ИМК. В зарубежной литературе

также встречаются единичные работы, связанные с однократным применением георадаров, где показана их эффективность при картировании аномалий скелетных остатков позднелейстоценового мамонта, замороженного во льду [9].

В таблице произведена обобщенная сравнительная оценка эффективности различных методов поиска остатков животных мамонтовой фауны.

Таблица

Способы и методы поиска бивней мамонта

Table

Mammoth bone prospecting techniques

Способы и методы	Суть метода	Преимущества	Недостатки
Наземный пеший поиск	Поиск ведется бригадами, на перспективных участках (береговые зоны, кладбища). Пешие маршруты. Возможно применение щупов	Простота и низкая стоимость работ. Возможность ведения работ на любых участках, где может пройти человек	Максимум трудозатрат на минимум площади. При обнаружении бивней возникает проблема транспортировки
Наземный поиск с применением различных видов транспорта	Поиски ведутся с применением транспортных средств и верховых животных	Большое покрытие площади опоскования. При обнаружении есть возможность погрузки сырья на транспорт	Поиск возможен на проходимых для транспорта участках. Затраты на топливо
Водный и подводный поиск	Визуальный поиск с применением подводных камер, дронов. При подводном поиске применяются также гидрокостюмы и акваланги	Высокая вероятность обнаружения ИМК ввиду малой освоенности акваторий. Покрытие больших площадей исследования	Дорогое оборудование, необходимость обучения дайверов навыкам погружения
Аэропоиск	Использование квадрокоптеров с телефотоаппаратурой для поиска вдоль русел рек, на побережьях озер и морей и любых труднодоступных участках экспонированных бивней	Экономия времени. Возможность проведения поиска на труднодоступных и опасных участках, таких как обрывы, крутые склоны и т. д.	Возможность обнаружения только крупных объектов, частично или полностью экспонированных. Непродолжительность работ из-за необходимости заряжать устройство
Геофизические методы поиска	Использование современных неразрушающих геофизических методов для обнаружения и оконтуривания крупных скоплений ИМК под землей и под водой	Неразрушающие методы без ущерба для экологии. Вероятность обнаружения совершенно новых захоронений и скоплений костных остатков	На данный момент геофизические методы поиска остатков животных мамонтовой фауны находятся на стадии экспериментальных и опытно-методических работ

Существует достаточно эффективный способ поиска и добычи мамонтовых бивней и костных остатков териофауны мамонтового комплекса в криогенных отложениях позднего плейстоцена — первичных костеносных коллекторах (едомная свита). Поиски и добыча осуществляются путем размывания многолетнемерзлых пород водой с помощью гидромониторов высокого давления. Данный способ, иногда незаконно используемый недропользователями, законодательно запрещен, поскольку ведет к непосредственному разрушению толщ многолетнемерзлых пород и последующей активизации термоэрозийных процессов (Закон Республики Саха (Якутия) от 22 мая 2018 г. 2006-З № 1571-V «Об охране вечной мерзлоты в Республике Саха/Якутия»).

Статистика сбора ИМК свидетельствует о том, что наиболее перспективными для поиска являются прибрежные территории водных объектов суши. Немаловажной в данном случае является доступность данных участков при использовании наводного транспорта, тогда как автотранспортная инфраструктура территории арктических районов РС(Я) практически отсутствует или слабо развита. С учетом запрета в законодательстве РС(Я)¹ на шахтный вид поиска с использованием мотопомп высокого давления, ведущего к искусственному разрушению многолетнемерзлых пород, наиболее перспективным представляется поиск и сбор ИМК со дна водоемов. Данный вид промысла не наносит вреда экологии и допустим согласно требованиям существующего законодательства на попутный сбор. В связи с этим необходимо решение задач по раскрытию потенциала продуктивности россыпных скоплений ИМК на дне и в донных отложениях водных объектов суши.

Водоемы Арктики характеризуются достаточно высокой мутностью воды и наличием донных отложений, мощность которых может составлять 1–6 м и более. С учетом протяженности участков местонахождений, которая может составлять от сотни метров до десятка километров, достаточно большой глубины водоемов и наличия донных отложений, наиболее эффективным и продуктивным методом для поиска подводных скоплений ИМК является георадиолокация. Таким образом, разработка и совершенствование георадиолокационного метода поиска ИМК на дне и в донных отложениях рек и озер криолитозоны в целом является актуальной задачей для повышения результативности добычи и уменьшения негативного влияния добычи на окружающую среду. В рамках данной работы целью исследований является изучение строения дна методом георадиолокации для выделения геоморфологических признаков для обнаружения и распознавания ИМК на дне пресноводных водоемов Арктики.

Материалы и методы исследования

В речных долинах находки бивней в основном фиксируются на меандрирующих участках рек, где происходит более интенсивное разрушение береговых склонов. Следует отметить, что высвобождение костного материала из продуктивных отложений происходит не только за счет речной эрозии, но и за счет протекания термоэрозийных процессов: береговые склоны нередко характеризуются наличием

¹ Распоряжение Главы РС(Я) от 13 августа 2018 г. № 649-РГ «Об утверждении Концепции развития сбора, изучения, использования, переработки и реализации палеонтологических материалов мамонтовой фауны на территории Республики Саха (Якутия)». URL: <http://docs.cntd.ru/document/550166534>

ем оплывин, сползанием участков склонов и иными проявлениями солифлюкции. Термозрозия играет более заметную роль в высвобождении костного материала в верховьях мелких водотоков, в деллях, в днищах зарождающихся оврагов.

Исследования проводились на р. Колыме, известной своими богатыми запасами ИМК. Работа выполнялась в осенний период, характеризующийся наиболее интенсивным протеканием эрозионного цикла. Участок, представляющий собой часть излучины с сильным течением, расположен на акватории среднего течения р. Колымы. При георадарном профилировании охвачена наиболее крутая часть излучины с размытыми береговыми склонами (рис. 1). Впадающий на данном участке в р. Колыму руч. Мангазейка способствует усилению эрозионных процессов, что должно приводить к высвобождению большего количества костного материала из эродируемых вмещающих пород.

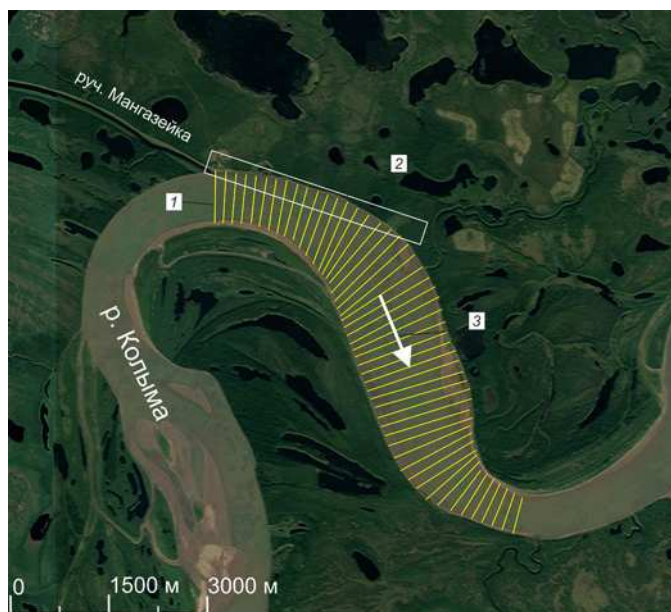


Рис. 1. Карта ключевого участка исследования.

1 — профили площадной георадарной съемки; 2 — область с размытыми береговыми склонами; 3 — направление течения р. Колымы

Fig. 1. Survey area on the map.

1 — the comprehensive GPR area survey; 2 — an area with blurred coastal slopes; 3 — the direction of the river flow

Для картирования потенциальных участков подводных скоплений ИМК использована площадная георадарная съемка, по результатам которой построена карта глубин, изучена общая картина рельефа дна и зарегистрированы сигналы от локальных объектов, находящихся на поверхности дна и в донных отложениях. Для измерений применялся георадар серии ОКО-3 компании ООО «Логис-ГЕОТЕХ» с центральной частотой антенного блока 150 МГц. Исследования с поверхности воды осуществлялись при комплексном применении двух лодок, закрепленных по бортам натяжным способом. Судно-буксир необходимо для размещения водителя судна с навигатором и оператора с блоком управления и блоком регистрации гео-

радар. Буксируемая ПВХ-лодка использована для размещения антенного блока, обеспечения гермозащиты, а также для уменьшения влияния сигналов-помех, вызванных металлической конструкцией судна-буксира. Расстояние между профилями составляло 80–100 м, в зависимости от погодных и территориальных условий, а именно — угла направления на поворотах реки. Данный шаг площадной съемки обусловлен задачей по исследованию рельефа дна и выявлению морфологических признаков локализации бивней мамонта. На основе карты глубин в последующем будут выбраны перспективные участки и проведены дополнительные поисковые работы с меньшим расстоянием между профилями и антеннами с разными центральными частотами. Для соблюдения равномерного хода судна, при необходимой скорости 3 км/ч, а также точности направления в процессе записи георадарных профилей применен спутниковый навигатор GPS, на котором отмечались начальные, конечные и промежуточные точки пройденных профилей. Данные координаты необходимы на стадии обработки и интерпретации данных для корректировки пройденного расстояния и фактического направления и расположения профилей на карте для повышения точности привязки георадарных данных к реальному рельефу дна. Всего за полевые работы с водной поверхности на исследуемой площади было получено 50 профилей. При средней протяженности профиля 800–1000 м и расстоянии между профилями ≈ 100 м, общая исследованная площадь составила около 5 кв. км и 45 тысяч пог. м.

Обработка и интерпретация данных производились с использованием программных ресурсов GeoScan32, Excel, SasPlanet и Surfer и учитывали географические координатные данные начальных, конечных и промежуточных точек привязки, зафиксированных с использованием GPS-навигатора. Среднее значение диэлектрической проницаемости при зондировании с поверхности воды составило 81 [10]. Накопление сигналов георадара выставлено равным 16, для этого значения оптимизирована постоянная скорость продвижения георадара (10 км/ч) с расчетом детальности — не менее 20 зондирований на каждый метр. Использование методических особенностей георадарного метода, выработанных авторами статьи ранее [11], позволило эффективно исследовать водоемы суши, расположенные в условиях вечной мерзлоты, на глубину до 16 м. Для участков, глубина которых превышала 16 м, для построения карты глубин на радарограммах граница рельефа дна проинтерполирована до глубины 20 м.

