ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ
И МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

THE RUSSIAN FEDERAL SERVICE ON HYDROMETEOROLOGY
AND ENVIRONMENTAL PROTECTION

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
АРКТИЧЕСКИЙ И АНТАРКТИЧЕСКИЙ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ

THE STATE SCIENTIFIC CENTER OF THE RUSSIAN FEDERATION
THE ARCTIC AND ANTARCTIC RESEARCH INSTITUTE

ПРОБЛЕМЫ АРКТИКИ И АНТАРКТИКИ

Problemy Arktiki i Antarktiki

Том 68, № 4, 2022

ARCTIC AND ANTARCTIC RESEARCH

Volume 68, No 4, 2022

Санкт-Петербург
2022
Saint Petersburg

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

Префикс DOI: 10.30758

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

СОСТАВ РЕДКОЛЛЕГИИ:

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

Заместители главного редактора:

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

Члены редколлегии:

д-р геогр. наук **Г.В. Алексеев** (Санкт-Петербург, Россия)
канд. физ.-мат. наук **Л.П. Бобылев** (Санкт-Петербург, Россия)
чл.-корр. РАН **Н.Б. Вахтин** (Санкт-Петербург, Россия)
д-р геогр. наук **М.Н. Григорьев** (Якутск, Россия)
д-р биол. наук **С.Г. Денисенко** (Санкт-Петербург, Россия)
д-р **Д.В. Дивин** (Тромсё, Норвегия)
академик РАН **С.А. Добролюбов** (Москва, Россия)
чл.-корр. РАН **Е.О. Дубинина** (Москва, Россия)
д-р физ.-мат. наук **В.М. Катцов** (Санкт-Петербург, Россия)
д-р физ.-мат. наук **Б.В. Козелов** (Мурманск, Россия)
д-р геол.-минерал. наук **М.О. Лейбман** (Тюмень, Россия)
проф. **М. Леппаранта** (Хельсинки, Финляндия)
канд. техн. наук **В.А. Лихоманов** (Санкт-Петербург, Россия)
академик НАН **В.Ф. Логинов** (Минск, Беларусь)
д-р физ.-мат. наук **А.П. Макштас** (Санкт-Петербург, Россия)
проф. **А.В. Марченко** (Лонгйир, Норвегия)
д-р геогр. наук. **Е.У. Миронов** (Санкт-Петербург, Россия)
канд. геогр. наук **В.Ф. Радионов** (Санкт-Петербург, Россия)
проф. **Д. Райно** (Гренобль, Франция)
д-р техн. наук **К.Е. Сазонов** (Санкт-Петербург, Россия)
д-р техн. наук **К.Г. Ставров** (Санкт-Петербург, Россия)
профессор **П.Г. Талалай** (Чаньчунь, Китай)
д-р физ.-мат. наук **Л.А. Тимохов** (Санкт-Петербург, Россия)
д-р физ.-мат. наук **О.А. Трошичев** (Санкт-Петербург, Россия)
чл.-корр. РАН **Н.Н. Филатов** (Петрозаводск, Россия)
академик РАН **М.В. Флинт** (Москва, Россия)
д-р геогр. наук **К.В. Чистяков** (Санкт-Петербург, Россия)

Редакционный совет:

д-р геогр. наук **А.С. Макаров** (Санкт-Петербург, Россия) (Председатель)

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

Ответственный секретарь – канд. биол. наук **И.А. Алехина**
Литературный редактор – **Е.В. Миненко**
Оригинал-макет и подготовка к печати: **А.А. Меркулов**.

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

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

Адрес редакции журнала «Проблемы Арктики и Антарктики»:
199397 Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38.
Тел. +7(812) 416-4251, e-mail: aaresearch@aari.ru
ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт.
Сайт журнала: https://www.aaresearch.science

Подписной индекс издания в каталоге ООО «Урал-Пресс»
48657 – на полгода

© ГНЦ РФ ААНИИ, 2022; © Росгидромет, 2022.

The journal continues the series of "Arctic Research", founded in 1937.
Four issues per year. ISSN 0555-2648 (Print), ISSN 2618-6713 (Online)
The journal is published under the scientific and methodological guidance of the Earth Sciences Division
of the Russian Academy of Sciences

DOI-prefix: 10.30758

CC BY

The Journal publishes new findings of studies of the Earth polar regions in oceanology, meteorology, climatology, hydrology, glaciology, hydrochemistry, paleogeography, biology and ecology of the polar regions, and on the problems of economic and social security in the Arctic.

EDITORIAL BOARD:

Editor-in-Chief – Vladimir V. Ivanov
Dr of Sci. (Physics and mathematics),
Moscow, Russia

Deputy of the Editor-in-Chief:

German L. Leitchenkov, Dr. of Sci. (Geology and mineralogy), St. Petersburg, Russia
Vladimir Ya. Lipenkov, Cand. of Sci. (Geography), St. Petersburg, Russia;
Galina V. Surkova, Dr. of Sci. (Geography), Moscow, Russia

Members of the editorial board:

Genrikh V. Alekseev, Dr. of Sci., St. Petersburg, Russia
Leonid P. Bobylev, Cand. of Sci., St. Petersburg, Russia
Kirill V. Chistyakov, Dr. of Sci., St. Petersburg, Russia
Stanislav G. Denisenko, Dr. of Sci., St. Petersburg, Russia
Dmitry V. Divine, Cand. of Sci., Tromsø, Norway
Sergey A. Dobrolyubov, academician, Dr. of Sci., Moscow, Russia
Elena O. Dubinina, RAS corr. member, Moscow, Russia
Nikolay N. Filatov, RAS corr. member, Petrozavodsk, Russia
Mikhail V. Flint, academician, Dr. of Sci., Moscow, Russia
Mikhail N. Grigoriev, Dr. of Sci., Yakutsk, Russia
Vladimir M. Kattsov, Dr. of Sci., St. Petersburg, Russia
Boris V. Kozelov, Dr. of Sci., Murmansk, Russia
Marina O. Leibman, Dr. of Sci., Tyumen, Russia
Matti Leppäranta, Ph.D., Prof. emer., Helsinki, Finland;
Vladimir A. Likhomanov, Cand. of Sci., St. Petersburg, Russia
Vladimir F. Loginov, academician, Dr. of Sci., Minsk, Belarus
Alexander P. Makshtas, Dr. of Sci., St. Petersburg, Russia
Alexey V. Marchenko, Dr. of Sci., Longyearbyen, Norway
Evgeny U. Mironov, Dr. of Sci., St. Petersburg, Russia
Vladimir F. Radionov, Cand. of Sci., St. Petersburg, Russia
Dominique Raynaud, Prof. emer., Grenoble, France
Kirill E. Sazonov, Dr. of Sci. St., Petersburg, Russia
Konstantin G. Stavrov, Dr. of Sci., St. Petersburg, Russia
Pavel G. Talalay, Prof., Dr. of Sci., Changchun, PRC
Leonid A. Timokhov, Dr. of Sci., St. Petersburg, Russia
Oleg A. Troshichev, Dr. of Sci., St. Petersburg, Russia
Nikolay B. Vakhtin, RAS corr. member, St. Petersburg, Russia

Editorial Council:

Alexander S. Makarov, Dr. of Sci., St. Petersburg, Russia (Chair)

Valery D. Kaminsky, academician, St. Petersburg, Russia;
Vladimir M. Kotlyakov, academician, Moscow, Russia;
Genady G. Matishov, academician, Rostov on the Don;
Oleg N. Pugachev, academician, St. Petersburg, Russia;
Vladislav A. Rumiantsev, academician, St. Petersburg, Russia;
Arkady A. Tishkov, RAS corr. member, Moscow, Russia

Executive Secretary – **Irina A. Alekhina**
Literary Editor – **Elena V. Minenko**
Original layout and preparation for printing: **Alexander A. Merkulov**.

Registration Certificate for the print publishing ПИ № ФС 77-73644 of September 7, 2018.
Registration Certificate for the web publishing ЭЛ № ФС 77-73287 of July 20, 2018.
Issued by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology, and Mass Media

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

Contacts:
199397 Saint Petersburg, Bering str, 38; phone: +7 (812) 416-4251; e-mail: aaresearch@aari.ru.
State Scientific Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute
https://www.aaresearch.science
Subscription index of the journal catalog "Ural-Press" 48657 – for half a year
© SSC RF AARI, 2022; © Roshydromet, 2022.

Содержание

ОКЕАНОЛОГИЯ

А.К. Наумов, Е.А. Скутина, Д.О. Якимушкин. Пространственные изменения осадки килей торосов на акватории моря Лаптевых 332

МЕТЕОРОЛОГИЯ И КЛИМАТОЛОГИЯ

И.В. Серых, А.В. Толстиков. Изменения климата западной части Российской Арктики в 1980–2021 гг.
Часть 2. Температура почвы, снег, влажность..... 352

ГЛЯЦИОЛОГИЯ И КРИОЛОГИЯ

А.В. Терехов, У.В. Прохорова, А.Л. Борисик, В.Э. Демидов, С.Р. Веркулич. Изменения объема и геометрии ледника Восточный Дальфонна (Шпицберген) в 2008–2019 гг. 370

Е.М. Бабкин, Е.А. Бабкина, М.О. Лейбман, Р.Р. Хайруллин, А.В.Хомутов. Мониторинг изменений рельефа полигональных торфяников, примыкающих к автодороге Заполярное — Тазовский 384

ЛЕДОТЕХНИКА

Б.П. Егоров. Анизотропия сил трения покоя и трения скольжения монокристаллов льда..... 406

СОЦИАЛЬНАЯ ГЕОГРАФИЯ И СОЦИАЛЬНАЯ АНТРОПОЛОГИЯ

К.В. Истомин, Н.Б. Вахтин. Фактор неопределенности в современных сообществах Крайнего Севера РФ: методологические подходы к изучению 420

Contents

OCEANOLOGY

A.K. Naumov, E.A. Skutina, D.O. Yakimushkin. Spatial variations of the hummocks keel draft in the Laptev Sea area 332

METEOROLOGY AND CLIMATOLOGY

I.V. Serykh, A.V. Tolstikov. Climate change in the western part of the Russian Arctic in 1980–2021. Part 2. Soil temperature, snow, humidity 352

GLACIOLOGY AND CRYOLOGY OF THE EARTH

A.V. Terekhov, U.V. Prokhorova, A.L. Borisik, V.E. Demidov, S.R. Verkulich. Changes in volume and geometry of the Austre Dahlfonna glacier (Spitsbergen island) in 2008–2019 370

E.M. Babkin, E.A. Babkina, M.O. Leibman, R.R. Khayrullin, A.V. Khomutov. Monitoring of the relief changes in polygonal peat plateaus adjacent to the highway Zapolyarnoe — Tazovsky 384

ICE TECHNOLOGY

B.P. Egorov. Anisotropy of the friction forces of rest and sliding friction of single crystals of ice 406

SOCIAL GEOGRAPHY AND SOCIAL ANTHROPOLOGY

K.V. Istomin, N.B. Vakhtin. Uncertainty factor in contemporary communities of the Russian Arctic: methodological approaches to research 420

ОКЕАНОЛОГИЯ
OCEANOLOGY

https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-4-332-351
УДК 551.467

CC BY

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ **ORIGINAL ARTICLE**

Пространственные изменения осадки килей торосов на акватории моря Лаптевых

А.К. Наумов[1], Е.А. Скутина[1], Д.О. Якимушкин[2]*

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

[2] — *Арктический научный центр, Москва, Россия*

[*]*nmv_alex@rambler.ru*

Резюме

Настоящая статья посвящена изучению морфометрических особенностей нижней поверхности ледяного покрова на акватории моря Лаптевых. Основное внимание уделено изучению осадки килей торосистых образований и пространственной изменчивости этой величины.

Для проведения исследования использованы данные, полученные в течение нескольких (от двух до четырех) ледовых сезонов в период с 2014 по 2019 г. с помощью гидролокаторов верхнего обзора, входивших в состав притопленных автономных буйковых станций (ПАБС). Станции располагались в пяти точках на акватории моря Лаптевых. Полученные на станциях ряды наблюдений за осадкой ледяного покрова позволили выделить информацию об осадке килей торосистых образований в отдельных точках акватории моря. В результате были сформированы выборки значений осадки килей торосов по отдельным ледовым сезонам для каждой из пяти станций. Далее была выполнена статистическая обработка полученных данных. В частности, для каждого из ледовых сезонов была проведена проверка на однородность средних значений и дисперсий выборок по станциям, а также проверка на совпадение их распределений. Сравнительный анализ данных методами математической статистики позволил описать пространственную изменчивость осадки килей торосистых образований на акватории моря Лаптевых для отдельных ледовых сезонов. По результатам проведенного анализа были определены «ключевые» точки (станции), описывающие пространственную изменчивость осадки килей торосистых образований для всех рассмотренных ледовых сезонов, что, в случае необходимости, позволяет планировать дальнейшие исследования осадки льда с применением ПАБС (определять необходимое число станций и точки их установки).

Ключевые слова: критерии однородности, ледяной покров, море Лаптевых, осадка льда, торос, торосистое образование.

Для цитирования: *Наумов А.К., Скутина Е.А., Якимушкин Д.О.* Пространственные изменения осадки килей торосов на акватории моря Лаптевых // Проблемы Арктики и Антарктики. 2022. Т. 68. № 4. С. 332–351. https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-4-332-351.

Поступила 27.07.2022 **После переработки 18.11.2022** **Принята 25.11.2022**

Spatial variations of the hummocks keel draft in the Laptev Sea area

Alexey K. Naumov[1], Elena A. Skutina[1], Dmitriy O. Yakimushkin[2]*

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

[2] — *Arctic research center, Moscow, Russia*

[*]*nmv_alex@rambler.ru*

Summary

The article investigates the morphometric features of the ice cover lower surface in the Laptev Sea area. The main attention is paid to the study of the hummocked formations' keel draft and the spatial variability of this quantity.

The data for the research were obtained during several ice seasons (from two to four) in the period 2014-2019 using upward-looking sonars, which were part of the submerged autonomous buoy stations (SABS). The stations were installed at five points in the Laptev Sea area. The data obtained from a series of observations of the ice cover draft allowed extracting information on the hummocked formations' keel draft at separate points of the sea area. As a result, samples of values of the hummocks keel draft were formed for separate ice seasons for each of the five stations. Further, a statistical processing of the data obtained was performed. In particular, for each of the ice seasons we checked the homogeneity of the mean values and of the distribution of samples by stations. Also checked was the distribution matching. A comparative data analysis using methods of mathematical statistics made it possible to describe the spatial variability of the hummocked formations' keel draft in the Laptev Sea area for separate ice seasons. The "key" points (stations) describing the spatial variability of the hummocked formations' keel draft for all the ice seasons considered were determined according to the results of the analysis performed, which allows planning further ice draft research using SABS, if required (to determine the necessary number of stations and points of their installation).

Keywords: homogeneity criteria, hummock, ice cover, ice draft, ice ridge, Laptev Sea.

For Citation: *Naumov A.K., Skutina E.A., Yakimushkin D.O.* Spatial variations of the hummocks keel draft in the Laptev Sea area. *Problemy Arktiki i Antarktiki.* Arctic and Antarctic Research. 2022, 68 (4): 332–351. [In Russian]. https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-4-332-351.

Received 27.07.2022 **Revised 18.11.2022** **Accepted 25.11.2022**

ВВЕДЕНИЕ

В связи с активным освоением шельфа арктических морей России в последнее время в ходе проведения работ возникает необходимость в определении параметров ледяного покрова. С 2012 г. ФГБУ «ААНИИ» по заказу ПАО «НК "РОСНЕФТЬ"» выполняет на акваториях арктических морей ледоисследовательские работы с целью сбора океанографической и ледовой информации. На акваториях морей Карского, Лаптевых и Чукотского устанавливаются притопленные автономные буйковые станции (ПАБС), в состав которых входит гидролокатор верхнего обзора, предназначенный для сбора данных по осадке ледяных образований, дрейфующих над прибором.

Подобные работы проводились неоднократно. На шельфе Сахалина были получены данные об осадке льда с помощью акустических профилографов, установленных на длительный период [1].

В работе [2] представлены результаты измерений осадки на трех станциях в море Бофорта за продолжительный период времени. Также проведено сравнение данных по станциям и сезонам. Примечательно, что места постановки станций находились на большой глубине (более 3000 м).

В настоящей работе анализируются материалы, полученные на акватории моря Лаптевых: в тексте приведены описания исходных данных и ледовых условий, в которых они были получены; выполнен сравнительный анализ результатов измерений, полученных с помощью ПАБС в течение нескольких ледовых сезонов.

Целями статьи являются: 1) выявление пространственной изменчивости осадки ледяных образований на акватории моря Лаптевых с помощью применения различных статистических критериев; 2) определение «ключевых точек» на акватории моря — точек, установки станций, данные с которых описывают пространственную изменчивость осадки килей торосистых образований для всех ледовых сезонов.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Для анализа пространственных изменений осадки льда в море Лаптевых были использованы данные об осадке килей торосов за 4 ледовых сезона: 2014/15, 2015/16, 2016/17 и 2018/19 гг. За указанные периоды с помощью ПАБС, установленных в пяти точках моря Лаптевых, было обследовано чуть более 45000 км профиля ледяного покрова (табл. 1, рис. 1).

В каждом из четырех рассматриваемых ледовых сезонов число станций, на которых получены данные по осадке льда, колеблется от 3 до 5. Наиболее протяженные профили ледяного покрова исследованы на станциях 11 и 12.

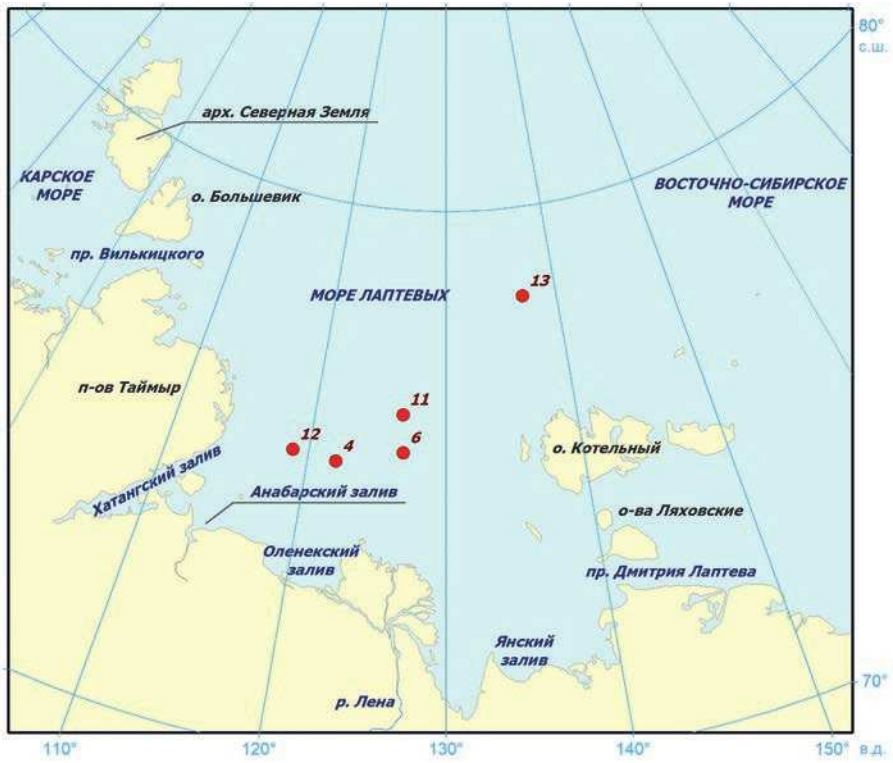

Рис. 1. Схема расположения ПАБС на акватории моря Лаптевых в период 2014–2017 и 2018/19 гг.

Fig. 1. The layout of the setting points of underwater autonomous buoy stations in the Laptev Sea in the period 2014–2017 and 2018/19

Таблица 1

Характеристика исходных данных по осадке льда, полученных на акватории моря Лаптевых в период 2014–2017 и 2018/19 гг.

Table 1

Characteristics of the initial data of the ice draft obtained in the Laptev Sea in the period 2014–2017 and 2018/19

Станция №	Протяженность ледового профиля (км)			
	2014/15	2015/16	2016/17	2018/19
4	–	3598	2586	–
6	–	3610	1955	2232
11	3491	3599	2839	2400
12	3956	2276	3383	3415
13	3480	3785	–	–

Для получения информации о нижней поверхности ледяного покрова использовался гидролокатор верхнего обзора для профилирования льда (IPS — *англ.* ice profiling sonar). Полученные данные (серии измерений осадки ледяного покрова в точках установки оборудования) позволили проследить внутригодовую (внутрисезонную), межгодовую (межсезонную) и пространственную изменчивость значений осадки льда для каждой станции, а также проанализировать пространственную изменчивость этой величины внутри отдельных сезонов.

Данные, полученные с гидролокатора, — это ряд значений (осадка льда, расстояние от начала профиля) с дискретностью 1 с. Обработка данных проводилась в несколько этапов:

1. Первичная обработка — проверка исходных данных на наличие выбросов.

2. Фильтрация данных.

На данном этапе проводится уменьшение объема данных за счет выбора из исходного ряда по осадке льда локальных экстремумов и замены цепочек неменяющихся значений осадки на пары начало–конец цепочки.

3. Выделение килей торосов и участков ровного льда.

На данном этапе в отфильтрованном ряду:

а) выделяются значения осадки, относящиеся к участкам ровного и всторошенного льда (выборки по станциям разбиваются на месячные серии, для каждой серии визуально оценивается средняя осадка ровного льда h, тогда участки ровного льда — участки с осадкой $h \pm 0{,}1h$, за участки наслоенного льда принимаются участки с относительно ровной осадкой h_1: $1{,}1h < h_1 \leq 2h$; остальные участки рассматриваются как участки всторошенного льда;

б) в зависимости от осадки ровного льда на исследуемом профиле, с учетом имеющихся данных о соотношении геометрических размеров торосов, всторошенные участки исследуемого ледового профиля, находящиеся рядом, могут быть объединены как относящиеся к одному торосу;

в) после выявления участков льда, относящихся к одному торосу, определяются значения осадки килей отдельных торосов.

Подробно методика обработки данных изложена в работе [3]. Данная работа посвящена изучению осадки торосистых образований, поэтому в данном случае в результате обработки данных гидролокатора мы формируем двумерный массив, где первый столбец — расстояние от начала ледового профиля (м), второй — осадка киля тороса (м). Сформированный таким образом ряд служит исходными данными

для оценки основных статистических характеристик осадки килей торосов на исследованном за время работы гидролокатора профиле.

Для сравнительного анализа выборок, содержащих осадки килей на различных станциях, были проведены:

– проверка на однородность средних значений выборок;

– проверка на однородность дисперсий выборок;

– проверка на совпадение распределений выборок.

Анализ выполнялся попарным сравнением имеющихся выборок и их характеристик.

Для проверки гипотезы об однородности распределений использовался классический критерий Колмогорова–Смирнова [4]. В некоторых случаях проводилась дополнительная проверка по критериям Лемана–Розенблатта и Андерсона–Дарлинга, обладающих, во многих случаях, большей мощностью [5–7, 8–11].

Для сравнения месячных серий осадки килей торосов, полученных на разных станциях, необходимо учитывать, что количество данных на различных станциях неодинаково. Чтобы учесть эту особенность, для сравнения средних значений месячных выборок был применен критерий Тьюки для выборок разного объема [4].

С помощью стандартного критерия Левене [12] проверялись гипотезы об однородности дисперсий исследуемых выборок.

РАЗВИТИЕ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА МОРЯ ЛАПТЕВЫХ В ИССЛЕДУЕМЫХ ЛЕДОВЫХ СЕЗОНАХ

Для описания ледовых условий в море Лаптевых в периоды работы ПАБС и получения серии наблюдений за осадкой льда были проанализированы ледовые карты за сезоны 2014/15, 2015/16, 2016/17 и 2018/19 гг. (http://old.aari.ru/odata/_d0004.php). Согласно картам, можно выделить следующие особенности развития ледяного покрова:

– развитие ледяного покрова в *ноябре* было для сезонов различным, более легкая картина отмечалась для 2014 и 2018 гг. (преобладание на акватории южнее 82° с. ш. серых и серо-белых льдов, небольшое количество тонких однолетних льдов), более тяжелые — в 2015 и 2016 гг. (наличие большей площади однолетних тонких льдов, а также старых и остаточных льдов в северной части моря);

– в *декабре* каждого из рассматриваемых ледовых сезонов наблюдалось развитие ледяного покрова и переход серо-белых льдов в градацию однолетних тонких льдов, которые стали преобладающими на всей акватории моря, — это говорит о более интенсивном нарастании льда в сезонах 2014/15 и 2018/19 гг.; в то же время при сглаживании различий в возрастном составе льда на всей акватории моря Лаптевых в декабре 2015 г. появились однолетние средние льды, для декабря 2016 г. было характерно наличие старых и остаточных льдов в северо-восточной части моря, то есть в декабре для сезонов 2015/16 и 2016/17 гг. в море Лаптевых по-прежнему отмечались более тяжелые ледовые условия (по сравнению с сезонами 2014/15 и 2018/19 гг.);

– в *январе* развитие ледяного покрова продолжилось: для всех сезонов отмечено наличие однолетних средних льдов, однако их граница от сезона к сезону располагается по-разному; более близкими являются границы однолетних средних льдов, зафиксированные в январе 2015 и 2019 гг., а также в январе 2016 и 2017 гг.;

– в *феврале* переход градации однолетних тонких льдов в однолетние средние продолжился, а в 2016 и 2017 гг. на акватории моря, расположенной южнее 82° с. ш., было отмечено появление однолетних толстых льдов; площадь однолетних средних льдов увеличилась; однолетние тонкие льды на акватории также сохранялись, но их площадь

сократилась, эти льды располагались полосой вдоль арх. Северная Земля, побережья п-ова Таймыр и материкового побережья до района устья р. Лены (для всех сезонов) и далее к северному побережью о. Котельный (за исключением февраля 2016/17 г.);

– в *марте* однолетние толстые льды отмечались на акватории моря Лаптевых уже во всех рассматриваемых сезонах; положение границы однолетних толстых льдов было примерно одинаковым в марте 2016 и 2017 гг. (с небольшим сдвигом в центральной части моря к юго-западу в 2016 г.); а в марте 2015 и 2019 гг. эта граница располагалась севернее на 0,5–1° по широте на всей акватории моря Лаптевых;

– в *апреле* в 2016, 2017 и 2019 гг. практически все однолетние тонкие льды перешли в градацию однолетних средних; в 2015 г. такой переход осуществился лишь на половине акватории, занятой однолетними тонкими льдами, однако граница распространения однолетних толстых льдов продвинулась значительно южнее вдоль меридианов 120–130° в. д. (до 76° с. ш.), по сравнению с апрелем 2016, 2017 и 2019 гг.; границы распространения толстых однолетних льдов для всех рассматриваемых сезонов сблизились;

– в *мае* возрастной состав льдов и их распространение по акватории моря Лаптевых сохранялся по сравнению с апрелем; установившиеся в апреле границы льдов разных возрастов немного сместились и в итоге практически совпали для всех рассматриваемых сезонов (2014/15, 2015/16, 2016/17 и 2018/19 гг.);

– в *июне* началось очищение акватории от льда, которое продолжилось в июле.

Таким образом, рассматриваемые сезоны, во время которых на акватории моря Лаптевых работали ПАБС, можно разделить на 2 группы (первая — 2014/15 и 2018/19 гг., вторая — 2015/16 и 2016/17 гг.), различия между которыми наблюдались в период с ноября по март (в начале ледовых сезонов 2014/15 и 2018/19 гг. наблюдались более легкие ледовые условия по сравнению с сезонами 2015/16 и 2016/17 гг.). В период максимального развития ледяного покрова (апрель–май) различия практически исчезли.

По данным региональных ледовых карт (http://old.aari.ru/odata/_d0004.php), ледовые условия во всех точках проведения измерений (в точках установки ПАБС) в течение каждого ледового сезона практически совпадают. Исключением является станция 13, где в январе–мае наблюдается более толстый лед (на одну градацию по толщине, согласно Номенклатуре морских льдов [13]), чем на станциях 4, 6, 11 и 12. Это объясняется в первую очередь расположением станции 13, которая находится севернее и наиболее удалена от остальных станций (рис. 1).

СЕЗОН 2014/15 г.

В ледовом сезоне 2014/15 г. данные по осадке льда были получены в точках постановки станций 11, 12 и 13 (рис. 1).

Применение критериев сравнения для сезонных серий (данных со станций за весь сезон) показало значимое различие в средних значениях между всеми станциями за весь ледовый сезон (результат попарного сравнения с применением t-критерия). Вместе с этим можно отметить определенную близость (общий вид графика) хода среднемесячных значений (рис. 2*а*).

На рис. 2*б* приведены распределения осадки килей (значения функции $F(x) = 1 - \mathrm{CDF}(x)$, где $\mathrm{CDF}(x)$ — значения распределения накопленной плотности вероятности величины осадки килей торосов (от *англ.* cumulative density function), полученные по данным для всего ледового сезона. Несмотря на близость функций распределения осадки килей на станциях (рис. 2*б*), применение критериев сравнения показало значимое различие средних за сезон величин осадки килей торосистых образований.

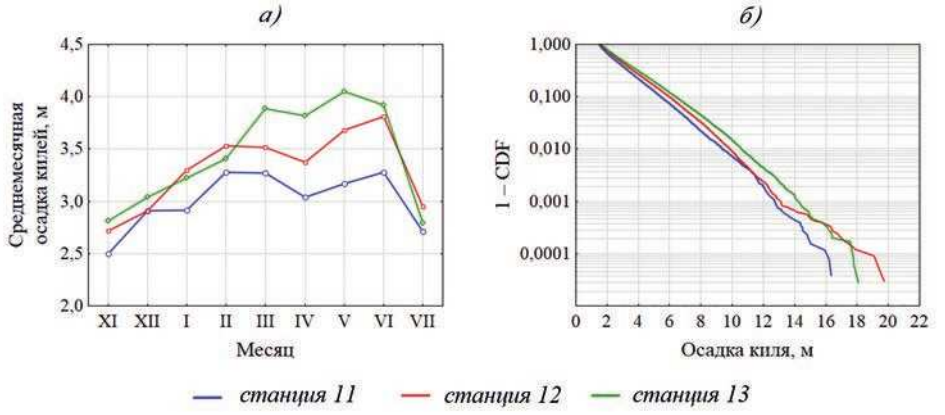

Рис. 2. Среднемесячные значения (*а*) и распределение значений (*б*) осадки килей торосистых образований по данным всего ледового сезона 2014/15 г.

Fig. 2. Mean monthly values (*а*) and the distribution of the draft values (*б*) of ice ridge keels according to the data of the entire ice season 2014–2015

Дисперсионный анализ сезонных серий для станций 11, 12 и 13 показал, что в целом за сезон 2014/15 г. наибольшее различие наблюдалось между станциями 11 и 13, наименьшее — между станциями 12 и 13.

В течение ледового периода форма распределения осадок килей торосистых образований сильно изменяется от месяца к месяцу на каждой из рассматриваемых станций (рис. 3). По функции распределения очень хорошо прослеживается сезонный ход осадки деформированного льда: начиная с ноября она «двигается» вправо до периода максимального развития ледяного покрова, затем «возвращается» назад в июле.

Всего за сезон 2014/15 г. было получено по 9 месячных серий (выборок) на каждой из 3 станций. Для сравнения месячных серий осадки килей торосов, полученных на разных станциях, необходимо учитывать, что количество данных на различных станциях неодинаково. Чтобы учесть эту особенность, для сравнения средних значений месячных выборок используем критерий Тьюки для выборок разного объема [4]. Для сравнения дисперсий используем стандартный критерий Левене [12].

Применение критерия Тьюки для выборок разного объема показало, что в средних значениях различия осадки килей в начале сезона (в ноябре) незначимы для станций 12 и 13, в декабре — для станций 11 и 12, в январе — для станций 12 и 13; по мере развития ледяного покрова различия для всех станций становятся значимыми; в конце сезона (июль) незначимыми становятся различия в средних для станций 11 и 13.

При попарном сравнении дисперсий месячных серий с помощью стандартного критерия Левене было выявлено, что для станций 11 и 12 различия незначимы в декабре, марте и июне; для станций 11 и 13 — в декабре и марте; для станций 12 и 13 для всех месяцев различия выборочных дисперсий являются значимыми.

На рис. 4 представлено распределение осадки килей торосов по месяцам на различных станциях. Несмотря на хорошее визуальное совпадение, применение критерия согласия Колмогорова–Смирнова показало, что незначимые различия обнаружены лишь для следующих пар выборок: станции 11 и 12 за декабрь, станции 12 и 13 за ноябрь.

Обобщенные результаты сравнения месячных серий наблюдений за осадкой торосистых образований с использованием статистических критериев, учитывающих разные объемы исследуемых выборок, представлены в табл. 2.

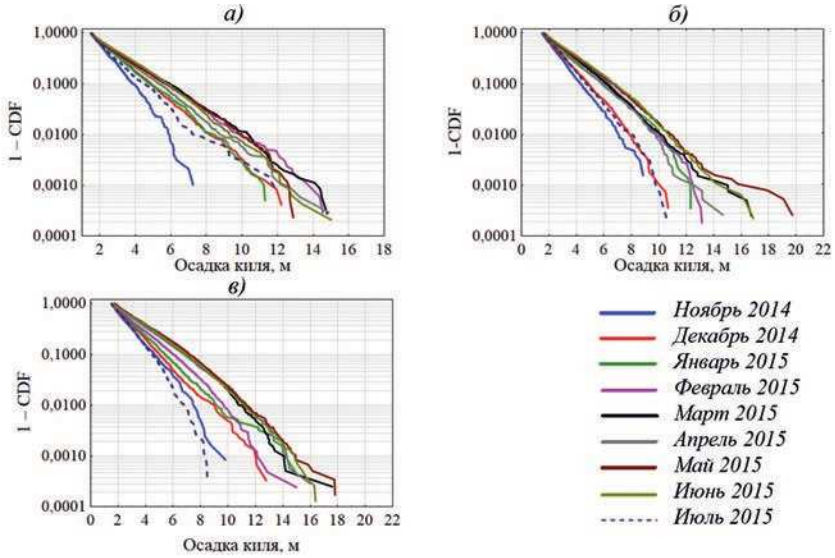

Рис. 3. Функции распределения осадок килей торосистых образований по станциям 11 (*а*), 12 (*б*) и 13 (*в*) в течение ледового сезона 2014/15 г.

Fig. 3. Distribution functions of the draft of ice ridge keels by stations 11 (*а*), 12 (*б*) and 13 (*в*) during the ice season 2014–2015

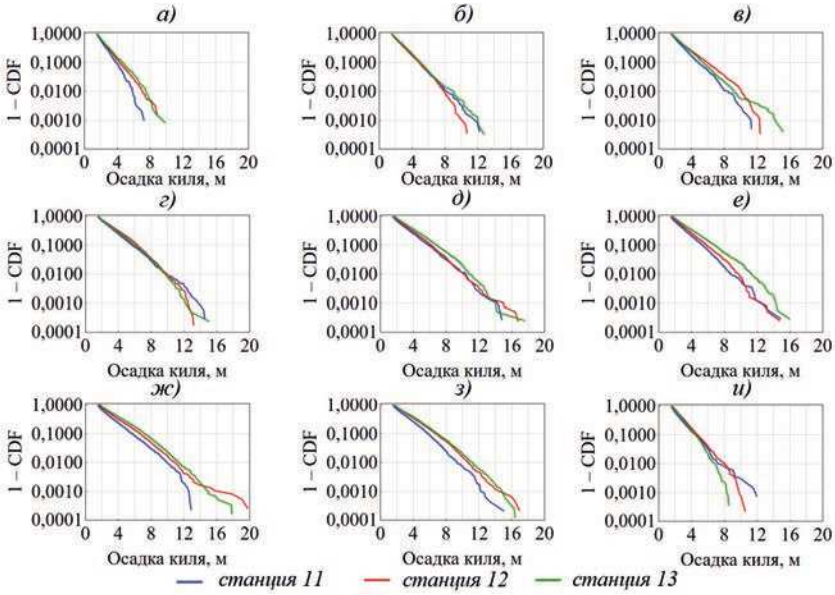

Рис. 4. Распределение осадки килей торосистых образований в течение ледового сезона 2014/15 г. по месяцам:

а) — ноябрь 2014 г., *б*) — декабрь 2014 г., *в*) — январь 2015 г., *г*) — февраль 2015 г., *д*) — март 2015 г., *е*) — апрель 2015 г., *ж*) — май 2015 г., *з*) — июнь 2015 г., *и*) — июль 2015 г.

Fig. 4. Distribution functions of the draft of ice ridge keels during the ice season 2014–2015 by months

а) — November, 2014, *б*) — December, 2014, *в*) — January, 2015, *г*) — February, 2015, *д*) — March, 2015, *е*) — April, 2015, *ж*) — May, 2015, *з*) — June, 2015, *и*) — July, 2015

Таблица 2

Месяцы с незначимыми различиями по месячным сериям, полученным на станциях 11, 12, 13 в ледовом сезоне 2014/15 г.

Table 2

Months with insignificant differences in the monthly series received at stations 11, 12, 13 in the ice season 2014/2015

Пары станций	Сравнение средних	Сравнение дисперсий	Сравнение распределений
11–12	XII	XII, III, VII	XII
11–13	VII	XII, II	–
12–13	XI, I	–	XI

С учетом анализа средних, можно сказать, что «близость» месячных выборок проявилась лишь в начале ледового сезона. В этот период для станций 11 и 12 средние, дисперсии и распределения различаются незначимо, что позволяет отнести осадки килей на этих станциях в декабре к одной выборке. Согласно данным ледовых карт, ледовые условия на этих станциях практически совпадали.

Также можно отметить, что в месяцы, когда различия были незначимы, длины исследованных ледовых профилей на станциях были достаточно близки.

В целом распределения выборок осадки килей торосов в районах установки станций по месяцам практически во всех случаях имеют значимые различия. Следовательно, в целом за сезон 2014/15 г. значения осадки килей торосов в разных районах акватории моря Лаптевых (станции находились на достаточном удалении друг от друга, рис. 1) значимо отличались друг от друга.

СЕЗОН 2015/16 г.

В этом сезоне, в отличие от предыдущего, были собраны данные на пяти станциях: 4, 6, 11, 12 и 13 (см. рис. 1). Применение критериев сравнения для сезонных выборок выявило значимое различие в средних значениях между всеми станциями за весь ледовый сезон (вывод по результатам попарного сравнения с применением *t*-критерия).

Ход среднемесячных значений на станциях 6, 11 и 13 был очень близок (рис. 5*а*). Данные на станции 12 имеются лишь до марта. Среднемесячные осадки килей на станции 4 в апреле имеют выраженный «провал» (наблюдается резкое уменьшение среднего значения осадки по сравнению с предыдущим и последующим месяцами).

Функции распределения для всех станций за весь ледовый сезон представлены на рис. 5*б*. Сравнение распределений для всего ледового сезона 2015/16 г. подтвердило значимость различий для всех пар станций.

Функция распределения, так же как и для предыдущего сезона, имеет ярко выраженный сезонный ход (рис. 6).

Дисперсионный анализ сезонных серий для станций 4, 6, 11, 12 и 13 показал, что в целом за сезон 2015/16 г. наибольшее различие наблюдалось между станциями 12 и 13, наименьшее — между станциями 4 и 13. В порядке возрастания различий между станциями (от наименьших различий к наибольшим) сформировалась следующая цепочка:

4–13 → 6–11 → 4–11 → 6–12 → 11–13 → 4–6 → 11–12 → 6–13 → 4–12 → 12–13.

Для ледового сезона 2015/16 г. было получено по 9 месячных серий (выборок) на станциях 4, 6, 11, 13 и 6 выборок на станции 12.

В результате применения критерия Тьюки для выборок неравного объема было выявлено, что в средних значениях в начале сезона (в декабре) различия незна-

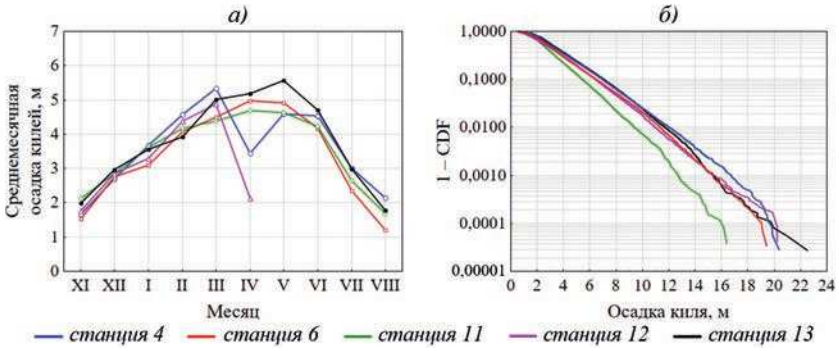

Рис. 5. Среднемесячные значения (*а*) и распределение значений (*б*) осадки килей торосистых образований по данным ледового сезона 2015/16 г.