В процессе зондирования и последующей интерпретации данных учитывался опыт применения георадаров при поиске ИМК с поверхности воды [12]. Так, на рис. 2 представлен характерный сигнал, отраженный от бивня мамонта (рис. 2а), искусственно помещенного на дно пресноводного водоема². Отраженный сигнал от бивня характеризуется отрицательной фазой вступления в отличие от сигнала, отраженного от влагонасыщенного ствола дерева (рис. 2б), находящегося в естественном залегании. Следует отметить, что представленные характеристики сигналов получены в результате натурного эксперимента, целью которого были анализ и сравнение спектральных характеристик сигналов, зарегистрированных от объектов различной природы, находящихся под водой.

² Христофоров И.И., Горохов И.В., Данилов К.П., Чепрасов М.Ю., Петрова Т.Н., Петухова Е.С. Особенности гидроадиолокации костей и бивней мамонта. Четвертичная палеонтология и палеоэкология Якутии: Материалы международного научного семинара, посвященного 85-летию со дня рождения известного ученого-палеонтолога, д-ра биол. наук П.А. Лазарева (1936–2011). Якутск, 2021: 86–90.

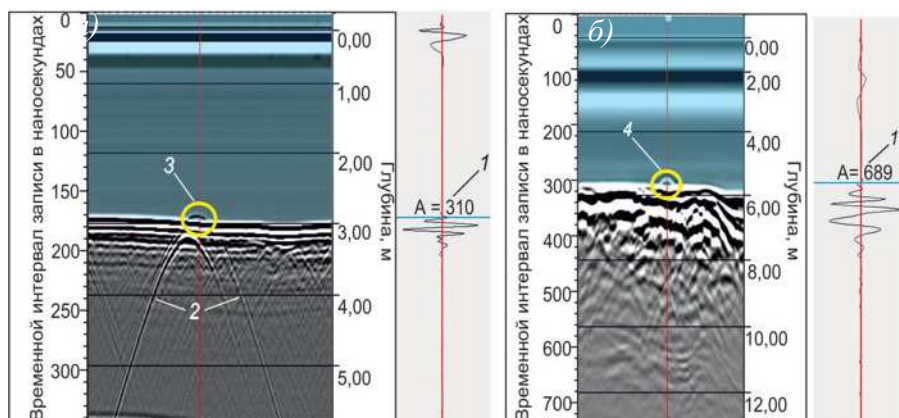


Рис. 2. Радарограммы отраженных сигналов от подводных объектов различной природы.

a — радарограмма ИМК; *б* — радарограмма ствола дерева; *1* — амплитуда отраженного сигнала; *2* — усы гиперболы, зарегистрированные при зондировании ИМК; *3* — дифрагированный сигнал ИМК; *4* — дифрагированный сигнал ствола дерева

Fig. 2. Radar images of reflected signals from underwater objects of different materials.

a — radar image of mammoth bone; *б* — radar image of trunk tree; *1* — the amplitude of the reflected signal; *2* — the whiskers of the hyperbole recorded during the probing of the tusk; *3* — the diffracted signal of the tusk; *4* — the diffracted signal of the tree

Результаты и обсуждение

ИМК встречаются обычно на речных отмелях (низкая пойма, русловые косы) — на участках, где река размывает склоны останцов, сложенных образованиями едомного комплекса, или в непосредственной близости от них. Иными словами: переотложенные в речных долинах ИМК — материал ближайшего сноса. На рис. 3 представлена схема накопления бивней на дне рек, разработанная Н.Д. Ки-

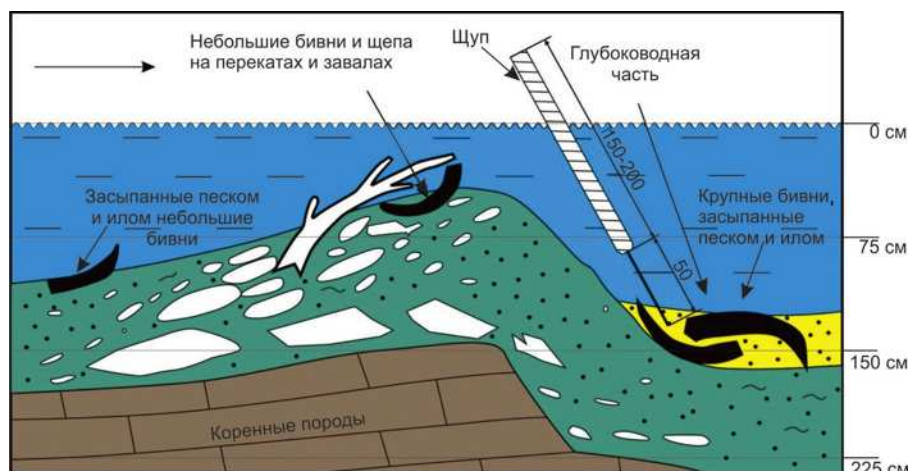


Рис. 3. Схематический профиль реки, благоприятные места залегания ИМК на дне и их обнаружение при помощи щупа. Адаптированная модель Н.Д. Кириллина [13]

Fig. 3. Schematic profile of the river and favorable locations of BCI at the bottom and their detection using a probe. Adapted from N.D. Kirillin's paper [13]

риллинам [13]. Отмечается, что глубоководные части русел являются коллекторами крупных тяжелых бивней, в то время как более мелкие бивни залегают на перекатах и косах. Определяющим фактором в данном случае является гидродинамика водных потоков, обеспечивающих перемещение и переотложение обломочного материала в виде взвешенных и волоочильных наносов.

Визуальное обнаружение наиболее глубоких участков русла и подводных наносных отмелей затруднено, а проведение работ с использованием аквалангов и гидрокостюмов чрезвычайно трудоемко, затратно и осложнено высокой мутностью воды и интенсивным течением.

Применение метода георадиолокации позволяет достаточно подробно изучить рельеф дна и, соответственно, определить участки, наиболее перспективные для формирования скоплений ИМК и других костных остатков на основании следующих ключевых признаков:

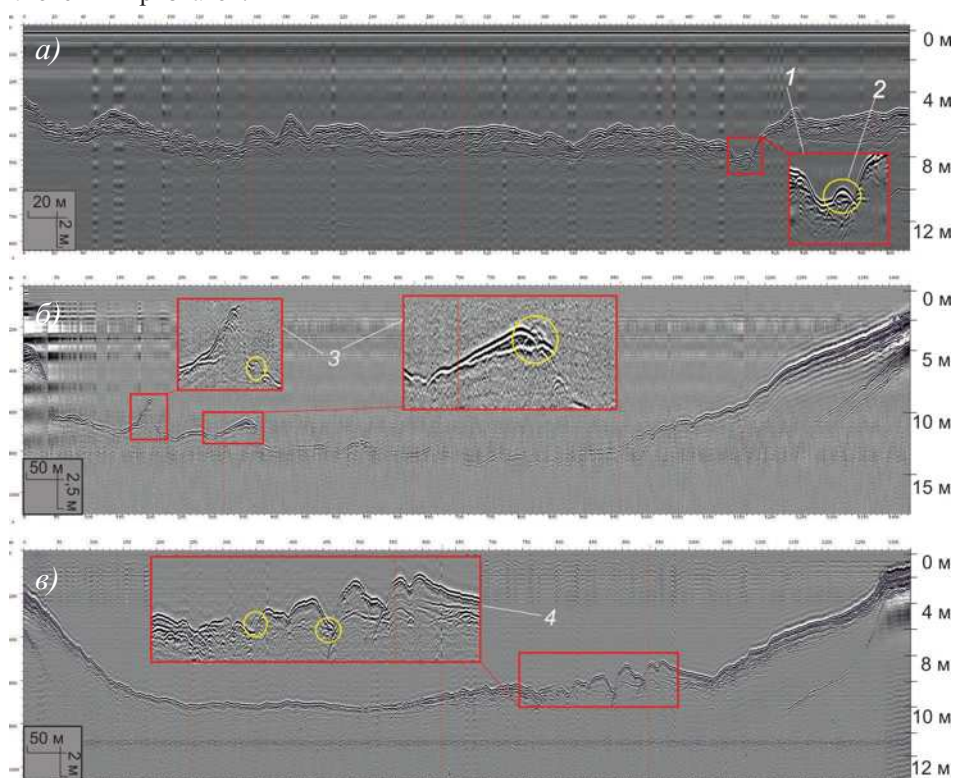


Рис. 4. Радарограммы с выявленными ключевыми признаками.

а — радарограмма с локальным объектом в естественном понижении рельефа дна; б — радарограмма с наносными повышениями в рельефе дна; в — радарограмма с донными отложениями с нарушенной структурой и локальными объектами внутри; 1 — естественное понижение рельефа дна; 2 — локальный объект; 3 — наносные повышения; 4 — донные отложения с нарушенной структурой

Fig. 4. Radar images with identified key signs of tusk detection.

а — a radar image with a local object in a natural decrease in the bottom relief; б — a radar image with alluvial increases in the bottom relief; в — radar image of bottom sediments with a disturbed structure and local objects inside; 1 — a natural decrease in the bottom relief; 2 — a local object; 3 — alluvial increases; 4 — bottom sediments with a disturbed structure

- наличие отраженных сигналов от локальных объектов, размеры и характеристики дифрагированных сигналов от которых сходны с характеристиками искоемых объектов;

- наличие значительных понижений на дне водоема, служащих для костных остатков естественными ловушками;

- наличие наносных отмелей, выделяющихся на радарограмме в виде повышений рельефа дна с нарушенной структурой донных отложений.

Анализ радарограмм, полученных при площадной съемке, позволил выявить локальные объекты и характерные для аккумуляции бивней мамонта формы рельефа на дне изучаемого участка р. Колымы. Так, на рис. 4 представлены некоторые радарограммы исследуемого участка с выявленными морфологическими признаками перспективности участка на предмет обнаружения подводных скоплений ИМК.

Характерным для объекта на рис. 4а является его расположение в естественном углублении на дне изучаемого водоема. Такие сигналы могут быть зарегистрированы от бивней, перезахороненных в процессе русловых гидродинамических процессов. Наиболее высокая вероятность обнаружения искомого объекта появляется при регистрации отраженного сигнала вблизи подводной части берегового склона, когда выпавший из вмещающих пород незадолго до проведения георадиолокационной съемки объект под действием силы тяжести постепенно сползал по склону и задержался на естественном препятствии, а русловые процессы не успели переместить и перезахоронить объект.

Также на рисунках (см. рис. 4б, 4в) объекты расположены в донных отложениях с нарушенной структурой, что может свидетельствовать о том, что они длительное время находятся на дне водоема и под воздействием речного потока и силы тяжести были перезахоронены в более глубоководных частях дна реки.

Согласно полученным разрезам и имеющимся представлениям о наиболее перспективных условиях для обнаружения крупных ИМК, на рис. 5 представлена карта глубин, преобразованная с учетом расположения обнаруженных локальных объектов, а также предположительная динамическая модель характерных перемещений и захоронений костных остатков на дне изучаемого водоема.

Разрез А-Б характеризует предположительный характер накопления костных остатков при их выпадении из разрушающихся в результате термоэрозионных процессов береговых склонов, сложенных едомными отложениями. Костный объект, высвобождаясь из оттаявших пород под действием силы тяжести, постепенно опускается на дно, задерживаясь на естественных выступающих препятствиях. Русловые процессы, в особенности в период их сезонной интенсификации, обеспечивают перемещение бивней и их обломков, а также их перезахоронение в наиболее глубоководные части водоема, откуда их дальнейшее перемещение затруднено (Разрез I-II). Более мелкие обломки в свою очередь могут перезахороняться на отмелях вдоль течения реки. Полученные результаты хорошо согласуются с результатами исследования, представленными в [13] и на рис. 3.

Таким образом, при геофизическом обследовании пресноводных водоемов Арктики с целью поиска костных остатков животных мамонтовой фауны следует использовать ряд методических рекомендаций:

1. Оценить ранее выявленную продуктивность водного объекта и его обрамления.

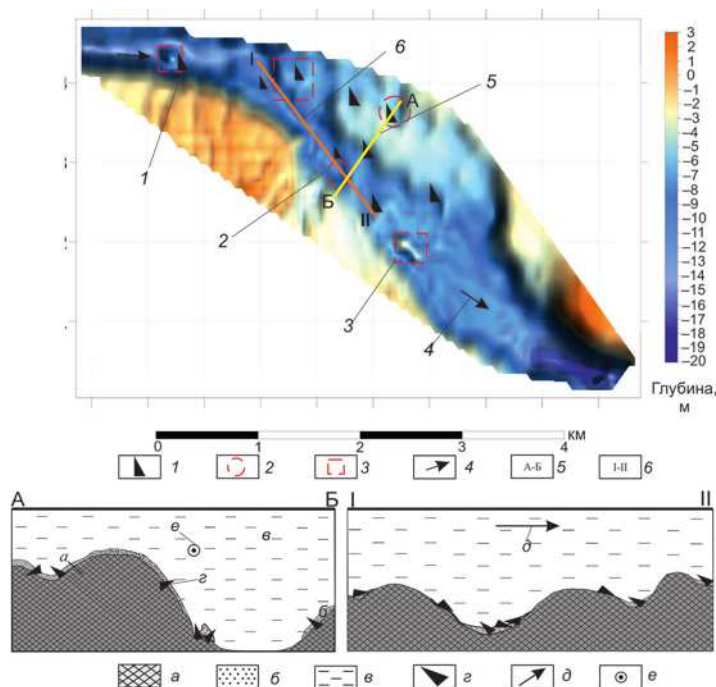


Рис. 5. Карта глубин с выявленными локальными объектами и условия их захоронения поперек и вдоль течения реки.

1 — зарегистрированные локальные объекты; 2 — естественные ловушки с понижениями в рельефе дна; 3 — наносные отмели; 4 — направление течения реки; 5 — поперечный разрез; 6 — продольный разрез; а — коренные породы; б — донные аллювиальные отложения; в — водный слой; з — предполагаемый характер залегания ИМК; д — направление течения на продольном разрезе; е — направление течения на поперечном разрезе

Fig. 5. Depth map with identified local objects and conditions for their burial across and along the river. 1 — registered local objects; 2 — natural traps with relief depressions; 3 — area with alluvial shoals; 4 — the direction of the river flow; 5 — a transverse section; 6 — a longitudinal section; а — bedrock; б — bottom alluvial deposits; в — water layer; з — the assumed nature of the occurrence of mammoth tusks; д — the direction of flow in the longitudinal section; е — the direction of the flow in the transverse section

2. Выявить основной источник поступления ИМК и обследовать подводную часть берегового склона.

3. Произвести площадную съемку, выявить локальные объекты, геофизические характеристики и размер которых сходны с искомым объектом.

4. Обследовать наиболее глубоководные части дна.

5. Выявить и обследовать подводные наносные отмели.

Безусловно, методические аспекты обработки и интерпретации данных георадиолокационного зондирования ИМК на дне пресноводных водоемов Арктики требуют дальнейшей детализации, включая возможность идентификации объектов различной природы, применения антенных блоков с другими частотами, разработки техники и программного обеспечения, доступных для применения недропользователями и т. д., что и будет являться предметом дальнейших изысканий авторов данной статьи.

Заключение

На примере проведенного исследования участка русла р. Колымы показана возможность применения метода георадолокации при поисковых работах, связанных с изучением условий локализации крупных костных остатков, включая ИМК, на дне и в толще донных отложений на глубину до 16 м при данном аппаратном комплексе. Определены параметры электромагнитных сигналов для антенного блока с центральной частотой 150 МГц, отраженных от искомым локальных объектов. Выделены ключевые признаки условий локализации скоплений костных остатков: естественные углубления или препятствия, способствующие их формированию; скопление наиболее тяжелых фрагментов в наиболее глубоководных углублениях на дне водоема; скопление более мелких фрагментов на наносных отмелях. Предложен алгоритм обследования перспективных для обнаружения ИМК водоемов, заключающийся в предварительном анализе перспективности местонахождения (были ли обнаружены ИМК ранее), выявлении продуктивного берегового склона, обследовании подводной части берегового склона, проведении площадной съемки с выявлением наиболее глубоководных участков, подводных наносных отмелей и локальных объектов поиска. Привязка показаний георадара к данным GPS-навигатора позволяет осуществить однозначную локализацию обнаруженных объектов, построить и верифицировать карту глубин, выделить перспективные для подводного сбора участки.

Конфликт интересов. Конфликт интересов отсутствует.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ НИОКТР № 122042000008-5.

Благодарности. Выражаем благодарность ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН за возможность проведения исследований на научном оборудовании Центра.

Competing interests. There is no conflict of interest.

Funding. The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation NIOKTR № 122042000008-5.

Acknowledgments. We express our gratitude to the Collective Use Center of the FRC Yakut Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences for the opportunity to conduct research using the research equipment of the Center.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Смирнов А.Н. Ресурсный потенциал ископаемой мамонтовой кости в Российской Арктике. *Минеральные ресурсы России. Экономика и управление*. 2007;4:21–29.
Smirnov A.N. The fossil ivory resource potential in the Russian Arctic. *Mineral Resources of Russia. Economics & Management*. 2007;4:21–29. (In Russ.)
2. Кириллин Н.Д., Ноговицин Р.Р. Ископаемая мамонтовая кость — особый природный ресурс. *Наука и техника в Якутии*. 2010;1(18):19–23.
3. Петухова Е.С., Христофоров И.И., Чепрасов М.Ю., Нестерова Е.А., Горохов И.В., Данилов К.П., Боевский Г.Г., Протопопов А.В., Лыткин В.М. С дроном за мамонтами. *Природа*. 2023;7:3–19.
Petukhova E.S., Khristoforov I.I., Cheprasov M.Y., Nesterova E.A., Gorokhov I.V., Danilov K.P., Boeskorov G.G., Protopopov A.V., Lytkin V.M. Chasing mammoths with a drone. *Priroda*. 2023;7:3–19. (In Russ.)
4. Смирнов А.Н., Калиновский К.К., Глинская Н.В., Дергачёва И.С., Калиновская М.А., Петров В.В. Перспективы использования беспилотных летательных аппаратов при поисках мамонтовых бивней в Арктике. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2024;70(1):103–116.
<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-1-103-116>

- Smirnov A.N., Kalinovskii K.K., Glinskaya N.V., Dergacheva I.S., Kalinovskaia M.A., Petrov V.V. Prospects of using unmanned aerial vehicles for detecting fossil mammoth ivory fields in the Arctic. *Arctic and Antarctic Research*. 2024;70(1):103–116. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2024-70-1-103-116>
5. Керемясов Н.В. Методы и технологии поиска ископаемой мамонтовой кости. *Вестник СВФУ*. Серия «Науки о земле». 2018;2(10):5–18.
Keremyasov N.V. Methods and technologies of fossil mammoth bone search. *NEFU Bulletin*. 2018;2(10):5–18. (In Russ.)
 6. Оленченко В.В., Шеин А.Н. Возможности геофизических методов при поисках плейстоценовой мегафауны в пойменных и надпойменных отложениях реки Юрибей (Ямал). *Криосфера Земли*. 2013;17(2):83–92.
Olenchenko V.V., Shein A.N. Possibilities of geophysical methods in the search for pleistocene megafauna in floodplain and above floodplain deposits of the Yuribey river (Yamal). *Kriosfera Zemli = Earth's Cryosphere*. 2013;17(2):83–92. (In Russ.)
 7. Смирнов А.Н., Калиновский К.К. Геологические предпосылки поисков подводных скоплений мамонтовых бивней методом гидролокации в российской Арктике. *Арктика: экология и экономика*. 2020;2:86–96. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2020-2-86-96>
Smirnov A. N., Kalinovskiy K.K. Geological background to search underwater accumulations of mammoth ivory by sonar in the Russian Arctic. *Arktika: ekologiya i ekonomika = Arctic: Ecology and economy*. 2020;2:86–96. (In Russ.). <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2020-2-86-96>.
 8. Lukjanov S.P., Stepanov R.A., Chernyi I.A., Stukach O.V. Use of the ground penetrating radar methods for paleontology on example of the mammoth fauna investigation. *Proceedings of the 4th European Radar Conference, EURAD*. Munich: IEEE; 2007:468–471. <http://dx.doi.org/10.1109/EURAD.2007.4405039>
 9. Urban T.M., Rasic J.T., Alix C., Anderson D.D., Manning S.W., Mason O.K., Tremayne A.H., Wolff C.B. The potential and pitfalls of ground-penetrating radar for archaeology in the Alaskan Arctic. *Remote Sensing*. 2016;8(12):1007. <http://dx.doi.org/10.3390/rs8121007>
 10. Владов М.Л., Пятилова А.М. Влияние водного слоя на глубинность георадиолокационных исследований на пресноводных акваториях. *Вестник Московского Университета. Серия 4. Геология*. 2009;1:63–66.
Vladov M.L., Pyatilova A.M., Influence of the water layer on marginal valuation of the depth of ground penetrating radar researches in freshwater reservoirs. *Moscow State University Bulletin. Series 4. Geology*. 2009;1:63–66. (In Russ.)
 11. Khristoforov I.I., Omelyanenko A.V. Improving the efficiency of hydrological investigations by submersible ground penetrating radar. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2018;15(3):335–339. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2017.2786858>
 12. Khristoforov I.I., Danilov K.P., Gorokhov I.V., Cheprasov M.Y., Petrova T.N., Petukhova E.S. GPR sounding of fossil mammoth bones from the surface of freshwater lakes and rivers. *17th Conference on Engineering and Mining Geophysics 2021, April 26–30, 2021, Gelendzhik, Russia*. Curran Associates, Inc.; 2021. P. 1281–1290. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202152205>
 13. Кириллин Н.Д. Ископаемая мамонтовая кость — особый геокриогенный природный ресурс севера России: проблемы права, экономики и организация рационального пользования. Якутск: Академия наук Республики Саха (Якутия), ООО «Компания «Дани АлмаС»; 2011.192 с.