Fig. 5. Mean monthly values (*а*) and the distribution of the draft values (*б*) of ice ridge keels according to the data of the entire ice season 2015/2016

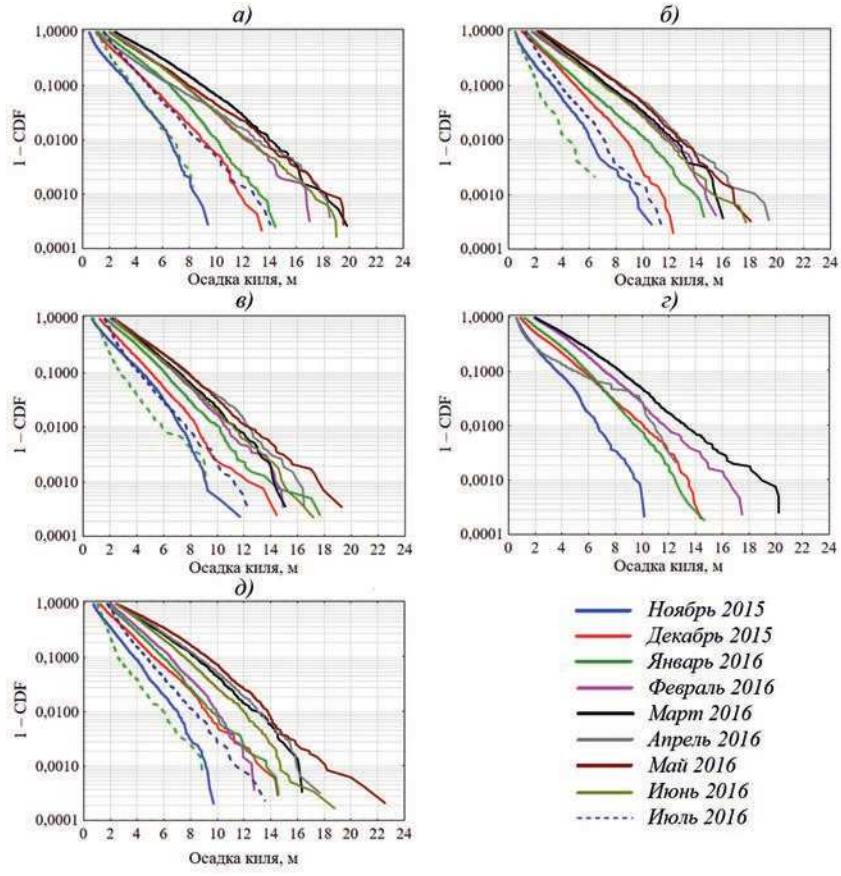

Рис. 6. Функции распределения осадок килей торосистых образований по станциям 4 (*а*), 6 (*б*), 11 (*в*), 12 (*г*) и 13 (*д*) в течение ледового сезона 2015/16 г.

Fig. 6. Distribution functions of the draft of ice ridge keels by stations 4 (*а*), 6 (*б*), 11 (*в*), 12 (*г*) and 13 (*д*) during the ice season 2015/2016

чимы для станций 4 и 6, 6 и 11 и 11–12–13; в январе — для станций 4–11–13; по мере развития ледяного покрова различия для всех станций становятся значимыми; в конце сезона (июнь–июль) незначимыми становятся различия средних значений для станций 4–13, 6–11, 11–13.

Сравнение дисперсий выборок (попарное сравнение с использованием стандартного критерия Левене) показало, что в начале сезона (ноябрь) различия незначимы для станций 4–12–13; в январе — на стациях 6–11–13. В конце сезона незначимо отличаются выборочные дисперсии на станциях 6–11 и 6–13.

На рис. 7 представлено распределение осадки килей торосов по месяцам на различных станциях. Функции распределения месячных серий, полученных на станциях в 2015/16 г., визуально очень похожи (особенно для ноября, декабря и января). Между тем по результатам применения критериев Колмогорова–Смирнова, Лемана–Розенблатта и Андерсона–Дарлинга можно сделать вывод о том, что различия в распределениях осадки килей торосов по месяцам является значимым практически для всех пар станций. Незначимыми оказались лишь различия для пар станций 6–11 в марте и 11–13 в декабре.

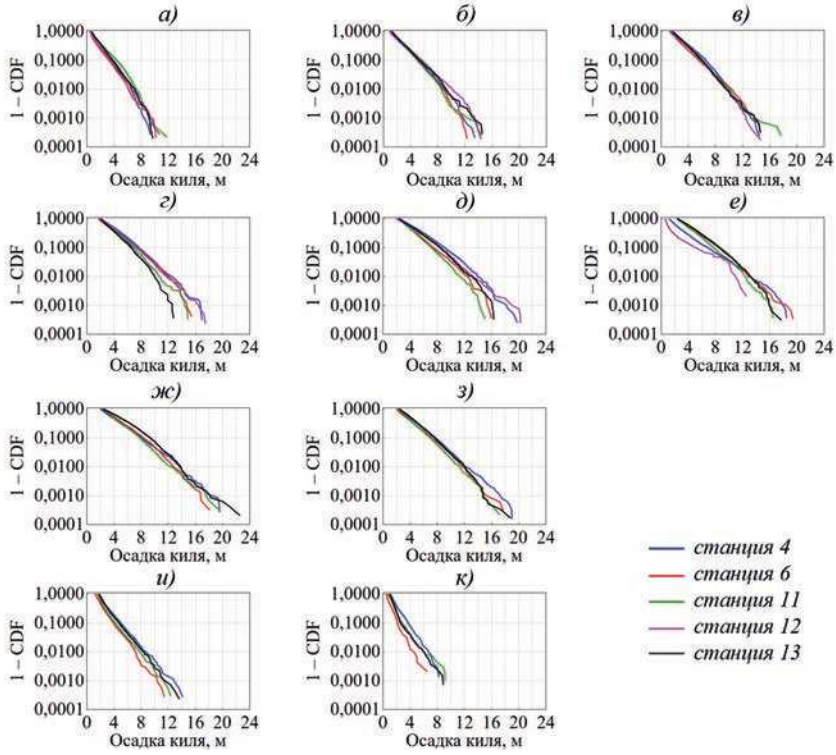

Рис. 7. Распределение осадки килей торосистых образований по месяцам в течение ледового сезона 2015/16 г.:

а) — ноябрь 2015 г., *б*) — декабрь 2015 г., *в*) — январь 2016 г., *г*) — февраль 2016 г., *д*) — март 2016 г., *е*) — апрель 2016 г., *ж*) — май 2016 г., *з*) — июнь 2016 г., *и*) — июль 2016 г., *к*) — август 2016 г.

Fig. 7. Distribution functions of the draft of ice ridge keels by months during the ice season 2015/2016

а) — November, 2015, *б*) — December, 2015, *в*) — January, 2016, *г*) — February, 2016, *д*) — March, 2016, *е*) — April, 2016, *ж*) — May, 2016, *з*) — June, 2016, *и*) — July, 2016, *к*) — August, 2016

Таблица 3

Месяцы с незначимыми различиями по месячным сериям, полученным на станциях 4, 6, 11, 12, 13 в ледовом сезоне 2015/16 г.

Table 3

Months with insignificant differences in the monthly series received at stations 4, 6, 11, 12, 13 in the ice season 2015/16

Пары станций	Сравнение средних	Сравнение дисперсий	Сравнение распределений
4–6	XII	II, IV	–
4–11	I, V	–	–
4–12	–	XI	–
4–13	I, VII	XI, XII, IV	–
6–11	XII, II, III, VI	I, VII	III
6–12	–	–	–
6–13	II	I, IV, VI	–
11–12	XII	IV	–
11–13	XII, I	I	XII
12–13	I, III	XI	–

Обобщенные результаты сравнения месячных серий наблюдений за осадкой торосистых образований с использованием статистических критериев, учитывающих разные объемы исследуемых выборок, представлены в табл. 3.

Таким образом, «близость» месячных выборок по средним значениям и дисперсиям отмечается в основном в начале ледового сезона. Распределения выборок осадки килей по месяцам практически во всех случаях имеют значимые различия.

На основании анализа средних, дисперсии и распределений наибольшая «близость» наблюдается для станций 6–11 и 11–13 в начале ледового сезона. При этом отметим, что станции 6 и 11 расположены достаточно близко друг к другу и станция 6 чуть более удалена от станции 13 (по сравнению со станцией 11).

В сезоне 2015/16 г. серии наблюдений были получены на всех 5 станциях. В качестве показателя различия параметров осадки килей торосов на станциях можно выбрать максимальное расстояние из критерия Колмогорова–Смирнова.

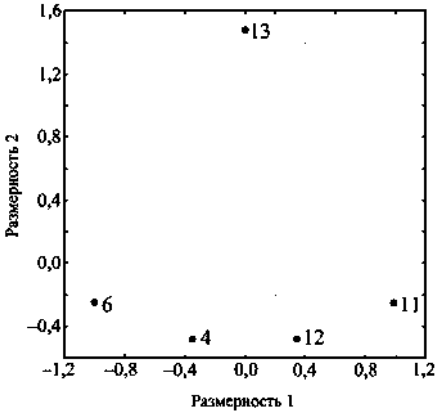

Рис. 8. Результат многомерного шкалирования по данным ледового сезона 2015/16 г.: различие между станциями по осадкам килей торосов в 2 измерениях

Fig. 8. The result of multidimensional scaling according to the data of the 2015/2016 ice season: the difference between stations in the draft of ice ridge keels in two dimensions

Вычисление данных величин и дальнейшее многомерное шкалирование в пространстве двух измерений позволяет получить картину, напоминающую разнесение станций в пространстве. Результат многомерного шкалирования приведен на рис. 8.

Таким образом, по результатам анализа данных, полученных за ледовый сезон 2015/16 г., можно сделать следующий вывод: в целом за сезон значения осадки килей в разных районах акватории моря Лаптевых значимо отличались друг от друга, в то время как в начале ледового сезона различия были незначимы на ближайших друг к другу станциях 6 и 11.

СЕЗОН 2016/17 г.

В ледовом сезоне 2016/17 г. были получены серии наблюдений на четырех станциях: 4, 6, 11 и 12 (см. рис. 1).

Ход среднемесячных значений показан на рис. 9*а*. Данные на станции 6 имеются лишь до мая. Среднемесячные осадки килей на станции 12 имеют небольшой «провал» в феврале. Применение критериев сравнения для сезонных выборок показало значимое различие в средних значениях между всеми станциями за весь ледовый сезон (вывод по результатам попарного применения *t*-критерия).

Функции распределения для всех станций за весь ледовый сезон представлены на рис. 9*б*. Сравнение распределений для всего сезона показало значимость различий для всех пар станций.

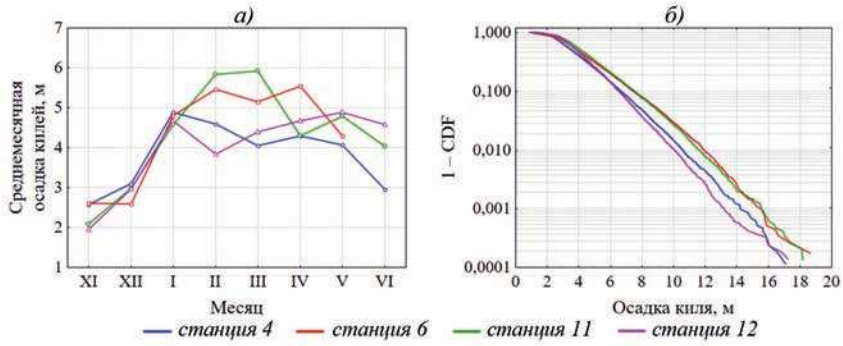

Рис. 9. Среднемесячные значения (*а*) и распределение значений (*б*) осадки килей торосистых образований для всего ледового сезона 2016/17 г.

Fig. 9. Mean monthly values (*а*) and the distribution of the draft values (*б*) of ice ridge keels according to the data of the entire ice season 2016/2017

Дисперсионный анализ сезонных серий для станций 4, 6, 11 и 12 показал, что в целом за сезон 2016/17 г. наибольшее различие наблюдалось между станциями 6 и 11, наименьшее — между станциями 4 и 12. В порядке возрастания различий между станциями (от пары с наименьшими различиями к паре с наибольшими) получается следующая последовательность:

4–12 → 4–6 → 11–12 → 6–12 → 4–11 → 6–11.

Если говорить о месячных сериях, то за сезон 2016/17 г. было получено по 8 выборок на станциях 4, 11 и 12, 7 — на станции 6 (данные только до мая).

Функция распределения месячных значений, так же как и для предыдущих сезонов, имеет ярко выраженный сезонный ход (рис. 10).

Применение критериев сравнения выборочных средних и дисперсий позволило сформулировать следующие особенности:

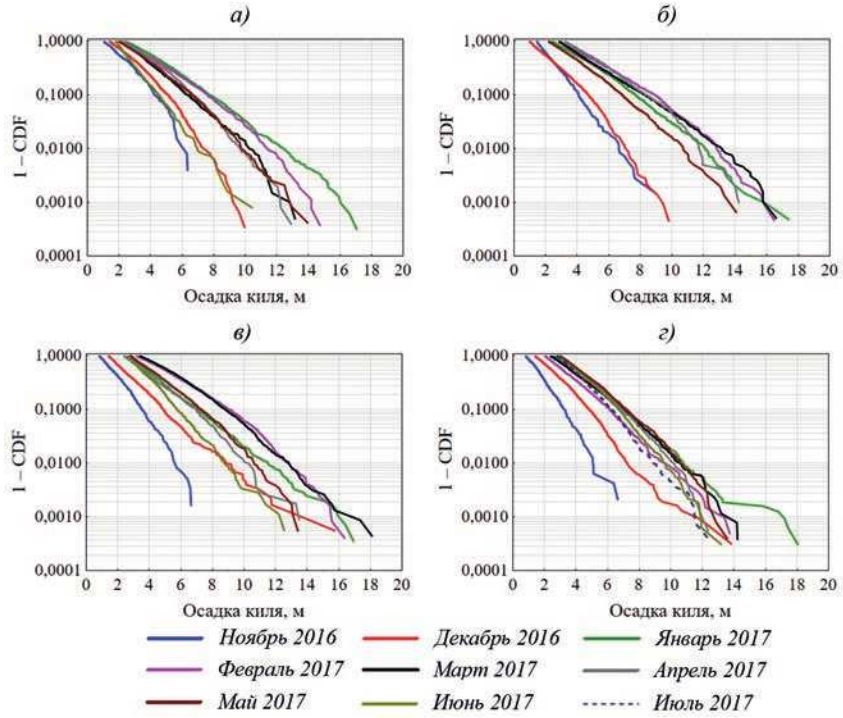

Рис. 10. Функции распределения осадок килей торосистых образований по станциям 4 (*а*), 6 (*б*), 11 (*в*) и 12 (*г*) в течение ледового сезона 2016/17 г.

Fig. 10. Distribution functions of the draft of ice ridge keels by stations 4 (*а*), 6 (*б*), 11 (*в*) and 12 (*г*) during the ice season 2016/2017

– в средних значениях в начале сезона (в ноябре) различия незначимы для станций 4–6 и 11–12, в декабре — для станций 11–12; в январе — для станций 4–6, 6–12 и 11–12; по мере развития ледяного покрова различия для всех станций становятся значимыми (аналогичные результаты получены и в предшествующих сезонах);

– различия дисперсий в начале сезона незначимы станций 4–6–11; для середины сезона различия дисперсий незначимы для пары станций 6–11.

Таблица 4

Месяцы с незначимыми различиями по месячным сериям, полученным на станциях 4, 6, 11, 12 в ледовом сезоне 2016/17 г.

Table 4

Months with insignificant differences in the monthly series received at stations 4, 6, 11, 12 in the 2016/17 ice season

Пары станций	Сравнение средних	Сравнение дисперсий	Сравнение распределений
4–6	XI, I	XII, I, V	I
4–11	IV	XI, IV, V	–
4–12	–	–	–
6–11	–	XI, XII, II, III, V	III
6–12	I	–	–
11–12	XI, XII, I, V	I	–

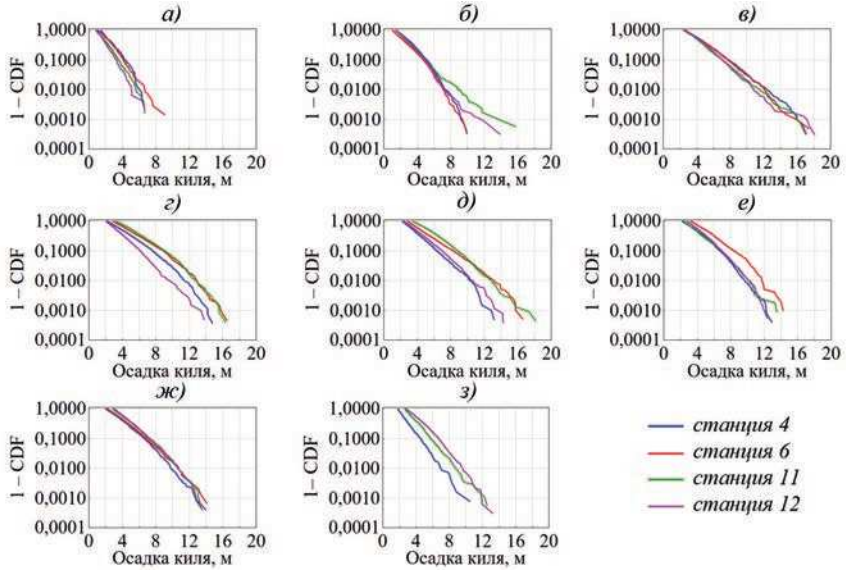

Рис. 11. Распределение осадки килей торосистых образований по месяцам в течение ледового сезона 2016/17 г.:
а) — ноябрь 2016 г., *б*) — декабрь 2016 г., *в*) — январь 2017 г., *г*) — февраль 2017 г., *д*) — март 2017 г., *е*) — апрель 2017 г., *ж*) — май 2017 г., *з*) — июнь 2017 г.

Fig. 11. Distribution functions of the draft of ice ridge keels by months during the ice season 2016/2017
а) — November, 2016, *б*) — December, 2016, *в*) — January, 2017, *г*) — February, 2017, *д*) — March, 2017, *е*) — April, 2017, *ж*) — May, 2017, *з*) — June, 2017

Функции распределения месячных серий для различных станций, приведенные на рис. 11, визуально очень похожи. Особенно для января и мая. Между тем различия в распределениях месячных сериях являются значимыми практически для всех пар станций. Незначимыми являются лишь различия для пары станций 4–6 в ноябре.

Обобщенные результаты сравнения месячных серий наблюдений за осадкой торосистых образований с использованием статистических критериев, учитывающих разные объемы исследуемых выборок, представлены в табл. 4.

Согласно имеющимся данным, однородность месячных выборок по средним значениям и дисперсиям проявлялась в основном в начале ледового сезона. На основании анализа средних, дисперсий и распределений наибольшая «близость» наблюдалась для наиболее близко расположенных станций 4–6, а также 6–11.

Распределения выборок осадки килей по месяцам на протяжении всего ледового сезона 2016/17 г. практически во всех случаях имеют значимые различия.

СЕЗОН 2018/19 г.

Данные в период ледового сезона 2018/19 г. были получены на 3 станциях: 6, 11 и 12 (см. рис. 1).

Ход среднемесячных значений на станциях 6, 11 и 12 показан на рис. 12*а*. В отличие от предыдущих случаев, никаких так называемых «провалов» в среднемесячных значениях осадки килей в середине сезона не наблюдалось. Применение критериев сравнения для сезонных выборок показало, что, как и во всех предыдущих случаях, наблюдалось значимое различие в средних значениях между всеми станциями за весь ледовый сезон (результат попарного применения *t*-критерия).

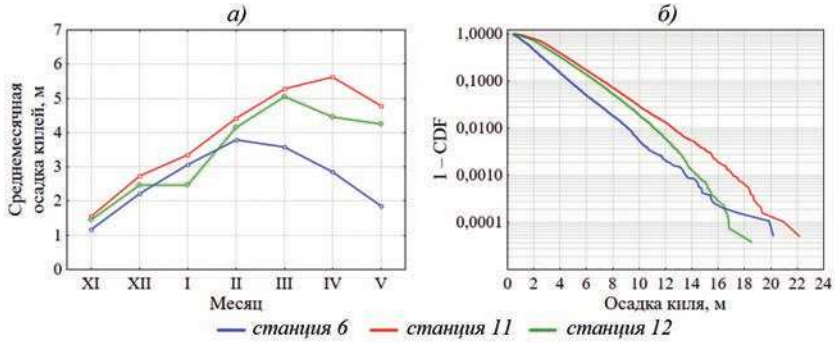

Рис. 12. Среднемесячные значения (*а*) и распределение значений (*б*) осадки килей торосистых образований по данным ледового сезона 2018/19 г.

Fig. 12. Mean monthly values (*а*) and the distribution of the draft values (*б*) of ice ridge keels according to the data of the entire ice season 2018/2019

Функции распределения для станций за весь ледовый сезон представлены на рис. 13.

Сравнение распределений для всего сезона критериями однородности показало значимость различий для всех пар станций, что в принципе видно и визуально.

Дисперсионный анализ сезонных серий для станций 6, 11 и 12 показал, что в целом за сезон 2018/19 г. наибольшее различие наблюдалось между станциями 6 и 12, наименьшее — между станциями 11 и 12.

Функция распределения имеет выраженный сезонный ход, который проявляется, пожалуй, больше, чем в предшествующие сезоны (рис. 13).

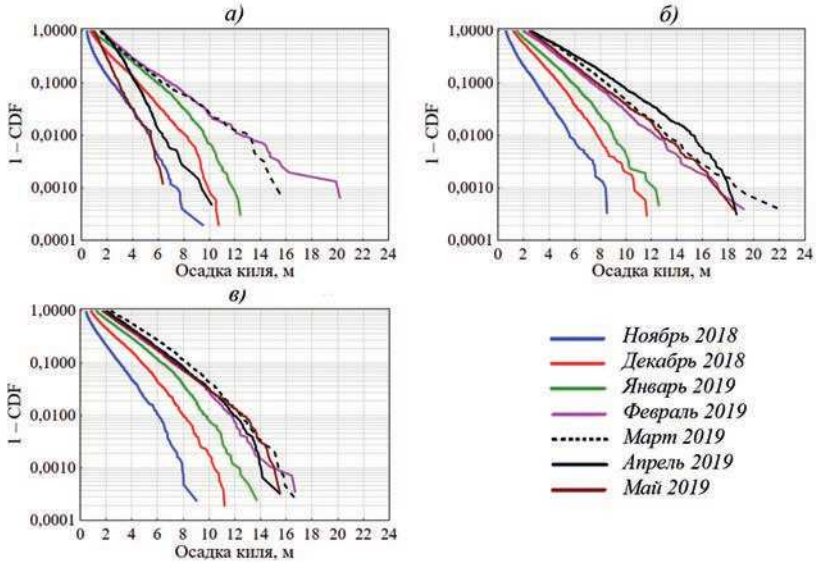

Рис. 13. Функции распределения осадок килей торосистых образований по станциям 6 (*а*), 11 (*б*) и 12 (*в*) в течение ледового сезона 2018/19 г.

Fig. 13. Distribution functions of the draft of ice ridge keels by stations 6 (*а*), 11 (*б*) and 12 (*в*) during the ice season 2018/2019

Применение критериев Тьюки и Левене для месячных выборок (в данном сезоне получено по 7 месячных серий на каждой из 3 станций) показало, что:

– в средних значениях: различия между всеми парами месячных выборок на станциях являются значимыми, за исключением пары станций 11–12 для марта (в этом отличие данного сезона от сезонов, рассмотренных ранее);

– в дисперсиях: в первой половине сезона (январь) для станций 6–12 различия незначимы; в феврале различия незначимы для всех рассматриваемых станций; в марте по дисперсии неразличима пара станций 11–12.

На рис. 14 представлено распределение осадки килей торосов по месяцам на различных станциях.

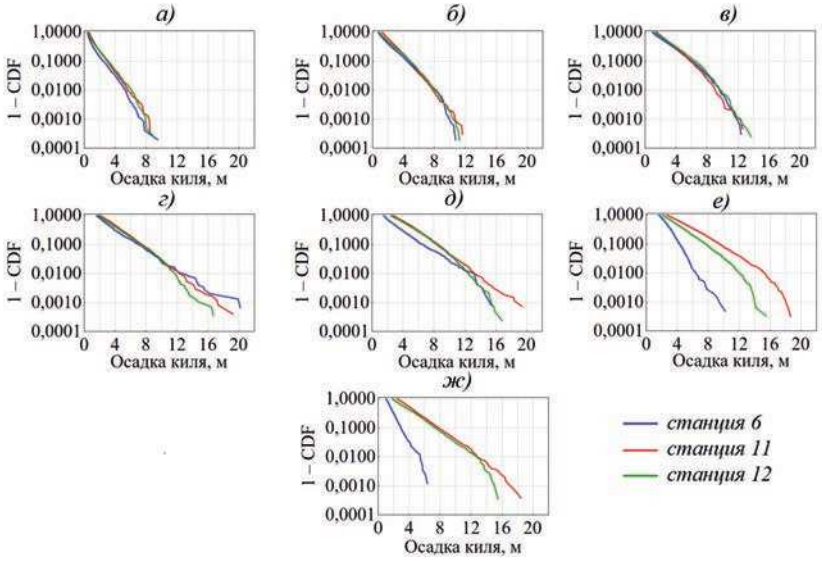

Рис. 14. Распределение осадки килей торосистых образований по месяцам в течение ледового сезона 2018/19 г.:

а) — ноябрь 2018 г., *б*) — декабрь 2018 г., *в*) — январь 2019 г., *г*) — февраль 2019 г., *д*) — март 2019 г., *е*) — апрель 2019 г., *ж*) — май 2019 г.

Fig. 14. Distribution functions of the draft of ice ridge keels by months during the ice season 2014/2015

а) — November, 2018, *б*) — December, 2018, *в*) — January, 2019, *г*) — February, 2019, *д*) — March, 2019, *е*) — April, 2019, *ж*) — May, 2019

Обобщенные результаты сравнения месячных серий наблюдений за осадкой торосистых образований с использованием статистических критериев, учитывающих разные объемы исследуемых выборок, представлены в табл. 5.

В отличие от предшествующих сезонов, в 2018/19 г. наблюдается ярко выраженное отличие функции распределения месячных серий осадки килей торосов на различных станциях начиная с марта. В мае различия между станциями 6 и 11 достигают больших значений. Можно отметить, что количество данных в мае на станции 6 в 3 раза меньше, чем на станциях 11 и 12. Логично, что и критерии сравнения показали значимые различия для всех пар станций для всех месячных серий.

По результатам анализа данных однородность месячных выборок по средним значениям для данного сезона проявилась лишь для станций 11 и 12 в январе.

Однородность дисперсий проявляется в большей степени: в феврале, например, станции неразличимы по дисперсии.

Таблица 5

Месяцы с незначимыми различиями по месячным сериям, полученным на станциях 6, 11, 12 в ледовом сезоне 2018/19 г.

Table 5

Months with insignificant differences in the monthly series received at stations 6, 11, 12 in the 2018/2019 ice season

Пары станций	Сравнение средних	Сравнение дисперсий	Сравнение распределений
6–11	–	II	–
6–12	–	I, II	–
11–12	I	II, III	–

Распределения выборок осадки килей по месяцам во всех случаях имеют значимые различия.

ВЫВОДЫ

Обобщая результаты анализа данных по осадкам килей торосистых образований, полученных в период с 2014 по 2017 г. и в ледовом сезоне 2018/19 г., можем сформулировать следующие выводы.

Ледовые условия в точках наблюдения в течение каждого ледового сезона были практически одинаковыми, за исключением станции 13, где наблюдался более толстый лед за счет, в первую очередь, ее более северного, по сравнению с остальными станциями, положения. Небольшие различия между ледовыми сезонами, во время которых на акватории моря Лаптевых работали ПАБС, позволяющие разделить их на 2 группы (2014/15, 2018/19 гг. и 2015/16, 2016/17 гг.), наблюдались в период с ноября по март; в период максимального развития ледяного покрова (апрель–май) различия практически исчезли.

Анализ данных с помощью статистических критериев проверки гипотез об однородности выборок приводит к заключению, что между станциями в целом наблюдаются различия по осадке килей торосов даже в сезоны со схожими ледовыми условиями.

Сильнее всего пространственные различия на протяжении всего ледового сезона проявились между станциями 6 и 11 в сезон 2016/17 г., в то время как в начале сезона различия на этих станциях проявились менее всего.

В целом схожесть оценок осадки льда наблюдается в основном в начале ледового сезона, в момент, когда ледовые условия на всех станциях достаточно схожи. При этом в начале сезона длина ледовых профилей на различных станциях различалась меньше, чем в середине и, особенно, в конце ледового сезона.

В середине ледового сезона скорость дрейфа, и, соответственно, протяженность профилей уменьшалась. В конце ледового сезона заметно увеличивалась скорость дрейфа ледяного покрова.

Условия дрейфа влияют на параметры осадки килей ледяных образований, по нашему мнению, в большей степени, чем ледовые условия. Исключения могут быть лишь в случае большого расстояния между станциями. Хотя анализ различий характеристик килей на станциях 12 и 13 (максимально удаленные друг от друга точки) показывает их схожесть для начала ледового сезона.

В целом анализ собранных с помощью ПАБС данных об осадке льда показал, что станции 11, 12 и 13 можно назвать ключевыми точками, описывающими пространственную изменчивость осадки килей торосистых образований для всех

ледовых сезонов. Данные, полученные на станциях 4 и 6, не вносят практически ничего в пространственную изменчивость.

Расстояния между станциями напрямую не влияют на величину различия в осадке килей торосистых образований. Расстояния критерия Колмогорова–Смирнова, выбранные как критерий различия в многомерном шкалировании, адекватно описывают пространственные различия осадки килей торосов.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Работы выполнены в рамках договоров № 100015/05937Д, № 100016/04690Д, № 100017/05003Д между ФГБУ «ААНИИ» и ОАО «НК «Роснефть» в 2015–2017 гг., а также договора № 04-2019ПР ФГБУ «ААНИИ» и ООО «Арктический Научный Центр» в 2019 г. в рамках проекта «Проведение гидрометеорологических исследований на шельфе морей Карского и Лаптевых».

Competing interests. The authors declare no conflict of interest.

Funding. The work was carried out within the framework of contracts № 100015/05937D, № 100016/04690D, № 100017/05003D and № 04-2019PR between FSBI “AARI” and Rosneft 2015–2017 and 2019 within the framework of the project “Hydrometeorological research on the shelf of the Kara and Laptev seas”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кузнецова О.А., Онищенко Д.А., Архипов В.В., Годецкий С.В.* Ледовые условия восточного шельфа по данным акустических профилографов // Neftegaz.RU. 2020. URL.: https://magazine.neftegaz.ru/articles/arktika/639067-ledovye-usloviya-vostochnogo-shelfa-po-dannym-akusticheskikh-profilografov/ (дата обращения: 10.11.2022).

2. *Krishfield R.A., Proshutinsky A., Tateyama K., Williams W.J., Carmack E.C., McLaughlin F. A., Timmermans M.L.* Deterioration of perennial sea ice in the Beaufort Gyre from 2003 to 2012 and its impact on the oceanic freshwater cycle // Journal of Geophysical Research: Oceans. 2014. V. 119 (2). P. 1271–1305.

3. *Naumov A.K., Skutina E.A., Kubyshkin N.V., Kornishin K.A., Tarasov P.A., Efimov Ya.O*. Comparative analysis of the hummock keel drafts in the Kara Sea, Laptev Sea and Chukchi Sea according to the data obtained from bottom sonars // Proceedings of the Thirtieth (2020) International Ocean and Polar Engineering Conference Shanghai, China, October 11–16, 2020 Copyright © 2020 by the International Society of Offshore and Polar Engineers (ISOPE). V. 1. P. 773–780.

4. *Кобзарь А.И.* Прикладная математическая статистка: для инженеров и научных работников. М.: Физматлит, 2006. 816 с.

5. *Лемешко Б.Ю.* Критерии проверки гипотез об однородности: Руководство по применению. Москва: НИЦ ИНФРА-М, 2021. 249 с.

6. *Лемешко Б.Ю., Веретельникова И.В.* Мощность к-выборочных критериев проверки однородности законов // Измерительная техника. 2018. № 7. С. 3–7.

7. *Лемешко Б.Ю., Лемешко С.Б., Веретельникова И.В.* О применении критериев проверки однородности законов распределения // Вестник Томского университета. Управление, вычислительная техника и информатика. 2017. № 41. С. 24–31.

8. *Орлов А.И.* О проверке однородности двух независимых выборок // Заводская лаборатория. 2003. Т. 69. № 1. С. 55–60.

9. *Орлов А.И.* Проверка статистической гипотезы однородности математических ожиданий двух независимых выборок: критерий Крамера–Уэлча вместо критерия Стьюдента // Научный журнал КубГАУ. 2015. № 110 (06). С. 1–22.

10. *Орлов А.И.* Состоятельные критерии проверки абсолютной однородности независимых выборок // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2012. Т. 78. № 11. С. 66–70.

11. *Холлендер М., Вулф Д.* Непараметрические методы статистики. Пер. с англ. М.: Финансы и статистика, 1983. 520 с.

12. *Levene H.* Robust tests for equality of variances // I. Olkin and others (eds.). Contributions to probability and Statistics: Essays in Honor of Harold Hotelling. Stanford: Stanford University Press, 1960. P. 278–292.

13. Номенклатура морских льдов. Л.: Гидрометеоиздат, 1974. 75 с.

REFERENCES

1. *Kuznetsova O.A., Onishchenko D.A., Arkhipov V.V., Godetskii S.V. Ledovye usloviia vostochnogo shel'fa po dannym akusticheskikh profilografov.* Ice conditions of the eastern shelf according to acoustic profilers. Neftegaz.RU. 2020. Available at: https://magazine.neftegaz.ru/articles/arktika/639067-ledovye-usloviya-vostochnogo-shelfa-po-dannym-akusticheskikh-profilografov/ (accessed: 10.11.2022). [In Russian].

2. *Krishfield R.A., Proshutinsky A., Tateyama K., Williams W.J., Carmack E.C., McLaughlin F.A., Timmermans M. L.* Deterioration of perennial sea ice in the Beaufort Gyre from 2003 to 2012 and its impact on the oceanic freshwater cycle. Journal of Geophysical Research: Oceans. 2014, 119 (2): 1271–1305.

3. *Naumov A.K., Skutina E.A., Kubyshkin N.V., Kornishin K.A., Tarasov P.A., Efimov Ya.O.* Comparative analysis of the hummock keel drafts in the Kara Sea, Laptev Sea and Chukchi Sea according to the data obtained from bottom sonars. Proceedings of the Thirtieth (2020) International Ocean and Polar Engineering Conference Shanghai, China, October 11–16, 2020. 2020, 1: 773–780.

4. *Kobzar' A.I. Prikladnaia matematicheskaia statistka dlia inzhenerov i nauchnykh rabotnikov.* Applied mathematical statistics for engineers and researchers. Moscow: FIZMATLIT, 2006: 816 p. [In Russian].

5. *Lemeshko B.Iu. Kriterii proverki gipotez ob odnorodnosti. Rukovodstvo po primeneniiu.* Criteria for testing hypotheses about homogeneity. Application Guide. Moscow: SIC INFRA-M, 2018: 249 p. [In Russian].

6. *Lemeshko B.Iu., Veretel'nikova I.V.* The power of k-sample criteria for checking the uniformity of laws. *Izmeritel'naia tekhnika.* Measuring equipment. 2018, 7: 3–7. [In Russian].

7. *Lemeshko B.Iu., Lemeshko S.B., Veretel'nikova I.V.* On the application of criteria for checking the uniformity of distribution laws. *Vestnik Tomskogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naia tekhnika i informatika.* Bulletin of Tomsk University. Management, computer engineering and computer science. 2017, 41: 24–31. [In Russian].

8. *Orlov A.I.* On checking the uniformity of two independent samples. *Zavodskaia laboratoriia.* Factory laboratory. 2003, 69 (1): 55–60. [In Russian].

9. *Orlov A.I.* Verification of the statistical hypothesis of the uniformity of mathematical expectations of two independent samples: the Kramer-Welch criterion instead of the Student criterion. *Nauchnyi zhurnal KubGAU*. Scientific Journal of the Kuban State University. 2015, 110 (06): 1–22. [In Russian].

10. *Orlov A.I.* Consistent criteria for checking the absolute uniformity of independent sampels. *Zavodskaia laboratoriia. Diagnostika materialov.* Factory Laboratory. Diagnostics of materials. 2012, 78 (11): 66–70. [In Russian].

11. *Khollender M., Vulf D. Neparamtricheskie metody statistiki*. Nonparametric methods of statistics. Moscow: *Finansy i statistika*, 1983: 520 p. [In Russian].

12. *Levene H.* Robust tests for equality of variances. I. Olkin and others (eds). Contributions to probability and Statistics. Essays in Honor of Harold Hotelling. Stanford: Stanford University Press, 1960: 278–292.

13. *Nomenklatura morskikh l'dov.* Nomenclature of sea ice. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1974: 75 p. [In Russian].

МЕТЕОРОЛОГИЯ И КЛИМАТОЛОГИЯ
METEOROLOGY AND CLIMATOLOGY

https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-4-352-369
УДК 551.583

CC BY

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ **ORIGINAL ARTICLE**

Изменения климата западной части Российской Арктики в 1980–2021 гг. Часть 2. Температура почвы, снег, влажность

И.В. Серых[1,2*], *А.В. Толстиков*[3]

[1] — *Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия*

[2] — *Геофизический центр РАН, Москва, Россия*

[3] — *Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН, Петрозаводск, Россия*

[*]*iserykh@ocean.ru*

Резюме

По среднемесячным данным реанализа спутниковых измерений NASA MERRA-2 исследованы климатические изменения температуры верхних 1,5 метров почвы (ТП), толщины и площади снежного покрова (СП), влагосодержания верхнего слоя почвы толщиной 1 метр (ВП) и влажности воздуха на высоте 2 метра от поверхности (ВВ) в регионе западной части Российской Арктики (60°–75° с. ш., 30°–85° в. д.) за 1980–2021 гг. Рассматриваемый временной интервал разбит на 2 периода: 1980–2000 гг. и 2001–2021 гг. Вычислены разности между средними значениями исследуемых параметров за эти периоды. Отдельно рассмотрены климатические изменения, произошедшие для зимнего и летнего сезонов, а также для каждого месяца года. С помощью вычисления линейных и квадратичных трендов обнаружен ускоряющийся рост ТП исследуемого региона в 2001–2021 гг. Показано уменьшение толщины СП и существенное сокращение площади СП в ноябре и апреле. Обнаружен рост ВП на юго-западе и востоке исследуемого региона в период 2001–2021 гг., и показано значительное увеличение ВВ западной части Российской Арктики за исследуемый временной интервал. Причем рост ВВ существенно ускорился в 2001–2021 гг. по сравнению с 1980–2000 гг. над акваториями Баренцева, Карского и Белого морей.

Ключевые слова: атлантификация Арктики, Баренцево море, Белое море, влагосодержание почвы, влажность воздуха, Карское море, климатический сдвиг, многолетняя мерзлота, обратные связи, потепление климата, северо-запад России, снежный покров.

Для цитирования: *Серых И.В., Толстиков А.В.* Изменения климата западной части Российской Арктики в 1980–2021 гг. Часть 2. Температура почвы, снег, влажность // Проблемы Арктики и Антарктики. 2022. Т. 68. № 4. С. 352–369. https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-4-352-369.

Поступила 25.09.2022 **После переработки 18.11.2022** **Принята 27.11.2022**

Climate change in the western part of the Russian Arctic in 1980–2021. Part 2. Soil temperature, snow, humidity

Ilya V. Serykh[1,2], Alexei V. Tolstikov[3]*

[1] — *Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

[2] — *Geophysical Center of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

[3] — *Northern Water Problems Institute of Karelian Research Centre of RAS, Petrozavodsk, Russia*

[*]*iserykh@ocean.ru*

Summary

Based on average monthly data from the re-analysis of NASA MERRA-2 satellite measurements, the paper explores climatic changes in the temperature of the upper 1.5 meters of soil (TS), the thickness and area of the snow cover (SC), the moisture content of the top layer of soil 1 meter thick (SM) and air humidity at a height of 2 meters from the surface (AH) in the western part of the Russian Arctic (60°–75° N, 30°–85° E) for 1980–2021. The time interval considered is divided into two periods: 1980–2000 and 2001–2021. The differences between the average values of the parameters studied for these periods are calculated. The climatic changes that have occurred for the winter and summer seasons, as well as for each month of the year, are considered separately. Calculation of linear and quadratic trends has revealed an accelerating growth in the TS of the region studied in the period 2001–2021. A decrease in the thickness of the SC and a significant reduction in the area of the SC in November and April are shown. An increase in SM was found in the southwest and east of the region studied in the period 2001–2021, and a significant increase in AH in the western part of the Russian Arctic over the time interval studied is shown. Moreover, the growth of AH over the waters of the Barents, Kara and White Seas significantly accelerated in 2001–2021 compared to 1980–2000.