СТРАНИЦЫ ИСТОРИИ PAGES OF HISTORY

Оригинальная статья / Original paper

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-1-87-102>

УДК 581.6+551.34



История и проблемы формирования зеленой инфраструктуры городов, расположенных в криолитозоне Западной и Центральной Сибири

Р.Ю. Федоров✉

Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, Тюмень, Россия

✉ r_fedorov@mail.ru

РЮФ, 0000-0002-3658-746X

Аннотация. Разработка научно-обоснованных подходов к озеленению городов, построенных в криолитозоне, была обусловлена урбанизацией регионов СССР, находящихся в арктическом и субарктическом климате. На протяжении последних десятилетий актуальность этих подходов возрастает в связи с необходимостью мер, связанных с обеспечением новых стандартов благоустройства и экологического благополучия городов Российской Арктики. Основная цель работы состоит в интегрированном анализе архивных документов и научных публикаций, отражающих эволюцию исследовательских подходов и знаний, связанных с проблемами озеленения городов, построенных в криолитозоне Западной и Центральной Сибири в период с 1930-х гг. до первой четверти XXI в. Сделан вывод о том, что такие факторы, как потепление климата, активное привнесение в урбанизированную среду чужеродных растений и внедрение новых технологий благоустройства северных городов, способствуют росту возможностей для развития их зеленой инфраструктуры. При этом криогенные процессы и характер развития зеленой инфраструктуры в урбанизированной среде имеют высокую степень взаимообусловленности.

Ключевые слова: зеленая инфраструктура городов, мерзлота, криолитозона, Западная Сибирь, Центральная Сибирь

Для цитирования: Федоров Р.Ю. История и проблемы формирования зеленой инфраструктуры городов, расположенных в криолитозоне Западной и Центральной Сибири. *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2025;71(1):87–102. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-1-87-102>

Поступила 18.01.2025

После переработки 03.03.2025

Принята 15.03.2025

The history and problems of developing the green infrastructure of cities located in the cryolithic zone of Western and Central Siberia

Roman Yu. Fedorov✉

Earth Cryosphere Institute, Tyumen Scientific Center SB RAS, Tyumen, Russia

✉ r_fedorov@mail.ru

RYF, 0000-0002-3658-746X

© Авторы, 2024

© Authors, 2024

Abstract. The development of research-based approaches to the greening of cities built in the cryolithic zone was caused by the urbanization of USSR regions located in the Arctic and Subarctic climate. Over the past decades, the relevance of these approaches has been increasing due to the need for measures aimed at ensuring new standards of landscaping and environmental well-being of cities in the Russian Arctic. The main aim of this article is an integrated analysis of archival documents and scientific publications reflecting the evolution of research approaches and knowledge pertaining to the problems of greening cities built in the cryolithic zone of Western and Central Siberia in the period from the 1930s to the first quarter of the 21st century. The article describes the first attempts at greening the Arctic cities of Siberia made in the 1930s — 1950s and discusses approaches to zoning the green infrastructure of Arctic cities that have been developed in Russian science. The problems of studying the interaction of permafrost and vegetation in urban areas are analyzed. Based on examples of Siberian cities the paper examines problems of developing green infrastructure during the period of active urbanization of the Russian Arctic in the 1970s — 1980s. A brief overview is given of new approaches to urban greening in the Arctic cities in the first quarter of the 21st century. It is concluded that in recent decades, in most of the cities studied, there has been a trend towards a rise in vegetation characteristics such as NDVI and tree height compared with areas that have been left untouched. Researchers attribute this trend to factors such as regular planting of new trees and shrubs, targeted maintenance of green spaces, as well as the presence of urban heat islands and other favorable microclimatic conditions. It is concluded that such common factors as climate warming, an active introduction of alien plants into the urbanized environment and using new technologies for the improvement of northern cities contribute to the growth of opportunities for the development of the cities' green infrastructure. At the same time, cryogenic processes and the way green infrastructure is developed in an urbanized environment are largely interdependent.

Keywords: urban green infrastructure, permafrost, cryolithic zone, Western Siberia, Central Siberia

For citation: Fedorov R. Yu. The history and problems of developing the green infrastructure of cities located in the cryolithic zone of Western and Central Siberia. *Arctic and Antarctic Research*. 2025; 71(1): 87–102. (In Russ.). <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2025-71-1-87-102>

Received 18.01.2025

Revised 03.03.2025

Accepted 15.03.2025

Введение

В современных исследованиях под зеленой инфраструктурой городов принято понимать расположенную на их территории совокупность древесных, кустарниковых и травянистых насаждений общего и ограниченного пользования, а также специального назначения, выполняющих различные экологические, рекреационные и утилитарные функции [1–3]. Процесс урбанизации Российской Арктики породил уникальный опыт озеленения населенных пунктов, построенных в зоне распространения многолетнемерзлых пород, включая создание в них парков, скверов, защитных полос, зеленых насаждений вдоль дорог и на придомовых территориях.

Как известно, выращивание растений на мерзлоте имеет ряд специфических особенностей. Они обусловлены тем, что при ее сплошном распространении процессы почвообразования происходят лишь в деятельном слое, который замерзает зимой и оттаивает летом. Ввиду водонепроницаемости многолетнемерзлых пород атмосферные осадки проникают в почву только до ее верхней границы, что нередко приводит к оглеенности, приводящей к сниженной плодородности грунтов в результате их продолжительного переувлажнения и высокой кислотности. Учитывая то, что растения развивают свою корневую систему лишь в сезонно-талом слое, она имеет существенные ограничения в вертикальном развитии, которые компенсируются ее значительно более широким, чем у растущих в обычных условиях растений, горизонтальным радиусом. Помимо этого, находящиеся над мерзлотой почвы, как правило, бедны минеральными и органическими соединениями ввиду того, что активная жизнь

микроорганизмов и вызываемые ею процессы минерализации органического вещества протекают лишь в протаивающем на непродолжительное время сезонно-талом слое. В совокупности с такими внешними факторами, как низкие температуры воздуха, высокая ветровая нагрузка, непродолжительный вегетационный период и неблагоприятные условия для фотосинтеза, выращивание многих видов древесных и кустарниковых растений в арктическом и субарктическом климате затруднено. В то же время зеленая инфраструктура городов оказывает как прямое, так и косвенное влияние на состояние мерзлоты. Она может создавать экранирующий и охлаждающий эффекты, способные защитить многолетнемерзлые породы от солнечной радиации и других тепловых воздействий летом [4]. В зимнее время определенные виды зеленых насаждений способствуют снегонакоплению, которое в разных ситуациях может привести к усилению или снижению динамики деградации многолетнемерзлых пород [5]. Наряду с этим некоторые виды обработки почвы для озеленения могут способствовать деградации расположенной под ее участками мерзлоты [6, 7].

Разработка научно обоснованных подходов к озеленению на мерзлоте в СССР получила наиболее последовательное развитие в период с 1950-х по 1980-е гг. Она была обусловлена активной урбанизацией регионов, расположенных в криолитозоне Крайнего Севера и Восточной Сибири. На протяжении последних десятилетий эта проблематика приобретает новую актуальность ввиду необходимости обеспечения мер, связанных с возрастающими требованиями к благоустройству и экологическому благополучию арктических городов. Несмотря на это, в отличие от работ, посвященных взаимовлияниям мерзлоты и растительности на ненарушенных территориях и сельскохозяйственных угодьях, проблемы озеленения городов, построенных на многолетнемерзлых породах, изучены более фрагментарно. При этом нередко именно озеленение городов порождает наиболее сложные и масштабные социоприродные взаимодействия, связанные с антропогенными преобразованиями почв и привнесением чужеродных видов растений. Наибольшее внимание этим проблемам уделено в работах З.Е. Чугуновой [6], Ю.Б. Хромова [8], Е.Н. Помазковой [9], Т.Б. Сродных [10], Е.В. Абакумова [11, 12], А.Х. Сариева [13, 14] и некоторых других авторов. Несмотря на наличие этих исследований, на сегодняшний день существует множество пробелов в знаниях об особенностях формирования зеленой инфраструктуры городов, построенных на многолетнемерзлых породах. Эта ситуация связана как с неравномерностью охвата наблюдениями разных городов, так и с тем, что подобные исследования часто проводились обособленно друг от друга специалистами по мерзлотоведению, геоэкологии, геоботанике и градостроительству, что, в свою очередь, препятствовало интеграции полученных знаний. При этом значительная часть исследований, осуществленных в советское время отраслевыми институтами, не была опубликована и на сегодняшний день представлена лишь в малоизвестных широкой научной общественности архивных документах. Исходя из этого, основная цель данной статьи состоит в интегрированном анализе архивных документов и научных публикаций, отражающих эволюцию исследовательских подходов и знаний, связанных с проблемами озеленения находящихся в криолитозоне городов Западной и Центральной Сибири в период с 1930-х гг. до первой четверти XXI в.