Keywords: air humidity, Arctic atlantification, Barents Sea, climate shift, climate warming, feedbacks, Kara Sea, northwest Russia, permafrost, snow cover, soil moisture content, White Sea.

For Citation: *Serykh I.V., Tolstikov A.V.* Climate change in the western part of the Russian Arctic in 1980–2021. Part 2. Soil temperature, snow, humidity. *Problemy Arktiki i Antarktiki.* Arctic and Antarctic Research. 2022, 68 (4): 352–369. [In Russian]. https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-4-352-369.

Received 25.09.2022 **Revised 18.11.2022** **Accepted 27.11.2022**

ВВЕДЕНИЕ

В 1-й части статьи [1] показано, что наиболее сильное увеличение температуры приповерхностного слоя воздуха в исследуемом регионе Арктики (60°–75° с. ш., 30°–85° в. д.) отмечается для ноября и апреля, что свидетельствует о произошедшем смещении границ сезонов — более позднем начале зимы и раннем ее завершении. В период 2001–2021 гг. температура быстрее всего росла в акваториях Белого, Баренцева и Карского морей, и этот рост происходил с ускорением. Увеличение количества осадков особенно заметно проявлялось для всего летнего сезона и сентября, а вызванное им поступление пресных вод в моря способствовало распреснению верхнего слоя воды, более раннему образованию морского льда, сокращению потоков тепла из океана в атмосферу и понижению приповерхностной температуры воздуха в зимние периоды в локальных районах впадения крупных рек в Карское и Баренцево моря. В зимний сезон 2001–2021 гг. в Баренцевом и Карском морях произошло усиление южного ветра, а в летний сезон — усиление западного ветра по сравнению с 1980–2000 гг. Таким образом, за исследуемый временной интервал произошли существенные изменения климата западной части Российской Арктики.

Во 2-й части статьи рассматриваются климатические изменения температуры верхних 1,5 метров почвы, толщины и площади снежного покрова, влагосодержания верхнего слоя почвы толщиной 1 метр и влажности воздуха на высоте 2 метра от поверхности в регионе западной части Российской Арктики (60°–75° с. ш., 30°–85° в. д.) за 1980–2021 гг.

Изменчивость этих параметров для Арктики играет существенную роль, поскольку в условиях потепления климата происходит деградация грунтов с многолетней мерзлотой [2–8]. Процесс разрушения криолитозоны опасен эмиссией парниковых газов, вымыванием органических и неорганических форм биогенных элементов, тяжелых металлов и других потенциальных загрязнителей, содержащихся в почве. Далее эти вещества с постоянными и временными водотоками могут попасть в окраинные моря Северного Ледовитого океана. Растепление мерзлоты вызывает деформацию и разрушение строительных конструкций, включая многочисленные трубопроводы, нефтегазовые сооружения, дороги, другие инфраструктурные объекты, расположенные в Арктике. По данным [9], из-за протаивания и деградации грунтов на нефтяных месторождениях Западной Сибири в среднем происходит около 7400 аварий в год, в том числе порядка 1900 — только в Ханты-Мансийском автономном округе.

В последние годы в Арктике отмечается изменение толщины снежного покрова, смещаются сроки его установления и разрушения [10]. Эти процессы влияют на освоение ресурсов в высоких широтах, причем, например, при увеличении толщины снежного покрова может происходить как уменьшение, так и увеличение запаса холода в подстилающей поверхности [11]. Причина этого кроется в разной стратиграфии покрова в силу чередования оттепелей и жидких осадков [11]. Таким образом, различные грунты реагируют на потепление приземной температуры воздуха с разной интенсивностью, и воздействие на многолетнюю мерзлоту в каждом конкретном случае неоднозначно [5]. Поэтому исследования, направленные на изучение динамики многолетней мерзлоты, очень важны.

Цель данной работы: определить климатические изменения температуры почвы, толщины и площади снежного покрова, а также влажности почвы и воздуха в регионе западной части Российской Арктики (60°–75° с. ш., 30°–85° в. д.) за период 1980–2021 гг.

ДАННЫЕ И МЕТОДИКА

Исследованы среднемесячные данные температуры верхних 1,5 метров почвы, толщины и фракционной площади снежного покрова, влагосодержания верхнего слоя почвы толщиной 1 метр и влажности воздуха на высоте 2 метра от поверхности из реанализа спутниковых измерений NASA MERRA-2 на сетке 0,5° ш. × 0,625° д. за период 1980–2021 гг. [12].

В качестве граничного форсинга для улучшенной версии модели почвенного компонента MERRA-2 (NASA Catchment Land Surface Model — CLSM) в средних и высоких широтах Северного полушария используются приземные метеорологические поля MERRA-2. В исследовании [13] представлен и оценен весь набор данных, созданный с помощью этой модели, о состоянии многолетней мерзлоты Северного полушария с разрешением 81 км^2. При этом MERRA-2 использует данные, основанные на наблюдениях, для корректировки спутниковой информации о выпадающих осадках [14].

Толщина снежного покрова в данных MERRA-2 регистрируется как толщина снега в пределах заснеженной части [15]. Когда снег падает на ранее свободный от него тайл

(тайл — это вычислительная единица модели; несколько тайлов составляют ячейку сетки), он накапливается до тех пор, пока его масса на единицу площади в заснеженной части ячейки не составит 26 кг/м^2. Этот порог известен в модели как минимальная масса снега в доле заснеженной площади и применяется для защиты от очень тонких слоев твердых осадков, которые будут численно нестабильными. По мере накопления снега заснеженная площадь увеличивается, но его масса в пределах заснеженной доли остается постоянной на уровне 26 кг/м^2. Постепенно расширение этой площади приводит к превышению порога 26 кг/м^2. В выходных данных MERRA-2 представлены толщина снежного покрова (в метрах) и масса снега (в кг/м^2). В данной работе в качестве исследуемого параметра выбрана толщина снежного покрова, поскольку она оказывает влияние на промерзание почвы в зимний период.

Данные о влажности почвы доступны в MERRA-2 в двух различных единицах измерения [16]. Первая — в безразмерных единицах относительной насыщенности для различных глубин слоя. Значение 1 указывает на полностью насыщенную почву, а значение 0 указывает на полностью обезвоженную почву. Вторая — это содержание влаги в почве в объемных единицах м^3/м^3, т. е. объем воды в объеме грунта (включая весь твердый материал, воду и воздух). В обоих случаях переменные влажности почвы предоставляются для верхнего слоя 0–100 см. В работе [17] представлена система усвоения данных о Земле и атмосфере, используемая в модели Глобальной системы наблюдения за Землей НАСА (NASA's Global Earth Observing System model), которая применяется в MERRA-2 для усвоения спутниковых данных о влажности почвы .

В исследовании [18] круговорот воды в MERRA-2 сравнивается с современными реанализами и данными наблюдений. MERRA-2 включает параметры, направленные на минимизацию ложных глобальных вариаций, связанных с неоднородностью в наблюдениях. Хотя можно выявить некоторые систематические региональные отклонения, MERRA-2 производит согласованные временные ряды общего количества воды в столбе атмосферы и переноса воды из океана на сушу. Однако на межгодовую изменчивость испарения океана влияет меняющаяся система наблюдений за приземным ветром, а изменчивость осадков тесно связана с испарением. На баланс поверхностной энергии также сильно влияет межгодовая изменчивость испарения океана. Кроме того, оценка температуры и водяного пара показывает, что взаимосвязи водяного пара с температурой слабее в MERRA-2, чем в определяемых наблюдениями атмосферных моделях или реанализах без ассимиляции водяного пара.

В каждом узле сетки исследуемых данных рассчитан средний годовой ход за период 1980–2021 гг. Затем этот средний годовой ход в каждом узле сетки вычитался из данных для получения среднемесячных аномалий относительно среднего годового хода (далее — просто аномалии). По исследуемым данным для региона западной части Российской Арктики (60°–75° с. ш., 30°–85° в. д.) рассчитаны и построены следующие поля:

1. Средние значения за периоды 1980–2000 гг. и 2001–2021 гг.

2. Средние изменения между периодами 1980–2000 гг. и 2001–2021 гг. (разность средних значений между этими периодами).

3. Средние значения для зимних (декабрь–февраль) и летних (июнь–август) сезонов и 12 месяцев года за периоды 1980–2000 гг. и 2001–2021 гг.

4. Средние изменения для зимних (декабрь–февраль) и летних (июнь–август) сезонов и 12 месяцев года между периодами 1980–2000 гг. и 2001–2021 гг. (разность средних значений между этими периодами).

5. Скорость (линейный тренд) изменений среднемесячных аномалий относительно годового хода за периоды 1980–2000 гг. и 2001–2021 гг., оцененная с помощью приближения полиномами 1-й степени методом наименьших квадратов (1-я производная).

6. Ускорение (квадратичный тренд) изменений среднемесячных аномалий относительно годового хода за периоды 1980–2000 гг. и 2001–2021 гг., оцененное с помощью приближения полиномами 2-й степени методом наименьших квадратов (2-я производная).

Средние значения и разности между 1980–2000 гг. и 2001–2021 гг. позволяют оценить изменения исследуемых климатических параметров, произошедшие между этими временными периодами, а линейные и квадратичные тренды дают возможность оценить изменения, произошедшие внутри самих этих периодов. Таким образом, можно достаточно подробно исследовать пространственные и временные особенности изменений анализируемых гидрометеорологических параметров западной части Российской Арктики за 1980–2021 гг.

Выбор временной границы 2000/2001 гг. между периодами подробно обоснован в 1-й части статьи [1]. Дополнительно к написанному в [1] можно добавить, что исследуемый временной интервал 1980–2021 гг. разбит на периоды 1980–2000 гг. и 2001–2021 гг. также исходя из того, что на рубеже XX и XXI веков произошел переход климатической системы западной части Российской Арктики в новое фазовое состояние [19]. Этот переход может быть связан с климатическим сдвигом в Северной Атлантике [20, 21] и Тихом океане [22, 23], послужившим триггером начала изменений в Арктике, которые затем усилились за счет региональных положительных обратных связей. Следует подчеркнуть, что этот переход не произошел за один год, а продолжался 5–10 лет, приблизительно с 1998 по 2007 г. Есть основания предположить, что данный климатический сдвиг начался в 1998 г. после одного из сильнейших за всю историю наблюдений события Эль-Ниньо 1997–1998 гг., за которым во второй половине 1998 г. последовало одно из самых заметных и продолжительных событий Ла-Нинья 1998–2000 гг. Это сильнейшее по амплитуде межгодовое колебание климата оказало глобальное влияние и могло послужить импульсом для перехода климатической системы Арктики из одного состояния в другое. Одной из причин этого является то, что при событиях Эль-Ниньо происходит понижение температуры Баренцева, Белого и Карского морей, а при событиях Ла-Нинья — повышение температуры в этих морях [24–27].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 представлены средние значения температуры верхних 1,5 м почвы (ТП) за периоды 1980–2000 гг. и 2001–2021 гг. Поскольку глубина слоя сезонного промерзания-оттаивания в исследуемом регионе составляет верхние 1,4–2,4 м почвы, то по средним значениям ТП можно предположить наличие либо отсутствие многолетней мерзлоты в данной ячейке сетки MERRA-2 размером 0,5° ш. × 0,625° д. Так, при среднегодовой ТП выше приблизительно +3 °С (желто-красные цвета) существование многолетней мерзлоты практически полностью исключено. При среднегодовой ТП приблизительно от +3 °С до 0 °С (зеленый цвет) возможно образование островной и прерывистой многолетней мерзлоты. При среднегодовой ТП меньше 0 °С (голубой и фиолетовый цвета) многолетняя мерзлота становится непрерывной, т. е. занимает более 90 % площади почвы. Однако следует принять во внимание, что на существование и тип многолетней мерзлоты кроме ТП влияют также такие параметры, как снежный покров, тип почвы, затененность, раститель-

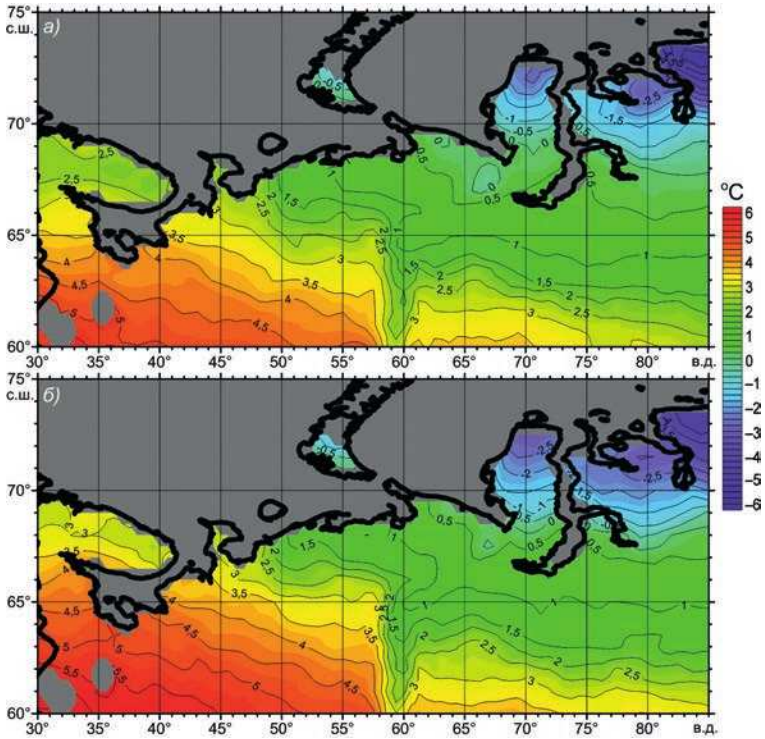

Рис. 1. Средние значения температуры верхних 1,5 м почвы за периоды 1980–2000 гг. (*а*) и 2001–2021 гг. (*б*) по данным MERRA-2

Fig. 1. Average temperatures of the upper 1.5 m of soil for the periods 1980–2000 (*a*) and 2001–2021 (*б*) according to MERRA-2 data

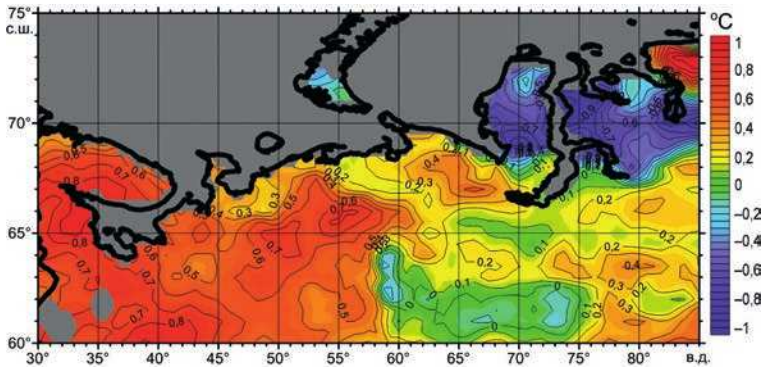

Рис. 2. Средние изменения температуры верхних 1,5 м почвы между периодами 1980–2000 гг. и 2001–2021 гг. (разность средних значений между этими периодами) по данным MERRA-2

Fig. 2. Average changes in temperature of the top 1.5 meters of soil between the periods 1980–2000 and 2001–2021 (difference of average values between these periods) according to MERRA-2 data

ность, влажность почвы, наличие водоемов и др. Тем не менее средние значения ТП, наряду со снежным покровом, изменения которого будут рассмотрены ниже, являются факторами, во многом определяющими вероятность существования многолетней мерзлоты в ячейке сетки MERRA-2.

По рис. 1 и 2 можно оценить изменения средних значений ТП, произошедшие между периодами 1980–2000 гг. и 2001–2021 гг. Видно, что ТП выросла более чем на 0,5 °С на западе исследуемого региона (рис. 2, оранжевый и красный цвета). Это может привести к сокращению и даже полному исчезновению островной многолетней мерзлоты на Кольском полуострове, где средняя ТП в 2001–2021 гг. практически всюду выросла и стала превышать +3 °С (рис. 1*б*). В центре и юго-востоке исследуемого региона преобладает незначительное увеличение ТП, но существенных изменений ТП не наблюдается (желтый, зеленый и голубой цвета). Возможно, что в этих районах рост количества тепла, поступающего из атмосферы, тратится моделью MERRA-2 на процесс таяния островной и прерывистой многолетней мерзлоты. И есть основания предположить, что рост ТП начнется после фазового перехода воды, содержащейся в верхнем слое почвы, из замерзшего в жидкое состояние. Интересным, на наш взгляд, обнаруженным результатом явилось заметное понижение средней ТП (на 0,5–1,0 °С) в 2001–2021 гг. по сравнению с 1980–2000 гг. на северо-востоке западной части Российской Арктики (рис. 2, фиолетовый цвет). Рассмотрим это понижение ТП более подробно.

Поля линейных и квадратичных трендов изменений ТП за 2001–2021 гг. (рис. 3) демонстрируют, что в 2001–2021 гг. практически на всей западной части Российской

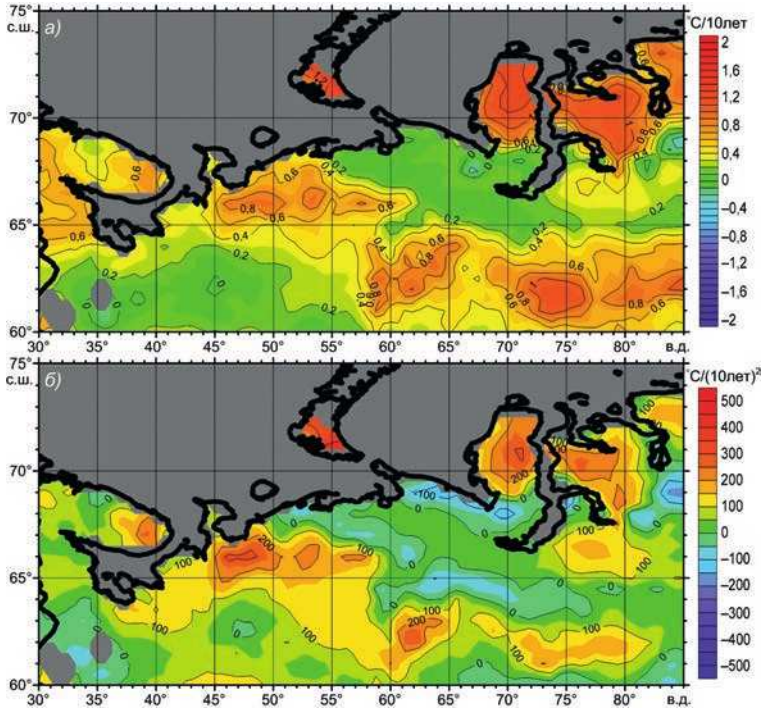

Рис. 3. Средняя скорость (линейный тренд) (*а*) и ускорение (квадратичный тренд) (*б*) изменений среднемесячных аномалий (относительно годового хода) температуры верхних 1,5 м почвы (°С за 10 лет), оцененные с помощью приближения полиномами 1-й и 2-й степени соответственно, за период 2001–2021 гг. по данным MERRA-2

Fig. 3. Average speed (linear trend) (*a*) and acceleration (quadratic trend) (*б*) of changes in average monthly anomalies (relative to the annual variation) in the temperature of the upper 1.5 meters of soil (°C for 10 years), estimated using approximation by polynomials of the 1st and 2nd degrees, respectively, for the period 2001–2021 according to MERRA-2

Арктики наблюдался рост ТП (рис. 3*а*), и происходил он в основном с положительным ускорением (рис. 3*б*). Причем на северо-востоке исследуемого региона значения линейного и квадратичного трендов изменений ТП в 2001–2021 гг. являются самыми высокими. То есть на северо-востоке исследуемого региона ТП заметно выросла в 2001–2021 гг., а ветви парабол, которыми приближены изменения ТП, в этом районе довольно круто направлены вверх. Поскольку в 2001–2021 гг. на северо-востоке исследуемого региона наблюдался ускоренный рост ТП (рис. 3), а средняя ТП за 2001–2021 гг. в этом районе ниже, чем за 1980–2000 гг. (рис. 2), то можно предположить, что в 1980–2000 гг. в этом районе происходило существенное понижение ТП.

Изменения ТП на северо-востоке (67°–72° с. ш.; 68°–85° в. д.) западной части Российской Арктики представлены на графике рис. 4*а*, где видно, что понижение ТП в этом районе произошло в 1980–2000 гг., а в 2001–2021 гг. наблюдается ее рост. Указанное выше понижение ТП в 1980–2000 гг. может быть связано с сокращением толщины снежного покрова (ТСП) (рис. 4*б*) и, как следствие, с более сильным выхолаживанием верхнего слоя почвы в зимний сезон. В свою очередь, рост средней ТП в районе (67°–72° с. ш.; 68°–85° в. д.) в 2001–2021 гг. (рис. 4*а*) может быть связан с увеличением температуры воздуха в летний сезон в этот период, который был обнаружен ранее и показан нами в 1-й части статьи [1], при этом ТСП за 2001–2021 гг. в этом районе существенно не изменилась и даже немного увеличилась (рис. 4*б*).

Таким образом, обнаруженные крупномасштабные изменения ТП западной части Российской Арктики могли быть вызваны изменениями как температуры воздуха у поверхности (ТВП), так и изменениями снежного покрова. Изменения ТВП западной части Российской Арктики за 1980–2021 гг. исследованы раньше и представлены в 1-й части статьи [1]. По рис. 5 можно оценить изменения толщины снежного покрова, произошедшие между периодами 1980–2000 гг. и 2001–2021 гг. Видно, что в центре исследуемого региона и, в особенности, в районе Уральских

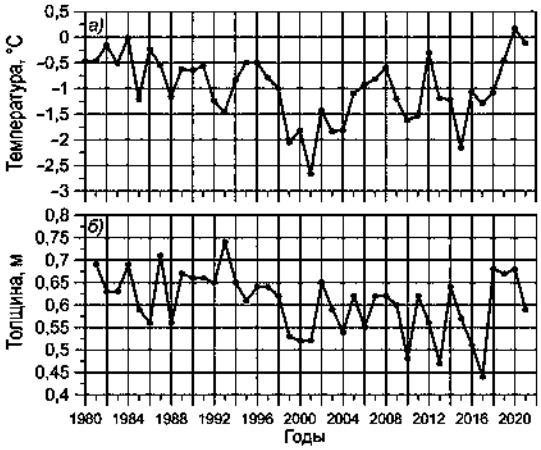

Рис. 4. Изменения среднегодовых значений температуры верхних 1,5 м почвы (*а*) и толщины снежного покрова за ноябрь–апрель (*б*), осредненных для северо-востока западной части Российской Арктики (67°–72° с. ш.; 68°–85° в. д.)

Fig. 4. Changes in the average annual temperature of the upper 1.5 meters of soil (*a*) and the snow depth for November-April (*б*) averaged for the northeast of the western part of the Russian Arctic (67°–72° N; 68°–85° E).

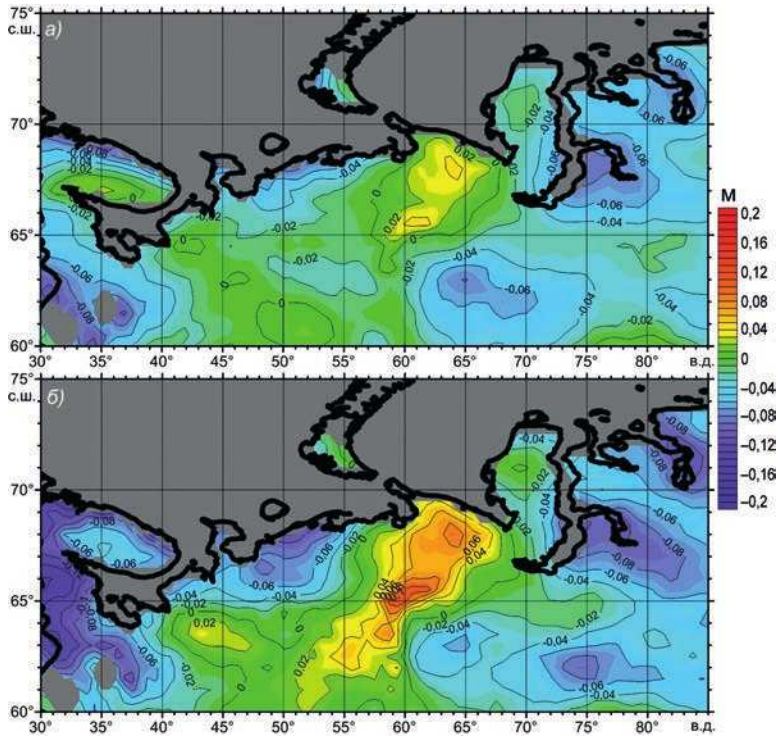

Рис. 5. Средние изменения толщины снежного покрова (метры) между периодами 1980–2000 гг. и 2001–2021 гг. (разность средних значений между этими периодами) для зимнего сезона (декабрь–февраль) (*а*) и апреля (*б*) по данным MERRA-2

Fig. 5. Average changes in snow cover thickness (meters) between the periods 1980–2000 and 2001–2021 (difference of average values between these periods) for the winter season (December-February) (*a*) and April (*б*) according to MERRA-2.

гор ТСП увеличилась, а на западе и востоке исследуемого региона — уменьшилась за 1980–2021 гг. Уменьшение ТСП на северо-востоке в 2001–2021 гг. по сравнению с 1980–2000 гг. (рис. 5) могло стать одной из причин описанного выше уменьшения ТП в этом районе. Зимой снег здесь играет роль теплоизолятора между очень холодным воздухом у поверхности и верхним слоем почвы, поэтому при сокращении ТСП верхний слой почвы на северо-востоке западной части Российской Арктики теряет больше тепла.

Уменьшение ТСП зимой в 1980–2021 гг. также наблюдается на западе исследуемого региона, за исключением юга Кольского полуострова. Особенно заметно уменьшение ТСП на западе исследуемого региона в апреле (рис. 5*б*), что, по всей видимости, стало следствием более раннего начала таяния снега в 2001–2021 гг. по сравнению с 1980–2000 гг. Это произошло из-за повышения ТВП западной части Российской Арктики, наиболее заметно проявившегося в ноябре и апреле [1]. Характерно, что для апреля (рис. 5*б*) на юге Кольского полуострова не наблюдается положительных аномалий ТСП, которые заметны для зимнего сезона (рис. 5*а*). По всей видимости, это может быть связано с более ранним началом таяния снега на юге Кольского полуострова в 2001–2021 гг. по сравнению с 1980–2000 гг.

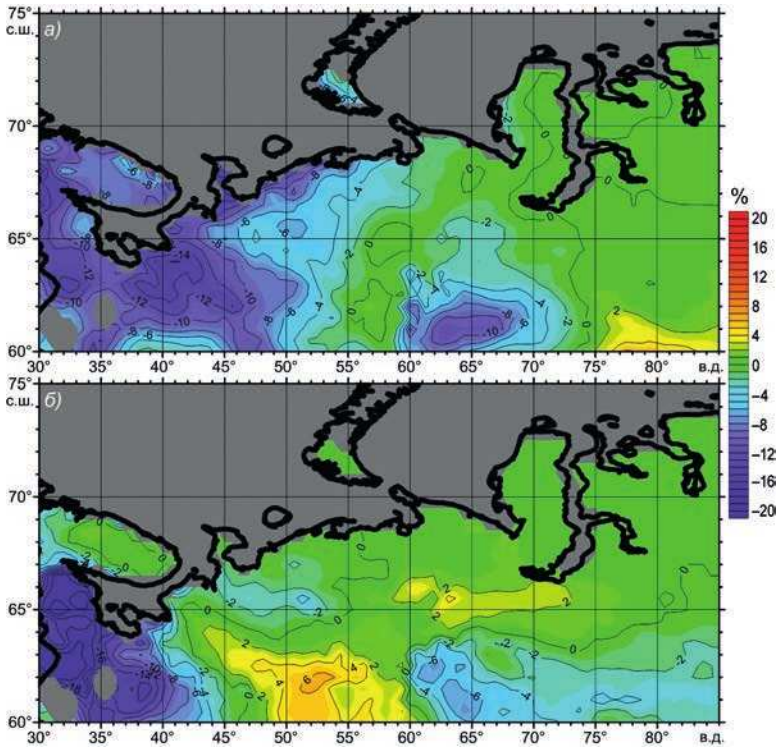

Рис. 6. Средние изменения фракционной площади снежного покрова между периодами 1980-2000 гг. и 2001–2021 гг. (разность средних значений между этими периодами) для ноября (*а*) и апреля (*б*) по данным MERRA-2.

Fig. 6. Average changes in the fractional area of snow cover between the periods 1980–2000 and 2001–2021 (difference of average values between these periods) for November (*a*) and April (*б*) according to MERRA-2 data.

Помимо уменьшения ТСП на западе исследуемого региона в 2001–2021 гг. по сравнению с 1980–2000 гг., произошло существенное сокращение площади снежного покрова (ПСП) в ноябре и апреле (рис. 6). Можно сделать вывод, что на западе исследуемого региона сократилась продолжительность снежного сезона, что привело к уменьшению отражательной способности поверхности, ее более быстрому нагреву солнечной радиацией и запуску альбедных положительных обратных связей между сокращением ПСП и повышением ТП и ТВП. Эта положительная обратная связь могла стать одной из причин наблюдаемого ускоряющегося роста температуры западной части Российской Арктики в исследуемый период.

Более раннее начало таяния снега в 2001–2021 гг. по сравнению с 1980–2000 гг. могло повлиять на изменение влагосодержания верхнего слоя почвы (ВП) (рис. 7). Поскольку ТСП на западе исследуемого региона уменьшилась (рис. 5), то и количество влаги, попадающей в почву при таянии снега, должно было стать меньше, что выразилось в понижении ВП на юго-западе региона в 2001–2021 гг. по сравнению с 1980–2000 гг. (рис. 7*а*). Тем не менее, помимо снега, на ВП влияют еще и жидкие осадки, изменение которых было рассмотрено в 1-й части статьи [1], где показано увеличение количества осадков на западе исследуемого региона в 2001–2021 гг.,

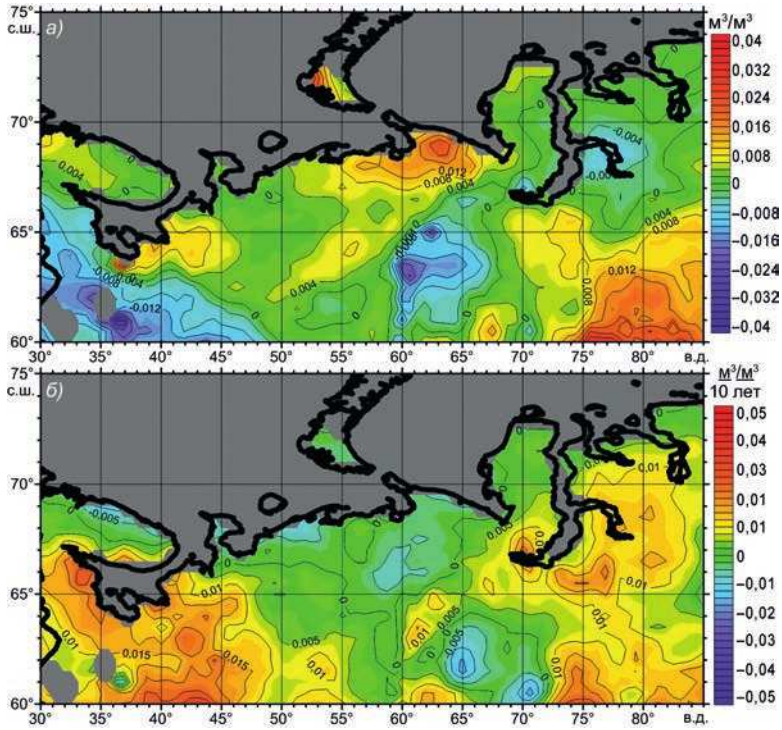

Рис. 7. Средние изменения влагосодержания верхнего слоя почвы толщиной 1 м между периодами 1980–2000 гг. и 2001–2021 гг. (разность средних значений между этими периодами) (*а*) и средняя скорость (линейный тренд) изменений среднемесячных аномалий (относительно годового хода) влагосодержания верхнего слоя почвы толщиной 1 м ($м^3/м^3$ за 10 лет), оцененная с помощью приближения полиномами 1-й степени (1-я производная), за период 2000–2021 гг. (*б*) по данным MERRA-2

Fig. 7. Average changes in the moisture content of the top layer of soil 1 meter thick between the periods 1980–2000 and 2001–2021 (difference between the average values between these periods) (*a*), and the average rate (linear trend) of changes in monthly average anomalies (relative to the annual variation) in the moisture content of the top layer of soil 1 meter thick (m^3/m^3 over 10 years), estimated using the approximation by polynomials 1st degree (1st derivative), for the period 2000–2021 (*б*) according to MERRA-2 data.

вследствие чего в этот период наблюдается рост ВП практически на всей территории западной части Российской Арктики (рис. 7*б*).

Рост количества осадков и температуры в 1980–2021 гг. повлиял на увеличение влажности воздуха (ВВ) в западной части Российской Арктики (рис. 8). Видно, что ВВ выросла заметнее всего над акваториями Белого, Баренцева и Карского морей и меньше всего на юге центральной части исследуемого региона. По всей видимости, увеличение ВВ над акваториями морей связано с усилением испарения с их поверхности вследствие роста температуры поверхности воды и сокращения площади морского льда. Также на рост испарения могло повлиять увеличение модуля скорости ветра у поверхности Баренцева и Карского морей, показанное в 1-й части статьи [1].

Рост ВВ начался на западе исследуемого региона, в особенности над акваторией Белого моря, в 1980–2000 гг. (рис. 9*а*). В 2001–2021 гг. увеличение ВВ распростра-

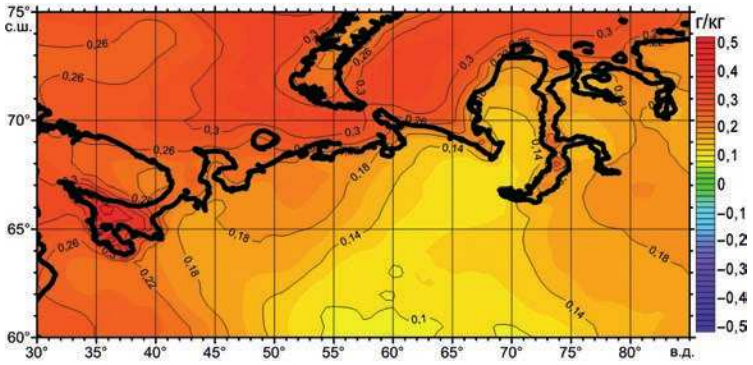

Рис. 8. Средние изменения удельной влажности воздуха на высоте 2 м от поверхности (г/кг за 10 лет) между периодами 1980–2000 гг. и 2001–2021 гг. (разность средних значений между этими периодами) по данным MERRA-2

Fig. 8. Average changes in specific air humidity at a height of 2 meters from the surface (g/kg over 10 years) between the periods 1980–2000 and 2001–2021 (difference of average values between these periods) according to MERRA-2 data.

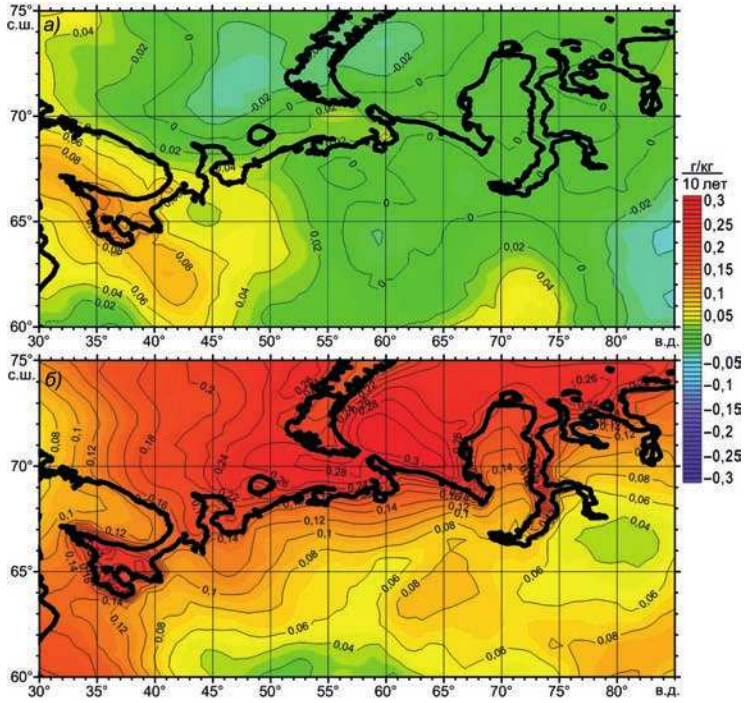

Рис. 9. Средняя скорость (линейный тренд) изменений среднемесячных аномалий (относительно годового хода) удельной влажности воздуха на высоте 2 м от поверхности (г/кг за 10 лет), оцененная с помощью приближения полиномами 1-й степени (1-я производная), за периоды 1980–2000 гг. (*а*) и 2001–2021 гг. (*б*) по данным MERRA-2

Fig. 9. The average rate (linear trend) of changes in monthly average anomalies (relative to the annual variation) in specific air humidity at a height of 2 meters from the surface (g/kg over 10 years), estimated using the approximation by polynomials of the 1st degree (1st derivative), for the periods 1980–2000 (*a*) and 2001–2021 (*б*) according to MERRA-2 data

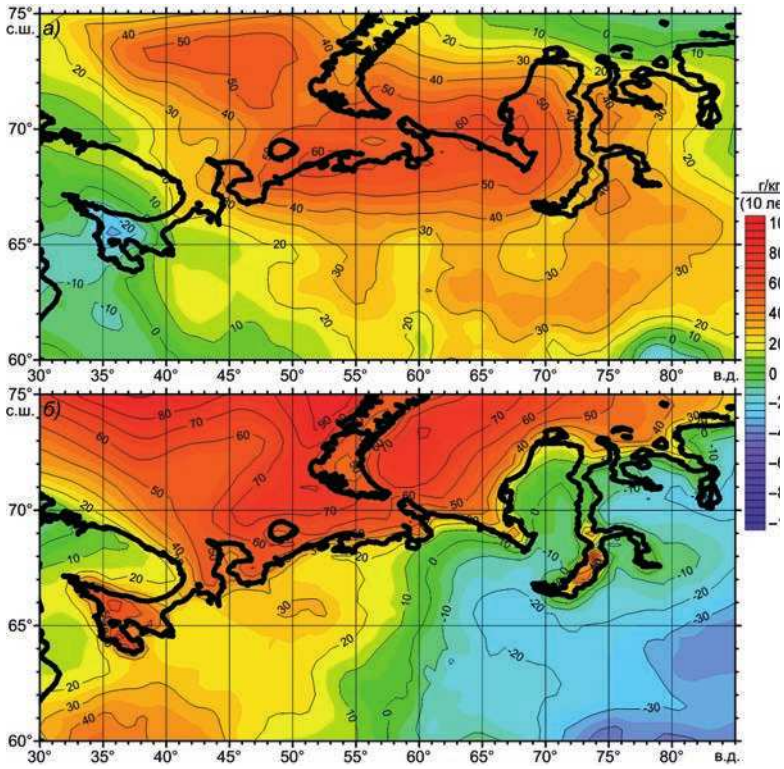

Рис. 10. Среднее ускорение (квадратичный тренд) изменений среднемесячных аномалий (относительно годового хода) удельной влажности воздуха на высоте 2 м от поверхности (г/кг за (10 лет)^2), оцененное с помощью приближения полиномами 2-й степени (2-я производная), за периоды 1980–2000 гг. (*а*) и 2001–2021 гг. (*б*) по данным MERRA-2

Fig. 10. Average acceleration (quadratic trend) of changes in monthly average anomalies (relative to the annual variation) of specific air humidity at a height of 2 meters from the surface (gram/kg for (10 years)^2), estimated using the approximation by polynomials of the 2nd degree (2nd derivative), for the periods 1980–2000 (*а*) and 2001–2021 (*б*) according to MERRA-2 data

нилось на центр и восток исследуемого региона с наибольшей скоростью роста над акваториями Баренцева, Белого и Карского морей (рис. 9*б*). Причем рост ВВ над акваториями этих морей в 2001–2021 гг. происходил со значительным положительным ускорением (рис. 10). Таким образом, наблюдаемые в западной части Российской Арктики процессы повышения ТП и ВВ распространяются с запада на восток и могут являться следствием усиливающегося влияния Северной Атлантики на исследуемый регион. Данный процесс ускоряющегося роста температуры и влажности западной части Российской Арктики можно назвать термином «атлантификация» этого региона, который изначально был введен для обозначения изменений физических свойств верхнего слоя воды приатлантической части Северного Ледовитого океана [28, 29].