Район исследования и использованные материалы

В исследовании рассмотрены города Западной и Центральной Сибири, находящиеся в административных границах Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО) Тюменской области и Таймырского Долгано-Ненецкого района Красноярского края

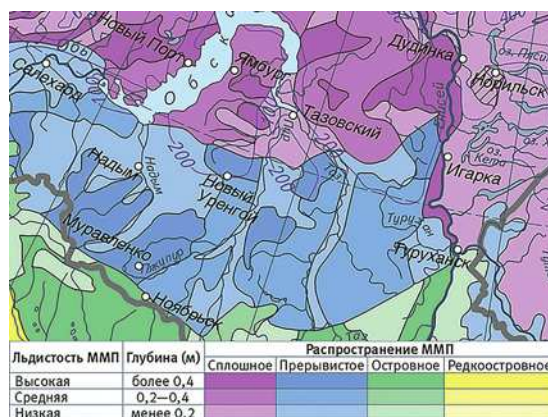


Рис. 1. Распространение, мощность и льдистость многолетнемерзлых пород на территории исследования (фрагмент Национального атласа Арктики¹)

Fig. 1. Distribution, thickness and iciness of permafrost in the study area (fragment of the National Atlas of the Arctic)

(рис. 1). Источниковая база предпринятого в статье аналитического обзора опиралась на несколько видов материалов. Первый вид источников — это неопубликованные научно-технические работы (НИРы), проектная документация и отчеты, хранящиеся в Российском государственном архиве научно-технической документации (РГАНТД), Центральном государственном архиве научно-технической документации Санкт-Петербурга (ЦГАНТД СПб), Государственном архиве Тюменской области (ГБУТО ГАТО) и Государственном архиве социально-политической истории Тюменской области (ГБУТО ГАСПИТО). В качестве второго вида источников была рассмотрена изданная в СССР в 1930–1980-е гг. научная и техническая литература, посвященная проблемам озеленения северных городов. Третьим (вспомогательным) видом источников являются полевые исследования автора, проведенные в период с 2019 по 2022 г. на территории ряда городов ЯНАО (г. Салехард, г. Новый Уренгой, г. Надым и др.), которые включали натурные наблюдения, а также проведение тематических интервью со специалистами, принимавшими участие в благоустройстве населенных пунктов региона.

Результаты и обсуждение

Первые попытки озеленения арктических городов Сибири (1930–1950-е гг.)

В 1930-е гг. в СССР сложилась централизованная система озеленения городов, впервые были предложены общегородские и внутриквартальные нормы площади озеленения. В этот период были также сформулированы требования по созданию защитных лесополос между промышленными предприятиями и жилыми районами. Несмотря на принятие этих мер, их практическое воплощение в условиях арктического климата и территорий с распространением многолетнемерзлых пород оказалось существенным образом затруднено ввиду отсутствия необходимого для этого практического опыта и научных знаний.

Большинство урбанизированных территорий ЯНАО представляют собой морскую и озерно-аллювиальную равнину, сложенную грунтами песчаного и глинистого состава. В приповерхностной части для грунтов характерно как многолетнемерзлое, так и талое

¹ Национальный атлас Арктики. М.: Роскартография, 2017. 254 с.

состояние [15]. Первые эксперименты, связанные с развитием озеленения и сельскохозяйственного растениеводства на мерзлоте, здесь были предприняты в Салехарде в конце 1920-х — 1930-х гг. В 1927 г. метеорологом и агрономом Д.М. Чубыниным в Салехарде были начаты эксперименты по выращиванию на мерзлых грунтах ряда овощных и зерновых культур из семян, переданных Всесоюзным институтом прикладной ботаники. Помимо успешного опыта выращивания на Полярном круге картофеля, капусты, редиса, льна и даже листового табака, Чубынин проводил эксперименты с интродуцированием чужеродных древесных растений. В частности, в Салехарде ему удалось вырастить желтую акацию и стелящиеся яблони [16]. Таким образом, становление полярного земледелия послужило косвенным толчком к проведению экспериментов и выработке научно обоснованных подходов к озеленению городов, построенных на многолетнемерзлых породах. В Салехарде в 1930-е гг. был создан первый на территории ЯНАО городской сад. Для его обустройства находившийся в центре города овраг, носивший название Грязный лог, был засыпан привозной землей. Этот прием позволил создать более благоприятные условия для выращивания в парке деревьев по сравнению с другими местами, под которыми располагалась мерзлота [3]. В парке росли лиственница, ель сибирская, береза пушистая, ольха кустарниковая, рябина сибирская, ивы (козья, русская, финиколистная и др.)². Несмотря на этот положительный опыт, в последующие десятилетия в Салехарде не проводилось систематическое озеленение. Так, в сведениях об объеме озеленения, проведенного в городах Тюменской области в 1961 г., данные по Салехарду отсутствовали³.

В Норильском промышленном районе городская застройка опирается либо на скальные коренные породы, либо на слабозасоленные песчано-глинистые мерзлые грунты [15]. Первые попытки озеленения Норильска были предприняты в 1940-е гг., однако доля зеленых пространств в нем из-за критически неблагоприятных природно-климатических факторов и некомфортной для них планировочной организации (включая уничтожение трудновосстановимой естественной растительности в процессе строительства города, отсутствие условий для эффективной ветрозащиты зеленых насаждений и формирования необходимых для них снегоотложений [9]) всегда оставалась достаточно низкой. Несмотря на затрудненность мероприятий по озеленению, в 1950-е гг., на центральных улицах Норильска высаживались деревья. Эти насаждения были часто приурочены к теплотрассам и коллекторам канализации, которые давали растениям дополнительное тепло. Несмотря на то, что борьба с пыльными бурями нередко заставляла архитекторов полностью асфальтировать дворы, на некоторых улицах устраивались газоны, в том числе из дерна, привезенного из тундры. В городе были созданы сквер им. Пушкина и Комсомольский парк, в которых успешно прижились березы, тундровые ивы и ольха⁴.

² Изучение лесорастительных свойств районов с вечной мерзлотой: подбор пород и разработка агротехнических способов выращивания защитных лесонасаждений. Российский государственный архив научно-технической документации (далее – РГАНТД). Ф. Р-129. Оп. 6-1. Д. 11071. Всесоюзный научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта, 1970. Л. 18.

³ Материалы по благоустройству городов и райцентров. Государственный архив Тюменской области (далее – ГБУТО ГАТО). Ф. 1894. Оп. 1. Д. 305. Л. 1. 1961.

⁴ Ферапонтова С. Норильск озеленяли одновременно с его строительством. Таймырский телеграф. 2023. 6 марта. URL: <https://www.ttelegraf.ru/news/norilsk-ozelenyali-odnovremenno-s-ego-stroitelstvom/?ysclid=m56jnd2brw459067017> (дата обращения: 15.03.2025)

Подходы к районированию зеленой инфраструктуры арктических городов

Для развития научно обоснованных методов и стандартов озеленения городов, расположенных в районах Крайнего Севера, было важно выработать специальные подходы к районированию их климатогеографических условий. В 1960-е гг. Е.Н. Помазковой была разработана авторская система зонирования зеленого строительства для арктических регионов СССР (рис. 2). Она имела некоторые отличия от использовавшихся в то время общепринятых подходов геоботанического зонирования. В частности, подзона северной тайги была объединена автором с лесотундрой. Этот подход был обусловлен сходством дендрологического состава, климатических условий и мерзлотной характеристики почв в этих двух подзонах [9]. В соответствии с разработанной классификацией, к I растительной зоне были отнесены арктические тундры, пустыни и районы голцов. II растительная зона включала моховые, лишайниковые, кустарниковые, кочкарные и горные тундры. К III растительной зоне были отнесены лесотундра и северотаежный лес, к IV растительной зоне — средне- и южнотаежные леса [9]. Для I зоны наиболее характерно наличие имеющих сплошное распространение многолетнемерзлых пород и небольшая мощность их сезонно-талого слоя. Во II зоне также преобладают многолетнемерзлые породы, однако здесь встречаются отдельные талые участки. Доля талых участков возрастает в III зоне. Данная ситуация особенно характерна для местности, прилегающей к источникам проточных вод или прежних речных русел. В IV зоне преобладает островная мерзлота среди талых грунтов, однако в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке встречаются обширные территории со сплошным распространением мерзлоты [9]. Для городов и поселков, расположенных в I, II и III зонах преимущественно используется озеленение с сохранением мерзлого состояния грунтов и со сплошной подсыпкой из торфяного грунта. В IV зоне чаще всего распространено озеленение на талых грунтах или после предварительного оттаивания многолетнемерзлых пород [9]. Большинство из рассмотренных в данной статье городов, расположенных на территории ЯНАО и Таймырского Долгано-Ненецкого района, относятся к III зоне. Е.Н. Помазковой был сделан вывод о том, что «непреодолимых

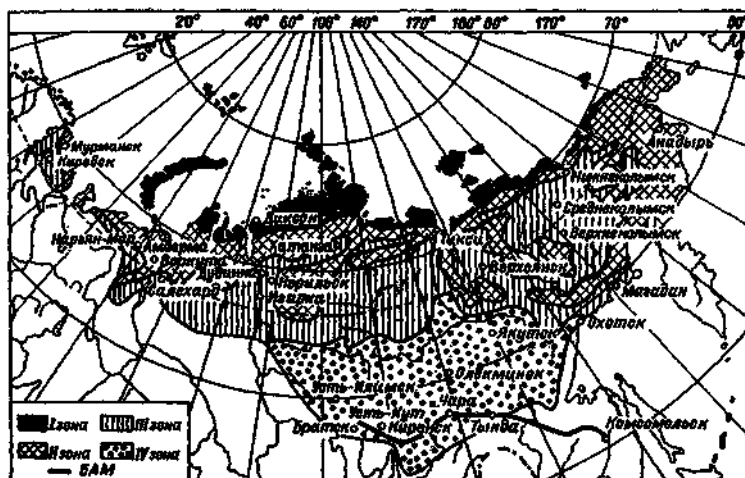


Рис. 2. Карта растительных зон Севера Е.Н. Помазковой [9]

Fig. 2. Map of the vegetation zones of the Russian Arctic by E.N. Pomazkova [9, с. 7]

препятствий для озеленения населенных мест во всех северных растительных зонах не существует, они более трудно разрешимы в I зоне, вполне разрешимы в II и III зонах и почти не отличаются от обычных для средних широт в IV зоне»⁵.