Повышение удельной ВВ (содержания воды в атмосфере) увеличило количество водяного пара, который является одним из парниковых газов. Это способствовало усилению нисходящей (отраженной) длинноволновой радиации, что, в свою очередь, повышает температуру, испарение и, как следствие, влагосодержание атмосферы.

Таким образом, усилилась обратная положительная связь между ВВ и температурой, влияющая на потепление западной части Российской Арктики. Однако следует принять во внимание, что из-за повышения температуры поверхности увеличилась и длинноволновая уходящая радиация, что в некоторой степени компенсирует влияние увеличения ВВ на рост температуры.

Вследствие обнаруженного по данным MERRA-2 увеличения температуры и влажности воздуха в нижнем слое тропосферы западной части Российской Арктики в 1980–2021 гг. произошло увеличение теплосодержания этого слоя. Поскольку тепловая энергия, содержащаяся в атмосфере, оказывает влияние на амплитуду, частоту и продолжительность экстремальных погодных явлений, то можно предположить, что в западной части Российской Арктики должны происходить изменения таких событий. Таким образом, анализ изменений амплитуды, частоты и продолжительности экстремальных погодных явлений западной части Российской Арктики требует дополнительных исследований.

ВЫВОДЫ

1. Обнаружено повышение температуры верхних 1,5 м почвы (ТП) приблизительно на 0,5 °С в 2001–2021 гг. по сравнению с 1980–2000 гг. на западе исследуемого региона. Это может привести к сокращению и даже полному исчезновению островной многолетней мерзлоты на Кольском полуострове, где средняя ТП в 2001–2021 гг. практически всюду выросла и стала превышать +3 °С. В 2001–2021 гг. начался ускоряющийся рост ТП также и на северо-востоке западной части Российской Арктики. Таким образом, в настоящее время на большей части исследуемого региона наблюдается ускоряющийся рост ТП, что может вызвать таяние многолетней мерзлоты.

2. Показано сокращение толщины снежного покрова на западе и востоке исследуемого региона в 2001–2021 гг. по сравнению с 1980–2000 гг. На западе исследуемого региона также произошло существенное сокращение площади снежного покрова в ноябре и апреле. Из-за этого усилилась альбедная обратная положительная связь между температурой и свободной от снега поверхностью, что могло явиться одной из причин сокращения длительности зимнего сезона в западной части Российской Арктики.

3. Рост удельной влажности воздуха на высоте 2 м от поверхности (ВВ) начался на западе исследуемого региона и в особенности над акваторией Белого моря в 1980–2000 гг. В 2001–2021 гг. увеличение ВВ распространилось на центр и восток исследуемого региона, с наибольшей скоростью роста над акваториями морей, причем рост ВВ происходил с положительным ускорением. Вероятно, увеличение ВВ над акваториями Белого, Баренцева и Карского морей связано с усилением испарения с их поверхностей вследствие роста температуры поверхности воды и сокращения площади морского льда. Дополнительно к росту ВВ в 2001–2021 гг. на западе и востоке исследуемого региона наблюдался рост влагосодержания почвы.

4. Исследованная пространственно-временная динамика роста температуры и влажности западной части Российской Арктики имеет тенденцию распространения с запада на восток, что можно объяснить усилением влияния Северной Атлантики на исследуемый регион. Данный процесс можно назвать «атлантификацией» климата западной части Российской Арктики. Увеличение температуры и влажности воздуха исследуемого региона привело к росту теплосодержания нижнего слоя атмосферы —

увеличению его тепловой энергии. Вследствие этого можно ожидать увеличения количества, силы и продолжительности экстремальных погодных явлений в западной части Российской Арктики.

Конфликт интересов. Авторы статьи не имеют конфликта интересов.

Финансирование. Исследование выполнено в рамках государственного задания Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН по теме № FMWE-2021-0003 «Крупномасштабные, волновые и вихревые океанские процессы и роль океана в формировании климата: междекадная эволюция циркуляции, гидрофизических полей океана и потоков на границе океан–атмосфера в условиях меняющегося климата».

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

Funding. The research was funded within the federal assignment to the Shirshov Institute of Oceanology RAS on topic No. FMWE-2021-0003 “Large-scale, wave and eddy ocean processes and the role of the ocean in climate formation: interdecadal evolution of circulation, ocean hydrophysical fields and flows at the ocean-atmosphere boundary in a changing climate”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Серых И.В., Толстиков А.В.* Изменения климата западной части Российской Арктики в 1980–2021 гг. Часть 1. Температура воздуха, осадки, ветер // Проблемы Арктики и Антарктики. 2022. Т. 68 (3). С. 258–277. doi: 10.30758/0555-2648-2022-68-3-258-277.

2. *Шерстюков А.Б.* Многолетняя мерзлота России в условиях глобального потепления климата // Эволюция и динамика экосистем. 2007. № 4. С. 8–11.

3. *Анисимов О.А., Анохин Ю.А., Лавров С.А., Малкова Г.В., Мяч Л.Т., Павлов А.В., Романовский В.А., Стрелецкий Д.А., Холодов А.Л., Шикломанов Н.И.* Континентальная многолетняя мерзлота. Глава 8 // Методы изучения последствий изменений климата для природных систем / Под ред. С.М. Семенова. М.: ВНИИГМИ, 2010. С. 301–359.

4. *Анисимов О.А., Шерстюков А.Б.* Оценка роли природно-климатических факторов в изменениях криолитозоны России // Криосфера Земли. 2016. Т. 22 (2). С. 90–99.

5. *Конищев В.Н.* Реакция вечной мерзлоты на потепление климата // Криосфера Земли. 2011. Т. 15 (4). С. 15–18.

6. *Lemke P., Ren J., Alley R.B., Allison I., Carrasco J., Flato G., Fujii Y., Kaser G., Mote P., Thomas R.H., Zhang T.* Observations: Changes in Snow, Ice and Frozen Ground. Chapter 4 // Climate Change: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2007. P. 337–383.

7. Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic (SWIPA). Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP). Oslo, Norway, 2017. URL: https://www.amap.no/documents/doc/snow-water-ice-and-permafrost-in-the-arctic-swipa-2017/1610 (дата обращения: 30.11.2022).

8. *Погожева М.П., Якушев Е.В., Петров И.Н., Яески Е.А.* Экспериментальное исследование влияния таяния многолетней мерзлоты на содержание биогенных элементов и тяжелых металлов в морской воде при абразионном разрушении арктических берегов // Арктика: экология и экономика. 2021. Т. 11. № 1. С. 67–75. doi: 10.25283/2223-4594-2021-1-67-75.

9. *Порфирьев Б.Н., Елисеев Д.О., Стрелецкий Д.А.* Экономическая оценка последствий деградации вечной мерзлоты под влиянием изменений климата для устойчивости дорожной инфраструктуры в Российской Арктике // Вестник Российской академии наук. 2019. Т. 89 (12). С. 1228–1239.

10. *Попова В.В., Ширяева А.В., Морозова П.А.* Изменения характеристик снежного покрова на территории России в 1950–2013 годах: региональные особенности и связь с глобальным потеплением // Криосфера Земли. 2018. Т. 22 (4). С. 65–75. doi: 10.21782/KZ1560-7496-2018-4(65-75).

11. *Сосновский А.В., Чернов Р.А.* Влияние снежного покрова на охлаждение поверхностного слоя ледника Восточный Грёнфьорд (Шпицберген) // Лед и снег. 2021. Т. 61 (1). С. 75–88. doi: 10.31857/S2076673421010072.

12. *Gelaro R., McCarty W., Suárez M.J., Todling R., Molod A., Takacs L., Randles C.A., Darmenov A., Bosilovich M.G., Reichle R., Wargan K., Coy L., Cullather R., Draper C., Akella S., Buchard V., Conaty A., da Silva A.M., Gu W., Kim G., Koster R., Lucchesi R., Merkova D., Nielsen J.E., Partyka G., Pawson S., Putman W., Rienecker M., Schubert S.D., Sienkiewicz M., Zhao B.* The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2) // Journal of Climate. 2017. V. 30 (14). P. 5419–5454.

13. *Tao J., Koster R.D., Reichle R.H., Forman B.A., Xue Y., Chen R.H., Moghaddam M.* Permafrost Variability over the Northern Hemisphere Based on the MERRA-2 Reanalysis // Cryo. 2019. V. 13. P. 2087–2110.

14. *Reichle R., Liu Q., Koster R., Draper C., Mahanama S., Partyka G.* Land Surface Precipitation in MERRA-2 // Journal of Climate. 2017. V. 30 (5). P. 1643–1664.

15. *Toure A.M., Reichle R.H., Forman B.A., Getirana A., De Lannoy G.J.M.* Assimilation of MODIS Snow Cover Fraction Observations into the NASA Catchment Land Surface Model // Remote Sensing. 2018. V. 10. 316. URL: https://doi.org/10.3390/rs10020316 (дата обращения: 30.11.2022).

16. *Reichle R.H., Draper C.S., Liu Q., Girotto M., Mahanama S.P.P., Koster R.D., De Lannoy G.J.M.* Assessment of MERRA-2 land surface hydrology estimates // Journal of Climate. 2017. V. 30. P. 2937–2960.

17. *Draper C., Reichle R.H.* Assimilation of satellite soil moisture for improved atmospheric reanalyses // Mon. Wea. Rev. 2019. V. 147. P. 2163–2188.

18. *Bosilovich M.G., Robertson F.R., Takacs L., Molod A., Mocko D.* Atmospheric Water Balance and Variability in the MERRA-2 Reanalysis // Journal of Climate. 2017. V. 30 (4). P. 1177–1196.

19. *Серых И.В., Костяной А.Г., Лебедев С.А., Костяная Е.А.* О переходе температурного режима региона Белого моря в новое фазовое состояние // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2022. Т. 15. № 1. С. 98–111.

20. *Бышев В.И., Нейман В.Г., Романов Ю.А., Серых И.В.* О фазовой изменчивости некоторых характеристик современного климата в регионе Северной Атлантики // Доклады Академии наук (ДАН). 2011. Т. 438. № 6. С. 817–822.

21. *Serykh I.V.* Influence of the North Atlantic dipole on climate changes over Eurasia // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2016. V. 48. 012004.

22. *Byshev V.I., Neiman V.G., Romanov Yu.A., Serykh I.V.* On the spatial nonuniformity of some parameters of global variations in the recent climate // Doklady Earth Sciences. 2009. V. 426. № 4. P. 705–709.

23. *Byshev V.I., Neiman V.G., Anisimov M.V., Gusev A.V., Serykh I.V., Sidorova A.N., Figurkin A.L., Anisimov I.M.* Multi-decadal oscillations of the ocean active upper-layer heat content // Pure and Applied Geophysics. 2017. V. 174. № 7. P. 2863–2878.

24. *Serykh I.V., Kostianoy A.G.* Seasonal and interannual variability of the Barents Sea temperature // Ecologica Montenegrina. 2019. V. 25. P. 1–13.

25. Серых И.В., Толстиков А.В. О причинах долгопериодной изменчивости приповерхностной температуры воздуха над Белым морем // Вестник Московского университета. Сер. 5: География. 2020. № 4. С. 83–95.

26. *Serykh I.V., Tolstikov A.V.* On the climatic changes of the surface air temperature in the White Sea region // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. V. 606. 012054.

27. *Серых И.В.* О роли Эль-Ниньо — Глобальной атмосферной осцилляции в межгодовой изменчивости гидрометеорологических процессов // Гидрометеорология и экология. 2021. № 63. С. 329–370.

28. *Årthun M., Eldevik T., Smedsrud L.H., Skagseth Ø., Ingvaldsen R.B.* Quantifying the Influence of Atlantic Heat on Barents Sea Ice Variability and Retreat // Journal of Climate. 2012. V. 25 (13). P. 4736–4743.

29. *Polyakov I.V., Pnyushkov A.V., Alkire M.B., Ashik I.M., Baumann T.M., Carmack E.C., Goszczko I., Guthrie J., Ivanov V.V., Kanzow T., Krishfield R., Kwok R., Sundfjord A., Morison J., Rember R., Yulin A.* Greater role for Atlantic inflows on sea-ice loss in the Eurasian Basin of the Arctic Ocean // Science. 2017. V. 356. № 6335. P. 285–291.

REFERENCES

1. *Serykh I.V., Tolstikov A.V.* Climate change in the western part of the Russian Arctic in 1980–2021. Part 1. Air temperature, precipitation, wind. *Problemy Arktiki i Antarktiki.* Arctic and Antarctic Research. 2022, 68 (3): 258–277. doi: 10.30758/0555-2648-2022-68-3-258-277. [In Russian].

2. *Sherstjukov A.B.* Permafrost of Russia in the context of global warming. *Jevoljucija i dinamika jekosistem.* Evolution and dynamics of ecosystems. 2007, 4: 8–11. [In Russian].

3. *Anisimov O.A., Anohin Ju.A., Lavrov S.A., Malkova G.V., Mjach L.T., Pavlov A.V., Romanovskij V.A., Streleckij D.A., Holodov A.L., Shiklomanov N.I.* Continental permafrost. Chapter 8. *Metody izucheniia posledstvii izmenenii klimata dlia prirodnykh system.* Methods for studying the consequences of climate change for natural systems (edited by S.M. Semenov). M.: VNIIGMI, 2010: 301–359. [In Russian].

4. *Anisimov O.A., Sherstiukov A.B.* Assessment of the role of natural and climatic factors in changes in the permafrost zone of Russia. *Kriosfera Zemli.* Earth's cryosphere. 2016, 22 (2): 90–99. [In Russian].

5. *Konishhev V.N.* Permafrost response to climate warming. *Kriosfera Zemli.* Earth's cryosphere. 2011, 15 (4): 15–18. [In Russian].

6. *Lemke, P., Ren J., Alley R.B., Allison I., Carrasco J., Flato G., Fujii Y., Kaser G., Mote P., Thomas R.H., Zhang T.* Observations: Changes in Snow, Ice and Frozen Ground. Chapter 4. Climate Change: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)). Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2007: 337–383.

7. Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic (SWIPA). Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP). Oslo, Norway, 2017. Available at: https://www.amap.no/documents/doc/snow-water-ice-and-permafrost-in-the-arctic-swipa-2017/1610 (accessed 30.11.2022).

8. *Pogojeva M.P., Yakushev E.V., Petrov I.N., Yaeski E.A.* Experimental study of the effect of permafrost melting on the content of biogenic elements and heavy metals in sea water during abrasion destruction of Arctic coasts. *Arktika: jekologija i jekonomika.* Arctic: ecology and economy. 2021, 11 (1): 67–75. doi: 10.25283/2223-4594-2021-1-67-75. [In Russian].

9. *Porfir'ev B.N., Eliseev D.O., Streletskii D.A.* Economic assessment of the consequences of permafrost degradation to exclude climate change for the sustainability of the road situation in the Russian Arctic. *Vestnik Rossiiskoi akademii nauk*. Bulletin of the Russian Academy of Sciences. 2019, 89 (12): 1228–1239. [In Russian].

10. *Popova V.V., Shiriaeva A.V., Morozova P.A.* Changes in Snow Cover Characteristics in Russia in 1950–2013: Regional Peculiarities and Relationship with Global Warming. *Kriosfera Zemli.* Earth's cryosphere. 2018, 22 (4): 65–75. doi: 10.21782/KZ1560-7496-2018-4(65-75). [In Russian].

11. *Sosnovskii A.V., Chernov R.A.* Influence of snow cover on the cooling of the surface layer of the East Grönfjord Glacier (Svalbard). *Led i Sneg.* Ice and snow. 2021, 61 (1): 75–88. doi: 10.31857/S2076673421010072. [In Russian].

12. *Gelaro R., McCarty W., Suárez M.J., Todling R., Molod A., Takacs L., Randles C.A., Darmenov A., Bosilovich M.G., Reichle R., Wargan K., Coy L., Cullather R., Draper C., Akella S., Buchard V., Conaty A., da Silva A.M., Gu W., Kim G., Koster R., Lucchesi R., Merkova D., Nielsen J.E., Partyka G., Pawson S., Putman W., Rienecker M., Schubert S.D., Sienkiewicz M., Zhao B.* The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2). Journal of Climate. 2017, 30 (14): 5419–5454.

13. *Tao J., Koster R.D., Reichle R.H., Forman B.A., Xue Y., Chen R.H., Moghaddam M.* Permafrost Variability over the Northern Hemisphere Based on the MERRA-2 Reanalysis. Cryo. 2019, 13: 2087–2110.

14. *Reichle R., Liu Q., Koster R., Draper C., Mahanama S., Partyka G.* Land Surface Precipitation in MERRA-2. Journal of Climate. 2017, 30 (5): 1643–1664.

15. *Toure A.M., Reichle R.H., Forman B.A., Getirana A., De Lannoy G.J.M.* Assimilation of MODIS Snow Cover Fraction Observations into the NASA Catchment Land Surface Model. Remote Sensing. 2018, 10, 316. Available at: https://doi.org/10.3390/rs10020316 (accessed 30.11.2022).

16. *Reichle R.H., Draper C.S., Liu Q., Girotto M., Mahanama S.P.P., Koster R.D., De Lannoy G.J.M.* Assessment of MERRA-2 land surface hydrology estimates. Journal of Climate. 2017, 30: 2937–2960.

17. *Draper C., Reichle R.H.* Assimilation of satellite soil moisture for improved atmospheric reanalyses. Mon. Wea. Rev. 2019, 147: 2163–2188.

18. *Bosilovich M.G., Robertson F.R., Takacs L., Molod A., Mocko D.* Atmospheric Water Balance and Variability in the MERRA-2 Reanalysis. Journal of Climate. 2017, 30 (4): 1177–1196.

19. *Seryh I.V., Kostjanoj A.G., Lebedev S.A., Kostjanaja E.A.* On the transition of the temperature regime of the White Sea region to a new phase state. *Fundamental'naja i prikladnaja gidrofizika.* Fundamental and applied hydrophysics. 2022, 15 (1): 98–111. [In Russian].

20. *Byshev V.I., Nejman V.G., Romanov Ju.A., Seryh I.V.* On the phase variability of some characteristics of the modern climate in the North Atlantic region. *Doklady Akademii nauk* (DAN). Reports of the Academy of Sciences. 2011, 438 (6): 817–822. [In Russian].

21. *Serykh I.V.* Influence of the North Atlantic dipole on climate changes over Eurasia. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2016, 48: 012004.

22. *Byshev V.I., Neiman V.G., Romanov Yu.A., Serykh I.V.* On the spatial nonuniformity of some parameters of global variations in the recent climate. Doklady Earth Sciences. 2009, 426 (4): 705–709. [In Russian].

23. *Byshev V.I., Neiman V.G., Anisimov M.V., Gusev A.V., Serykh I.V., Sidorova A.N., Figurkin A.L., Anisimov I.M.* Multi-decadal oscillations of the ocean active upper-layer heat content. Pure and Applied Geophysics. 2017, 174 (7): 2863–2878.

24. *Serykh I.V., Kostianoy A.G.* Seasonal and interannual variability of the Barents Sea temperature. Ecologica Montenegrina. 2019, 25: 1–13.

25. *Seryh I.V., Tolstikov A.V.* On the causes of long-term variability of near-surface air temperature over the White Sea. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 5: Geografija.* Bulletin of Moscow University. Ser. 5: Geography. 2020, 4: 83–95. [In Russian].

26. *Serykh I.V., Tolstikov A.V.* On the climatic changes of the surface air temperature in the White Sea region. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020, 606: 012054.

27. *Seryh I.V.* On the role of El Niño — Global Atmospheric Oscillation in the interannual variability of hydrometeorological processes. *Gidrometeorologija i jekologija.* Hydrometeorology and ecology. 2021, 63: 329–370. [In Russian].

28. *Årthun M., Eldevik T., Smedsrud L.H., Skagseth Ø., Ingvaldsen R.B.* Quantifying the Influence of Atlantic Heat on Barents Sea Ice Variability and Retreat. Journal of Climate. 2012, 25 (13): 4736–4743.

29. *Polyakov I.V., Pnyushkov A.V., Alkire M.B., Ashik I.M., Baumann T.M., Carmack E.C., Goszczko I., Guthrie J., Ivanov V.V., Kanzow T., Krishfield R., Kwok R., Sundfjord A., Morison J., Rember R., Yulin A.* Greater role for Atlantic inflows on sea-ice loss in the Eurasian Basin of the Arctic Ocean. Science. 2017, 356, 6335: 285–291.

ГЛЯЦИОЛОГИЯ И КРИОЛОГИЯ
GLACIOLOGY AND CRYOLOGY OF THE EARTH

https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-4-370-383
УДК 551.321.61, 551.324.4, 551.324.6

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ **ORIGINAL ARTICLE**

Изменения объема и геометрии ледника Восточный Дальфонна (Шпицберген) в 2008–2019 гг.

А.В. Терехов[1,2], У.В. Прохорова[1], А.Л. Борисик[1], В.Э. Демидов[1], С.Р. Веркулич[1]*

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

[2] — *Федеральное государственное бюджетное учреждение «Государственный гидрологический институт», Санкт-Петербург, Россия*

[*] *antonvterekhov@gmail.com*

Резюме

В работе представлены результаты топографической и геофизической съемок на леднике Восточный Дальфонна площадью около 2 км^2, расположенном на архипелаге Шпицберген к югу от поселка Баренцбург. Средняя толщина льда по состоянию на 2019 г. составляет 82 м, максимальная — 170 м. На основе сравнения с архивными данными дистанционного зондирования показано, что за 12 балансовых лет ледник потерял 16 % своего объема, что эквивалентно потере массы в 12,05 ± 0,85 м в. э. Сравнением двух шестилетних периодов установлено, что в 2008–2013 гг. потеря массы замедлялась по отношению к последующему интервалу 2013–2019 гг., что согласуется как с наблюдениями на соседнем леднике Восточный Грёнфьорд, так и с общей масс-балансовой изменчивостью на архипелаге. Это приводит к выводу, что на временных интервалах порядка 5–10 лет изменчивость баланса массы ледников в районе Баренцбурга определяется факторами регионального масштаба, а именно сменами режимов атмосферной циркуляции на Шпицбергене, которые могут быть охарактеризованы преобладанием положительной либо отрицательной фазы индекса Северо-Атлантического колебания (NAO) летом.

Ключевые слова: баланс массы, георадарная съемка, изменения климата, индекс NAO, ледник, Шпицберген.

Для цитирования: *Терехов А.В., Прохорова У.В., Борисик А.Л., Демидов В.Э., Веркулич С.Р.* Изменения объема и геометрии ледника Восточный Дальфонна (Шпицберген) в 2008–2019 гг. // Проблемы Арктики и Антарктики. 2022. Т. 68. № 4. С. 370–383. https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-4-370-383.

Поступила 26.07.2022 **После переработки 17.09.2022** **Принята 02.10.2022**

Changes in volume and geometry of the Austre Dahlfonna glacier (Spitsbergen island) in 2008–2019

Anton V. Terekhov[1,2], Uliana V. Prokhorova[1], Alexander L. Borisik[1], Vasiliy E. Demidov[1], Sergei R. Verkulich[1]*

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

[2] — *State Hydrological Institute, St. Petersburg, Russia*

[*]*antonvterekhov@gmail.com*

Summary

Previously published geodetic mass balance data indicate glacier shrinkage in the Barentsburg area of Svalbard since the beginning of the 20th century on the decadal time scale. However, observations for shorter time spans allowing one to compute the inter-annual variability of the mass balance are scarce. The study presents results of ground-based GNSS and the GPR surveys of the Austre Dahlfonna glacier (2 sq km) located on Spitsbergen island, south of the town of Barentsburg. According to the GPR survey of spring 2019 at 50 MHz frequency, the area-averaged ice thickness was equal to 82 m, while the maximum was 170 m. The results confirm the polythermal structure of the glacier, with a layer of underlying temperate ice. Since the end of the Little Ice Age, the area of Austre Dahlfonna has halved. By comparing the GNSS survey results (the end of the melt season of 2019) with the co-registered archived remote sensing data (ArcticDEM strip of 2013 and S0 Terrengmodell of 2008), it was computed that, within the last 12 years (2008–2019), Austre Dahlfonna lost 16 % of its volume, which corresponds to a geodetic mass balance of –12.05 ± 0.85 m w. e. The mass loss in 2008–2013 (5.22 ± 0.37 m w. e.) was lower than in 2013–2019 (6.83 ± 0.48 m w. e.), which is in agreement with the ongoing direct measurements on the neighboring Austre Grønfjordbreen glacier and with the archipelago-wide mass-balance patterns. We demonstrate that the less intensive glacier mass loss, which occurred in 2005–2012 and was detected previously for the whole archipelago, definitely took place in the Barentsburg area as well. This time interval is characterized by the prevalence of a negative NAO phase (65 % of recurrence), which may indicate more frequent intrusions of colder Arctic air masses. This fact proves that the mass-balance variability of the Barentsburg area glaciers is governed in time spans of 5–10 years by regional-scale factors, presumably by shifts in the atmospheric circulation regimes.

Keywords: Barents Sea, climate change, glacier, GPR, mass balance, North-Atlantic Oscillation, Svalbard.

For Citation: *Terekhov A.V., Prokhorova U.V. , Borisik A.L., Demidov V.E., Verkulich S.R.* Changes in volume and geometry of the Austre Dahlfonna glacier (Spitsbergen island) in 2008–2019. *Problemy Arktiki i Antarktiki.* Arctic and Antarctic Research. 2022, 68 (4): 370–383. [In Russian]. https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-4-370-383.

Received 26.07.2022 **Revised 17.09.2022** **Accepted 02.10.2022**

ВВЕДЕНИЕ

Архипелаг Шпицберген — один из крупнейших центров современного оледенения в Арктике. Проведенный в середине первого десятилетия XXI в. анализ данных дистанционного зондирования показал значительное ускорение темпов потери массы ледниками Шпицбергена. В работе [1] авторы на основе повторных лидарных съемок 1996 и 2002 гг. установили, что в этот временной промежуток средний баланс массы ледников архипелага составлял –0,19 м в. э. в год, что в 1,6 раза ниже, чем за предыдущие 30 лет. В 2003–2005 гг. снижение высоты поверхности ледников стало еще более интенсивным — в 4 раза выше, чем за первый доступный для расчета по архивным данным период с 1936 по 1962 г. [2]. Рекордно отрицательные показатели

баланса массы наблюдались и прямыми измерениями на абляционных рейках для ледников в окрестностях Баренцбурга [3, 4]. Теперь, в конце второго десятилетия XXI в., стало известно, что в 2005–2012 гг. на Шпицбергене последовал период некоторого повышения баланса массы, вновь сменившийся более отрицательными показателями с 2013 г. [5]. По гравиметрическим данным спутниковой программы GRACE было рассчитано, что в период 2005–2012 гг. суммарная потеря массы ледниками архипелага практически прекратилась [6]. В работе [7] на основе данных реанализа этот факт обоснован сменами атмосферной циркуляции в регионе, в результате которых в 2005–2012 гг. над архипелагом чаще господствовали более холодные арктические воздушные массы, приходящие с северо-запада. Если предположение верно, то подобная периодичность масс-балансовых характеристик должна была одновременно наблюдаться и в окрестностях Баренцбурга.

Несмотря на имеющиеся публикации о балансе массы некоторых ледников в районе Баренцбурга (например, работы [8, 9]), приводимые в них данные относятся либо к предыдущему столетию, либо к значительным по продолжительности интервалам лет, масштаба десятилетий, что не позволяет делать выводы о кратковременной изменчивости масс-балансовых характеристик в рассматриваемой области.

Баланс массы ледников района Баренцбурга в 2005–2012 гг. освещен в современных публикациях слабо. На сегодняшний день известен только один масс-балансовый ряд, охватывающий указанный период, с ледника Восточный Грёнфьорд [10]. Однако в распоряжении авторов имеется достаточное количество данных с ледника Восточный Дальфонна, которые позволят рассчитать баланс массы за два одинаковых по продолжительности периода до и после 2013 г. и проверить, действительно ли в недавнем прошлом имел место эпизод с повышением баланса массы ледников в окрестностях Баренцбурга. Это и является целью данного исследования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования. Ледник Восточный Дальфонна — горно-долинный ледник площадью около 2 км^2, расположенный приблизительно в 15 км к юго-западу от населенного пункта Баренцбург. Ледник занимает диапазон высот от 100 до 550 м, спускаясь от ледораздела с более крупным ледником Западный Грёнфьорд в долину Орустдален, относящуюся к водосбору Гренландского моря.

Натурные съемки. Георадиолокационная съемка была выполнена 4 и 6 апреля 2019 г. Маршруты съемки, общая длина которых составила 7 км, показаны на рис. 1. При производстве наблюдений использовался георадар Pulse EKKO PRO с антенной 50 МГц вместе с ГНСС системой Sokkia GRX2, работавшей в режиме RTK (Real time kinematic). Система сбора геофизической информации была размещена в специальных санях, перемещаемых по профилям при помощи снегохода. Шаг зондирования по профилю составил 0,5 м, при этом для каждой трассы записывались точные плановые и высотные координаты измерений.

Полученный массив геофизических данных был обработан в программе EKKO_Project V5 (Sensors&Software, Канада) по стандартному графу, включавшему введение поправок и смещений за положение ГНСС-приемника и разнос антенн, частотную фильтрацию сигнала и миграцию полученных разрезов для корректировки положения наклонных границ. На следующем этапе выполнялось ручное пикирование границы ложа ледника и пересчет полученных времен в глубины. Значение скорости электромагнитных волн принято равным 168 м·мкс$^{-1}$, как было рекомендовано для

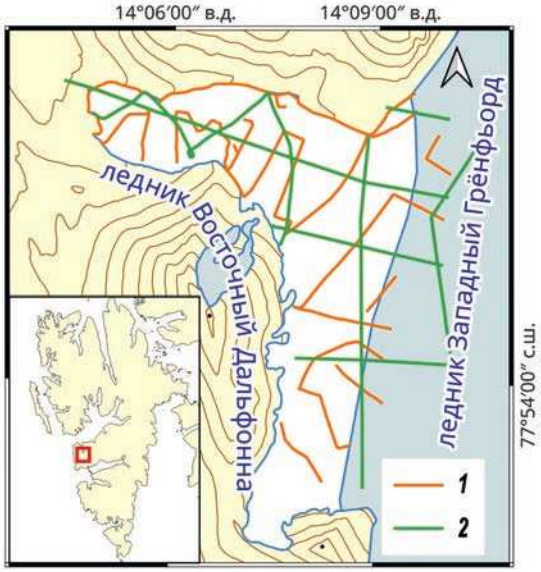

Рис. 1. Расположение ледника Восточный Дальфонна и маршруты съемок 2019 г.: *1* — топографическая съемка, *2* — георадарная съемка

Fig. 1. The location of the Austre Dahlfonna glacier and the routes of 2019 surveys: *1* — ground-based GNSS survey, *2* — GPR survey

ледников этой части Шпицбергена в работе [11]. На основании предыдущих измерений скоростей распространения электромагнитных волн в толще политермических ледников [12] авторами принята относительная погрешность скорости в 2 %, которая далее введена в полученные величины объемов ледника.

Наземная топографическая съемка на леднике была проведена 20 августа 2019 г., ближе к концу сезона абляции. Ее маршруты показаны на рис. 1. Работы проводились многоканальными ГНСС-приемниками Sokkia GRX-2 кинематическим методом с постобработкой. На основе результатов съемки, после предварительного отсева всех точек с вертикальной точностью хуже 10 см, была построена цифровая модель рельефа (ЦМР). Для интерполяции использован алгоритм Thin Plate Spline.

Контуры ледника. Контуры ледника Восточный Дальфонна, необходимые для расчета изменений объема, были определены на три момента времени: для 2008, 2013 и 2019 гг. Также для сравнения площадей и длин ледника нами были оконтурены наиболее ранний из доступных для анализа космических снимков, на 1963 г., и максимальное распространение ледника. Максимальные длина и площадь выделены по наибольшему покрытию морен в долине, отмеченному на топографических картах Kartdata Svalbard [13]. Наиболее вероятно, что эти морены относятся к моменту окончания Малого ледникового периода (далее МЛП, ~1900 г. [14]). Использованные для определения контуров ледника материалы перечислены в табл. 1.

Для оценки погрешности определения площадей по космическим снимкам вдоль контура ледника был построен буфер шириной в половину пикселя снимка. Площадь буфера была условно принята за погрешность. Там, где контур был отрисован по топографической съемке, погрешность принята пренебрежимой, поскольку плановая ошибка спутниковых измерений много меньше пикселя снимка.

Таблица 1

Материалы, использованные для получения контуров ледника Восточный Дальфонна
Table 1

Materials for the delineation of the Austre Dahlfonna glacier

Год	Источник	Разрешение
2019	Sentinel-2 + топографическая съемка	10 м
2013	Landsat-8 (LC08_L1TP_216004_20130928_20200912_02_T1)	15 м
2008	Kartdata Svalbard 1:100 000 (S100 Kartdata)	—
1963	ARGON (KH-5) (DS09058A024MC013)	30 м

Погрешность площадей на 2008 г. и на конец МЛП оценить сложно, поскольку для их расчета были использованы готовые картографические материалы. Поэтому эти величины приведены авторами без доверительных интервалов.

Изменения объема и массы ледника. Изменение объема ледника определено вычитанием друг из друга трех разновременных ЦМР: S0 Terrengmodell [15] на 2008 г., фрагмента ArcticDEM на 16 сентября 2013 г. [16] и ЦМР, полученной по топографической съемке 2019 г. Пересчет единиц объема в единицы массы производился путем умножения на величину плотности 850 ± 60 кг м$^{-3}$, как рекомендовано в работе [17].

Перед сравнением высот соответствующих пикселей ЦМР было необходимо предварительно устранить систематические различия в значениях, вызванные ошибками вертикальной привязки ЦМР. Фрагмент ArcticDEM был привязан на основе вектора переноса, рассчитанного создателями ЦМР на основе измерений IceSat и содержащегося в метаданных файла. Вектор сдвига (dz, dx, dy) составил (+1,243, +0,503, +3,088) метра.

Для корегистрации фрагмента ЦМР S0 Terrengmodell к ЦМР ArcticDEM был использован пакет demcoreg [18], реализующий на языке Python алгоритм взаимной привязки, разработанный Nuth и Kaab [19]. Вектор сдвига (dz, dx, dy) составил (+34,181, +0,637, –2,453) метра.

Все расчеты велись в системе высот от эллипсоида WGS84. Для перехода к среднему уровню моря из всех значений вычиталась величина 32,563 м, рассчитанная на основе спутниковых измерений в Баренцбурге и принятая постоянной для всего района работ. Далее все результаты представлены в системе высот от уровня моря.

Индекс Северо-Атлантического колебания (NAO). В работе использованы значения индекса NAO, рассчитанные организацией Climate Prediction Center (NOAA) и доступные на сайте [20].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Контуры и рельеф поверхности ледника Восточный Дальфонна по состоянию на конец сезона абляции 2019 г. показаны на рис. 2*а*. В расчеты характеристик ледника не включен крупный снежник, расположенный на крутом северном склоне горы Харальдфьеллет и недоступный для каких-либо наземных съемок. В последние годы снежник отделился от основной части ледника и распался на несколько частей, быстро деградируя. Чуть более чем за столетие, прошедшее после окончания МЛП, площадь ледника уменьшилась вдвое (табл. 2).

По расчетам авторов [5], современная снеговая линия на архипелаге Шпицберген расположена на высотах 500–550 м. На рис. 2*а* видно, что поверхность

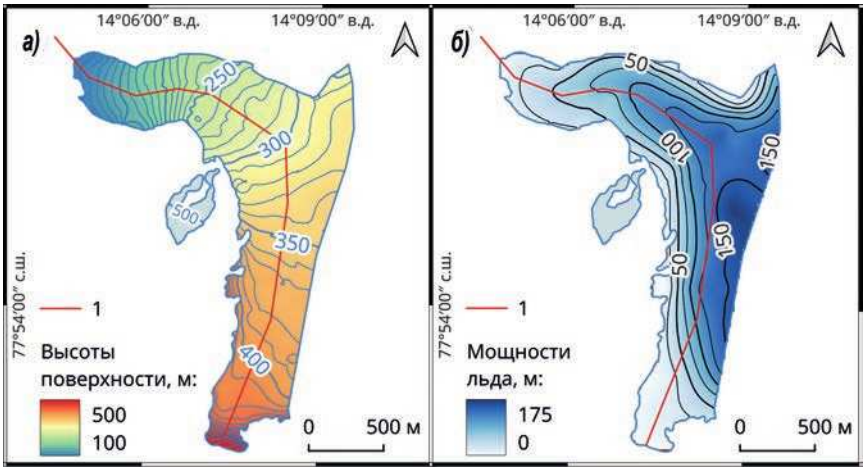

Рис. 2. Высоты поверхности ледника Восточный Дальфонна (*а*) и мощности льда (*б*), по состоянию на 2019 г. *1* — условная центральная линия вдоль ледника

Fig. 2. Surface topography of the Austre Dahlfonna glacier (*а*) and its ice thickness (*б*) in 2019. *1* — the glacier centerline

Таблица 2

Геометрические характеристики ледника Восточный Дальфонна в 1963, 2008, 2013 и 2019 гг.

Table 2

Geometric characteristics of the Austre Dahlfonna glacier in 1963, 2008, 2013 and 2019

Характеристики	Конец МЛП	1963	2008	2013	2019
Длина вдоль условной центральной линии, м	5 260	4 600	3 890	3 830	3 690
Площадь, км^2	4,12	3,36 ± 0,12	2,25	2,10 ± 0,06	1,92 ± 0,03
Общий объем, км^3	—	—	0,187 ± 0,003	0,174 ± 0,003	0,157 ± 0,003

ледника Восточный Дальфонна в настоящее время расположена полностью ниже этой границы и, следовательно, должна быть практически полностью лишена зоны аккумуляции.

На рис. 2*б* показано пространственное распределение запасов льда. Область с наибольшими мощностями до 170 м расположена вдоль ледораздела с Западным Грёнфьордом, в то время как средняя мощность льда составляет 82 м. На всех полученных георадиолокационных разрезах были прослежены участки теплого льда, что согласуется с результатами предыдущих геофизических съемок на частоте 20 Гц, представленными в работах [21, 22]. Пример обработанного георадиолокационного разреза с введенным рельефом, где видны отражения от поверхности раздела холодного и теплого льда, а также ложе и поверхность ледника, показан на рис. 3.

Величины снижения поверхности по двум временным интервалам (2008–2013 и 2013–2019 гг.) показаны на рис. 4. Видно, что снижение поверхности за первый из периодов значительно меньше, чем за последующий: средние величины различаются примерно на четверть. Значения убывают с увеличением высоты (рис. 5), из чего можно сделать вывод, что в недавнем прошлом изменения поверхности определялись в большей мере ее таянием, нежели движением и деформациями льда.

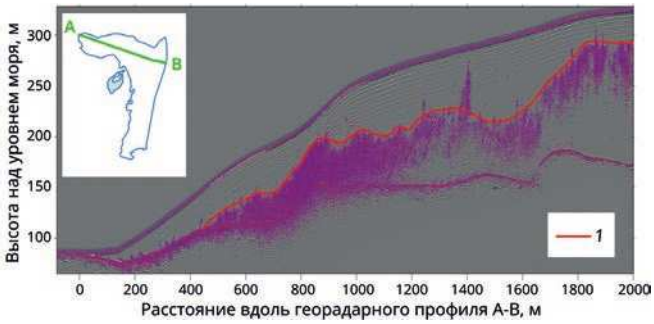

Рис. 3. Обработанный георадиолокационный разрез ледника Восточный Дальфонна по результатам съемки 2019 г.: *1* — поверхность раздела холодного и теплого льда

Fig. 3. Processed cross-section of the Austre Dahlfonna glacier based on GPR-survey of 2019: *1* — boundary between cold and temperate ice

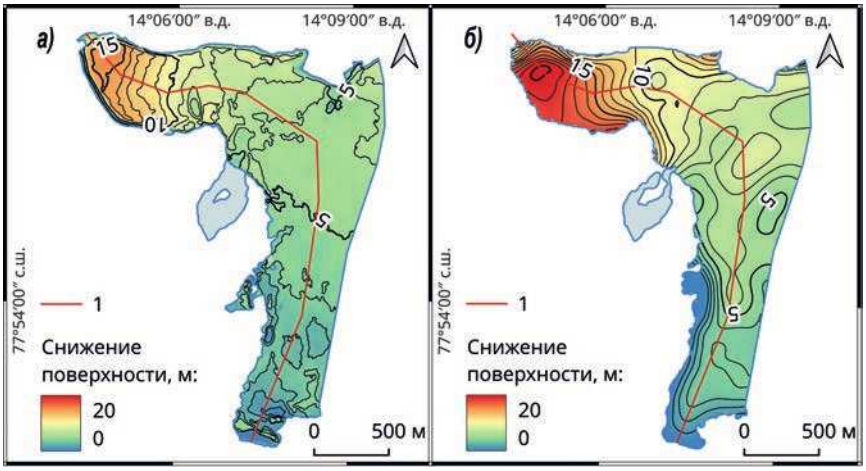

Рис. 4. Изменение высоты поверхности ледника Восточный Дальфонна по двум шестилетним интервалам: 2008–2013 гг. (*а*), 2013–2019 гг. (*б*). *1* — условная центральная линия вдоль ледника

Fig. 4. Surface lowering of the Austre Dahlfonna glacier within two six-year spans: 2008–2013 (*а*), 2013–2019 (*б*). *1* — the glacier centerline

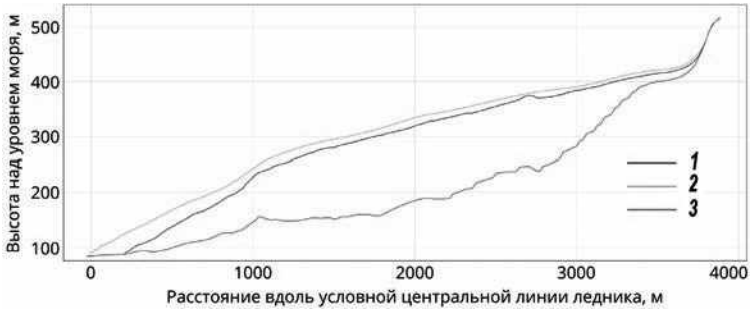

Рис. 5. Изменения продольного профиля ледника Восточный Дальфонна в 2008–2019 гг.: *1* — поверхность в 2019 г., *2* — поверхность в 2008 г., *3* — ложе ледника

Fig. 5. The changes in the longitudinal profile of the Austre Dahlfonna glacier, 2008–2019: *1* — surface in 2019, *2* — surface in 2008, *3* — bed topography

Просуммировав по площади ледника полученные значения, получим, что за период в 12 балансовых лет, с 2008 по 2019 г., Восточный Дальфонна потерял 30,2 млн м^3 льда, или 16,1 % своего объема (табл. 3). Это эквивалентно средней по площади потере массы в 12,05 ± 0,85 м в. э. Грубая экстраполяция позволяет заключить, что ледник полностью исчезнет примерно через 60 лет, что, для сравнения, в два раза дольше, чем подобная же экстраполяция дает леднику Альдегонда, расположенному в нескольких километрах севернее [23].