Среди сложившихся в отечественной науке подходов к лесорастительному районированию арктических и субарктических территорий Западной и Центральной Сибири большое внимание мерзлотным характеристикам почв было уделено Г.В. Крыловым и Н.Г. Салатовой. В рассматриваемом в статье районе исследования ими была выделена Салехардо-Дудинская лесотундровая зона [17]. В соответствии с предложенным авторами региональным районированием, в нее входит территория лесотундры и северной тайги. Характерными особенностями этой зоны являются продолжительный период преобладания отрицательных температур воздуха (до 8–9 месяцев) с безморозным периодом около 85 дней, наличие снежного покрова на протяжении 200–240 дней, среднегодовой температуры от -5°C до -11°C . Средняя температура вегетационного периода — около $9,5^{\circ}\text{C}$. Среднее годовое количество осадков составляет 300 мм, из них осадков в вегетационный период — 190 мм. Для грунтов характерно наличие многолетнемерзлых пород, которые на суглинистых почвах оттаивают летом на глубину 40–60 см, а на песчаных — 120–150 см. В целом состояние мерзлоты для этой зоны оценивается как устойчивое. На водоразделах преобладают торфянисто-подзолисто-глеевые, торфяно-глеевые и — реже — слабо-подзолистые почвы [17]. К этой зоне принято относить такие города, как Салехард, Новый Уренгой, Ноябрьск, Надым, Норильск, Игарка и др. Вариативность типичного ассортимента древесной растительности в этих городах в значительной мере определяется степенью дренирования и сезонного протаивания грунтов, а также защищенностью от холодных ветров. К наиболее типичным древесным растениям этой зоны принято относить лиственницы — сибирскую и Сукачева, ель сибирскую, березу извилистую, ольху кустарную и др. Из кустарников чаще всего встречаются карликовая береза и ивы разных видов [17]. В отдельных районах возможна акклиматизация березы пушистой, рябины, смородины и др.⁶ Для озеленения городов, расположенных в этой зоне, чаще всего использовалась местная древесно-кустарниковая флора, однако на протяжении последних десятилетий стала возрастать доля акклиматизированных чужеродных растений, приобретаемых в питомниках. Вследствие преобладания на протяжении большей части года низких температур почв деятельность микроорганизмов в них замедлена. Это приводит к длительному сохранению в почве растительных остатков и попадающих в нее отходов, возникающих в результате антропогенной деятельности. В этой ситуации в городских почвах формируется так называемый культурно-наносный слой, который усиливает неблагоприятные условия для произрастания древесных растений. Для озеленения таких участков была необходима длительная промывка грунта проточной водой [9]. В числе агромероприятий для улучшения условий произрастания древесных растений при производстве озеленительных работ были рекомендованы методы

⁵ Роль зеленых насаждений в населенных местах Крайнего Севера. Центральный государственный архив научно-технической документации Санкт-Петербурга (далее – ЦГАНТД СПб). Ф. 17. Оп. 22. Д. 452. ЛЕНЗНИИЭП, 1960. Л. 26

⁶ Прогнозы формирования перспективности сети населенных мест в северных районах Западно-Сибирского экономического района. ЦГАНТД СПб. Ф. 29. Оп. 21. Д. 35. НИИПГрадостроительства, 1973 г. Л. 61.

водно-тепловой мелиорации, снегозадержание, рыхление почв, введение в почву органических и минеральных удобрений⁷.

В расположенной южнее Ханты-Мансийско-Туруханской зоне проходит граница криолитозоны, однако наиболее крупные построенные на ней города (Сургут, Нижневартовск, Ханты-Мансийск) находятся вне зоны распространения многолетнемерзлых пород. Следует отметить, что эти, выделенные Г.В. Крыловым и Н.Г. Салатовой обширные природно-климатические зоны имеют неоднородные геокриологические и геоботанические условия, которые существенно отличаются друг от друга в разных городах, построенных на их территории. При этом, как показали недавние исследования, проведенные в ЯНАО, несмотря на близкое подзональное положение населенных пунктов, состав их флоры может существенно различаться благодаря разным подходам к ассортименту для озеленения и проникновению чужеродных видов растительности [12]. Исходя из этого, в процессе изучения взаимовлияний растительности и мерзлоты важно учитывать индивидуальные для каждого города комбинации этих условий. С учетом этих тенденций нормы озелененных территорий на одного жителя городов и поселков: в районах субарктической зоны — 6–7 м², в районах лесотундры — 7–8 м² — можно считать очень условными и нередко требующими корректировки для каждого конкретного города [14].

Проблемы изучения взаимодействий мерзлоты и древесной растительности в урбанизированной среде

Большой интерес представляют воздействие процесса озеленения арктических городов на состояние многолетнемерзлых пород и лимитирующие факторы для развития зеленой инфраструктуры, которые несет в себе мерзлота. Большинство исследователей склоняются к тому, что растительные покровы, включая древесные растения, способствуют охлаждению грунтов, препятствуя деградации мерзлоты. Как показали исследования Е.Н. Помазковой, глубина сезонного протаивания почв с растительным покровом во всех выделенных ею геоботанических зонах существенно ниже, чем на грунтах со снятым надпочвенным покровом (табл. 1).

В отчете о НИР на тему «Роль зеленых насаждений в населенных местах Крайнего Севера» Е.Н. Помазкова подчеркивала важное почвоохранное значение растительного покрова, защищающего многолетнемерзлые грунты от распространения плывунов, оврагов и развешивания иссушенного почвенного слоя. При этом растительный покров эффективно предохраняет мерзлоту от растепления летом. В частности, почвы под асфальтированными покрытиями нагреваются летом на 8–10 °С сильнее, чем покрытые газоном⁸. В настоящее время в процессе строительства на многолетнемерзлых породах рекомендуется максимально возможное сохранение растительного покрова в непосредственной близости от застройки и за ее пределами, которое способно понизить температуру грунта на 1–2 °С и более [18].

Опыт озеленения арктических городов демонстрирует, что образующиеся в результате него сеяные травостой, формируя сплошную дернину, способны противостоять ветровой и водной эрозии на северных легких почвах (песчаные, супесчаные и легкие суглинки) [19]. Таким образом, большинство исследователей склоняются к тому, что растительные покровы способствуют охлаждению грунтов, препятствуя деградации

⁷ ЦГАНТД СПб. Ф. 17. Оп. 22. Д. 452. Л. 61.

⁸ ЦГАНТД СПб. Ф. 17. Оп. 22. Д. 452. Л. 4.

Таблица 1

Сравнительная таблица средних глубин сезонно-талого слоя (в метрах)

Table 1

Comparative table of the average depths of the active layer (in meters)

Наименование грунта	Зоны							
	I		II		III		IV	
	1	2	1	2	1	2	1	2
Песчаный	1,2	1,6	1,5	2,5	1,7	3,2	2,0	3,5
Глинистый	0,7	1,0	0,7	1,5	1,5	2,8	2,8	3,0
Торяфный	0,2	0,4	0,25	0,45	0,35	0,5	0,7	1,5
Минеральный	0	0,75	1,0	1,5	1,4	2,1	1,7	4,0

Примечание. 1 — глубина летнего протаивания почв под теплоизоляционным растительным покровом (мхи, кустарнички); 2 — грунт со снятым напочвенным покровом [9, с. 12]

Note. 1 — the depth of summer thawing of soils under thermal insulation vegetation (mosses, shrubs); 2 — soil with removed ground cover [9, p. 12]

мерзлоты. По результатам исследований НИИ сельского хозяйства и экологии Арктики, проведенных в Таймырском Долгано-Ненецком муниципальном районе, для ускоренного создания дерново-защитного слоя на поверхности техногенно-нарушенных земель наиболее эффективен посев многолетних низовых злаковых трав мятлика лугового и овсяницы красной, тогда как верховые злаковые травы: пырейник сибирский, кострец безостый, овсяница луговая — обладают слабыми дернообразующими свойствами на мерзлотных почвах ввиду низкой плотности травостоя, слабой зимостойкости и отсутствия генеративного способа размножения [13, 19]. В то же время распашка почвы в области распространения многолетнемерзлых пород может повысить ее температуру на 4 °С для первой половины вегетационного периода и на 3 °С для его второй половины [20]. Распахивание почв и такие рекомендуемые некоторыми специалистами меры тепловой мелиорации, как прогревание почвы паром или путем воздействия проточных вод с целью понижения горизонта многолетнемерзлых пород [17], представляются нежелательными вблизи зданий и инженерных коммуникаций, построенных по принципу сохранения мерзлоты. Обработка почвы на участках озеленения, включая вспашку и рыхление, может понизить в течение нескольких лет глубину сезонного протаивания во II зоне до 3–4 м [9, с. 44]. В ряде случаев эта тенденция может быть благоприятна для создания условий для озеленения, однако к ней необходимо с осторожностью относиться в городах, построенных с соблюдением принципа сохранения мерзлоты. В частности, создание сплошных массивов древесных насаждений, включая защитные полосы, может существенным образом увеличить глубину протаивания под ними почв. Эту ситуацию наглядно демонстрирует примеры, зафиксированные в сопредельных с территорией нашего исследования регионах. Так, созданная в 1950-е гг. Нарьян-Марской сельскохозяйственной опытной станцией защитная полоса на надпойменной террасе реки Печоры способствовала снижению скорости ветра и увеличению отложений снега. При этом глубина промерзания почвы под ней снизилась с 270 см до 80 см, температура и влажность почвы повысились⁹. В снегозащитной полосе 2191 километра железнодорожной линии Коноша–Воркута, в соответствии с проведенными во второй половине 1960-х гг. наблюдениями, почва сильнее промерзала и оттаивала

⁹ ЦГАНТД СПб. Ф. 29. Оп. 21. Д. 35. Л. 17.

значительно быстрее, чем в тундре с моховым покровом мощностью около 5 см. В начале периода наблюдений (20 июня) мерзлота в почве тундры была на глубине, превышающей 30 см, а температура здесь была всего 0,4 °С. В это же время в защитной полосе на глубине 30 см почва прогрелась уже до 3,6 °С, а мерзлота оттаяла глубже 50 см. Ко времени максимального прогревания метрового слоя почвы (20 августа) ее температура на глубине 100 см составила в тундре всего 2,3 °С при 9,1 °С в защитной полосе. В это же время на глубине 5 см температура почвы была соответственно равна 13,2 °С и 19,8 °С¹⁰. Таким образом, нарушение растительных покровов летом и образование на них снежных сугробов зимой способствуют повышению температуры почвы и увеличению глубины ее сезонно-талого слоя.

Непроницаемость многолетнемерзлых пород для воды способствует тому, что в верхних слоях почвы после таянья снега скапливается излишняя влага, которая нередко приводит к заболачиванию местности. Это часто приводит к проблемам приживаемости древесных растений. В ряде случаев гибель зеленых насаждений происходила из-за их полива подмерзлотной водой, которая содержала легкорастворимые и вредные для растений соли, включая соду и сульфат натрия [6].

Проблемы развития зеленой инфраструктуры в период активной урбанизации (1970–1980-е гг.)

На территории ЯНАО развитие зеленой инфраструктуры было связано со строительством во второй половине 1970-х — 1980-е гг. новых городов, обслуживающих газодобывающий комплекс. В наиболее крупных из этих городов — Новом Уренгое, Надыме и Ноябрьске — сохранены отдельные участки естественной растительности, в которых были благоустроены парки и другие виды мест отдыха. С начала застройки этих городов предпринимались попытки озеленения их улиц. Ввиду отсутствия в регионе специализированного питомника, для озеленения городов чаще всего использовались саженцы, которые выкапывались в лесах, расположенных в более южных районах округа или на таких находившихся в непосредственной близости от города нарушенных территориях, как полосы отвода газопроводов, где часто можно было найти качественный подрост.

В отчете о научной командировке в Тюменскую область, проведенной в 1978 г. специалистами по геоботанике Кольского филиала АН СССР, отмечалось, что, несмотря на то, что Салехард начали озеленять еще в довоенное время местными видами деревьев и кустарников (ива, береза, рябина, лиственница), обследованные озеленительные посадки были созданы в основном в прошлые десятилетия и ухода за ними практически не велось¹¹. В реальности эта оценка скорее характеризовала низкую эффективность озеленительных работ, предпринимавшихся в Салехарде в 1970-е гг., нежели их полное отсутствие. К примеру, в рамках всесоюзного соревнования 1976 г. в Салехарде было высажено 5300 деревьев, из которых прижилось лишь 20 %¹². По-

¹⁰ РГАНТД. Ф. Р-129. Оп. 6-1. Д. 11071. Л. 41.

¹¹ Переписка обкома КПСС с министерствами, ведомствами, центральными организациями и предприятиями о развитии строительства и коммунального хозяйства. Государственный архив социально-политической истории Тюменской области (далее – ГБУТО ГАСПИТО). Ф. 124. Оп. 1 Д.6882. 1979. Л. 201

¹² Документы (решения, постановления, справки, показатели и др.) по итогам Всероссийского соревнования за лучшее проведение работ по благоустройству и санитарному содержанию городов и населенных пунктов Тюменской области. ГБУТО ГАТО. Ф. 1894. Оп. 1. Д. 738. 1976. Л. 77.

добная ситуация была характерна и для других городов ЯНАО, в которых не приживалось до 70–80 % пересаживаемых деревьев [19]. Низкий процент приживаемости был особенно характерен для хвойных пород. По сравнению с ними лучше приживались такие местные виды лиственных деревьев, как ива и береза. В Норильске большинство пересаженных взрослых деревьев погибало через год [8]. Схожая ситуация наблюдалась в других городах, построенных на многолетнемерзлых породах [6]. Ее причины, как правило, были обусловлены несколькими типичными факторами, в числе которых чаще всего выступали неблагоприятные почвенные условия (бедность органического и минерального состава, засоленность, недостаточная или избыточная влажность) и неправильные приемы пересадки. Так, при наличии мерзлоты корневая система деревьев и кустарников при небольшой глубине залегания (нередко не более 20–30 см) может иметь значительно больший радиус по сравнению с деревьями, произрастающими в условиях средней полосы России. К примеру, в этих условиях радиус корневой системы лиственницы и березы может достигать 16 м, а ели и ивы — 12 м [9]. Таким образом, во время выкапывания растений их корневая система повреждается, ее значительная часть остается в почве. Исходя из этого, пересадка деревьев в условиях промерзания почв должна осуществляться в соответствии со специальными технологиями. В конце лета, когда почва максимально оттаивает, хороший результат давала пересадка деревьев с комом земли. Начиная с 1950-х гг. в холодное время года успешно использовалась технология пересадки крупных деревьев с замороженным комом, которая обеспечивала высокую степень сохранения целостности их корневой системы. Позднее в некоторых питомниках начали выращивать саженцы с использованием методов искусственного ограничения горизонтального развития их корневой системы. Высаживание ивы и некоторых других видов древесных растений черенками показало более высокую приживаемость по сравнению с их пересадкой со сформировавшейся корневой системой.

Неглубокое залегание корневой системы деревьев часто приводит к ее обнажению на территории городских парков и других общественных пространств с высокой антропогенной нагрузкой (рис. 3). По мнению специалистов, в подобных случаях



Рис. 3. Примеры оголения корневой системы деревьев в г. Надыме. Фото Р.Ю. Федорова

Fig. 3. Examples of exposed root systems of trees in the city of Nadym. Photo by R. Yu. Fedorov

оголение корневой системы возможно предотвратить лишь путем ограничения доступа посетителей парка к зеленым насаждениям и частичной подсыпки торфа¹³. В то же время наличие мерзлоты в бореальной зоне может быть благоприятно для древесных растений ввиду того, что в летнее время при сезонном протаивании грунтов мерзлотные воды увлажняют почву [9].

Важно отметить, что многие города ЯНАО расположены в местах выхода относительно легких по гранулометрическому составу почвообразующих пород различного генезиса, в том числе песков и супесей эолового и флювиального происхождения. Как отмечают Е.М. Копцева и Е.В. Абакумов, «это приводит к тому, что глубина залегания многолетнемерзлого слоя составляет не 30–60 см, а иногда превышает 100 см, что способствует формированию коренных различий в почвенном и растительном покрове урбанизированных и фоновых тундровых территорий» [12, с. 186]. Опыт озеленения городов округа показывает, что песчаные грунты существенным образом улучшают условия для произрастания деревьев. В Надыме, который относится к III растительной зоне, для основы городской застройки, формировавшейся в 1970–1980-е гг., был отведен участок, представляющий собой песчаный раздув, состоящий из талых грунтов аллювиального генезиса с вкраплением маломощных линз мерзлоты. Эта ландшафтная особенность Надыма выступила в роли благоприятного фактора для возможностей озеленения города. Благодаря дренирующим свойствам песка, в Надыме и его окрестностях весной не происходит обводнений из-за тающего снега, которые характерны для участков со сплошным распространением многолетнемерзлых пород. В условиях арктического климата на песчаных раздувах возникают возможности для произрастания некоторых не встречающихся в зоне сплошного распространения мерзлоты видов деревьев и кустарников. Таким образом, песчаные грунты нередко превращаются в своеобразные «оазисы» для растительности, окруженные мерзлотой [21].

Новые подходы к озеленению арктических городов (первая четверть XXI в.)

Формирование экономики рыночного типа существенным образом изменило организационные подходы к озеленению городов. Связанные с ним тендеры часто стали выигрывать подрядчики из других регионов, не имевшие опыта озеленения в арктическом и субарктическом климате. В последние годы для решения этих проблем большую востребованность получила разработка индивидуальных концепций развития зеленой инфраструктуры северных городов. В первые десятилетия XXI в. для озеленения городов севера Западной и Центральной Сибири все чаще используются саженцы акклиматизированных древесных и кустарниковых растений из питомников, расположенных в более южных регионах. Параллельно с этим ведутся работы по созданию и развитию местных питомников. Первым шагом в этом направлении стало создание в 1982 г. в Норильске питомника кустарниковых ив. В 2022 г. было принято решение организовать первый экспериментальный питомник хвойных насаждений на территории ЯНАО. В формировании травяного яруса арктических городов начали использоваться рулонные газоны. Эти меры, наряду с повышением доступности адаптированных для местных условий грунтосмесей

¹³ ГАСПИТО. Ф. 124. Оп. 1 Д.6882. Л. 203.

и удобрений, способствовали увеличению процента приживаемости и расширению ассортимента городской растительности [14]. В крупнейших арктических городах Западной и Центральной Сибири — Норильске и Новом Уренгое — успешно высаживаются ель сибирская, голубая ель, сибирский кедр, можжевельник, цветущие кустарниковые породы и др.¹⁴ Однако практика последних десятилетий показывает, что озеленение в этих городах продолжает носить преимущественно островной характер, ему часто не хватает единой концепции и равномерного охвата. Ввиду этих факторов развитие зеленой инфраструктуры городов, построенных в криолитозоне, в большинстве случаев отстает от проектных нормативов, заложенных для данных природно-климатических условий. К примеру, по состоянию на 2014 г. в Норильском промышленном районе на одного человека приходилось примерно 1,6 м² зеленых насаждений, что составляло лишь 25 % от принятой нормы [14]. Рекомендуемый в исследованных районах метод сохранения мерзлого состояния грунтов обязывал архитекторов и строителей придерживаться принципа компактной застройки, поэтому во многих городах не были предусмотрены большие парковые зоны. Их функции отчасти компенсировали небольшие скверы и бульвары или участки естественной растительности, сохраненные за чертой города. Исходя из этого, слабонарушенные участки древесной растительности, находящиеся за пределами городской застройки, часто являются до конца не оцененными экологическими и рекреационными ресурсами арктических городов. В процессе будущего благоустройства этих территорий важно максимальное сохранение участков естественной растительности и учет гео-криологического отклика почв на их антропогенные преобразования.

Заключение

Предпринятый на протяжении последнего десятилетия рядом исследователей анализ вегетационных индексов NDVI (Normalized Difference Vegetation Index — нормализованный разностный вегетационный индекс) городов севера Западной и Центральной Сибири дает общее представление о динамике развития их зеленой инфраструктуры. В этих исследованиях отмечается общая тенденция «позеленения» приполярных районов, расположенных в зоне тундры и лесотундры, которую чаще всего связывают с увеличением температуры воздуха и ростом высоты снежных покровов [22]. При этом индикаторы качества растительности в городах, построенных в криолитозоне, существенным образом зависят от принципов и возраста их застройки [23]. В большинстве городов ЯНАО в последние десятилетия отмечалась тенденция к тому, что такие характеристики растительности, как NDVI и высота деревьев, оказывались выше, чем на слабонарушенных фоновых территориях. Исследователи связывают эту тенденцию с такими факторами, как регулярное высаживание новых деревьев и кустарников, целенаправленный уход за зелеными насаждениями, а также наличие городских островов тепла и других благоприятных микроклиматических условий [22, 24].

¹⁴ Гунина С. Сеем, сеем, посеваем. Заполярная правда. 2012. 20 июля. URL: <https://gazetazp.ru/news/gorod/3788-seem-seem-posevaem.html> (дата обращения: 15.03.2025); Город строили —щепки летели. Как спасали деревья на будущих улицах Нового Уренгоя. Красный Север. 2024. 16 февр. URL: <https://vk.com/@ksyanao-gorod-stroili-schepki-leteli-kak-spasali-derevya-na-buduschi> (дата обращения: 15.03.2025).

В целом можно сделать вывод о том, что такие факторы, как потепление климата, активное привнесение в урбанизированную среду чужеродных растений и внедрение новых технологий благоустройства северных городов, будут способствовать росту возможностей для развития их зеленой инфраструктуры. При этом криогенные процессы и характер развития зеленой инфраструктуры в урбанизированной среде имеют высокую степень взаимообусловленности, что делает актуальным развитие в городском планировании междисциплинарных исследований на стыке геоботаники и криологии. Анализ опубликованных работ и хранящихся в архивах отчетов о НИР указывает на то, что наиболее последовательно и активно исследования взаимовлияний криогенных процессов и озеленения городов Западной и Центральной Сибири осуществлялись в 1950–1970-е гг. Современные публикации на эту тему охватывают лишь отдельные города. При этом за последние десятилетия так и не появилось новых обобщающих исследований монографического характера. Исходя из этого, сегодня важна ревизия и актуализация разработанных ранее подходов, опирающаяся на новые технические возможности геоэкологических и геоботанических исследований.