Таблица 3

Изменение характеристик и баланс массы ледника Восточный Дальфонна в 2008–2019 гг.

Table 3

Changes in the parameters of the Austre Dahlfonna glacier and its mass balance in 2008–2019

Характеристики	2008–2013 гг.	2013–2019 гг.	2008–2019 гг.
Уменьшение площади, км^2	0,146	0,186	0,332
Уменьшение объема, млн м^3	13,3 млн м^3	16,9 млн м^3	30,2 млн м^3
Уменьшение объема (от объема на 2008 г.)	7,1 %	9,0 %	16,1 %
Потеря массы, млн т	11,3 ± 0,8	14,3 ± 1,0	25,6 ± 1,8
Среднее по площади снижение поверхности, м	6,14	8,03	14,17
Баланс массы за период, м в. э.	–5,22 ± 0,37	–6,83 ± 0,48	–12,05 ± 0,85

Использованный в расчетах фрагмент ArcticDEM, а также ЦМР, построенная по результатам топографической съемки авторов, относятся к концу сезонов абляции. Вскоре после проведения топосъемки таяние льда на поверхности замедлилось практически до нуля, что было зафиксировано по абляционным рейкам, установленным на соседнем леднике Западный Грёнфьорд. ЦМР на 2008 г. была получена Норвежским полярным институтом на основе аэрофотосъемки, выполненной в середине июля, когда отступление снеговой линии вверх по леднику только начиналось, а значит, таяние льда было минимально, — поэтому ЦМР можно отнести к самому началу сезона абляции 2008 г. Таким образом, оба рассматриваемых интервала включают в себя ровно по шесть балансовых лет и могут быть сопоставлены друг с другом напрямую, без дополнительных коррекций.

В табл. 3 видно, что в 2008–2013 гг. средняя потеря массы ледником действительно была ниже, чем в 2013–2019 гг. Данных по соседним ледникам для сравнения имеется немного. В статье [24] приводятся результаты масс-балансового мониторинга ледников Альдегонда и Западный Грёнфьорд в 2016–2019 гг. Для аналогичного данной работе шестилетнего интервала 2013–2019 гг. на основе аэрофотосъемки был рассчитан баланс для ледника Веринг [25]. Однако период 2005–2012 гг. освещен в литературе плохо. Так, для ледника Веринг расчет для этого интервала оказался невозможен, поскольку ледник лежит на стыке двух разновременных фрагментов (2008 и 2010 гг.) ЦМР S0 Terrengmodell, которая является единственным источником о рельефе поверхности в указанный промежуток времени. На леднике Западный Грёнфьорд мониторинговые работы были начаты только в 2013 г., то есть уже после предполагаемой смены режима циркуляции.

Единственный масс-балансовый ряд, опубликованный в настоящее время и доступный для сравнения, относится к леднику Восточный Грёнфьорд. В работе [10] показано, что геодезический баланс массы Восточного Грёнфьорда соста-

вил –0,97 м в. э. в год для периода 2008–2013 гг. и –1,45 м в. э. в год для 2013–2017 гг. Прямое сопоставление абсолютных значений с полученными в настоящем исследовании мало информативно, поскольку они зависят от высотного распределения конкретного ледника. Однако видно, что период до 2013 г. также характеризуется значительно менее отрицательным балансом массы.

Циркуляция в атлантическом секторе Арктики хорошо описывается с помощью индекса Северо-Атлантического колебания (NAO). Положительные и отрицательные фазы индекса, рассчитываемого на основе разности давлений между Исландским минимумом и Азорским максимумом, являются характеристикой атмосферной циркуляции в регионе. Предположительные механизмы связи индекса NAO с массбалансовыми характеристиками ледников на севере Европы описаны в работе [26]: при положительной фазе NAO шторм-трек смещается глубоко на север, вследствие чего Шпицберген получает больше тепла за счет его переноса циклонами; при отрицательной фазе шторм-трек смещается южнее, за счет чего архипелаг более подвержен влиянию арктических воздушных масс с севера и востока.

Для анализа индекса NAO повторяемость его положительных и отрицательных фаз в течение месяцев с положительной средней температурой воздуха (июнь–сентябрь) была сгруппирована в равные по продолжительности периоды по шесть лет. Два из периодов (2008–2013 и 2014–2019 гг.) совпадают с интервалами расчета баланса масс ледника Восточный Дальфонна, а предшествующий им период 2002–2007 гг. примерно соответствует наблюдавшемуся в начале столетия усилению интенсивности таяния. На рис. 6, где изображено процентное соотношение фаз NAO по указанным периодам, видно, что более благоприятный для ледников интервал 2008–2013 гг. действительно характеризуется повышенной частотой отрицательной фазы NAO. Это согласуется с заключением о более частых вторжениях арктических воздушных масс в этот промежуток времени летом, сформулированным на основе реанализа в работе [7].

Таким образом, баланс массы ледников Восточный Дальфонна и Восточный Грёнфьорд согласуются между собой и укладываются в общую по архипелагу Шпицберген изменчивость, связанную, вероятно, со сменами режимов атмосферной циркуляции. Результаты измерений, показанные в работах [8, 24], демонстрируют, что в конкретные годы интенсивность таяния ледников района Грёнфьорда различается: максимумы и минимумы потери массы могут приходиться для разных ледников на разные годы.

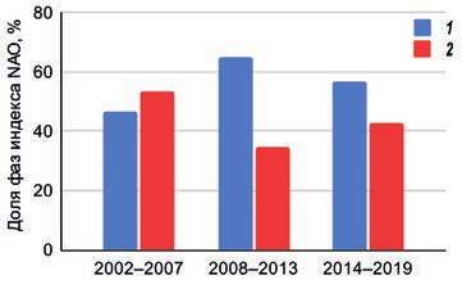

Рис. 6. Соотношение повторяемостей фаз индекса NAO за июнь–сентябрь в 2002–2019 гг.: *1* — отрицательная фаза, *2* — положительная фаза

Fig. 6. Recurrence of the NAO index phases (June–September) in 2002–2019: *1* — negative phase, *2* — positive phase

Этот факт объясняется авторами локальными особенностями местного масштаба, к примеру, различиями в экспозиции и в конфигурации скального обрамления, затеняющего ледник. Исходя из нашего анализа, можно предположить, что в более продолжительные периоды времени, порядка 5–10 лет, изменчивость масс-балансовых характеристик в районе Баренцбурга определяется сменами режимов региональной атмосферной циркуляции. Это делает их надежным индикатором климатических изменений масштаба всего архипелага Шпицберген. Подобная гипотеза может быть подтверждена будущей публикацией рядов результатов мониторинга с ледника Альдегонда, которые охватывают последние 20 лет, то есть все три периода, выделяющихся в изменчивости баланса массы ледников Шпицбергена с начала XXI в.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе были представлены результаты топографической и геофизической съемок на леднике Восточный Дальфонна, расположенном на архипелаге Шпицберген к югу от поселка Баренцбург. Средняя толщина льда по состоянию на 2019 г. составляет 82 м, максимальная — 170 м. За последнее столетие, с конца МЛП, Восточный Дальфонна потерял около половины своей площади, уменьшившись в размерах до 2 км^2. На основе сравнения с архивными данными дистанционного зондирования показано, что за 12 балансовых лет (2008–2019) ледник потерял 16 % своего объема, что эквивалентно потере массы в 12,05 ± 0,85 м в. э. При этом, в первую половину этого периода, в 2008–2013 гг., потеря массы замедлялась по отношению к последующему интервалу 2013–2019 гг., что согласуется как с наблюдениями на соседнем леднике Восточный Грёнфьорд, так и с общей масс-балансовой изменчивостью на архипелаге. Это приводит авторов к выводу, что на временных интервалах порядка 5–10 лет изменчивость баланса массы ледников в районе Баренцбурга определяется факторами регионального масштаба, а именно сменами режимов атмосферной циркуляции на Шпицбергене, характеризуемых преобладанием положительной либо отрицательной фазы индекса NAO летом. Таким образом, ледники в рассматриваемом районе могут являться надежным индикатором региональных климатических изменений на архипелаге в целом.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Исследование выполнено в рамках темы 5.1.4 Плана НИТР Росгидромета «Мониторинг состояния и загрязнения природной среды, включая криосферу, в Арктическом бассейне и районах научно-исследовательского стационара “Ледовая база Мыс Баранова”, Гидрометеорологической обсерватории Тикси и Российского научного центра на архипелаге Шпицберген».

Благодарности. Авторы выражают благодарность участникам Российской арктической экспедиции на архипелаге Шпицберген ФГБУ «ААНИИ» за предоставленное оборудование, за помощь в организации и проведении полевых работ.

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

Funding. This study was funded under Project 5.1.4, “Monitoring of State and Pollution of the Environment, Including the Cryosphere, in the Arctic Basin and in the Area of Scientific Station Ice Base Cape Baranov, Hydrometeorological Observatory of Tiksi and Russian Scientific Centre on Spitsbergen”, within the Plan NITR of Roshydromet 2020–24.

Acknowledgements. The authors are grateful to the Russian Arctic Expedition on Svalbard (Arctic and Antarctic Research Institute, Saint Petersburg, Russia) for providing logistics, equipment and for assistance in carrying out the field studies.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bamber J.L., Krabill W., Raper V., Dowdeswell J.A., Oerlemans J.* Elevation changes measured on Svalbard glaciers and ice caps from airborne laser data // Annals of Glaciology. 2005. V. 42. P. 202–208.

2. *Kohler J., James T.D., Murray T., Nuth C., Brandt O., Barrand N.E., Aas H.F., Luckman A.* Acceleration in thinning rate on western Svalbard glaciers // Geophysical Research Letters 2007. V. 34. L18502. doi:10.1029/2007GL030681.

3. *Мавлюдов Б.Р., Соловьянова И.Ю.* Водно-ледовый баланс ледника Альдегонда в 2002/03 г. // Материалы гляциологических исследований. 2007. № 102. С. 206–208.

4. *Solovyanova I.Y., Mavlyudov B.R.* Mass balance observations on some glaciers in 2004/2005 and 2005/2006 balance years, Nordenskjold Land, Spitsbergen // The Dynamics and Mass Budget of Arctic Glaciers. 2007. P. 115–120. URL: https://webspace.science.uu.nl/~broek112/home.php_files/Publications_MvdB/2007_Workshop_Pontresina.pdf (дата обращения: 30.11.2022).

5. *Noël B., Jakobs C.L., van Pelt W.J.J., Lhermitte S., Wouters B., Kohler J., Hagen J.O., Luks B., Reijmer C.H., van de Berg W.J., van den Broeke M.R.* Low elevation of Svalbard glaciers drives high mass loss variability // Nature Communications. 2020. V. 11. 4597. P. 1–8. URL: https://doi.org/10.1038/s41467-020-18356-1 (дата обращения: 30.11.2022).

6. *Wouters B., Gardner A., Moholdt G.* Global glacier mass loss during the GRACE satellite mission (2002–2016) // Frontiers in Earth Science. 2019. V. 7. P. 1–11.

7. Lang C., Fettweis X., Erpicum M. Stable climate and surface mass balance in Svalbard over 1979–2013 despite the Arctic warming // The Cryosphere. 2015. V. 9. P. 83–101. https://doi.org/10.5194/tc-9-83-2015.

8. *Navarro F.J., Glazovsky A.F., Macheret Y.Y., Vasilenko E.V., Corcuera M.I., Cuadrado M.L.* Ice-volume changes (1936–1990) and structure of Aldegondabreen, Spitsbergen // Annals of Glaciology. 2005. V. 42. P. 158–162.

9. *Martín-Español A., Vasilenko E., Navarro F., Otero J., Lapazaran J., Lavrentiev I., Macheret Y., Machío F., Glazovsky A*. Ice volume estimates from ground-penetrating radar surveys,western Nordenskiöld Land glaciers, Svalbard // Annals of Glaciology. 2013. V. 54. P. 211–217.

10. *Elagina N., Kutuzov S., Rets E., Smirnov A., Chernov R., Lavrentiev I., Mavlyudov B.* Mass Balance of Austre Grønfjordbreen, Svalbard, 2006–2020, Estimated by Glaciological, Geodetic and Modeling Aproaches // Geosciences. 2021. V. 11. № 2. URL: https://doi.org/10.3390/geosciences11020078 (дата обращения: 30.11.2022).

11. *Мачерет Ю.Я.* Радиозондирование ледников. М.: Научный Мир, 2006. 389 с.

12. *Bradford J., Nichols J., Mikesell T., Harper J.* Continuous profiles of electromagnetic wave velocity and water content in glaciers: An example from Bench Glacier, Alaska, USA // Annals of Glaciology. 2009. 50 (51). P. 1–9. URL: doi:10.3189/172756409789097540 (дата обращения: 30.11.2022).

13. Norwegian Polar Institute. Kartdata Svalbard 1:100 000 (S100 Kartdata) / Map Data [Data set]. Norwegian Polar Institute. 2014. URL: https://doi.org/10.21334/npolar.2014.645336c7 (дата обращения: 30.11.2022).

14. *Lovell H., Fleming E., Benn D., Hubbard B., Lukas S., Naegeli K.* Former dynamic behaviour of a cold-based valley glacier on Svalbard revealed by basal ice and structural glaciology investigations // Journal of Glaciology. 2005. V. 61 (226). P. 309–328. doi:10.3189/2015JoG14J120.

15. Norwegian Polar Institute. Terrengmodell Svalbard (S0 Terrengmodell) / Map Data [Data set]. Norwegian Polar Institute. 2014. URL: https://doi.org/10.21334/npolar.2014.dce53a47 (дата обращения: 30.11.2022).

16. *Porter C., Morin P., Howat I., Noh M.-J., Bates B., Peterman K., Keesey S., Schlenk M., Gardiner J., Tomko K., Willis M., Kelleher C., Cloutier M., Husby E., Foga S., Nakamura H., Platson M., Wethington M. Jr., Williamson C., Bauer G., Enos J., Arnold G., Kramer W., Becker P., Doshi A.,*

D'Souza C., Cummens P., Laurier F., Bojesen M. "ArcticDEM" Dataset. 2018. URL: https://doi.org/10.7910/DVN/OHHUKH (дата обращения: 30.11.2022).

17. *Huss M.* Density assumptions for converting geodetic glacier volume change to mass change // The Cryosphere. 2013. V. 7. P. 877–887. https://doi.org/10.5194/tc-7-877-2013.

18. *Shean D.E., Alexandrov O., Moratto Z., Smith B.E., Joughin I.R., Porter C.C., Morin P.J.* An automated, open-source pipeline for mass production of digital elevation models (DEMs) from very high-resolution commercial stereo satellite imagery // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2016. V. 116. P. 101–117. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2016.03.012.

19. *Nuth C., Kääb A.* Co-registration and bias corrections of satellite elevation data sets for quantifying glacier thickness change // The Cryosphere. 2011. V. 5. P. 271–290. URL: https://doi.org/10.5194/tc-5-271-2011 (дата обращения: 30.11.2022).

20. North Atlantic Oscillation. National Centers for Environmental Prediction — Climate Prediction Center (NOAA). URL: https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/pna/nao.shtml (дата обращения: 25.07.2022).

21. *Мачерет Ю.Я., Глазовский А.Ф., Лаврентьев И.И., Марчук И.О.* Распределение холодного и теплого льда в ледниках на Земле Норденшельда (Шпицберген) по данным наземного радиозондирования // Лед и снег. 2019. Т. 59. № 2. С. 149–166. URL: https://doi.org/10.15356/20766734-2019-2-430 (дата обращения 25.07.2022).

22. *Лаврентьев И.И., Глазовский А.Ф., Мачерет Ю.Я., Мацковский В.В., Муравьев А.Я.* Запасы льда в ледниках на Земле Норденшельда (Шпицберген) и их изменения за последние десятилетия // Лед и снег. 2019. Т. 59. № 1. С. 23–38. URL: https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-1-23-38 (дата обращения 25.07.2022).

23. *Holmlund E.* Aldegondabreen glacier change since 1910 from structure-from-motion photogrammetry of archived terrestrial and aerial photographs: Utility of a historic archive to obtain century-scale Svalbard glacier mass losses // Journal of Glaciology. 2021. V. 67 (261). P. 107–116. doi:10.1017/jog.2020.89.

24. *Сидорова О.Р., Тарасов Г.В., Веркулич С.Р., Чернов Р.А.* Изменчивость поверхностной абляции горных ледников Западного Шпицбергена // Проблемы Арктики и Антарктики. 2019. № 65 (4). С. 438–448.

25. *Терехов А.В., Демидов В.Э., Казаков Э.Э., Анисимов М.А., Веркулич С.Р.* Определение баланса массы ледника Веринг (Западный Шпицберген) геодезическим методом, 2013–2019 годы // Криосфера Земли. 2020. Т. XXIV. № 5. С. 55–63. doi: 10.21782/KZ1560-7496-2020-5(55-63).

26. *Bonan D., Christian J., Christianson K.* Influence of North Atlantic climate variability on glacier mass balance in Norway, Sweden and Svalbard // Journal of Glaciology. 2019. V. 65 (252). C. 580–594. doi:10.1017/jog.2019.35 (дата обращения: 25.07.2022).

REFERENCES

1. *Bamber J.L., Krabill W., Raper V., Dowdeswell J.A., Oerlemans J.* Elevation changes measured on Svalbard glaciers and ice caps from airborne laser data. Annals of Glaciology. 2005, 42: 202–208.

2. *Kohler J., James T.D., Murray T., Nuth C., Brandt O., Barrand N.E., Aas H.F., Luckman A.* Acceleration in thinning rate on western Svalbard glaciers. Geophysical Research Letters. 2007, 34: L18502. doi:10.1029/2007GL030681.

3. *Mavliudov B.R., Solov'ianova I.Iu.* Water-ice balance of Aldegonda glacier in 2002/03. *Materialy gliatsiologicheskikh issledovanii.* Data of Glaciological Studies. 2007, 102: 206–208. [In Russian].

4. *Solovyanova I.Y., Mavlyudov B.R.* Mass balance observations on some glaciers in 2004/2005 and 2005/2006 balance years, Nordenskjold Land, Spitsbergen. The Dynamics and Mass Budget of Arctic Glaciers. 2007: 115–120. Available at: https://webspace.science.uu.nl/~broek112/home.php_files/Publications_MvdB/2007_Workshop_Pontresina.pdf (accessed 30.11.2022).

5. *Noël B., Jakobs C.L., van Pelt W.J.J., Lhermitte S., Wouters B., Kohler J., Hagen J.O., Luks B., Reijmer C.H., van de Berg W.J., van den Broeke M.R.* Low elevation of Svalbard glaciers drives high mass loss variability. Nature Communications. 2020, 11 (4597): 1–8. Available at: https://doi.org/10.1038/s41467-020-18356-1 (accessed 30.11.2022).

6. *Wouters B., Gardner A., Moholdt G.* Global glacier mass loss during the GRACE satellite mission (2002–2016). Frontiers in Earth Science. 2019, 7 (11): 1–11.

7. *Lang C., Fettweis X., Erpicum M.* Stable climate and surface mass balance in Svalbard over 1979–2013 despite the Arctic warming. The Cryosphere. 2015, 9: 83–101. Available at: https://doi.org/10.5194/tc-9-83-2015 (accessed 30.11.2022).

8. *Navarro F.J., Glazovsky A.F., Macheret Y.Y., Vasilenko E.V., Corcuera M.I., Cuadrado M.L.* Ice-volume changes (1936–1990) and structure of Aldegondabreen, Spitsbergen. Annals of Glaciology. 2005, 42: 158–162.

9. *Martín-Español A., Vasilenko E., Navarro F., Otero J., Lapazaran J., Lavrentiev I., Macheret Y., Machío F., Glazovsky A.* Ice volume estimates from ground-penetrating radar surveys,western Nordenskiöld Land glaciers, Svalbard. Annals of Glaciology. 2013, 54: 211–217.

10. *Elagina N., Kutuzov S., Rets E., Smirnov A., Chernov R., Lavrentiev I., Mavlyudov B.* Mass Balance of Austre Grønfjordbreen, Svalbard, 2006–2020, Estimated by Glaciological, Geodetic and Modeling Aproaches. Geosciences. 2021, 11 (2): 78. Available at: https://doi.org/10.3390/geosciences11020078. (accessed 30.11.2022).

11. *Macheret Iu.Ia. Radiozondirovanie lednikov.* Radiosounding of glaciers. Moscow: Nauchnyi Mir, 2006: 389 p. [In Russian].

12. *Bradford J., Nichols J., Mikesell T., Harper J.* Continuous profiles of electromagnetic wave velocity and water content in glaciers: An example from Bench Glacier, Alaska, USA. Annals of Glaciology. 2009, 50 (51): 1–9. Available at: doi:10.3189/172756409789097540 (accessed 30.11.2022).

13. Norwegian Polar Institute. Kartdata Svalbard 1:100 000 (S100 Kartdata) / Map Data [Data set]. Norwegian Polar Institute. 2014. Available at: https://doi.org/10.21334/npolar.2014.645336c7 (accessed 30.11.2022).

14. *Lovell H., Fleming E., Benn D., Hubbard B., Lukas S., Naegeli K.* Former dynamic behaviour of a cold-based valley glacier on Svalbard revealed by basal ice and structural glaciology investigations. Journal of Glaciology. 2005, 61 (226): 309–328. doi:10.3189/2015JoG14J120.

15. Norwegian Polar Institute. Terrengmodell Svalbard (S0 Terrengmodell) / Map Data [Data set]. Norwegian Polar Institute. 2014. Available at: https://doi.org/10.21334/npolar.2014.dce53a47 (accessed 30.11.2022).

16. *Porter C., Morin P., Howat I., Noh M.-J., Bates B., Peterman K., Keesey S., Schlenk M., Gardiner J., Tomko K., Willis M., Kelleher C., Cloutier M., Husby E., Foga S., Nakamura H., Platson M., Wethington M. Jr., Williamson C., Bauer G., Enos J., Arnold G., Kramer W., Becker P., Doshi A., D'Souza C., Cummens P., Laurier F., Bojesen M.* "ArcticDEM" Dataset. 2018. Available at: https://doi.org/10.7910/DVN/OHHUKH (accessed 30.11.2022).

17. *Huss M.* Density assumptions for converting geodetic glacier volume change to mass change. The Cryosphere. 2013, 7: 877–887. https://doi.org/10.5194/tc-7-877-2013 (accessed 30.11.2022).

18. *Shean D.E., Alexandrov O., Moratto Z., Smith B.E., Joughin I.R., Porter C.C., Morin P.J.* An automated, open-source pipeline for mass production of digital elevation models (DEMs) from very high-resolution commercial stereo satellite imagery. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2016, 116: 101–117. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2016.03.012.

19. *Nuth C., Kääb A.* Co-registration and bias corrections of satellite elevation data sets for quantifying glacier thickness change. The Cryosphere. 2011, 5: 271–290. Available at: https://doi.org/10.5194/tc-5-271-2011 (accessed 30.11.2022).

20. North Atlantic Oscillation. National Centers for Environmental Prediction — Climate Prediction Center (NOAA). Available at: https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/pna/nao.shtml (accessed 25.07.2022).

21. *Macheret Y.Y., Glazovsky A.F., Lavrentiev I.I., Marchuk I.O.* Distribution of cold and temperate ice in glaciers on the Nordenskiold Land, Spitsbergen, from ground-based radio-echo sounding. *Led i sneg.* Ice and Snow. 2019, 59 (2): 149–166. [In Russian]. Available at: https://doi.org/10.15356/20766734-2019-2-430 (accessed 30.11.2022).

22. *Lavrentiev I.I., Glazovsky A.F., Macheret Y.Y., Matskovsky V.V., Muravyev A.Y.* Reserve of ice in glaciers on the Nordenskiöld Land, Spitsbergen, and their changes over the last decades. *Led i sneg.* Ice and Snow. 2019, 59 (1): 23–38. [In Russian]. Available at: https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-1-23-38 (accessed 30.11.2022).

23. *Holmlund E.* Aldegondabreen glacier change since 1910 from structure-from-motion photogrammetry of archived terrestrial and aerial photographs: Utility of a historic archive to obtain century-scale Svalbard glacier mass losses. Journal of Glaciology. 2021, 67 (261): 107–116. doi:10.1017/jog.2020.89.

24. *Sidorova O.R., Tarasov G.V., Verkulich S.R., Chernov R.A.* Surface ablation variability of mountain glaciers of West Spitsbergen. *Problemy Arktiki i Antarktiki.* Arctic and Antarctic Research. 2019, 65 (4): 438–448. [In Russian].

25. *Terekhov A.V., Demidov V.E., Kazakov E.E., Anisimov M.A., Verkulich S.R.* Geodetic mass balance of Voring glacier, Western Spitsbergen, in 2013–2019. *Kriosfera Zemli.* Earth's Cryosphere. 2020, XXIV: 55–63. doi:10.21782/KZ1560-7496-2020-5(55-63).

26. *Bonan D., Christian J., Christianson K.* Influence of North Atlantic climate variability on glacier mass balance in Norway, Sweden and Svalbard. Journal of Glaciology. 2019, 65 (252): 580–594. doi:10.1017/jog.2019.35.

https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-4-384-405
УДК 551.345+435.522:551.583.13:528

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ **ORIGINAL ARTICLE**

Мониторинг изменений рельефа полигональных торфяников, примыкающих к автодороге Заполярное — Тазовский

Е.М. Бабкин[1], Е.А. Бабкина[1], М.О. Лейбман[1,2], Р.Р. Хайруллин[1], А.В. Хомутов[1,2]*

[1] — *Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, г. Тюмень, Россия*

[2] — *Тюменский государственный университет, Институт экологической и сельскохозяйственной биологии (Х-BIO), г. Тюмень, Россия*

[*]*zmbabkin@gmail.com*

Резюме

Вытаивание полигонально-жильных льдов (ПЖЛ) определяет динамику рельефа полигональных торфяников. Массивы полигональных торфяников Пур-Тазовского междуречья составляют в среднем 6,5 % от общей площади. Целью исследования является установление краткосрочных темпов и направленности изменения рельефа торфяников под совместным действием техногенных и естественных факторов, основанное на мониторинге за период 2005–2022 гг. По спутниковым снимкам и ортофотопланам оконтурены морфологические элементы торфяника и определены их площади за разные годы. Исследования проведены на торфянике, непосредственно прилегающем к автодороге, покрытой бетонными плитами (Т1), и на фоновом торфянике на удалении примерно в 1,5 км от дороги (Т2). Для выявления естественных причин изменения рельефа торфяников рассмотрено влияние базовых климатических характеристик. Установлено, что на участке к северо-западу от дороги наблюдается стабилизация полигонального торфяника Т1. На юго-восточном участке Т1 деградация после строительства дороги резко усилилась. Полигональные канавы расширялись за счет деградации полигонов. На фоновом торфянике Т2 скорость разрушения поверхности несколько выше, чем на северо-западном участке Т1. Сопоставление основных показателей климата и скоростей деградации полигонального рельефа не дало явных зависимостей. Вероятно, большее значение имеет режим атмосферных осадков, перераспределение поверхностного стока и смена режимов затопления полигональных канав и их дренирования, определяемого ритмичным ходом деградации рельефа.

Ключевые слова: БПЛА-съемка, климатические параметры, полигоны, полигональные канавы, полигонально-жильные льды, спутниковые снимки, сток, термокарст, термоэрозия, техногенное воздействие.

Для цитирования: *Бабкин Е.М., БабкинаЕ.А., ЛейбманМ.О., Хайруллин Р.Р., Хомутов А.В.* Мониторинг изменений рельефа полигональных торфяников, примыкающих к автодороге Заполярное — Тазовский // Проблемы Арктики и Антарктики. 2022. Т. 68. № 4. С. 384–405. https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-4-384-405.

Поступила 15.11.2022 **После переработки 03.12.2022** **Принята 05.12.2022**

Monitoring of the relief changes in polygonal peat plateaus adjacent to the highway Zapolyarnoe — Tazovsky

Evgeny M. Babkin[1], Elena A. Babkina[1], Marina O. Leibman[1,2], Rustam R. Khayrullin[1], Artem V. Khomutov[1,2]*

[1] — *Earth Cryosphere Institute of Tyumen Scientific Centre, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Tyumen, Russia*

[2] — *University of Tyumen, Institute of Environmental and Agricultural Biology (X-BIO), Tyumen, Russia*

[*]*zmbabkin@gmail.com*

Summary

The thawing of polygonal ice wedges determines the dynamics of polygonal peatland relief. The polygonal peat plateaus in the Pur-Taz interfluve account for an average of 6,5 % of the total area. The purpose of the proposed study is to establish the short-term rates and direction of change in the plateaus' relief under the combined action of technogenic and natural factors, using monitoring data for the period 2005–2022. Based on satellite images and orthophotoplans, elements of the peat plateaus have been outlined and their areas have been determined for different time slices. The studies were carried out on a peat plateau immediately adjacent to the highway (T1) and on a background peat plateau at a distance of about 1.5 km from the highway (T2). To identify the natural causes of changes in the relief of the peat plateaus, the influence of climatic parameters is considered. The rates of relief change in natural conditions and under the impact of the highway are also compared. It has been established that in the area to the north-west of the highway the relief of the T1 polygonal peat plateau has stabilized. In the south-east section of T1, degradation has sharply increased after the construction of the highway. Due to the degradation of the polygons, the polygonal troughs expanded. In the background peat plateau T2, the rate of relief degradation is somewhat higher than in the northwestern portion of T1. Comparison of the main climatic parameters and degradation rates of the polygonal relief did not show any clear correlations. Probably, of greater importance are the regime of atmospheric precipitation, the redistribution of surface runoff and recurrence of flooding and drainage of the polygonal troughs, determined by the rhythmic course of the relief degradation.

Keywords: climatic controls, ice wedges, polygons, polygonal troughs, runoff, satellite imagery, technogenic impact, thermoerosion, thermokarst, UAV survey.

For Citation: *Babkin E.M., Babkina E.A., Leibman M.O., Khayrullin R.R., Khomutov A.V.* Monitoring of the relief changes in polygonal peat plateaus adjacent to the highway Zapolyarnoe — Tazovsky. *Problemy Arktiki i Antarktiki.* Arctic and Antarctic Research. 2022, 68 (4): 384–405. [In Russian]. https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-4-384-405.

Received 15.11.2022 **Revised 03.12.2022** **Accepted 05.12.2022**

ВВЕДЕНИЕ

На южном пределе сплошного распространения многолетнемерзлых пород в Ямало-Ненецком автономном округе (ЯНАО) распространены торфяники с развитым полигональным рельефом, который формируется системой полигонально-жильных льдов (ПЖЛ), достигающих мощности 5 м [1–7]. Существует несколько классификаций торфяников, в основном морфологических с выделением бугристых, плоских и валиковых [4, 8, 9]. Стадийность в развитии рельефа торфяников в связи с динамикой растительности рассматривает А.П. Тыртиков [4]. Н.Н. Романовский [10] оценивает влияние изменений температурного режима, состава и влажности пород в ходе климатических колебаний на чередование стадий развития полигонального микрорельефа. В этих работах рассматривается долгосрочная эволюция торфяников, сопряженная с их переходом

от валиковых к плоскобугристым и далее к выпукло-бугристым. Однако никто ранее не оценивал краткосрочные быстрые изменения рельефа торфяников, связанные с совместным действием техногенных и естественных факторов.

ПЖЛ в торфяниках формируются столетиями и тысячелетиями. Оттаивание же может происходить в течение десятилетий [11–13]. Деградации ПЖЛ способствует потепление, особенно увеличение температуры воздуха и количества осадков в летний период [11, 14, 15]. За счет этого происходит увеличение глубины многолетнего протаивания с достижением кровли ПЖЛ. Кроме того, увеличение глубины протаивания, повышение температуры пород, уменьшение влажности и последующее вытаивание ПЖЛ могут быть связаны с нарушениями почвенно-растительного покрова, обусловленными такими причинами, как пожары, проезд вездеходной техники, строительство и эксплуатация автодорог [8, 16–22]. Тем самым провоцируется активизация процессов термокарста и термоэрозии. В некоторых исследованиях отмечается, что деградация ПЖЛ связана главным образом с экстремальными значениями летней температуры воздуха и сумм зимних осадков, а не с постепенным потеплением климата [11, 23–25].

Несмотря на интерес к изучению торфяников, последнее время основное внимание уделяется изучению генезиса и свойств торфа [6, 26–28]. Публикаций же об особенностях развития торфяников в современных климатических и антропогенных условиях недостаточно [29, 30–32].

Деградация ПЖЛ определяет динамику рельефа полигональных торфяников. Исследование процессов деградации ПЖЛ и динамики полигонального рельефа включает измерения морфометрических характеристик микрорельефа и ПЖЛ, температурного режима и глубины протаивания, нивелирование поверхности, отбор проб почв, растительности и льда; дистанционные методы включают дешифрирование аэрофотоснимков разных лет [11, 25]. Особое внимание уделяется изучению гидрологического режима и его изменений в связи с деградацией ПЖЛ [29, 11, 33]. Для этого используются и полевые измерения (в том числе измерения морфометрических характеристик, глубины снежного покрова), и дистанционные методы и моделирование [29], а также анализ климатических данных [11, 33].

Летние температурные экстремумы последнего десятилетия (2012, 2016 и 2020 гг.) сказались на увеличении глубины сезонного протаивания и связанной с этим активизации криогенных процессов при таянии подземного льда [34, 29]. Когда к температурным колебаниям добавляется техногенное воздействие, криогенные процессы протекают еще интенсивнее [35, 36]. Массивы полигональных торфяников Пур-Тазовского междуречья выделены с помощью детального дешифрирования мозаики космических снимков [37]. На этой территории зафиксировано 2450 отдельных торфяных массивов, при этом их встречаемость возрастает от менее 1 на 100 км^2 вдоль южной границы зоны распространения полигональных торфяников до 225 на 100 км^2 в районе исследования, составляя в среднем 6,5 % от общей площади.

С 2016 г. авторы проводят комплексные геокриологические исследования в северо-восточной части Пур-Тазовского междуречья [38, 39], в том числе включающие исследования изменений рельефа торфяников [40, 41].

Целью предлагаемого исследования является установление темпов и направленности изменения рельефа полигональных торфяников северной части Пур-Тазовского междуречья, связанного с вытаиванием ПЖЛ, под действием естественных климатических колебаний и техногенных воздействий.

РАЙОН РАБОТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рельеф района исследований — равнинный, поверхность характеризуется значительной заболоченностью [8, 42]. Территория представлена первой и второй надпойменными террасами с абсолютными высотами от 2–3 до 10–25 м [43]. Район исследований относится к зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород [44, 45].

Для исследуемого района характерен суровый климат, средняя годовая температура воздуха по метеостанции Тазовский за период 1969–1989 гг. составляла –9,3 °С [46], а за период 2001–2021 гг. она повысилась до –6,8 °С [47]. Сумма атмосферных осадков, осредненная за период 1966–1990 г. составляла 355 мм, при этом большая их часть (200 мм) выпадала в теплый период [47]. За период 2001–2021 гг. средняя сумма осадков выросла до 560 мм, причем большая их часть приходится на зимний период (в среднем 320 мм) [47, 48]. Температура пород на глубине нулевых годовых амплитуд в регионе варьируется от 0 °С до –3…–6 °С. Более высокая температура наблюдается в поймах рек и на I надпойменной террасе, более низкая — на II надпойменной террасе и в массивах торфяников [42, 46]. Для исследуемого района характерны полигональные торфяники, находящиеся в нисходящей стадии развития по Н.Н. Романовскому [10].

Исследования проведены на торфянике, непосредственно прилегающем к автодороге (деградирующем торфянике Т1), и на фоновом торфянике на удалении примерно в 1,5 км от дороги (стабильный торфяник Т2) (рис. 1). Рельеф исследуемых торфяников изучался с 2016 г. ежегодно в начале и конце летнего сезона наземными

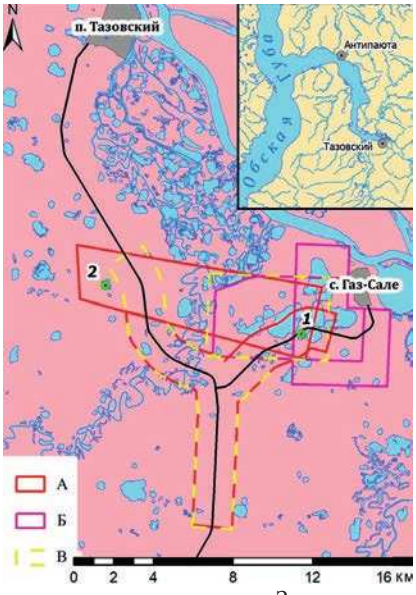

Рис. 1. Схема расположения участков исследования. Зелеными кружками показаны: *1* — торфяник, подверженный техногенному воздействию (Т1), *2* — торфяник в естественных условиях (Т2). Границы космических снимков: А — 2005 и 2016 гг., Б — 2012 г., В — 2017 г.

Fig. 1. Sketch-map of study sites. Green circles refer to: *1* — peat plateau under technogenic impact (T1); *2* — peat plateau in natural environments (T2). Limits of satellite images dated: A — 2005 and 2016; Б — 2012; B — 2017

Таблица 1

Параметры используемых дистанционных материалов

Table 1

Parameters of distance materials used

Тип	Число дней с положительной температурой воздуха между датами съемки	Оборудование-источник визуальных данных	Дата съемки	Пространственное разрешение, м
Космоснимок	–	Quickbird-2	02.09.2005	0,5
– ″ –	888	WorldView-2	01.07.2012	0,4
То же	543	“	15.07.2016	0,5
То же	132	WorldView-3	18.07.2017	– ″ –
Ортофотопланы	126	DJI FC300X	19.07.2018–20.07.2018	0,03
– ″ –	128	DJI Mavic Pro	30.06.2019–07.07.2019	0,02
То же	169	DJI Mavic Pro 2	06.07.2020–13.07.2020	– ″ –
То же	149	– “ –	18.07.2021–24.07.2021	То же
То же	155	То же	21.07.2022–26.07.2022	То же

методами. В начале исследований проводилась тахеометрическая съемка, позднее замененная на БПЛА-съемку из-за усложнившегося рельефа. Также дешифрировались доступные космоснимки высокого пространственного разрешения (табл. 1). Покрытие космоснимками исследуемых участков не совпадает (см. рис. 1). Торфяник Т1 покрыт космической съемкой 2005, 2012, 2016 и 2017 гг. и БПЛА-съемкой 2018–2022 гг. только на юго-восточном сегменте торфяника Т1ю (см. табл. 1). Северо-восточный сегмент покрыт космосъемкой 2005, 2012 гг. и БПЛА-съемкой 2022 г. Для торфяника Т2 есть космоснимки 2005 и 2016 гг. и БПЛА-съемка 2022 г. (см. рис. 1, табл. 1).

Построены цифровые модели рельефа и ортофотопланы. С помощью ортофотопланов по индикационным признакам (фототону, типам растительности и влажности, линейности границ), а также с использованием превышений поверхности на основе детальных цифровых моделей рельефа оконтурены элементы торфяника — полигоны и полигональные канавы и определены площади и глубина расчленения для каждого элемента.

Для выявления естественных причин деградации торфяников обработаны данные метеостанций. Основные факторы — сумма положительных температур воздуха и количество атмосферных осадков — обрабатывались особым способом. Поскольку основной анализ изменений рельефа проводился за периоды между датами спутниковых и наземных съемок, то и климатические параметры суммировались за эти периоды между датами, приведенными в табл. 1. Для того чтобы сопоставлять темпы разрушения рельефа, полученные за разные промежутки времени (от нескольких месяцев до нескольких лет в зависимости от доступности дистанционных материалов), параметры нормировались относительно продолжительности теплого периода, заключенного между соседними датами съемки (см. табл. 1, вторая колонка).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Полигональный торфяник Т1

Полигональный торфяник Т1 расположен на поверхности хасырея с абсолютными отметками 6–9 м. Поверхность торфяника ячеистая, разбита многочисленными пересекающимися морозобойными трещинами на прямоугольные, треугольные и многоугольные плоские полигоны, обрамленные полигональными канавами. Центральная часть полигонов часто на 0,2–0,3 м ниже периферийной, а их поверхность местами мелкобугорковатая, увлажненная. Торфяник пересекается насыпью автомобильной дороги высотой до 3 м, построенной в период 1994–1995 гг. и покрытой бетонными плитами. Фрагмент торфяника к северо-западу от дороги обозначен как Т1с, а к юго-востоку как Т1ю (рис. 2*а*).

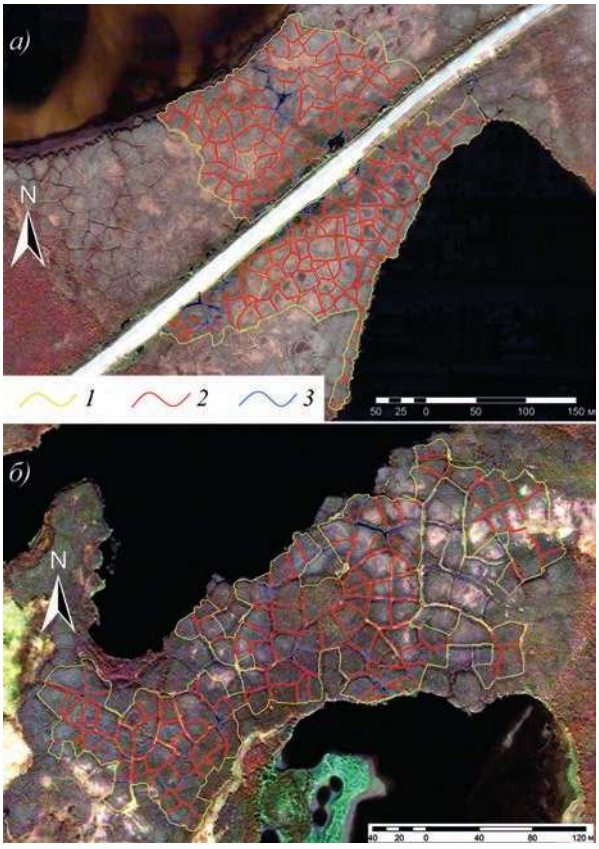

Рис. 2. Структура поверхности полигональных торфяников: *а*) Т1ю (участок к юго-востоку от автодороги) и Т1с (участок к северо-западу от автодороги); *б*) Т2 (оба на космоснимке 2005 г.); *1* — граница участка съемки и мониторинга, *2* — контуры полигонов и полигональных канав между ними, *3* — канавы без растительности, заполненные на дату съемки водой. Прямая белая полоса — насыпь автодороги

Fig. 2. Polygonal peat plateau surface structure: *а*) Т1ю (site south-east of the highway) and Т1с (site north-west of the highway); *б*) Т2 (both sites on a 2005 image); *1* — limits of the survey and monitoring site; *2* — outlines of the polygons and polygonal troughs in between; *3* — troughs without vegetation, flooded with water on the date of the survey. The straight white stripe is a highway.

В пределах торфяника выделяются:

– поверхность полигонов, относительно дренированная;

– сниженная поверхность полигонов, слабодренированная;

– полигональные канавы, увлажненные;

– переуглубленные, обводненные полигональные канавы, возникшие в результате вытаивания ПЖЛ.

Переуглубленные канавы, дно которых покрыто слаборазложившейся растительностью, частично бывают затоплены водой, в них обнаруживаются обвалившиеся фрагменты полигонов с остаточной растительностью, некоторые канавы достигают глубины 3 м и периодически дренируются через сток в смежное озеро.

Площадка мониторинга Т1ю. Для оценки темпов деградации ПЖЛ на участке торфяника Т1ю и следующего за этим изменения рельефа проанализирована динамика полигонов торфяника на основе наземной съемки 2016–2021 гг. и анализа космоснимков 2005, 2012 и 2016 гг. (см. табл. 1). Оценены темпы деградации ПЖЛ на участке торфяника Т1ю и изменений рельефа.

Со времени строительства автодороги (1994–1995 гг.) до 2005 г. (первого доступного космоснимка) произошло незначительное разрушение поверхности торфяника за счет вытаивания ПЖЛ, происходящего только у основания насыпи за счет скопления воды в сниженных участках, что и индицируется на снимке черным фототоном. Разрушения полигонов за пределами подножья насыпи на снимке 2005 г. не выявлено (см. рис. 2*а*).

На выделенной площади в 26958 м^2 (см. рис. 2*а*) по космоснимкам сверхвысокого пространственного разрешения и по снимкам с БПЛА вычислены площади каждого полигона и сумма площадей всех полигонов на каждую дату съемки. Затем из площади участка съемки вычтена суммарная площадь полигонов, что в результате дает площадь всех полигональных канав. Отдельно картируются полигональные канавы, выделяющиеся на снимках очень темным цветом, что интерпретируется нами как отсутствие растительности, а следовательно, деградация с повышенной скоростью, и вычислена их площадь. Из суммарной площади канав вычтена площадь деградирующих полигональных канав, таким образом установлена площадь все еще стабильных канав.

На рисунке 3*а* показана динамика площади полигонов и полигональных канав, полученная сопоставлением значений измеренных площадей на космических снимках и ортофотопланах, составленных на основании БПЛА-съемки 2005–2022 гг. (см. табл. 1).

На рис. 3*а* видно, что суммарная площадь полигонов, как и площадь стабильных канав, отражающих исходное состояние торфяника, убывают с большей скоростью до 2019 г., после чего их разрушение немного замедляется. При R^2 более 95 % можно достаточно достоверно оценить потерю площади в прошлом стабильного полигонального торфяника на некоторый период времени. За счет уменьшения площади полигонов и стабильных полигональных канав расширяются и растут по площади деградирующие полигональные канавы, однако со скоростью, также убывающей после июля 2019 г. Площадь деградирующих полигональных канав растет быстрее, чем суммарная площадь канав, а значит, со временем стабильные канавы вовлекаются в процесс затопления, протаивания, размыва и осадки.

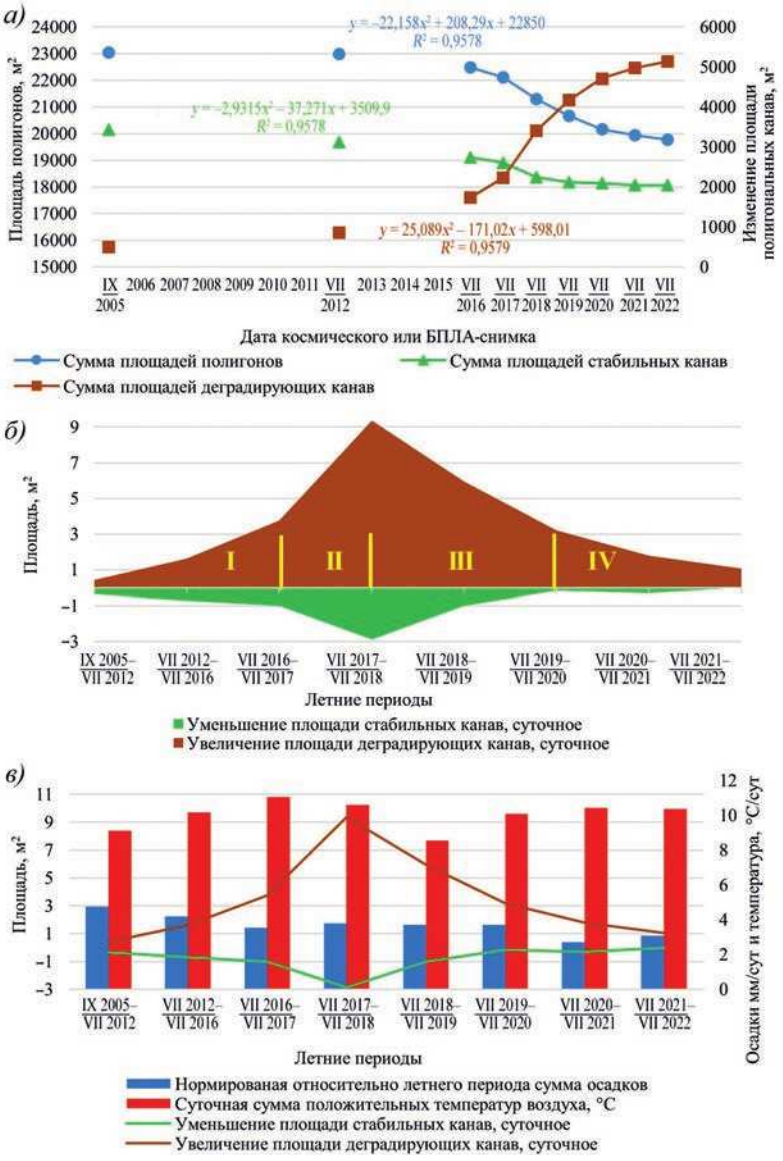

Рис. 3. Динамика разрушения полигонального торфяника Т1ю в 2005–2022 гг. по данным дистанционного зондирования: *а*) изменение площади полигонов и полигональных канав; *б*) изменение площади стабильных и деградирующих полигональных канав, в пересчете на 1 сутки летнего периода; *в*) связь изменения площади полигональных канав с климатическими характеристиками.
I–IV — этапы деградации рельефа торфяника

Fig. 3. Dynamics of polygonal peat plateau T1ю change in 2005–2022 estimated using remote-sensing data: *а*) changes in area of polygons and polygonal troughs; *б*) changes in area of stable and degrading polygonal troughs normalized with respect to 1 summer day; *в*) relation of polygonal trough area changes to climatic parameters.
I – IV — Stages of peat plateau degradation

Поскольку результаты получены за разные промежутки времени, то мы рассчитали продолжительность теплого периода между датами съемки, которая складывается из второй половины лета предыдущего года и первой половины лета следующего года от июля до июля (см. табл. 1), и привели результаты измерения площадей к суточным, разделив на продолжительность этого периода. Как следует из графиков (рис. 3*б*), площадь полигональных канав в целом увеличивается (площадь коричневой фигуры больше площади зеленой по абсолютной величине). Максимальный рост пришелся на лето 2017 г., после чего оба графика стали приближаться к нулю, значит, процесс затухает во времени. Однако деградирующие полигональные канавы за время наблюдений увеличиваются по площади намного быстрее, чем все канавы суммарно. На графике (см. рис. 3*б*) это выражается в том, что темпы увеличения площади стабильных канав уменьшаются почти до нуля уже к 2020 г., а площадь деградирующих канав, с уменьшением темпов изменения их площади, тем не менее постоянно растет. К 2022 г. площадь деградирующих канав увеличивается незначительно, а площадь стабильных канав практически не меняется, а значит, в этот период и сокращение площади полигонов незначительно и связано только с расширением деградирующих канав.

На графике (см. рис. 3*б*) отчетливо выделяются 4 этапа:

– постепенная деградация рельефа торфяника с небольшой скоростью до июля 2017 г. (I);

– резкое усиление темпов деградации с пиком к началу лета 2018 г. (II);

– резкое снижение темпов деградации к началу лета 2020 г. (III);

– постепенное затухание деградации к лету 2022 г. (IV).

Сопоставление скоростей роста площади полигональных канав с климатическими параметрами показало следующее. Экстремум роста площади канав, который выпал на лето 2017 г., не связан с суммами положительных температур и отчасти отражает минимум атмосферных осадков за период между измерениями (рис. 3*в*). Однако, возможно, пик 2017–2018 гг. является реакцией на волну потепления за несколько предыдущих лет с 2012 по 2017 г. Неопределенность связана отчасти с отсутствием более частых съемок, которые позволили бы определить темпы увеличения площади полигональных канав за каждый месяц или неделю и сопоставить их с соответствующими климатическими параметрами.

Площадка мониторинга Т1с. Для оценки совместного влияния естественных условий и насыпи рассмотрели участок Т1с, расположенный к северо-западу от автодороги и отличающийся визуально по темпам деградации рельефа (см. рис. 2*а*). Наличие и разрешение дистанционных материалов для этого участка позволили рассмотреть два временных отрезка: 09.2005–07.2012 и 07.2012–07.2022 гг. (рис. 4). Наблюдается тенденция, аналогичная той, что на участке Т1ю. Снижается площадь полигонов и стабильных канав при увеличении площади деградирующих канав, причем последнее — с более заметным градиентом (рис. 4*а*). За период 2005–2022 гг. площадь деградирующих канав на этом участке выросла в 2 раза (с 1142 до 2316 м^2).

На рис. 4*а* видно, что суммарная площадь полигонов, как и площадь стабильных канав, отражающих исходное состояние торфяника, убывают практически линейно с очень низкой скоростью. Деградирующие полигональные канавы растут с малой скоростью. Поскольку площадь стабильных канав убывает явно быстрее, чем площадь полигонов, то можно считать полигоны практически стабильными, а происходит затопление и расширение стабильных прежде канав.

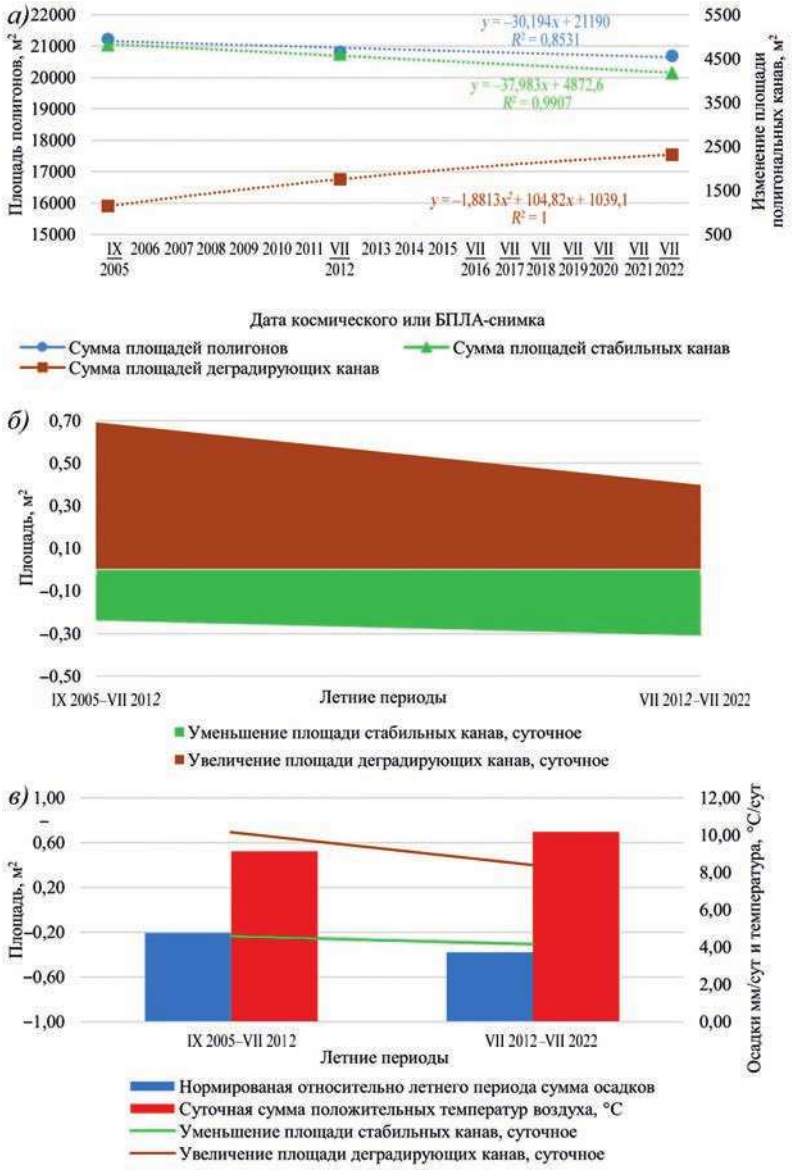

Рис. 4. Динамика разрушения полигонального торфяника Т1с в 2005–2022 гг. по данным дистанционного зондирования: *а*) изменение площади полигонов и полигональных канав; *б*) изменение площади стабильных и деградирующих полигональных канав, в пересчете на 1 сутки летнего периода; *в*) связь изменения площади полигональных канав с климатическими характеристиками

Fig. 4. Dynamics of the polygonal peat plateau T1c change in 2005–2022 estimated using remote-sensing data: *а*) changes in area of polygons and polygonal troughs; *б*) changes in area of stable and degrading polygonal troughs normalized with respect to 1 summer day; *в*) relation of polygonal trough area changes to climatic parameters

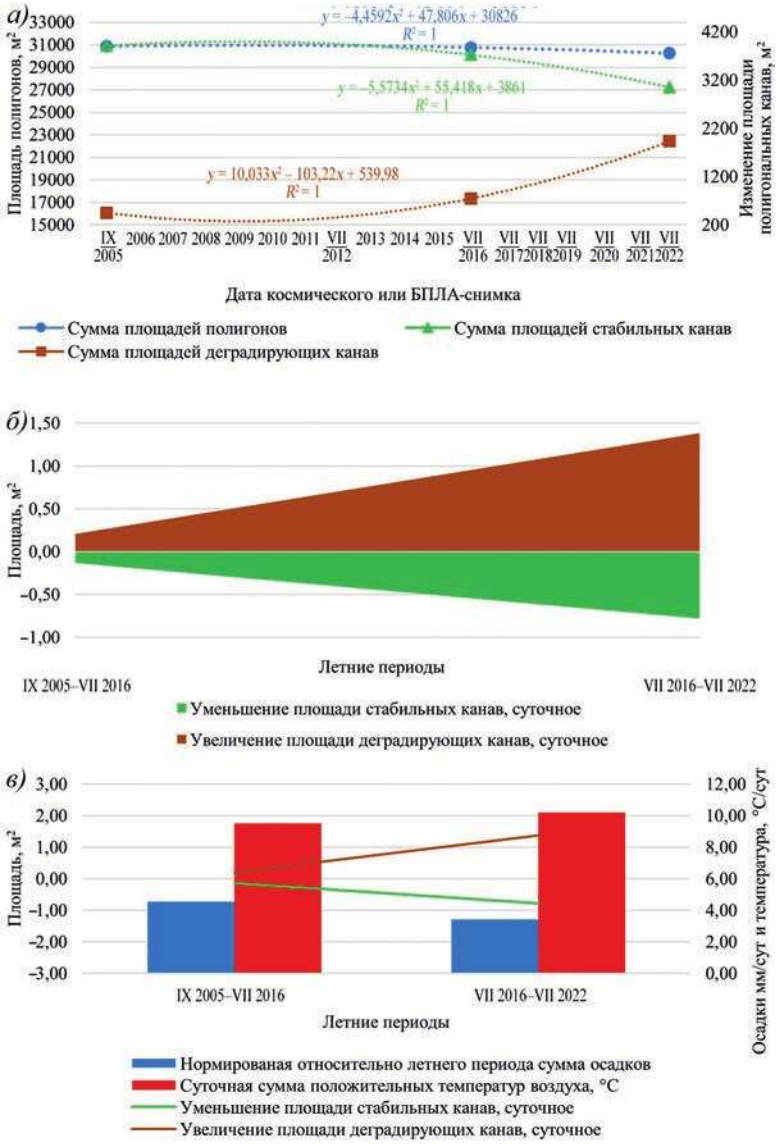

Рис. 5. Динамика разрушения полигонального торфяника Т2 в 2005–2022 гг. по данным дистанционного зондирования: *а*) изменение площади полигонов и полигональных канав; *б*) изменение площади стабильных и деградирующих полигональных канав, в пересчете на 1 сутки летнего периода; *в*) связь изменения площади полигональных канав с климатическими характеристиками

Fig. 5. Dynamics of the polygonal peat plateau T2 change in 2005–2022 estimated using remote-sensing data: *а*) changes in area of polygons and polygonal troughs; *б*) changes in area of stable and degrading polygonal troughs normalized with respect to 1 summer day; *в*) relation of polygonal trough area changes to climatic parameters

Графики (рис. 4*б*) построены аналогично приведенным на рис. 3*б*. Площадь полигональных канав в целом увеличивается (площадь коричневой фигуры больше площади зеленой по абсолютной величине). При этом прирост площади деградирующих полигональных канав за время наблюдений убывает, а площади стабильных канав снижаются, но с меньшим градиентом.

Сопоставление изменения площади полигональных канав с климатическими параметрами показано на рис. 4*в*. Последняя декада характеризуется более высокой суммой летних температур и меньшей суммой атмосферных осадков. Однако темпы прироста площади деградирующих полигональных канав снижаются, как и темпы снижения площади стабильных канав, что в некоторой степени соответствует тренду суммы атмосферных осадков, а не летнего тепла.

Полигональный торфяник Т2

Для оценки влияния автодороги на темпы деградации прилегающего торфяника результаты мониторинга деградирующего торфяника Т1 сопоставлены с результатами, полученными для торфяника Т2, находящегося в естественных условиях (см. рис. 2*б*). Таким образом, также может быть оценено нетто-влияние колебаний климата.

На рис. 5*а* видно, что суммарная площадь полигонов убывает очень медленно, а сумма площадей стабильных канав убывает несколько быстрее. Поскольку площадь стабильных канав убывает быстрее, чем площадь полигонов, то можно считать полигоны практически стабильными. Площадь деградирующих полигональных канав растет намного быстрее и за счет площади полигонов, и за счет площади стабильных канав. Причем преобразование канав заметно ускоряется летом 2012 г.

Наличие и разрешение снимков позволили рассмотреть два временных отрезка: 09.2005–07.2016 и 07.2016–07.2022 гг. (см. рис. 5). Наблюдается тенденция, сходная с той, что на участке Т1ю. Снижается площадь полигонов и стабильных канав при увеличении площади деградирующих канав, причем последнее — с более заметным градиентом (см. рис. 5*а*). Поскольку площадь стабильных канав убывает медленнее, чем растет площадь деградирующих канав, то, значит, канавы деградируют в основном за счет разрушения полигонов (рис. 5*б*). Сопоставление скоростей роста площади полигональных канав с климатическими параметрами показано на рис. 5*в*. Первая часть рассматриваемого периода характеризуется меньшими суммами положительных температур и большей суммой атмосферных осадков по сравнению со второй частью периода. Этому соответствует и тенденция увеличения площади деградирующих полигональных канав.

ДИСКУССИЯ

Несмотря на то, что исходная суммарная площадь деградирующих канав на Т1с больше, чем на Т1ю, темпы роста деградирующих канав на Т1ю за период 2005–2022 гг. значительно выше и составляют 0,17 м^2/м^2 против 0,04 м^2/м^2 на Т1с (табл. 2). Прирост деградирующих канав составил 0,04 м^2/м^2 на Т2. Таким образом, участок Т1с за последние 17 лет не подвергался отрицательному влиянию автодороги. Поскольку начальная площадь деградирующих канав на участке Т1с была выше, чем на участке Т1ю (см. табл. 2), то можно заключить, что автодорога сыграла стабилизирующую роль для рельефа этого участка. Мы полагаем, что причина этого лежит в перераспределении поверхностного стока, который изменился под влиянием дороги (рис. 6).

Таблица 2

Сравнение скоростей разрушения рельефа трех участков мониторинга

Table 2

Comparison of relief destruction rates of three monitoring sites

Индекс участка мониторинга	Т1ю	Т1с	Т2
Площадь участка мониторинга ($П_у$, м^2)	26958	27187	35228
Площадь деградирующих канав ($П_{дк}$), образовавшихся на участке за период 2005–2022 гг., ($П_{дк}2022 – П_{дк}2005$) м^2	5143 – 492 = 4651	2316 – 1142=1174	1933 – 447 = 1486
Удельная площадь деградирующих канав, образовавшихся на участке за период 2005–2022 гг., ($П_{дк}2022 – П_{дк}2005/П_у$) м^2/м^2	0,17	0,04	0,04

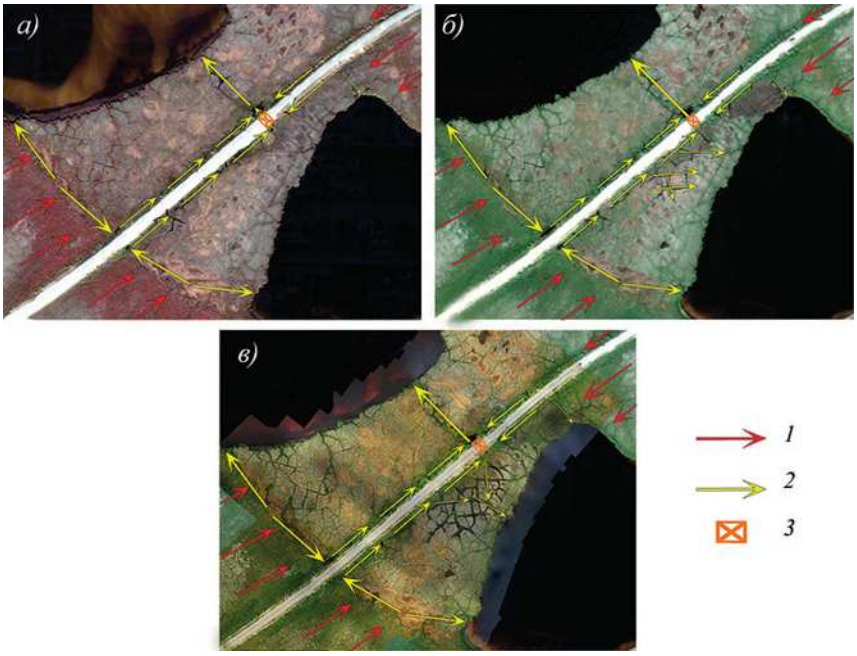

Рис. 6. Схема перераспределения поверхностного стока воды: *а*) 2005 г.; *б*) 2017 г.; *в*) 2022 год. *1* — сток с водораздела; *2* — сток вдоль подножья насыпи и вдоль полигональных канав торфяника; *3* — водопропускная труба

Fig. 6. Sketch-map of surface runoff re-distribution in: *а*) 2005; *б*) 2017; *в*) 2022. *1* — runoff from the watershed; *2* — runoff along the embankment base and along the polygonal troughs of the peat plateau; *3* — a culvert

В 2005 г. при таянии снега сток с водоразделов (красные стрелки) скапливался у подошвы склона водораздела. Далее сток распределялся частью к озерам и частью к дороге (желтые стрелки). Вдоль юго-восточного откоса насыпи вода стекала по канавам в самую низменную часть торфяника, в которой заложена водопропускная труба. Далее вода шла через водопропускную трубу с юго-востока на противоположную сторону насыпи, скапливаясь в термокарстовом блюдце (черное пятнышко на снимке) и по мере наполнения дальше текла по канавам в северо-западное

озеро (см. рис. 6*а*). При этом процессы термокарста и термоэрозии с вытаиванием ПЖЛ развивались вдоль дороги у основания насыпи и по направлению стока, обозначенного желтыми стрелками на рис. 6, от трубы к северо-западному озеру по существовавшей ранее эрозионной промоине.

По нашим наблюдениям, к 2016 г. свои функции перестала выполнять водопропускная труба. В связи с этим вода начала скапливаться в больших объемах и с юго-восточной стороны насыпи, что в свою очередь запустило процессы термокарста и термоэрозии в направлении юго-восточного озера с образованием сети деградирующих канав (см. рис. 6*б*).

В период с 2016 по 2022 г. с северо-западной стороны насыпи изменение стока не выявлено, поскольку не было перераспределения стока через трубу. С юго-восточной стороны насыпи сток через сеть деградирующих канав находит выход в юго-восточное озеро, минуя водопропускную трубу (см. рис. 6*в*).

На высокодетальных космоснимках и снимках с БПЛА хорошо виден режим заполнения полигональных канав водой или их дренирование, а значит, и преобладание в их деградации процессов термокарста или термоэрозии соответственно. Так, с 2005 по 2016 г. затопление полигональных канав шло интенсивно вместе с их деградацией под действием термокарста, вода занимала до 74 % площади канав. В период 2016–2017 гг. началось дренирование полигональных канав, и в 2019 г. прорвалась перемычка между Т1ю и юго-восточным озером. В этот период начал преобладать процесс термоэрозии и углубления канав. К периоду 2020–2022 гг. осталась только застойная вода на наиболее низких участках днища полигональных канав, занимающих площадь менее 5 %.

Активизацию криогенных процессов в последние десятилетия связывают с потеплением климата, а именно с ростом средних годовых температур воздуха, сумм положительных температур воздуха и количества летних и зимних атмосферных осадков, влияющим на состояние подземных льдов [34, 15, 49–54]. Отмечается, что вытаивание ПЖЛ происходит за счет чрезвычайно высоких значений летних температур воздуха и количества летних осадков отдельных лет, тогда как постепенное потепление климата не оказывает существенного влияния [11, 23–25]. По нашим данным не установлено явное влияние короткопериодных колебаний климата на разрушение ПЖЛ в торфяниках на севере Пур-Тазовского междуречья. Короткопериодная стадийность, по-видимому, связана с гидрологическим режимом, который контролируется совместным влиянием сумм атмосферных осадков, изменения направления стока, в том числе под влиянием насыпи автодороги и рабочего состояния водопропускной трубы, и собственно разрушением торфяников в результате смены режима блокирования или режима ускорения стока.

ВЫВОДЫ

Мониторинг рельефа полигональных торфяников, находящихся в естественных условиях и под воздействием насыпи автодороги, показал следующее.

– На участках, прилегающих к насыпи автодороги, наблюдается существенное различие между темпами деградации участка к юго-востоку и к северо-западу от автодороги. На северо-западном участке в результате существования на начало исследований сформировавшейся эрозионной канавы и перераспределения поверхностного стока скорость деградации торфяника сократилась, то есть автодорога оказала стабилизирующее действие на рельеф полигонального торфяника.

– На юго-восточном участке деградация после строительства дороги резко усилилась. Полигональные канавы расширялись за счет деградации полигонов.

– На фоновом участке скорость деградации рельефа полигонального торфяника, находящегося в естественных условиях, несколько выше, чем на участке, прилегающем к автодороге с северо-запада. Это подтверждает вывод о том, что автодорога оказывает стабилизирующее воздействие на рельеф торфяника на северо-западном участке.

– Сопоставление основных показателей климата и скоростей деградации полигонального рельефа не дал явных зависимостей. Вероятно, большее значение имеет перераспределение поверхностного стока и смена режимов затопления полигональных канав и их дренирования, определяемого самим ритмичным ходом деградации рельефа: активизация обрушения полигонов в теплое лето приводит к блокированию стока по канавам и термокарсту. В более холодные периоды, сочетающиеся со значительными атмосферными осадками, преобладает проточный режим в канавах и термоэрозия как фактор увеличения глубины и площади полигональных канав.

– Выявление закономерностей взаимовлияния деградации полигональных торфяников и климатических параметров требует большего временного разрешения дистанционных материалов, например съемки ключевых площадок с БПЛА в еженедельном режиме.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Исследование проведено при частичной финансовой поддержке РФФИ и Ямало-Ненецкого автономного округа в рамках научных проектов № 18-45-890013 и 19-45-890011. Методические подходы разрабатываются при выполнении работы по госзаданию № 121041600042-7.

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

Funding. The study was carried out with partial financial support from the Russian Foundation for Basic Research and the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug within the framework of scientific projects Nos. 18-45-890013 and 19-45-890011. Methodological approaches are developed as part of work carried out on state assignment No. 121041600042-7.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Городков Б.К.* Крупнобугристые торфяники и их географическое распространение // Природа. 1928. № 6. С. 22–26.

2. *Кузнецова Т.П.* Подземные льды молодых прибрежно-морских террас Тазовского полуострова // Проблемы криолитологии. Вып. 1. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1969. С. 44–49.

3. *Шполянская Н.А., Евсеев В.П.* Выпуклобугристые торфяники северной тайги Западной Сибири // Природные условия Западной Сибири. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1972. С. 134–146.

4. *Тыртиков А.П.* Динамика растительного покрова и развитие мерзлотных форм рельефа. М.: Наука, 1979. 116 с.

5. *Кашперюк П.И., Трофимов В.Т.* Типы и инженерно-геологическая характеристика многолетнемерзлых торфяных массивов. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1988. 184 с.

6. *Васильчук Ю.К., Васильчук А.К.* Мощные полигональные торфяники в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород Западной Сибири // Криосфера Земли. 2016. Т. 20. № 4. С. 3–15.

7. *Фотиев С.М.* Арктические торфяники Ямало-Гыданской провинции Западной Сибири // Криосфера Земли. 2017. Т. 21. № 5. С. 3–15.

8. *Лисс О.Л., Абрамова Л.И., Аветов Н.А., Березина Н.А., Инишева Л.И., Курнишкова Т.В., Слука З.А., Толпышева Т.Ю., Шведчикова Н.К.* Болотные системы Западной Сибири и их природоохранное значение / Под ред. В.Б. Куваева. Тула: Гриф и К, 2001. 584 с.

9. *Кашперюк П.И.* Типы и инженерно-геологические особенности многолетнемерзлых торфяных массивов севера Западно-Сибирской плиты: Дис. … канд. геол.-мин. наук. М., 1985. 291 с.

10. *Романовский Н.Н.* Формирование полигонально-жильных структур. Новосибирск: Наука, 1977. 216 с.

11. *Liljedahl A.K., Boike J., Daanen R.P., Fedorov A.N., Frost G.V., Grosse G., Hinzman L.D., Iijma Y., Jorgenson J.C., Matveyeva N., Necsoiu M., Raynolds M.K., Romanovsky V.E., Schulla J., Tape K.D., Walker D.A., Wilson C.J., Yabuki H., Zona D.* Pan-Arctic ice-wedge degradation in warming permafrost and its influence on tundra hydrology // Nature geosciences. 2016. V. 9. P. 312–318.

12. *Fraser R.H., Kokelj S.V., Lantz T.C., McFarlane-Winchester M., Olthof I., Lacelle D.* Climate sensitivity of high arctic permafrost terrain demonstrated by widespread ice-wedge thermokarst on banks Island // Remote Sens. 2018. V. 10. 954. URL: https://www.mdpi.com/2072-4292/10/6/954 (дата обращения: 25.09.2022).

13. *Farquharson L.M., Romanovsky V.E., Cable W.L., Walker D.A., Kokelj S., Nicolsky D*. Climate change drives widespread and rapid thermokarst development in very cold permafrost in the Canadian high arctic // Geophys. Res. Lett. 2019. V. 4. 6681–9. URL: https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2019GL082187 (дата обращения: 25.09.2022).

14. *De Klerk P., Donner N., Karpov N.S., Minke M., Joosten H.* Short-term dynamics of a low-centred ice-wedge polygon near Chokurdakh (NE Yakutia, NE Siberia) and climate change during the last ca 1250 years // Quat. Sci. Rev. 2011. V. 30. P. 3013–3031.

15. *Gao Y., Couwenberg J.* Carbon accumulation in a permafrost polygon peatland: steady longterm rates in spite of shifts between dry and wet conditions // Glob. Chang. Biol. 2015. V. 21. P. 803–815.

16. *Мельцер Л.И.* Фитоценотические аспекты устойчивости ландшафтов Ямала // Западная Сибирь — проблемы развития. Тюмень: Ин-т пробл. освоения Севера СО РАН, 1994. С. 128–141.

17. *Москаленко Н.Г.* Антропогенная динамика растительности равнин криолитозоны России. Новосибирск: Наука, 1999. 280 с.

18. Антропогенные изменения экосистем Западно-Сибирской газоносной провинции / Отв. ред. Н.Г. Москаленко. М.: ИКЗ СО РАН, 2006. 359 с.

19. *Yi S., Woo M. K., Arain M.A.* Impacts of peat and vegetation on permafrost degradation under climate warming // Geophys. Res. Lett. 2007. V. 34. L16504. doi:10.1029/2007GL030550.

20. *Валеева Э.И., Московченко Д.В.* Зональные особенности растительного покрова Тазовского полуострова и его техногенная трансформация // Вестник экологии, лесоведения и ландшафтоведения. 2009. № 9. С. 174–190.

21. *Москаленко Н.Г.* Изменение температуры пород и растительности под влиянием меняющегося климата и техногенеза в Надымском районе Западной Сибири // Криосфера Земли. 2009. Т. 13. № 4. С. 18–23.

22. *Губарьков А.А., Андреева М.В., Еланцев Е.В., Хомутов А.В.* Динамика экзогенных геологических процессов на автодороге Южно-Русское–Береговое // Проблемы региональной экологии. 2014. № 3. С. 19–23.

23. *Jorgenson M.T., Shur Y.L. Pullman E.R.* Abrupt increase in permafrost degradation in Arctic Alaska // Geophys. Res. Lett. 2006. V. 33 (2). L02503. doi: 10.1029/2005GL024960.

24. *Raynolds M., Walker D., Ambrosius K., Brown J., Everett K., Kanevskiy M., Kofinas G., Romanovsky V., Shur Y., Webber P.* Cumulative geoecological effects of 62 years of infrastructure

and climate change in ice-rich permafrost landscapes, Prudhoe Bay Oilfield, Alaska // Glob. Change Biol. 2014. V. 20. P. 1211–1224.

25. *Jorgenson M.T., Kanevskiy M., Shur Y., Moskalenko N., Brown D.R.N., Wickland K., Striegl R., Koch J.* Role of ground ice dynamics and ecological feedbacks in recent ice wedge degradation and stabilization // J. Geophys. Res. 2015. V. 120. P. 2280–2297.

26. *Kuznetsova A.O., Afonin A.S., Tikhonravova Ya.V., Slagoda E.A.* Dynamics of local conditions of peat accumulation in the Holocene of the southern tundra of the Pur-Taz interfluves // International conference "Solving the puzzles from Cryosphere". Pushchino, Russia, April 15–18, 2019. 2019. P. 81–82.

27. *Raudina T.V., Loiko S.V.* Properties and major element concentrations in peat profiles of the polygonal frozen bog in Western Siberia // IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci. 2019. V. 400. 012009. URL: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/400/1/012009 (дата обращения: 25.09.2022).

28. *Pastukhov A., Marchenko-Vagapova T., Loiko S., Kaverin D.* Vulnerability of the Ancient Peat Plateaus in Western Siberia // Plants. 2021. V. 10. 2813. URL: https://www.mdpi.com/2223-7747/10/12/2813 (дата обращения: 25.09.2022).

29. *Zlotnik V.A., Harp D.R., Jafarov E.E., Abolt C.J.* A Model of Ice Wedge Polygon Drainage in Changing Arctic Terrain // Water. 2020. V. 12. 3376. URL: https://www.mdpi.com/2073-4441/12/12/3376 (дата обращения: 25.09.2022).

30. *Пономарева О.Е., Гравис А.Г., Бердников Н.М.* Современная динамика бугров пучения и плоскобугристых торфяников в северной тайге Западной Сибири (на примере Надымского стационара) // Криосфера Земли. Т. 16. № 4. С. 21–30.

31. *Пастухов А.В., Каверин Д.А.* Экологическое состояние мерзлотных бугристых торфяников на северо-востоке Европейской России // Экология. 2016. № 2. С. 94–102.

32. *Loiko S., Klimova N., Kuzmina D., Pokrovsky O.* Lake Drainage in Permafrost Regions Produces Variable Plant Communities of High Biomass and Productivity // Plants. 2020. V. 9. 867. URL: https://www.mdpi.com/2223-7747/9/7/867 (дата обращения: 25.09.2022).

33. *Nitzbon J., Langer M., Westermann S., Martin L., Aas K.S., Boike J.* Pathways of ice-wedge degradation in polygonal tundra under different hydrological conditions // The Cryosphere. 2019. V. 13. P. 1089–1123.

34. *Бабкина Е.А., Лейбман М.О., Дворников Ю.А., Факащук Н.Ю., Хайруллин Р.Р., Хомутов А.В.* Активизация криогенных процессов на территории Центрального Ямала как следствие региональных и локальных изменений климата и теплового состояния пород // Метеорология и гидрология. 2019. № 4. С. 99–109.

35. *Москаленко Н.Г.* Изменения криогенных ландшафтов северной тайги Западной Сибири в условиях меняющегося климата и техногенеза // Криосфера Земли. 2012. Т. 16. № 2. С. 38–42.

36. *Гребенец В.И., Исаков В.А.* Деформации автомобильных и железных дорог на участке Норильск–Талнах и методы борьбы с ними // Криосфера Земли. 2016. Т. 20. № 2. С. 69–77.