Конфликт интересов. У автора исследования нет конфликта интересов.

Финансирование. Исследование выполнено в рамках госзадания ИКЗ ТюмНЦ СО РАН № FWRZ-2021-0005.

Competing interests. Author declares no conflict of interest.

Funding. This research was supported by the state assignment of the Earth Cryosphere Institute no. № FWRZ-2021-0005.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Amorim J.H., Engardt M., Johansson C., Ribeiro I., Sannebro M. Regulating and cultural ecosystem services of urban green infrastructure in the Nordic countries: A Systematic Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021;18:1219. <https://doi.org/10.3390/ijerph18031>
2. Vilanova C., Ferran J.S., Concepción E.D. Integrating landscape ecology in urban green infrastructure planning: A multi-scale approach for sustainable development. *Urban Forestry & Urban Greening*. 2024;94:128248. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2024.128248>
3. Федоров Р.Ю. Формирование зеленой инфраструктуры как фактора устойчивого развития городов севера Западной Сибири. *Географическая среда и живые системы*. 2024;2:104–118. <https://doi.org/10.18384/2712-7621-2024-2-104-118>
Fedorov R.Yu. Formation of green infrastructure as a factor of sustainable development of cities in the north of Western Siberia. *Geograficheskaya sreda i zhivye sistemy*. 2024;2:104–118. (In Russ.)
4. Zhenhai L., Chen B., Wang S., Wang Q., Chen J., Shi W., Wang X., Liu Y., Tu Y., Huang M., Wang J., Wang Z., Li H., Zhu T. The impacts of vegetation on the soil surface freezing-thawing processes at permafrost southern edge simulated by an improved process-based ecosystem model. *Ecological Modelling*. 2021;456:109663. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2021.109663>.
5. Сосновский А.В. Математическое моделирование влияния толщины снежного покрова на деградацию мерзлоты при потеплении климата. *Криосфера Земли*. 2006;10(3):83–88.
Sosnovskij A.V. Mathematical modeling of the effect of snow cover thickness on permafrost degradation during climate warming. *Kriosfera Zemli*. 2006;10(3):83–88. (In Russ.)
6. Чугунова З.Е. Озеленение населенных мест в районах вечной мерзлоты. М.: Изд-во Мин-ва коммун. хозяйства РСФСР; 1960. 76 с.
Chugunova Z.E. *Greening of populated areas in permafrost areas*. Moscow: Izd-vo Min-va kommun. hozyajstva RSFSR; 1960. 76 p. (In Russ.)

7. Forbes B.C. Land use and climate change on the Yamal Peninsula of north-west Siberia: Some ecological and socio-economic implications. *Polar Research*. 2007;18(2):367–373. <https://doi.org/10.1111/j.1751-8369.1999.tb00316.x>
8. *Озеленение и благоустройство в городах и групповых системах расселения на Севере* / сост. Ю.Б. Хромов. М.; 1975. 66 с.
Hromov Yu.B. (ed.). *Landscaping and landscaping in cities and group settlement systems in the North*. Moscow; 1975. 66 p. (In Russ.)
9. Помазкова Е.Н. *Озеленение северных городов*. Л.: Стройиздат, 1978. 160 с.
Pomazkova E.N. *Greening of northern cities*. Leningrad: Strojizdat; 1978. 160 p. (In Russ.)
10. Сродных Т.Б. *Озеленение городов Тюменского Севера*. Екатеринбург: Уральский государственный лесотехнический университет; 2011, 140 с.
Srodnykh T.B. *Greening the cities of the Tyumen North*. Ekaterinburg: Uralskij gosudarstvennyj lesotekhnicheskij universitet; 2011. 140 p. (In Russ.)
11. Абакумов Е.В., Томашунас В.М., Алексеев И.И. Профили сопротивления мерзлотных почв севера Западной Сибири по данным вертикального электрического зондирования. *Почвоведение*. 2017;9:1113–1121. <https://doi.org/10.7868/S0032180X17090015>
Abakumov E.V., Tomashunas V.M., Alekseev I.I. Profiles of permafrost soil resistance in the north of Western Siberia according to vertical electric sensing data. *Pochvovedenie*. 2017;9:1113–1121. <https://doi.org/10.7868/S0032180X17090015> (In Russ.)
12. Копцева Е.М., Абакумов Е.В. Особенности растительного покрова некоторых населенных пунктов севера Западной Сибири. *Ботанический журнал*. 2021;106(2):177–191.
Kopceva E.M., Abakumov E.V. Features of vegetation cover of some settlements in the north of Western Siberia. *Botanicheskij zhurnal*. 2021;106(2):177–191. (In Russ.)
13. Сариев А.Х. Дернообразовательный процесс на мерзлотных почвах. *Вестник КрасГАУ*. 2016;8(119):15–21.
Sariev A.H. The sod-forming process on permafrost soils. *Vestnik KrasGAU*. 2016;8(119):15–21. (In Russ.)
14. Сариев А.Х. Проблемы озеленения г. Норильска и перспективы. *Культура. Наука. Производство*. 2021;7:32–35.
Sariev A.H. Problems of landscaping in Norilsk and prospects. *Culture. Science. Production*. 2021;7:32–35. (In Russ.)
15. Брушков А.В., Алексеев А.Г., Бадина С.В., Дроздов Д.С., Дубровин В.А., Жданеев О.В., Осокин А.Б., Садуртдинов М.Р., Сергеев Д.О., Федоров Р.Ю., Фролов К.Н. К вопросу о необходимости выработки целостной системы мер по предупреждению деформаций зданий и сооружений в криолитозоне в условиях меняющегося климата. *Арктика: экология и экономика*. 2024;14(4):605–616. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2024-4-605-616>
Brushkov A.V., Alekseev A.G., Badina S.V., Drozdov D.S., Dubrovin V.A., Zhdaneev O.V., Osokin A.B., Sadurtdinov M.R., Sergeev D.O., Fedorov R.Yu., Frolov K.N. On the need to develop an integrated system of measures to prevent deformations of buildings and structures in the cryolithozone in a changing climate. *Arktika: ekologiya i ekonomika*. 2024;14(4):605–616. <https://doi.org/10.25283/2223-4594-2024-4-605-616>. (In Russ.)
16. Чубынин Д.М. *Мой опыт растениеводства в Заполярье*. М.: Сельхозгиз; 1951. 32 с.
Chubynin D.M. *My experience of crop production in the Arctic*. Moscow: Sel'hozgiz; 1951. 32 p. (In Russ.)
17. Крылов Г.В., Салатова Н.Г. *Озеленение городов и рабочих поселков Западной Сибири: Районирование, ассортимент и опыт зеленого строительства*. Новосибирск, 1955. 56 с.
Krylov G.V., Salatova N.G. *Greening of cities and workers' settlements in Western Siberia: Zoning, assortment and experience of green construction*. Novosibirsk, 1955. 56 p. (In Russ.)

18. Мельников В.П., Осипов В.И., Брушков А.В., Бадина С.В., Дроздов Д.С., Дубровин В.А., Железняк М.Н., Садуртдинов М.Р., Сергеев Д.О., Окунев С.Н., Остарков Н.А., Осокин А.Ю., Федоров Р.Ю. Адаптация инфраструктуры Арктики и Субарктики к изменениям температуры мерзлых грунтов. *Криосфера Земли*. 2021;25(6):3–15. <https://doi.org/10.15372/KZ20210601>
Melnikov V.P., Osipov V.I., Brushkov A.V., Badina S.V., Drozdov D.S., Dubrovin V.A., Zheleznyak M.N., Sadurtdinov M.R., Sergeev D.O., Okunev S.N., Ostarkov N.A., Osokin A.Yu., Fedorov R.Yu. Adaptation of Arctic and Subarctic infrastructure to changes in the temperature of frozen soils. *Kriosfera Zemli*. 2021;25(6):3–15. <https://doi.org/10.15372/KZ20210601> (In Russ.)
19. Исекеев И.И., Тихановский А.Н. *Технологии озеленения городов и поселков Ямало-Ненецкого автономного округа*. Новосибирск: СО РАСХН; 1996. 24 с.
Isekeev I.I., Tihanovskij A.N. *Technologies of greening cities and towns of the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug*. Novosibirsk: SO RASKHN; 1996. 24 p. (In Russ.)
20. Дадыкин В.П. *Особенности поведения растений на холодных почвах*. М.: Изд-во АН СССР; 1952. 279 с.
Dadykin V.P. *Features of plant behavior on cold soils*. Moscow: Izd-vo Akad. nauk SSSR; 1952. 279 p. (In Russ.)
21. Kuklina V., Sizov O., Fedorov R., Butakov D. Dealing with sand in the Arctic city of Nadym. *Ambio*. 2023;52:1198–1210. <https://doi.org/10.1007/s13280-023-01868-7>
22. Тигеев А.А., Московченко Д.В., Фахретдинов А.В. Современная динамика природной и антропогенной растительности зоны предтундровых лесов Западной Сибири по данным вегетационного индекса. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2021;18(4):166–177. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-4-166-177>
Tigeev A.A., Moskovchenko D.V., Fahretdinov A.V. Modern dynamics of natural and anthropogenic vegetation in the pre-tundra forests of Western Siberia according to the vegetation index. *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2021;18(4):166–177. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-4-166-177> (In Russ.)
23. Esau I., Miles V.V., Davy R., Miles M.W., Kurchatova A. Trends in normalized difference vegetation index (NDVI) associated with urban development in northern West Siberia. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2016;16:9563–9577. <https://doi.org/10.5194/acp-16-9563-2016>
24. Fedorov R., Kuklina V., Sizov O., Soromotin A., Lobanov A., Prikodko N., Pechkin A., Krasnenko A., Esau I. Zooming in on Arctic Urban Nature: Green and Blue Space in Nadym, Siberia. *Environmental Research Letters*. 2021;16: 075009. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac0fa3>

Подписано в печать 25.03.2025
Формат 70×100 1/16
Тираж 85

Печать цифровая
Печ. л. 6,375
Заказ №

ООО «Тверская фабрика печати»,
170006, Россия, г. Тверь, Беляковский переулок, д. 46, пом. 20.

Signed to print 25.03.205
Format 70×100 1/16
Edition 85

Digital Printing
P.s. 6,375
Order No

LLC “Tver Printing Factory”,
170006, Russia, Tver, Belyakovsky lane, 46, office 20.