37. *Хомутов А.В., Королева Е.С., Данько М.М., Хайруллин Р.Р.* Полигональные торфяники севера Западной Сибири: распространение и вопросы классификации // Сборник докладов Шестой конференции геокриологов России «Мониторинг в криолитозоне». МГУ имени М.В. Ломоносова, 14–17 июня 2022 г. М.: «КДУ», «Добросвет». 2022. С. 745–751. URL: https://bookonlime.ru/node/44945 (дата обращения: 25.09.2022).

38. *Хомутов А.В., Лейбман М.О., Губарьков А.А., Дворников Ю.А., Муллануров Д.Р., Бабкин Е.М., Бабкина Е.А.* Мониторинг криолитозоны: новые данные на Центральном Ямале и организация наблюдений на Гыдане // Научный вестник ЯНАО. 2016. Т. 93. № 4. С. 17–19.

39. *Хомутов А.В., Бабкин Е.М., Тихонравова Я.В., Хайруллин Р.Р., Дворников Ю.А., Бабкина Е.А., Каверин Д.А., Губарьков А.А., Слагода Е.А., Садуртдинов М.Р., Судакова М.С., Королева Е.С., Кузнецова А.О., Факащук Н.Ю., Сощенко Д.Д.* Комплексные исследования криолитозоны северо-восточной части Пур-Тазовского междуречья // Научный вестник ЯНАО. 2019. Т. 102. № 1. С. 53–64.

40. *Бабкин Е.М., Хомутов А.В., Дворников Ю.А., Хайруллин Р.Р., Бабкина Е.А.* Изменение рельефа торфяника с вытаивающим полигонально-жильным льдом в северной части Пур-Тазовского междуречья // Проблемы региональной экологии. 2018. № 4. С. 115–119.

41. *Хайруллин Р.Р., Хомутов А.В., Дворников Ю.А., Бабкин Е.М., Бабкина Е.А., Сощенко Д.Д.* Анализ изменения торфяников северо-восточной части Пур-Тазовского междуречья по дистанционным и наземным данным мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 4. С. 54–62.

42. Атлас Ямало-Ненецкого автономного округа. Омск: Омская картографическая фабрика, 2004. 304 с.

43. *Лебедева Е.А., Файбусович Я.Э., Назаров Д.В., Воронин А.С., Герасичева А.В., Маркина Т.В., Никольская О.А., Рубин Л.И., Чеканов В.И.* Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:1 000 000. Третье поколение. Серия Западно-Сибирская. Лист Q-44–Тазовский. Объяснительная записка. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2020. 191 с.

44. Геокриологическая карта СССР масштаба 1:2 500 000 / Под ред. Э.Д. Ершова, К.А. Кондратьевой. М.: МГУ; ПГО Гидроспецгеология, 1991. 16 л.

45. СП 115.1330.2016. Геофизика опасных природных воздействий. М.: Стандартинформ, 2016. 40 с.

46. Геокриология СССР. Кн. 2 / Под ред. Э.Д. Ершова. М.: Изд-во «Недра», 1989. 454 с.

47. Погода в Тазовском. URL: http://rp5.ru/Погода_в_Тазовском (дата обращения: 01.09.2022).

48. Удаленный доступ к ЯОД-архивам. URL: http://aisori-m.meteo.ru/waisori/index.xhtml?idata=8 (дата обращения: 01.09.2022).

49. *Бакулин А.А., Пижанкова Е.И., Гаврилов А.В.* Разнонаправленные криогенные процессы береговой зоны морей Лаптевых и Восточно-Сибирского // Евразийский союз ученых. 2016. № 4–4 (25). С. 138–140.

50. *Куницкий В.В., Сыромятников И.И., Ширмейстер Л., Скачков Ю.Б., Гроссе Г., Веттерих С., Григорьев М.Н.* Льдистые породы и термоденудация в районе поселка Батагай (Янское плоскогорье, Восточная Сибирь) // Криосфера Земли. 2013. Т. 17. № 1. С. 56–68.

51. *Пижанкова Е.И.* Современные изменения климата высоких широт и их влияние на динамику берегов района пролива Дмитрия Лаптева // Криосфера Земли. 2016. Т. 20. № 1. С. 51–64.

52. *Günther F., Overduin P.P., Yakshina I.A., Opel T., Baranskaya A.V., Grigoriev M.N.* Observing Muostakh disappear: permafrost thaw subsidence and erosion of a ground-ice-rich island in response to arctic summer warming and sea ice reduction // The Cryosphere. 2015. V. 9. P. 151–178.

53. *Кизяков А.И., Лейбман М.О.* Рельефообразующие криогенные процессы: обзор литературы за 2010–2015 годы // Криосфера Земли. 2016. Т. 20. № 4. С. 45–58.

54. *Romanovsky V., Isaksen K., Drozdov D., Anisimov O., Instanes A., Leibman M., McGuire A.D., Shiklomanov N., Smith S., Walker D., Grosse G., Jones B.M., Jorgensen M.T., Kanevskiy M., Kizyakov A., Lewkowicz A., Malkova G., Marchenko S., Nicolsky D.J., Streletskiy D., Westermann S.* Changing permafrost and its impacts. (Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic (SWIPA) 2017). Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), 2017. P. 65–102. URL: https://www.amap.no/documents/doc/snow-water-ice-and-permafrost-in-the-arctic-swipa-2017/1610 (дата обращения: 25.09.2022)

REFERENCES

1. *Gorodkov B.K.* Large hill bogs and their geographical distribution. *Priroda.* Nature. 1928, 6: 22–26. [In Russian].

2. *Kuznetsova T.P.* Ground ice of young coastal-marine terraces of the Taz Peninsula. *Problemy kriolitologii.* Problems of criolithology. Moscow: Moscow University Press, 1969. 1: 44–49. [In Russian].

3. *Shpolianskaia N.A., Evseev V.P.* Hill peatlands of the northern taiga of Western Siberia. *Prirodnye usloviia Zapadnoi Sibiri.* Natural condition of Western Siberia. Moscow: Moscow University Press, 1972: 134–146. [In Russian].

4. *Tyrtikov A.P. Dinamika rastitel'nogo pokrova i razvitie merzlotnykh form rel'efa.* Vegetation dynamics and development of permafrost landforms. Moscow: Nauka, 1979: 116 p. [In Russian].

5. *Kashperiuk P.I. Tipy i inzhenerno-geologicheskaia kharakteristika mnogoletnemerzlykh torfianykh massivov.* Types and engineering-geological conditions of permafrost peatlands. Moscow: Moscow University Press, 1988: 184 p. [In Russian].

6. *Vasil'chuk Yu.K., Vasil'chuk A.K.* Thick polygonal peatlands in continuous permafrost zone of West Siberia. *Kriosfera Zemli.* Earth's Cryosphere. 2016, 20 (4): 3–15. [In Russian].

7. *Fotiev S.M.* Arctic peatlands of the Yamal-Gydan province of Western Siberia. *Kriosfera Zemli.* Earth's Cryosphere. 2017, 21 (5): 3–15. [In Russian].

8. *Liss O.L., Abramova L.I., Avetov N.A., Berezina N.A., Inisheva L.I., Kurnishkova T.V., Sluka Z.A., Tolpysheva T.Iu., Shvedchikova N.K. Bolotnye sistemy Zapadnoi Sibiri i ikh prirodookhrannoe znachenie.* Bog of West Siberia and their conservation value. Tula: Grif i K Publ., 2001: 584 p. [In Russian].

9. *Kashperiuk P.I. Tipy i inzhenerno-geologicheskie osobennosti mnogoletnemerzlykh torfianykh massivov severa Zapadno-Sibirskoi plity.* Types and engineering-geological conditions of permafrost peatlands in the North of Western Siberia plate. PhD geol.-min. sci. diss. Moscow, 1985: 291 p. [In Russian].

10. *Romanovskii N.N. Formirovanie poligonal'no-zhil'nykh struktur.* Formation of Polygonal-Wedge Structures. Novosibirsk: Nauka, 1977: 216 p. [In Russian].

11. *Liljedahl A.K., Boike J., Daanen R.P., Fedorov A.N., Frost G.V., Grosse G., Hinzman L.D., Iijma Y., Jorgenson J.C., Matveyeva N., Necsoiu M., Raynolds M.K., Romanovsky V.E., Schulla J., Tape K.D., Walker D.A., Wilson C.J., Yabuki H., Zona D.* Pan-Arctic ice-wedge degradation in warming permafrost and its influence on tundra hydrology. Nature geosciences. 2016, 9: 312–318.

12. *Fraser R.H., Kokelj S.V., Lantz T.C., McFarlane-Winchester M., Olthof I., Lacelle D.* Climate sensitivity of high arctic permafrost terrain demonstrated by widespread ice-wedge thermokarst on Banks Island. Remote Sens. 2018, 10: 954. Available at: https://www.mdpi.com/2072-4292/10/6/954 (accessed 25.09.2022).

13. *Farquharson L.M., Romanovsky V.E., Cable W.L., Walker D.A., Kokelj S., Nicolsky D*. Climate change drives widespread and rapid thermokarst development in very cold permafrost in the Canadian high arctic. Geophys. Res. Lett. 2019, 4: 6681–9. Available at: https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2019GL082187 (accessed 25.09.2022).

14. *De Klerk P., Donner N., Karpov N.S., Minke M., Joosten H*. Short-term dynamics of a low-centred ice-wedge polygon near Chokurdakh (NE Yakutia, NE Siberia) and climate change during the last ca 1250 years. Quat. Sci. Rev. 2011, 30: 3013–3031.

15. *Gao Y., Couwenberg J.* Carbon accumulation in a permafrost polygon peatland: steady longterm rates in spite of shifts between dry and wet conditions. Glob. Chang. Biol. 2015, 21: 803–815.

16. *Mel'tser L.I.* Phytocenosis aspects of sustainability of Yamal landscapes. Fitotsenoticheskie aspekty ustoichivosti landshaftov Yamala. Western Siberia — Development Problems. Tyumen: Institute of Northern Development Issues, SB RAS, 1994: 128–141. [In Russian].

17. *Moskalenko N.G. Antropogennaia dinamika rastitel'nosti ravnin kriolitozony Rossii.* The anthropogenic Dynamics of Vegetation Growing on the Plains of the Russian Permafrost Zone. Novosibirsk: Nauka, 1999: 280 p. [In Russian].

18. Moskalenko N.G. *(Ed.) Antropogennye izmeneniia ekosistem Zapadno-Sibirskoi gazonosnoi provintsii.* Anthropogenic changes in the ecosystems of the West-Siberian gas-bearing province. Moscow: Institute of the Earth's Cryosphere, 2006: 359 p. [In Russian].

19. *Yi S., Woo M.K., Arain M.A.* Impacts of peat and vegetation on permafrost degradation under climate warming. Geophysical Research Letters. 2007, 34: L16504. doi:10.1029/2007GL030550.

20. *Valeeva E.I., Moskovchenko D.V.* Zonal specifics of the vegetative cover of the Tazovsky Peninsula and its anthropogenic transformation. *Vestnik ekologii, lesovedeniia i landshaftovedeniia*. Bulletin of ecology, forest science and landscape science. 2009, 9: 174–190. [In Russian].

21. *Moskalenko N.G.* Permafrost and vegetation changes in the Nadym region of West Siberian northern taiga due to the climate change and technogenesis. *Kriosfera Zemli.* Earth's Cryosphere. 2009, 13 (4): 18–23. [In Russian].

22. *Gubar'kov A.A., Andreeva M.V., Elantsev E.V., Khomutov A.V.* Dynamics of exogenous processes on the Yuzhno-Russkoye–Beregovoe highway. *Problemy regional'noi ekologii.* Regional Environmental Issues. 2014, 3: 19–23. [In Russian].

23. *Jorgenson M.T., Shur Y.L. Pullman E.R.* Abrupt increase in permafrost degradation in Arctic Alaska. Geophys. Res. Lett. 2006, 33(2): L02503. doi: 10.1029/2005GL024960.

24. *Raynolds M., Walker D., Ambrosius K., Brown J., Everett K., Kanevskiy M., Kofinas G., Romanovsky V., Shur Y., Webber P.* Cumulative geoecological effects of 62 years of infrastructure and climate change in ice-rich permafrost landscapes, Prudhoe Bay Oilfield, Alaska. Glob. Change Biol. 2014, 20: 1211–1224.

25. *Jorgenson M.T., Kanevskiy M., Shur Y., Moskalenko N., Brown D.R.N., Wickland K., Striegl R., Koch J.* Role of ground ice dynamics and ecological feedbacks in recent ice wedge degradation and stabilization. J. Geophys. Res. 2015, 120: 2280–2297.

26. *Kuznetsova A.O., Afonin A.S., Tikhonravova Ya.V., Slagoda E.A.* Dynamics of local conditions of peat accumulation in the Holocene of the southern tundra of the Pur-Taz interfluves. International conference "Solving the puzzles from Cryosphere". Pushchino, Russia, April 15–18. 2019, 81–82. Available at: http://cryosol.ru/images/phocagallery/conference/cryospherepuzzles/PushchinoPermafrost_ConferenceProgrammAbstracts2019_compressed.pdf (accessed 25.09.2022).

27. *Raudina T.V., Loiko S.V.* Properties and major element concentrations in peat profiles of the polygonal frozen bog inWestern Siberia. IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci. 2019, 400: 012009. Available at: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/400/1/012009 (accessed 25.09.2022).

28. *Pastukhov A., Marchenko-Vagapova T., Loiko S., Kaverin D.* Vulnerability of the Ancient Peat Plateaus in Western Siberia. Plants. 2021, 10: 2813. Available at: https://www.mdpi.com/2223-7747/10/12/2813 (accessed 25.09.2022).

29. *Zlotnik V.A., Harp D.R., Jafarov E.E., Abolt C.J.* A Model of Ice Wedge Polygon Drainage in Changing Arctic Terrain. Water. 2020, 12: 3376. Available at: https://www.mdpi.com/2073-4441/12/12/3376 (accessed 25.09.2022).

30. *Ponomareva O.E., Gravis A.G., Berdnikov N.M.* Contemporary dynamics of frost mounds and flat peatlands in north taiga of West Siberia (on the example of Nadym site). *Kriosfera Zemli.* Earth's Cryosphere. 16 (4): 21–30. [In Russian].

31. *Pastukhov A.V., Kaverin D.A.* Ecological state of peat plateaus in northeastern European Russia. *Ekologiia.* Russ. J. Ecol. 2016, 2: 94–102. [In Russian].

32. *Loiko S., Klimova N., Kuzmina D., Pokrovsky O.* Lake Drainage in Permafrost Regions Produces Variable Plant Communities of High Biomass and Productivity. Plants. 2020, 9: 867. Available at: https://www.mdpi.com/2223-7747/9/7/867 (accessed 25.09.2022).

33. *Nitzbon J., Langer M., Westermann S., Martin L., Aas K.S., Boike J.* Pathways of ice-wedge degradation in polygonal tundra under different hydrological conditions. The Cryosphere. 2019, 13: 1089–1123.

34. *Babkina E.A., Leibman M.O., Dvornikov Yu.A., Fakashchuk N.Yu., Khairullin R.R., Khomutov A.V.* Activation of cryogenic processes in Central Yamal as a result of Regional and Local change in

climate and thermal state of permafrost. *Meteorologiia i gidrologiia.* Meteorology and Hydrology. 2019, 4: 99–109. [In Russian].

35. *Moskalenko N.G.* Cryogenic landscape changes in the West Siberian northern taiga in the conditions of climate change and human-induced disturbances. *Kriosfera Zemli.* Earth's Cryosphere. 2012, 16 (2): 38–42. [In Russian].

36. *Grebenets V.I., Isakov V.A.* Deformations of roads and railways within the Norilsk-Talnakh transportation corridor and the stabilization methods. *Kriosfera Zemli.* Earth's Cryosphere. 2016, 20 (2): 69–77. [In Russian].

37. *Khomutov A.V., Koroleva E.S., Dan'ko M.M., Khairullin R.R.* Polygonal peatlands in the north of West Siberia: distribution and classification issues. *Sbornik dokladov Shestoi konferentsii geokriologov Rossii "Monitoring v kriolitozone".* Collection of reports of the Sixth Conference of geocryologists of Russia "Monitoring of permafrost zone". Moscow, 2022, 745–751. Available at: https://bookonlime.ru/node/44945 (accessed 25.09.2022). [In Russian].

38. *Khomutov A.V., Leibman M.O., Gubar'kov A.A., Dvornikov Yu.A., Mullanurov D.R., Babkin E.M., Babkina E.A.* Monitoring of permafrost zone: new data from Central Yamal and arrangement of observations on Gydan. *Nauchnyi vestnik YaNAO*. Scientific Bulletin of the Yamal-Nenets Autonomous District. 2016, 93 (4): 17–19. [In Russian].

39. *Khomutov A.V., Babkin E.M., Tikhonravova Ya.V., Khairullin R.R., Dvornikov Yu.A., Babkina E.A., Kaverin D.A., Gubar'kov A.A., Slagoda E.A., Sadurtdinov M.R., Sudakova M.S., Koroleva E.S., Kuznetsova A.O., Fakashchuk N.Yu., Soshchenko D.D. C*omplex studies of the cryolithozone of the north-eastern part of the Pur-Taz interfluve. *Nauchnyi vestnik IaNAO*. Scientific Bulletin of the Yamal-Nenets Autonomous District. 2019, 102 (1): 53–64. [In Russian].

40. *Babkin E.M., Khomutov A.V., Dvornikov Yu.A., Khairullin R.R., Babkina E.A.* Relief changes of the peat plateau with melting of polygonal-wedge ice in the northern part of the Pur-Taz interfluve. *Problemy regional'noi ekologii.* Regional Environmental Issues. 2018, 4: 115–119.

41. *Khairullin R.R., Khomutov A.V., Dvornikov Yu.A., Babkin E.M., Babkina E.A., Soshchenko D.D.* Analysis of peatland changes in the northeastern part of the Pur-Taz interfluve based on remote sensing and ground monitoring data. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniia Zemli iz kosmosa.* Modern problems of remote sensing of the Earth from space. 2019, 16 (4): 54–62. [In Russian].

42. *Atlas Iamalo-Nenetskogo avtonomnogo okruga.* Atlas of the Yamal-Nenets Autonomous District. Omsk: Omsk Cartographic Factory, 2004: 304 p. [In Russian].

43. *Lebedeva E.A., Faibusovich Ia.E., Nazarov D.V., Voronin A.S., Gerasicheva A.V., Markina T.V., Nikol'skaia O.A., Rubin L.I., Chekanov V.I. Gosudarstvennaia geologicheskaia karta Rossiiskoi Federatsii masshtaba 1:1000000. Tret'e pokolenie. Seriia Zapadno-Sibirskaia. List Q-44–Tazovskii. Ob"iasnitel'naia zapiska.* State geological map of the Russian Federation, scale 1:1000000. Third generation. Series West Siberian. Sheet Q-44–Tazovsky. Explanatory note. FGBU «VSEGEI». St. Petersburg: VSEGEI, 2020: 191 p. [In Russian].

44. *Ershov E.D. (Ed.) Geokriologicheskaia karta SSSR.* Geocryological map of the SSSR. Moscow: Lomonosov MSU, 1991: 16 p. [In Russian].

45. *Geofizika opasnykh prirodnykh vozdeistvii.* SP 115.1330.2016. Geophysics of hazardous natural processes. Moscow: Standartinform Publ., 2016: 40 p. [In Russian].

46. *Trofimov V.T., Vasil'chuk Yu.K., Baulin V.V., Yershov E.D. (Ed.). Geokriologiia SSSR Zapadnaia Sibir'.* Geocryology of the USSR. Western Siberia. Moscow: *Nedra*, 1989: 454 p. [In Russian].

47. *Pogoda v Tazovskom.* Weather in Tazovsky. Available at: http://rp5.ru/Weather_in_Tazovsky (accessed 01.09.2022).

48. Remote access to the Hydrometeorological Data Description Language-archives. Available at: http://aisori-m.meteo.ru/waisori/index.xhtml?idata=8 (accessed 01.09.2022).

49. *Bakulin A.A., Pizhankova E.I., Gavrilov A.V*. Multiple cryogenic processes in the coastal zone of the Laptev and Eastern Siberian seas. *Evraziiskii soiuz uchenykh.* Eurasian of Union of scientists. 2016, 4–4 (25): 138–140. [In Russian].

50. *Kunitskii V.V., Syromiatnikov I.I., Shirrmeister L., Skachkov Iu.B., Grosse G., Vetterikh S., Grigor'ev M.N.* Ice-rich permafrost and thermal denudation in the Batagay area (Yana upland, East Siberia). *Kriosfera Zemli.* Earth's Cryosphere. 2013, 17 (1): 56–68. [In Russian].

51. *Pizhankova E.I.* Modern climate change at high latitudes and their influence on the coastal dynamics of the Dmitriy Laptev strait area. *Kriosfera Zemli.* Earth's Cryosphere. 2016, 20 (1): 51–64. [In Russian].

52. *Günther F., Overduin P.P., Yakshina I.A., Opel T., Baranskaya A.V., Grigoriev M.N.* Observing Muostakh disappear: permafrost thaw subsidence and erosion of a ground-ice-rich island in response to arctic summer warming and sea ice reduction. The Cryosphere. 2015, 9: 151–178.

53. *Kizyakov A.I., Leibman M.O.* Cryogenic relief-formation processes: a review of 2010–2015 publications. *Kriosfera Zemli*. Earth's Cryosphere. 2016, 20 (4): 45–58. [In Russian].

54. *Romanovsky V., Isaksen K., Drozdov D., Anisimov O., Instanes A., Leibman M., McGuire A.D., Shiklomanov N., Smith S., Walker D., Grosse G., Jones B.M., Jorgensen M.T., Kanevskiy M., Kizyakov A., Lewkowicz A., Malkova G., Marchenko S., Nicolsky D.J., Streletskiy D., Westermann S.* Changing permafrost and its impacts. (Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic (SWIPA) 2017). Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), 2017: 65–102. Available at: https://www.amap.no/documents/doc/snow-water-ice-and-permafrost-in-the-arctic-swipa-2017/1610 (accessed 25.09.2022).

ЛЕДОТЕХНИКА
ICETECHNOLOGY

https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-4-406–419
УДК 552.125

CC BY

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ **ORIGINAL ARTICLE**

Памяти Н.В. Черепанова — полярника, ледоисследователя и человека

To the memory of Nikolai Vasilyevich Cherepanov — polar scientist, ice explorer and a remarkable person

Анизотропия сил трения покоя и трения скольжения монокристаллов льда

Б.П. Егоров

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

egorov.nord@mail.ru

Резюме

Свойства льдов природных водоемов обусловлены их кристаллическим строением. Кроме механических и прочностных характеристик льда как твердого тела, имеют большое значение характеристики поверхностей льда, проявляемые в процессе трения. В работе исследовалось трение двух монокристаллов льда друг относительно друга как основа для понимания закономерностей трения натурного, поликристаллического льда. В работе приведены результаты измерения характеристик сухого трения покоя и трения скольжения монокристаллов льда. Из искусственно выращенной пластины монокристалла льда для эксперимента изготавливались образцы монокристаллов льда с определенной ориентацией С-оси. Измерение коэффициента трения покоя монокристалла льда реализовалось по классической схеме регистрации минимального угла, при котором монокристалл начинал скатываться по наклонной поверхности второго монокристалла. Была обнаружена зависимость коэффициента трения покоя монокристаллов льда от взаимной ориентации С-осей монокристаллов друг относительно друга. Коэффициенты трения покоя в случае, когда С-оси монокристаллов льда параллельны друг другу, значительно превысили коэффициенты трения покоя в случае, когда С-оси монокристаллов льда перпендикулярны друг другу.

Проведенные исследования показали наличие анизотропии сил трения пары монокристаллов льда.

Ключевые слова: анизотропия, базисные плоскости, монокристалл льда, С-ось монокристалла, трение покоя, трение скольжения.

Для цитирования: *Егоров Б.П.* Анизотропия сил трения покоя и трения скольжения монокристаллов льда // Проблемы Арктики и Антарктики. 2022. Т. 68. № 4. С. 406–419. https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-4-406-419.

Поступила 14.04.2022 **После переработки 31.08.2022** **Принята 19.10.2022**

Anisotropy of the friction forces of rest and sliding frictionof single crystals of ice

Boris P. Egorov

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

egorov.nord@mail.ru

Summary

The properties of the ice of natural reservoirs are due to its crystalline structure. The dependence of the mechanical and strength characteristics of single ice crystals on the angle between the direction of application of force to a single crystal and the direction of its C-axis is known. Basically, this dependence is due to the possibility of the base plates of a single crystal of ice sliding relative to each other. In physics, in addition to the mechanical and strength characteristics of a solid, the properties of the surfaces of a solid state, manifested in the process of friction, are of great importance. The friction of two single crystals of ice relative to each other has been investigated in experiments on rest friction and sliding friction. From an artificially grown plate of a single ice crystal, samples of single crystals of ice with a certain orientation of the C-axis were made for the experiment. The measurement of the rest friction coefficient of a single ice crystal was realized according to the classical scheme of recording the minimum angle at which the single crystal began to roll down an inclined surface. The dependence of the rest friction coefficient of ice single crystals on the mutual orientation of the C-axes of single crystals relative to each other was discovered. The coefficients of rest friction in the case that the C-axes of single ice crystals are parallel to each other significantly exceed those obtained when the C-axes of single ice crystals are perpendicular to each other. Measurements have shown that the anisotropy of sliding friction increases with increasing initial velocity of the single crystal on the surface of the second single crystal. This is explained by the fact that with the growth of the path traveled by the M_2 crystal, the time of interaction of single crystals of ice also increases, during which the properties of the anisotropy of single crystals of ice relative to sliding friction are manifested. Studies have shown the presence of anisotropy of the friction forces of rest and friction of sliding of a pair of single crystals of ice.

Keywords: anisotropy, base planes, C-axis of single crystal, rest friction, single ice crystal, sliding friction.

For Citation: *Egorov B.P.* Anisotropy of the friction forces of rest and sliding frictionof single crystals of ice. *Problemy Arktiki i Antarktiki.* Arctic and Antarctic Research. 2022, 68 (4): 406–419. [In Russian]. https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-4-406-419.

Received 14.04.2022 **Revised 31.08.2022** **Accepted 19.10.2022**

ВВЕДЕНИЕ

Анизотропия — это зависимость физических свойств вещества (механических, электрических, оптических) от направления. Анизотропия механических свойств кристаллов состоит в различии твердости, упругости, прочности в разных направлениях. Причиной анизотропии кристаллов является упорядоченное расположение частиц в них, при котором расстояние между соседними частицами, а следовательно, и силы связи между ними различны в разных направлениях. Поликристаллические материалы, состоящие из большого числа случайно ориентированных мелких кристаллов, изотропны.

Трение, возникающее при поступательном перемещении одного тела по поверхности другого, называется *трением скольжения*. Трение между взаимно неподвижными телами называется *трением покоя*. Оно проявляется в том, что для возник-

новения относительного перемещения двух соприкасающихся тел нужно приложить внешнюю силу $F > F_0$, где F_0— так называемая предельная сила трения покоя [1].

Существуют два принципиально различных механизма трения — жидкое, или аэрогидродинамическое, и сухое. В работе рассматривается сухое трение покоя и сухое трение скольжения. Сила сухого трения скольжения вызывается в основном механическим зацеплением между неровностями поверхностей тел и сцеплением между молекулами обоих тел в областях непосредственного соприкосновения [2].

Характеристики сил трения покоя и трения скольжения льда определяются свойствами его поверхности.

В работах [3, 4] автор исследует механические свойства льда в субмикрообъемах, тонких приповерхностных слоях и пленках. В работе [5] были проведены измерения анизотропии сил кинетического трения, возникающих при скольжении шарика из карбида вольфрама в различных направлениях по поверхности монокристалла льда. Основное внимание исследователи уделили характеристикам поверхности монокристалла.

В данной работе рассмотрены некоторые вопросы взаимодействия поверхностей двух монокристаллов льда.

Цель исследования — измерить анизотропию сил сухого трения покоя и трения скольжения пары монокристаллов льда.

Силы трения покоя и трения скольжения монокристаллов льда друг о друга опосредованно вносят свой вклад в прочностные характеристики поликристаллического льда. Исследование характеристик сил трения покоя и трения скольжения кристаллов льда представляет научный интерес и имеет практическое значение. Эти знания необходимо учитывать при моделировании растекания ледников, их скольжения по внутренним плоскостям и ложу, также они важны для понимания особенностей взаимодействия отдельных зерен льда в механизме деформации ледяных тел.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для достижения поставленной цели работы необходимо было решить следующие задачи:

– вырастить блок монокристалла пресного льда;

– из блока монокристалла льда изготовить образцы монокристаллов с размерами и ориентациями С-осей, необходимыми для постановки экспериментов;

– разработать методику измерения коэффициентов сил трения покоя;

– разработать методику измерения коэффициентов сил трения скольжения;

– провести эксперименты по измерениям коэффициентов сил трения покоя при различных ориентациях С-осей монокристаллов и при различных временах выдержки соприкосновения монокристаллов поверхностями друг с другом;

– провести эксперименты по измерению коэффициентов сил трения скольжения при различных ориентациях С-осей монокристаллов;

– проанализировать полученные результаты.

МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИСПОЛЬЗУЕМОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Объектом исследования были образцы монокристаллов льда, предназначенные для проведения экспериментов по измерению сил трения покоя и трения скольжения. Образцы изготавливались из блока монокристалла льда, выращенного в холодной ледоисследовательской лаборатории по методике, разработанной Николаем Васильевичем Черепановым.

Методика выращивания блока монокристалла льда следующая. Емкость размерами 100×100×100 см^3 имела термоизолированные стенки толщиной 10 см. Внутренние стенки емкости собраны из бакелизированной фанеры толщиной 10 мм. Емкость располагалась на бетонном кубе 110×110×70 см^3, расположенном на песчаной подушке толщиной 50 см, насыпанной на поверхности земли. В загородной одноэтажной холодной лаборатории для этой цели был вскрыт пол и смонтирована данная конструкция, значительно снижающая вибрацию емкости с водой при движении наружного наземного транспорта. Емкость по высоте на 90 см заполнялась отфильтрованной и дегазированной водой. Для дегазации воды она нагревалась до температуры +80 °С и выдерживалась в таком состоянии в течение часа.

В воде на дне емкости располагался плоский нагревательный элемент с электрической регулировкой нагрева. Регулирование нагрева осуществлялось по электрическим проводам, выведенным из емкости на пульт управления.

Во внутренней части емкости монтировалась термокоса для измерения профиля температуры воды по вертикали с шагом 10 см.

Температура воздуха в холодной лаборатории составляла –10 °С.

Когда на поверхности воды нарастает монокристалл льда, внутри емкости увеличивается давление воды. Для компенсации давления оборудование располагало системой сброса избыточного объема воды. Для этого нижние слои воды соединены термоизолированной трубкой с наружной поверхностью емкости и выведены на уровень верхней поверхности монокристалла льда. Внутри трубки уложена в две жилы токопроводящая проволока, по ней подается ток, вызывающий незначительный нагрев проволоки, при котором ее температура на несколько градусов превышает температуру плавления льда. При этом избыток воды, возникающий с ростом монокристалла, вдоль «теплой» проволоки вытекает из емкости, не вызывая в ней роста давления воды.

С течением времени температура воды в емкости понижалась. Когда температура поверхностного слоя воды выравнивалась на отметке 0 °С, температура нижнего слоя воды в емкости составляла +0,4 °С. В это время с емкости снималась крышка, и начиналось интенсивное выхолаживание верхнего слоя воды. Работа проводилась в ночные часы для исключения колебаний емкости с водой, вызванных движущимся транспортом. При отсутствии вибрации воды в емкости по прошествии некоторого времени верхний тонкий слой воды становился переохлажденным, то есть его температура опускалась ниже 0 °С. Вопросам физики возникновения слоя переохлажденной воды и ее взаимодействия с нижележащими слоями воды посвящена работа [6]. Со временем в связи с попаданием на поверхность переохлажденного верхнего слоя воды пылинок начинался процесс кристаллизации воды. На поверхности образовывался монокристалл льда. В начальный период скорость роста монокристалла льда достаточно велика, затем начинает снижаться. В процессе роста монокристалла необходимо поддерживать положительную температуру +0,4 °С в нижнем слое воды посредством подогрева ее электрическим нагревателем. Необходимо следить за тем, чтобы не повысить температуру нижнего слоя воды выше +4 °С. В противном случае возникнет конвективный перенос «теплой» воды вверх, к нижней поверхности растущего монокристалла, что приведет к нарушению его структуры. С-ось растущего в емкости монокристалла ориентирована перпендикулярно поверхности замерзания льда, а базисные плоскости монокристалла ориентированы параллельно поверхности замерзания.

Достаточно крупные монокристаллы льда встречаются и в натурных условиях. Их можно наблюдать во льдах природных водоемов, относящихся ко льдам типа А-1 по классификации Н.В. Черепанова [7]. Однако вырезать из ледяного покрова образцы монокристаллов льда с размерами, необходимыми для проведения эксперимента, без нарушения их целостности не представляется возможным. Это обстоятельство предопределило необходимость выращивать монокристалл льда в лабораторных условиях.

При достижении блоком монокристалла льда необходимой толщины он извлекался из емкости и разрезался на образцы с размерами, необходимыми для проведения экспериментов. При этом недопустимо пользоваться режущим инструментом, таким, как, например, ручная ножовка, поскольку это приведет к образованию в монокристалле крупных и мелких трещин. Монокристалл разрезался на образцы разогретой электрическим током нихромовой проволокой. Проволока имела пружинное натяжение, компенсирующее ее провисание, связанное с удлинением при нагревании. Перед началом работы следует в термостате установить температуру блока монокристалла в пределах –0,2…–0,4 °С. В противном случае вода, образующаяся при расплавлении льда разогретой нихромовой проволокой, понизит свою температуру от контакта с «холодным» объемом монокристалла до температуры ледообразования, что приведет к замерзанию реза. Разрезание блока монокристалла льда на образцы следует проводить по возможности быстро. Отрезанные куски насухо протирались хлопчатобумажной тканью, для того чтобы убрать с их поверхности остатки воды. При изготовлении необходимых для эксперимента образцов монокристаллов льда из блока учитывалось то обстоятельства, что С-ось блока монокристалла льда, выращенного на горизонтальной поверхности воды, направлена вертикально. Направления С-осей изготовленных образцов монокристаллов льда контролировались в поляризационном свете.

Перед измерением сил трения покоя и трения скольжения образцов монокристаллов льда должным образом обрабатывались их поверхности. Сначала поверхности монокристаллов, которые будут находиться во время эксперимента в соприкосновении, шлифовались на наждачной бумаге, затем слегка оплавлялись на «теплой» полированной латунной плите и насухо протирались хорошо впитывающей воду хлопчатобумажной тканью. Температура полированной латунной плиты подбиралась экспериментальным путем и была несколько выше температуры плавления пресного льда. Недопустима высокая температура латунной плиты, при которой плавление льда происходит интенсивно. Не следует устанавливать и низкую температуру, при которой процесс плавления льда затягивается на 10 и более секунд. Время плавления тонкого приповерхностного слоя монокристалла льда на поверхности «теплой» латунной плиты составляло от 1,5 до 2 секунд. При этом монокристалл интенсивно перемещался рукой по поверхности плиты. После оплавления рабочей поверхности монокристалла на латунной плите он быстро перемещался на ровную поверхность, покрытую тканью, хорошо впитывающей воду. Монокристалл интенсивно перемещался в течение 3 секунд по поверхности ткани, для того чтобы тонкий слой воды, остающийся на нижней поверхности монокристалла после оплавления на латунной плите, быстро и равномерно впитался в ткань. Так достигались ровные, гладкие поверхности скольжения монокристаллов льда.

Эксперименты проводились в холодной лаборатории при температуре воздуха –9…–11 ˚С. Холодная лаборатория представляла собой термоизолированное

помещение с размерами 3×2×2 м^3. В этом помещении был установлен охлаждающий воздух радиатор.

Проведенная работа носит характер феноменологического исследования.

«Другим общим методом подхода к исследованию движения материальных тел является построение феноменологической макроскопической теории, основанной на общих, добытых из опыта закономерностях и гипотезах. Макроскопические теории являются эффективным средством решения практически важных задач, и добытые с их помощью сведения согласуются с опытом» [8, с. 19].

Применение феноменологического метода позволяет установить закономерности между параметрами, которые описывают данное явление. При этом вещество рассматривается как сплошная среда, без учета его микроскопического строения.

То есть в работе, проводимой в рамках феноменологического исследования, не рассматривались вопросы молекулярной ориентации, структуры и формы шероховатостей поверхности монокристалла. По результатам этого феноменологического исследования можно выдвинуть гипотезу (обоснованное предположение) относительно характеристик микроструктуры поверхности монокристалла. Для подтверждения либо опровержения этой гипотезы возникает необходимость проведения отдельных, тонких измерений, например, с использованием оптических либо электронных микроскопов.

Измерение коэффициента трения покоя проводилось по следующей методике. В эксперименте использовались два монокристалла льда. Первый монокристалл льда M_1 имел размеры 200×200×10 мм^3, а второй монокристалл льда M_2 имел размеры 50×50×10 мм^3. Поверхности скольжения были соответственно 200×200 мм^2 и 50×50 мм^2. Монокристалл M_1 располагался горизонтально. Имеющий меньшие размеры монокристалл M_2 помещался на верхнюю поверхность монокристалла M_1. При помещении монокристалла M_2 на поверхность монокристалла M_1 до начала эксперимента давалась некоторая выдержка по времени Δt. Эта выдержка составляла 5, 60 и 600 секунд. Затем большой монокристалл M_1 начинал поворачиваться вокруг горизонтальной оси. При определенном угле поворота меньший монокристалл льда M_2, расположенный на верхней поверхности большого кристалла, начинал скатываться с него вниз. Измерялось минимальное значение этого критического угла наклона. Коэффициент трения покоя f связан с λ — наименьшим критическим углом наклона плоскости к горизонту, при котором монокристалл M_2 начинал скользить вниз под действием собственного веса, соотношением $f = \mathrm{tg}\lambda$ [1]. Из формулы видно, что коэффициент трения покоя не зависит от веса монокристалла M_2.

Вращение кристалла M_1 вокруг оси вращения осуществлялось вручную через блок со скоростью вращения 0,25 рад/с. Начало движения монокристалла M_2 по наклонной поверхности монокристалла M_1 фиксировалось визуально. В этот момент вращение монокристалла M_1 прекращалось, и при помощи механического универсального угломера с погрешностью измерения ±1,0° измерялся угол наклона монокристалла M_1.

Была проведена серия экспериментов с различной ориентацией С-осей монокристаллов льда друг относительно друга. Схемы расположения в этих экспериментах С-осей монокристаллов M_1 и M_2 друг относительно друга представлены на рис. 1.

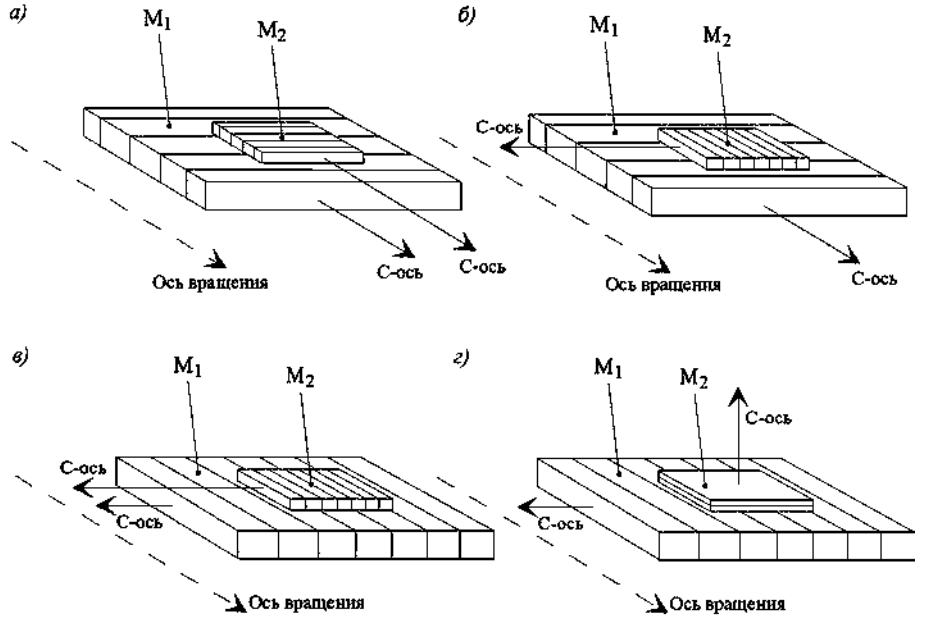

Рис. 1. Четыре схемы (*а*, *б*, *в* и *г*) ориентаций С-осей монокристаллов M_1 и M_2 в экспериментах по измерению коэффициентов трения покоя монокристаллов льда

Fig. 1. Four schemes (*а*, *б*, *в* and *г*) orientations of the C-axes of single crystals M_1 and M_2 in experiments to measure the friction coefficients of rest of single crystals of ice

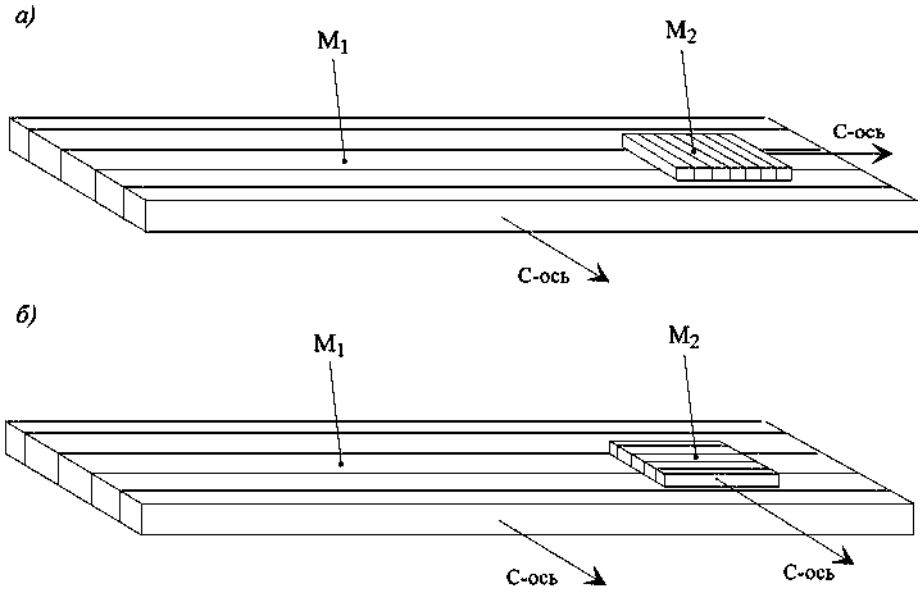

Рис. 2. Две схемы (*а* и *б*) ориентаций С-осей монокристаллов M_1 и M_2 в экспериментах по исследованию трения скольжения монокристаллов льда

Fig. 2. Two schemes (*а* and *б*) orientations of the C-axes of single crystals M_1 and M_2 in experiments to study the friction of sliding single crystals of ice

Следующая серия экспериментов заключалась в измерении анизотропии сил трения скольжения монокристаллов льда. Схему эксперимента поясняет рис. 2, где представлена схема расположения С-осей монокристаллов M_1 и M_2 в экспериментах по исследованию сил трения скольжения.

Сила трения скольжения оценивалась по длине пути, пройденного монокристаллом M_2 по поверхности монокристалла M_1. Чем больше расстояние, пройденное при скольжении монокристаллом льда по поверхности другого монокристалла при прочих равных условиях, тем меньше сила трения скольжения. Была реализована следующая методика исследования силы трения скольжения. Монокристалл M_2 помешался на полиэтиленовую пленку, расположенную на поверхности монокристалла M_1. Монокристалл M_2 располагался вплотную к сжатой на определенную длину небольшой пружине. Распрямляясь, пружина приводила монокристалл M_2 в движение. Монокристалл M_2 соскальзывал с полиэтиленовой пленки и начинал двигаться по поверхности монокристалла M_1. Расстояние, которое проходит монокристалл M_2 по поверхности монокристалла M_1 до остановки, измерялось линейкой с точностью ±1 мм. Это расстояние определялось силой трения скольжения.

Относительно просто измерить коэффициент трения покоя по описанной выше классической методике. Измерить коэффициент трения скольжения значительно сложнее. Коэффициент трения скольжения двух тел равен отношению силы трения скольжения к весу движущегося тела. Коэффициент трения скольжения зависит от скорости движения тела. Для каждой скорости движения тела он свой. Этим обусловлена необходимость измерять коэффициент трения скольжения при равномерном прямолинейном движении тела. Чтобы обеспечить равномерное прямолинейное движение монокристалла льда с определенной скоростью при наличии трения скольжения, к движущемуся монокристаллу необходимо прикладывать силу с отрицательной обратной связью относительно скорости движения монокристалла. То есть, если скорость движения монокристалла льда увеличивается, то силу, действующую на него, необходимо уменьшить. Для реализации такого измерения потребуется сложный комплекс лабораторного оборудования ледовой лаборатории и специальный высокочувствительный измерительный комплекс.

В поставленном эксперименте исследовалась анизотропия сил трения скольжения монокристалла льда при его движении с замедлением от начальной скорости движения до остановки. Поэтому был введен условный коэффициент трения скольжения *H*. Этот коэффициент рассчитывался как отношение расстояния, пройденного монокристаллом M_2 в эксперименте, при котором С-оси перпендикулярны друг к другу, к расстоянию, при котором С-оси монокристаллов M_1 и M_2 параллельны. При этом начальные скорости движения кристаллов были одинаковы.

Максимальной начальной скорости движения монокристалла M_2 соответствует максимальный пройденный им путь. Положим, что в первом эксперименте длина пройденного монокристаллом пути равна l_1, а во втором эксперименте начальная скорость движения монокристалла была меньше и меньше был пройденный им путь l_2. Введем L — относительную начальную скорость движения монокристалла, равную l_2/l_1, как отношение длин пройденных путей (пропорциональных начальным скоростям движения монокристалла). Эту величину будем использовать при исследовании зависимости анизотропии трения скольжения монокристаллов льда от скорости их движения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты измерения коэффициента трения покоя монокристаллов льда при различной ориентации С-осей монокристаллов друг относительно друга представлены в табл. 1.

Таблица 1

Зависимость коэффициента трения покоя монокристаллов льда *f* от взаимной ориентации С-осей (рис. 1) монокристаллов льда при различных временах выдержки Δ*t*

Table 1

The dependence of the rest friction coefficient of single ice crystals *f* on the mutual orientation of the C-axes (fig. 1) of single ice crystals at different exposure times Δ*t*

Схема ориентации С-осей	Δ*t*, с	λ, град.	*f*
а	5	31, 43, 28, 31, 33, 33, 25, 26, 36	0,55±0,15
	60	65, 75, 73	4±1
	600	90, 90,90	→∞
б	5	18,25, 18, 16, 18, 27, 18	0,36±0,05
	60	45,57,55,48	1,3±0,3
	600	89,90	→∞
в	5	58, 38, 46, 50, 38, 40	1,0±0,3
	60	90,90, 90	→∞
г	5	18, 24, 25, 16, 18, 22, 18	0,36±0,07
	60	32, 33, 22, 27, 41	0,59±0,16
	600	83, 66, 77	4,8±2,8

Примечание. В первом столбце — схемы ориентации С-осей монокристаллов согласно рис. 1; Δ*t* — время пребывания монокристалла M_1 на поверхности монокристалла M_2; λ — критический угол наклона в градусах, при котором по поверхности монокристалла льда M_1 начинал скользить монокристалл льда M_2; *f* — коэффициент трения покоя.

Note. The first column contains the orientation schemes of the C-axes of single crystals according to Fig. 1; Δ*t* is the residence time of a single crystal M_1 on the surface of a single crystal M_2; λ is the critical angle of inclination in degrees at which a single crystal of ice M_2 began to slide on the surface of a single crystal of ice M_1; *f* is the rest coefficient of friction.

Из таблицы видно, что коэффициент трения покоя зависит от взаимной ориентации С-осей монокристаллов M_1 и M_2. Коэффициент трения покоя изменялся от 0,36 до 1,0 при времени выдержки Δ*t*, равной 5 секунд, и от 4,8 до ∞, при времени выдержки Δ*t* равной 600 секунд.

Коэффициент трения покоя достаточно стабилен для каждой конкретной ситуации. Максимальный коэффициент вариации (схема *в*, Δ*t* = 5 секунд) составил 0,3.

Эксперимент показал, что после 4–5 измерений поверхности монокристаллов изменяют свои свойства, при этом перестает проявляться анизотропия сил трения покоя. При этом критический угол наклона в любой из схем расположения С-осей при выдержке, равной 5 секундам, составлял 30–35°. Если обработать поверхности монокристаллов снова, как указано выше, значения коэффициентов трения покоя восстанавливаются в соответствии с данными, указанными в табл. 1.

Так же, как и в случае с трением покоя, при исследовании трения скольжения поверхности монокристаллов после 4–5 опытов изменяют свои свойства, и анизотропия сил трения скольжения перестает проявляться. При этом длины путей, которые проходят монокристаллы льда, одинаковы и уже не зависят от взаимной ориентации их С-осей друг относительно друга. После повторной обработки поверхностей монокристаллов по вышеописанной методике анизотропия трения скольжения монокристаллов восстанавливалась.

Было обнаружено, что после нахождения на воздухе в холодной лаборатории в течение 12–15 минут особенности поверхностей монокристаллов льда, проявляющиеся в анизотропии сил трения покоя и трения скольжения, сводились на нет.

В табл. 2 представлены результаты измерений анизотропии монокристаллов льда при трении скольжения. Каждой ситуации в таблице (№ эксперимента) соответствует определенная начальная скорость движения монокристалла льда, определяемая первоначальной деформацией пружины.

Таблица 2

Зависимость расстояния *S*, которое проходит монокристалл M_2 при скольжении по поверхности монокристалла M_1, от взаимной ориентации С-осей кристаллов M_1 и M_2 (рис. 2) для различных значений начальной скорости движения монокристалла M_2

Table 2

The dependence of the distance *S* travelled by a single crystal M_2 when sliding along the surface of a single crystal M_1 on the mutual orientation of the C-axes of the crystals M_1 and M_2 (fig. 2) for different values of the initial velocity of the single crystal M_2

№ эксперимента	Ориентация С-осей монокристаллов льда M_1 и M_2	*S*, см	$S \pm \Delta S$, см
1	*а*	65, 70, 80, 80	74±7,5
	б	45, 42, 40, 40	42±2,4
2	*а*	45, 55, 65	55±10
	б	29, 35, 38	34±4,6
3	*а*	31, 42	36,5±7,8
	б	26, 28	27±1,4
4	*а*	24, 26, 25	25±1
	б	18, 19, 17	18±1

Примечание. S — расстояния, пройденные монокристаллом M_2, см; $S \pm \Delta S$ — средние значения и стандартные отклонения расстояний, пройденных монокристаллом M_2, см

Note. S is the distances covered by the M_2 single crystal, cm; $S \pm \Delta S$ is the average values and standard deviations of the distances traveled by the M_2 single crystal, cm

Результаты измерения зависимости коэффициента трения скольжения монокристалла *H* от относительной скорости его движения *L* представлены на графике рис. 3.

Рис. 3. График зависимости коэффициента анизотропии трения скольжения *H* от *L* — относительной начальной скорости движения монокристалла M_2

Fig. 3. Graph of the dependence of the coefficient of anisotropy of sliding friction *H* on *L* — the relative initial speed of motion of the single crystal M_2

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ, ВЫВОДЫ

Льды природных водоемов: речные, озерные, морские — в верхних слоях ледяного покрова, там, где они мелкокристаллические, как правило, изотропны. В нижних слоях ледяного покрова кристаллы льда значительно крупнее и вытянуты по вертикали. Базисные плоскости этих кристаллов перпендикулярны поверхности замерзания льда [9]. Анизотропия прочностных и реологических характеристик льда нижних слоев ледяного покрова ярко выражена и обусловлена анизотропией механических характеристик кристаллов льда. Известно, что монокристалл льда состоит из базисных пластин — элементарных пластин, разделенных между собой плоскостями ослабления или трансляции. В работах [10, 11] была исследована анизотропия механических, прочностных и реологических характеристик монокристаллов льда. Было показано, что основным механизмом, определяющим анизотропию механических свойств монокристалла льда, является способность базисных пластин монокристалла скользить друг относительно друга.

Проведенное исследование носит феноменологический характер, поэтому можно лишь высказать предположение, объясняющее анизотропию сил трения покоя и трения скольжения монокристаллов льда. Допустим, что базисные пластины определяют также и анизотропию сил трения покоя и трения скольжения монокристаллов льда. Предположим, что при оплавлении монокристалла льда на латунной плите промежутки между базисными пластинами (объемы ослабления) расплавляются несколько интенсивней, чем базисные пластины. Это придаст микроструктуре поверхности монокристалла льда вид «стиральной доски». Такое предположение позволяет в первом приближении объяснить основные закономерности, обнаруженные в данной работе, при измерениях сил трения покоя и трения скольжения для различных ориентаций С-осей монокристаллов. При параллельном расположении С-осей монокристаллов льда силы трения покоя и трения скольжения превышают силы трения в случаях, когда С-оси монокристаллов перпендикулярны.

Из табл. 1 и рис. 1 видно следующее. Если С-оси монокристаллов льда параллельны друг другу (эксперименты по схеме *а* и по схеме *в*), то коэффициенты трения покоя значительно превышают коэффициенты трения покоя в случае, если С-оси монокристаллов льда перпендикулярны друг другу (эксперименты по схеме *б* и по схеме *г*).

В экспериментах, проведенных по схемам *а* и *в*, С-оси обоих монокристаллов параллельны. Но различно было направление движения монокристалла M_2 по поверхности M_1. Если в эксперименте по схеме *а* направление движения монокристалла M_2 было перпендикулярно С-осям монокристаллов M_1 и M_2, то в эксперименте по схеме *в* направление движения монокристалла M_2 было параллельно С-осям монокристаллов.

Эксперимент показал, что коэффициент трения покоя в случае, когда направление движения монокристаллов друг относительно друга параллельно С-осям монокристаллов (эксперимент по схеме *в*), превышает коэффициент трения покоя монокристаллов, движущихся перпендикулярно С-осям (эксперимент по схеме *а*). Первоначально монокристаллы находились в одинаковых условиях, в обоих случаях базисные пластины монокристаллов были параллельны друг другу. Оказалось, что для приведения в движение монокристаллов друг относительно друга параллельно базисным пластинам требуется меньшая сила, чем для приведения в движения монокристаллов перпендикулярно базисным пластинам.

В экспериментах по схеме *в* коэффициент трения покоя растет быстрее с увеличением времени пребывания Δt монокристалла M_2 на поверхности монокристалла M_1,

чем в экспериментах по схеме *а*. При реализации экспериментов по схеме *в* было обнаружено, что только в этом случае коэффициент трения покоя $f \to \infty$ уже при времени выдержки монокристалла M_2 на поверхности монокристалла M_1, равной 60 секундам. То есть только в этом случае монокристаллы смерзаются уже через 60 секунд.

Результаты измерения показали, что коэффициенты трения покоя при реализации экспериментов по схемам *б* и *г*, то есть когда С-оси монокристаллов M_1 и M_2 перпендикулярны друг другу, значительно меньше, чем в случаях при параллельном расположении С-осей монокристаллов M_1 и M_2.

Сравнивая результаты экспериментов, проведенных по схеме *б* и *г*, можно увидеть, что коэффициенты трения покоя при временной выдержке Δt = 5 секунд у них равны, затем начинают проявляться различия. Так, если временная выдержка увеличивается до 60 секунд, то коэффициент трения покоя в экспериментах по схеме *б* увеличивается в 5,1 раза, а в экспериментах по схеме *г* увеличивается всего лишь в 1,6 раза.

При еще более длительной выдержке Δt = 600 секунд коэффициент трения покоя монокристаллов льда в экспериментах, проведенных по схеме *б*, равен бесконечности (монокристаллы смерзлись), а коэффициент трения покоя в экспериментах, проведенных по схеме *г*, равен 4,8. Монокристаллы не смерзлись, и это единственный случай, когда монокристаллы льда, пребывая в соприкосновении в течение 10 минут, не смерзлись. Этот эффект обусловлен основным свойством роста монокристалла льда: молекула H_2O легко присоединяется к краям базисной плоскости, а образование новой базисной плоскости затруднено, поскольку этот процесс более энергозатратный (снежинки плоские; по мере роста ледяного покрова кристаллы с С-осью, параллельной поверхности ледяного покрова, становятся преобладающими [9]). В рассмотренном случае один из монокристаллов, а именно M_2 граничит с монокристаллом M_1 плоскостью базисной пластины, присоединение к которой молекул H_2O затруднено энергетически. Поэтому монокристаллы не смерзлись, даже пребывая в соприкосновении в течение 10 минут.

Нахождение монокристалла льда на воздухе в холодной лаборатории приводит к уменьшению и затем к полному исчезновению анизотропии сил трения покоя и скольжения. Проведенные эксперименты дают основания предположить, что это объясняется конденсацией водяного пара на поверхностях монокристаллов. При этом на поверхности монокристалла образуются участки, покрытые пленкой воды, при замерзании которой образуется лед. Эти пленки воды и «корочки» льда скрадывают уникальные особенности поверхности монокристалла льда, проявляющиеся в анизотропии сил трения. В случае нахождения монокристалла M_2 на поверхности монокристалла M_1 этот механизм уменьшения анизотропии исключается, так как к поверхностям соприкосновения монокристаллов льда не поступает воздух, содержащий водяной пар.

Вопросам тонкой структуры поверхности льда посвящена работа [3]. В ней автор пишет: «Структура и свойства поверхности льда, граничащей с паром, остается во многом неясной. Одна из наиболее интригующих гипотез, выдвинутая еще М. Фарадеем, заключается в существовании на поверхности льда квазижидкого слоя толщиной в десятки-сотни ангстрем. Основанием для этого являются не только умозрительные построения и теории структуры приповерхностных слоев из сильно поляризованных молекул H_2O, но и тонкие измерения (методом ядерного магнитного резонанса) фазового состояния поверхности льда, а также его поверхностной проводимости. Однако в большинстве практически важных случаев свойства поверхности льда, скорее всего, определяются наличием макроскопической водяной пленки, а не

квазижидкого слоя» [3, с. 70]. В работе [4] автор рассматривает методики измерения характеристик тонких поверхностных слоев и пленок.

Таким образом, в этих работах подтверждается наше предположение об образовании из водяного пара тонкой пленки воды на поверхности монокристалла, приводящей к уменьшению анизотропии сил трения монокристаллов льда.

Результаты измерений сил трения покоя в первом приближении объясняются нашим предположением о волнообразной микроструктуре поверхности монокристалла, обусловленной базисными пластинами и зонами ослабления между ними.

В работе [5] были проведены измерения анизотропии сил кинетического трения, возникающей при скольжении шарика из карбида вольфрама в различных направлениях по поверхности монокристалла льда. Также измерялась ширина дорожки, образующейся на поверхности монокристалла. Анизотропия была обнаружена как в коэффициенте трения, так и в ширине дорожки. Ширина дорожки была максимальной при скольжении шара по нормали к базисным плоскостям и минимальной при движении параллельно им. Хотя коэффициент трения был минимальным при скольжении по нормали к базисным плоскостям и максимальным параллельно им. Анизотропию ширины дорожки автор объяснил с точки зрения величины вклада механизма скольжения в деформацию образца.

Из графика на рис. 3 видно, что коэффициент анизотропии трения скольжения H растет с ростом начальной скорости движения монокристалла M_2 по поверхности монокристалла M_1 (от пройденного пути, определяемого начальной скоростью движения M_2 по поверхности M_1). Это можно объяснить ростом пройденного кристаллом M_2 пути и увеличением времени взаимодействия монокристаллов льда, в течение которого и проявляются свойства анизотропии, растет и площадь поверхностей монокристаллов, пребывающих в соприкосновении.

В работах [6, 7] было продемонстрировано наличие анизотропии механических характеристик монокристаллов льда, которые обусловлены скольжением базисных пластин монокристалла друг относительно друга.

В настоящей работе показана определяющая роль базисных пластин монокристалла льда в формировании особой характеристики микроструктуры его поверхности, проявляющейся в макроскопической анизотропии сил трения покоя и трения скольжения.

Обнаруженная анизотропия сил трения покоя может опосредованно проявляться при исследовании прочностных характеристик льдов, состоящих из крупных, вертикально ориентированных кристаллов. В ледяном покрове, состоящем из этого типа льда, уже с уровня 40 см и ниже кристаллы льда вертикально ориентированы. Их С-оси параллельны верхней поверхности ледяного покрова и расположены хаотично. В случае, если С-оси двух соприкасающихся кристаллов перпендикулярны друг другу, то, при возникновении во льду напряжения, эти кристаллы с большей вероятностью смогут перемещаться друг относительно друга, чем пара соприкасающихся кристаллов с параллельной ориентацией С-осей.

Основным результатом данного исследования является экспериментальное подтверждение наличия у монокристаллов льда анизотропии сил трения покоя и трения скольжения.

Проведенная работа по измерению характеристик сил трения покоя и трения скольжения монокристаллов льда представляет научный интерес и практическое значение.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Работа выполнена по теме «Исследование крупномасштабной динамики, физических процессов, механики деформирования и разрушения морских льдов» ЦНТП 052626 раздел 5.1.5.

Competing of Interest. The author declares that there is no conflict of interest.

Funding. The work was carried out on the topic "Study of large-scale dynamics, physical processes, mechanics of deformation and destruction of sea ice" CSTC 052626 section 5.1.5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Яворский Б.М., Детлаф А.А.* Справочник по физике. М.: Наука, 1964. 847 с.

2. *Хайкин С.Э.* Физические основы механики. М.: Наука, 1971. 752 с.

3. *Головин Ю.И.* Вода и лед — знаем ли мы о них достаточно? // Соросовский образовательный журнал. 2000. Т. 6. № 9. С. 67–72.

4. *Головин Ю.И.* Наноиндентирование и механические свойства твердых тел в субмикрообъемах, тонких приповерхностных слоях и пленках // Физика твердого тела. 2008. Т. 50. № 12. С. 2113–2141.

5. *Tusima K.* Anisotropy of the kinetic friction on a single crystal of ice // Journal of Glaciology. 1978. V. 21. № 85. P. 661–668.

6. *Mishima O., Stanley E.* The Relationship between Liquid, Supercooled and Glassy Water // Nature. 1998. V. 396. P. 329–335.

7. *Черепанов Н.В.* Классификация льдов природных водоемов // Труды ААНИИ. 1976. Т. 331. С. 77–99.

8. *Седов Л.И.* Механика сплошной среды. М.: Наука, 1970. Т. 1. 492 с.

9. *Богородский В.В., Гаврило В.П.* Лед: Физические свойства. Современные методы гляциологии. Л.: Гидрометеоиздат, 1980. 384 с.

10. *Steinemann S.* Results of preliminary experiments on the plasticity of ice crystals // Journal of Glaciology. 1954. V. 2. № 16. P. 404–412.

11. *Higashi A.* Mechanical properties of ice single crystals // Physics of snow and ice: Proc. of int. symposium. Munich; N.Y., 1969. P. 197–212.

REFERENCES

1. *Yavorsky B.M., Detlaf A.A. Spravochnik po fizike.* Handbook of Physics. Moscow: Nauka, 1964: 847 p. [In Russian].

2. *Khaikin S.E. Fizicheskie osnovy mehaniki.* Physical Foundations of Mechanics. Moscow: Nauka, 1971: 752 p. [In Russian].

3. *GolovinYu.I.* Water and Ice — do we know enough about them? Soros Educational Journal. 2000, 6 (9): 67–72. [In Russian].

4. *GolovinYu.I.* Nanoindentation and mechanical properties of solids in submicrovolums, thin near-surface layers and films. Physics of solid state. 2008, 50 (12): 2113–2141. [In Russian].

5. *Tusima K.* Anisotropy of the Kinetic Friction on a Single Crystal of Ice. Journal of Glaciology. 1978, 21 (85): 661–668.

6. *Mishima O., Stanley E.* The Relationship between liquid, supercooled and glassy water. Nature. 1998, 396: 329–335.

7. *Cherepanov N.V.* Classification of ice in natural waters. *Trudy AARI.* Proc. of AARI. 1976, 331: 77–99. [In Russian].

8. *Sedov L.I. Mehanika sploshnoj sredy.* Mechanics of continuous medium. Moscow: Nauka, 1970, 1: 492 p. [In Russian].

9. *Bogorodsky V.V, Gavrilo V.P. Led. Fizicheskie svoystva. Sovremennye metody glyatsiologii.* Ice. Physical properties. Modern methods of glaciology. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1980: 384 p. [In Russian].

10. *Steinemann S.* Results of preliminary experiments on the plasticity of ice crystals. Journal of Glaciology: 1954, 2 (16): 404–412.

11. *Higashi A.* Mechanical properties of ice single crystals. Physics of snow and ice: Proc. of int. symposium. Munich; N.Y., 1969: 197–212.

СОЦИАЛЬНАЯ ГЕОГРАФИЯ И СОЦИАЛЬНАЯ АНТРОПОЛОГИЯ
SOCIAL GEOGRAPHY AND SOCIAL ANTHROPOLOGY

https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-4-420-436
УДК [316.47+656.02](985)

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ **ORIGINAL ARTICLE**

Фактор неопределенности в современных сообществах Крайнего Севера РФ: методологические подходы к изучению

К.В. Истомин, Н.Б. Вахтин*

Центр социальных исследований Севера АНООВО «Европейский университет в Санкт-Петербурге», Санкт-Петербург, Россия

**kistomin@eu.spb.ru*

Резюме

Статья знакомит читателей с работой Центра социальных исследований Севера Европейского университета в Санкт-Петербурге по исследовательскому проекту «Преодоление неопределенности при взаимодействии с физической и социальной средой в Российской Арктике». Основные вопросы, на которые призвано ответить исследование: какова роль природной и социальной неопределенности в жизненных ситуациях постоянного населения Арктики? Каковы стратегии действий населения в условиях неопределенности? Какова роль различных акторов в преодолении негативных последствий природных и социальных неопределенностей? Дается обзор теоретических и методологических основ проекта и литературы по объекту на русском и английском языках.

Ключевые слова: антропология неопределенности, антропология рисков, методология, сообщества Крайнего Севера.

Для цитирования: *Истомин К.В., Вахтин Н.Б.* Фактор неопределенности в современных сообществах Крайнего Севера РФ: методологические подходы к изучению // Проблемы Арктики и Антарктики. 2022. Т. 68. № 4. С. 420–436. https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-4-420-436.

Поступила 20.10.2022 **После переработки 07.11.2022** **Принята 11.11.2022**

Uncertainty factor in contemporary communities of the Russian Arctic: methodological approaches to research

Kirill V. Istomin, Nikolai B. Vakhtin*

Center for Arctic Social Studies, European University, St. Petersburg, Russia

**kistomin@eu.spb.ru*

Summary

The article introduces readers to work on a new research project "Overcoming Uncertainty in Interaction with the Physical and Social Environment in the Russian Arctic" by describing its conceptual and theoretical approach and premises as well as the steps of designing it. It opens with an analysis of the concept of risk, which is currently popular in the Arctic Social Studies and which is sometimes claimed to be the central concept in the field. It proceeds by describing the new approach, which is based on the concept of uncertainty, both natural and social, which constantly accompanies human life in the Far North. The inhabitants of the North know from experience that uncertainty cannot be ruled out, but one can be constantly prepared for it by planning one's behavior with this factor in mind. Furthermore, one can suggest that the effects of ecological, economic and social changes are experienced by these inhabitants first and foremost as shifts in the level and kind of uncertainty. Therefore, the concept of uncertainty can replace the concept of risk in the studies of the effects of change on northern communities; in fact, "uncertainty" is preferable because its conceived nature is obvious, while in many risk studies, risk is still perceived as something objective. The main questions that a study of uncertainty can answer are: what is the role of natural and social uncertainty in the everyday life of the permanent population of the Arctic? What are the action strategies of the people in the face of uncertainty, including discursive strategies to explain the growing uncertainty? What is the role of state authorities, industrial companies, local organizations, urban and rural communities in overcoming the negative consequences of natural and social uncertainties? How are social connections and networks involved in dealing with situations of uncertainty? The paper demonstrates how these questions can be answered on the basis of anthropological fieldwork. It also uses examples from the Komi Republic (Vorkuta), Yakutia (Chersky settlement), and Magadan area to demonstrate the sort of problems the uncertainty-based approach can contribute to solving. A review of the existing literature in Russian and English is presented in order to give the reader useful insights into the field of uncertainty studies and outline the main directions of research that a study of uncertainty can take.

Keywords: anthropology of risks, anthropology of uncertainty, Arctic communities, methodology.

For Citation: *Istomin K.V., Vakhtin N.B.* Uncertainty factor in contemporary communities of the Russian Arctic: methodological approaches to research. *Problemy Arktiki i Antarktiki.* Arctic and Antarctic Research. 2022, 68 (4): 420–436. [In Russian]. https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-3-420-436.

Received 20.10.2022 **Revised 07.11.2022** **Accepted 11.11.2022**

ВВЕДЕНИЕ

В послесловии к только что изданному коллективному труду, посвященному социальным исследованиям Арктики и носящему очень характерное, на наш взгляд, название «Рискованное будущее: климат, геополитика и местные реалии неопределенного полярного Севера» [1], Майкл Браво определяет задачу этого труда и, шире, социальных исследований Арктики вообще как описание и анализ «созвездий рисков» [2, p. 210], т. е. комплексов взаимосвязей в экологической среде, социальной среде и между ними, разрушение или трансформация которых потенциально способны нанести значительный урон обитателям Арктики. Редакторы коллективного труда, Ольга Ультургашева и Барбара Боденхорн, являющиеся, как и М. Браво, весьма значимыми фигурами в современном социальном североведении, также указывают риск в написанном ими введении к данной книге в качестве одного из ключевых понятий своей дисциплины [3].

Такое «увлечение» риском кажется вполне уместным, учитывая рост экологических, социальных, экономических и политических угроз в современном мире, пожалуй наиболее сильно ощущаемый в арктическом регионе. И тем не менее, на наш взгляд, коллективный труд мог бы сильно выиграть, в том числе в плане оценки воздействия на население Арктики упомянутых угроз, если бы редакторы поменяли

местами в его заглавии и, что еще более важно, в предлагаемой ими теоретической рамке (которую они, как мы уже сказали, склонны распространять на всю дисциплину), понятия «риск» и «неопределенность».

Действительно, уже почти сорок лет назад в давно ставшей этнологической классикой работе «Риск и культура» [4] Мэри Дуглас и Аарон Вилдавски показали, что в характере преобладающих в обществе социальных связей произошел существенный сдвиг: платформой, на которой происходит формирование крупных общественных групп и объединений — партий, общественных движений, молодежных субкультур и т. д. (включая и некоторые религиозные группы), — перестает быть общность классовых, расовых, культурных и т. п. интересов; на первый план все больше и больше выходит то, что исследователи назвали «общностью страхов». Анализируя наиболее яркие общественные движения своего времени — движение в защиту природы и движение за разоружение, — авторы пришли к выводу, что членов этих движений объединяет не сходное общественное положение, уровень образования, этическое или расовое происхождение, а социально сконструированная иерархия рисков. Так, в представлении членов движения за разоружение риск ядерной войны превышает все остальные риски, и именно это представление наполняет их деятельность смыслом и отличает их как от членов других общественных движений, так и от остальных представителей общества, чья «иерархия рисков» устроена иначе. (Другим существенным вкладом исследования Дуглас и Видлавски в антропологическое знание стала демонстрация того, что риски — а уж тем более их иерархии — социально сконструированы. К этому их утверждению мы еще вернемся в тексте настоящей работы.)

Хотя события прошедших сорока лет показали, что авторы слегка поторопились сбрасывать со счетов «классические» факторы социальной мобилизации, им тем не менее удалось «нащупать» нечто важное и новое. Заложенное ими направление исследований нашло свое продолжение, например, в работах Ульриха Бека [5] и наиболее ярко — в работах Дэвида Чейни (напр., [6]). Последний утверждает, что на смену классовым различиям в современном обществе пришли различия в стилях жизни (lifestyles) и именно они определяют современную общественную структуру. Стиль жизни, по мысли Чейни, имеет две стороны: surfaces (поверхности), т. е. внешние проявления, заключающиеся в определенном стиле одежды, поведения, потребления материальных и культурных благ, и sensibilities (что можно перевести как «беспокойства»), т. е. особый набор тем и дискурсов, обычно отсылающих к той или иной общественной проблеме (положение женщин, права подростков, политические предпочтения и т. д.), вызывающих сильную эмоциональную реакцию. Именно на базе sensibilities носители того или иного стиля жизни и объединяются между собой. Иными словам, в современном обществе действует максима: «Скажи мне, что тебя беспокоит, и я скажу, кто ты», причем, как утверждает Чейни, она действует как при социальных контактах и межличностном общении, так и при формировании у личности «образа себя», создании собственной идентичности.

Несомненно, «беспокойства» Чейни значительно отличаются от «иерархии рисков» Дуглас и Видлавски, да и сама его теория стилей жизни остается открытой для критики. Мы полагаем, однако, что гораздо важнее общая мысль, которая связывает эти теоретические работы, а также упомянутую выше работу Бека и целый ряд других исследований (напр., [7 и 8]), а именно, что для понимания процессов,

происходящих в современных человеческих (со)обществах, мало учитывать лишь те события и изменения, которые действительно происходят внутри и вокруг него; важное значение имеют также события и изменения, которые *могут* произойти (или не произойти) с точки зрения членов этих сообществ. Оценка возможного влияет на действия людей не в меньшей степени, чем оценка реального. К настоящему моменту накоплено, по нашему мнению, достаточно эмпирических доказательств этой мысли, и на повестке дня стоит разработка концептуального аппарата и методов, способных развить ее в исследовательскую программу. Такая программа, на наш взгляд, обладала бы гораздо большим потенциалом в понимании воздействия существующих угроз на человеческие сообщества, в том числе проживающие в арктическом регионе, по сравнению с классическими исследованиями риска. К сожалению, в этом направлении до сих пор сделано не так много, особенно в теоретическом плане.

Цель настоящей статьи — наметить основные черты подобной программы, ориентированной на исследование человеческих сообществ Российской Арктики. В основу ее положен наш опыт разработки исследовательского проекта по данной тематике для Российского научного фонда.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДМЕТА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование роли и места возможного в формировании человеческого поведения исторически начиналось как исследование риска и отношения к нему. Антропология и социальные науки, впрочем, в данном случае не одиноки: риск уже долгое время является популярным предметом исследования в экономике, медицине, инженерном деле и ряде других наук. Более того, понятие риска — тот редкий случай, когда научный термин, пришедший из экономики и имеющий строгое математическое определение (*ущерб от события, умноженный на вероятность этого события* [7]) проник в живую речь и стал частью повседневного дискурса. Неудивительно поэтому, что риск долго воспринимался — и часто воспринимается до сих пор — как сугубо объективное явление, существующее вне и помимо человеческого сознания. (Заметим, что в когнитивной психологии существует целое направление исследований, призванное объяснить «ошибки» в оценке риска и неопределенности, которые мы «постоянно совершаем в обыденной жизни» [17]).

Недостаточность такого подхода к риску очевидна. Начало его критики положило уже упомянутое нами исследование М. Дуглас и А. Вилдавски [4], где было впервые продемонстрировано, что оценки риска и неопределенности зависят от культурных и социальных факторов. Однако наиболее существенными в плане критики «объективистского» подхода к риску и неопределенности стали работы об «Обществе риска» У. Бека [5]. В этих работах, фактически заложивших основу теории рефлексивной модернизации, показано, что современное общество не просто само создает риски и неопределенности, но их создание (и последующее преодоление) следует считать нормальной формой его функционирования. При этом вопрос об объективности этих понятий вообще не имеет смысла: большинство рисков в современном обществе порождено самим обществом, то есть риск не является объективной реальностью, которая «правильно» или «неправильно» воспринята его членами.

Это удобно показать на примере изменения климата, которое часто называют одним из наиболее существенных рисков в современном мире. Если в прошлом веке — и даже в первом десятилетии нынешнего — риски, связанные с изменением климата, трактовались как объективные, несмотря на разницу их оценки в различ-

ных странах, то сегодня в литературе прочно утвердилась мысль, что оценка риска глобального потепления неотделима от восприятия этого риска в обществе (см. 9–12]. Это вызвало шквал социологических исследований восприятия глобального потепления различными группами населения, в том числе — коренным населением Севера (см., напр., [13–16]). Наиболее масштабным примером такого исследования — и одновременно признанием их важности — стал проект Организации Объединенных Наций "Peoples' Climate Vote", результаты которого были опубликованы в январе 2021 года (см. https://www.undp.org/publications/peoples-climate-vote).

Существенным недостатком исследований такого рода, однако, является их сохраняющаяся привязка к «экономическому» и «инженерному» понятиям риска, что, по нашему мнению, сильно снижает их информативность, поскольку понятия эти содержат неизбежную отсылку к опасности, убытку и алармистскому дискурсу в целом. В результате для многих, если не большинства, людей «риск» становится практически синонимом понятия «опасность», и исследовательское внимание неизбежно направляется в сторону оценки опасных, потенциально разрушительных последствий природных и социальных изменений. Этим, в частности, объясняется широко растиражированный образ северян, особенно «коренных», как жертв климатических изменений, который в последнее время справедливо критикуется: «Однако было бы ошибкой рассматривать коренные народы только как потенциальные жертвы глобального изменения климата. На самом деле коренные народы редко представляют себя беспомощными или неспособными справиться с переменами…; [о]ни обычно подчеркивают, что их окружающая среда всегда менялась и постоянно меняется… они также систематически выражают уверенность в своей способности адаптироваться к любым обстоятельствам, которые может принести изменение климата» [18, p. 9].

Выходом из этой ситуации могло бы стать смещение фокуса исследования с понятия риска и его восприятия жителями Арктики к понятию неопределенности и адаптации к ней как основного предмета исследования. Это дает возможность оценить восприятие жителями Арктики происходящих изменений в их взаимосвязи: ведь климатические изменения — далеко не единственный (хотя и важный) элемент неопределенности в Арктике, и он несет далеко не только опасности, но и возможности, которые также влияют на оценку этих изменений.

Конечно, некоторые последствия, скажем, природных изменений могут быть однозначно угрожающими — например, зимний дождь, вызывающий наледь и падеж оленей, — но многие из них могут быть нейтральными, а иногда и содержать новые возможности, в зависимости от восприятия их и реакции на них. Так, более поздний ледостав и промерзание грунта могут вызвать более позднее открытие зимников, что в некоторых контекстах может быть воспринято как угроза. Однако те же явления могут продлить водную навигацию, открыть новые возможности для рыболовства или сельского хозяйства. Поэтому методологически правильно, особенно в контексте качественного исследования, говорить не о рисках, связанных с природными или социальными изменениями, а о порождаемой ими *неопределенности* (см. [19]).

Понятие неопределенности ценно еще и потому, что позволяет поставить воздействие и восприятие природных и социальных изменений в более широкий контекст. Как справедливо пишет Игорь Крупник, «процесс "нормализации" для таких [арктических] общин означает, что заботы об изменениях климата оказались

вплетены в ткань повседневной жизни, где другие тревоги — смерть и болезни, экономика, цена бензина для моторов, отсутствие зарплаты и т. п. — часто волнуют людей не меньше, если не больше, чем состояние погоды и льда. Никто уже не боится “изменений климата” и не собирается из-за них уезжать. “Любовь к родной земле” — фактор, отсутствующий в моделях климатологов, помогает людям быть стойкими (resilient), предприимчивыми или просто упрямыми» [20, с. 183].

ВОЗМОЖНЫЕ ОБЪЕКТЫ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ имеющихся данных и собственные наблюдения показывают, что неопределенность — чуть ли не всеобъемлющая категория, определяющая очень многие аспекты жизни и поведения населения Крайнего Севера, причем проявления воздействия природных неопределенностей связаны с неопределенностями социальными таким образом, что сокращение природных источников неопределенности ведет к росту социальной неопределенности, и наоборот: рост природной неопределенности снижает неопределенность социальную [21, 22]. Этот факт открывает широкий выбор объектов, изучение которых может внести вклад в понимание процессов, связанных с неопределенностью. Ниже всего лишь несколько примеров:

(1) Эпидемия COVID-19, затрагивая в той или иной степени все население нашей страны, приобретает особую актуальность в Арктическом регионе: разреженная инфраструктура затрудняет оказание своевременной медицинской помощи; большое количество периодически сменяющихся вахтовиков создает практически идеальные условия для распространения вируса; скученность населения в поселках, его длительное пребывание в закрытых помещениях в зимний период увеличивают скорость распространения заражения. Несмотря на то, что эти факторы известны, темпы прививочной кампании в Арктике в целом оказались невысоки. При этом вряд ли можно сказать, что большинство населения Арктики неправильно оценивало риски, связанные с болезнью, или преувеличивало риски, связанные с вакцинацией. Проблема состоит как раз в том, что люди не воспринимают и не оценивают по отдельности риски болезни и риски вакцинации и не сопоставляют их. Здесь идет речь о сложившейся за время эпидемии специфической форме переживания неопределенности, факторами которой являются заболеваемость COVID-19, вакцинация, действия местных и центральных властей в этой сфере и, возможно, целый ряд других факторов. Какова эта форма? Как она различается между группами населения и регионами Арктики? Каковы различные пути адаптации жителей Арктики к этой неопределенности? Лишь ответив, путем тщательного эмпирического исследования, на эти вопросы, можно понять причины неудачи кампании вакцинации в Арктике и наметить пути решения подобных проблем в будущем.

(2) Город Воркута и прилежащие к нему шахтовые поселки давно стали символом постсоветской депопуляции в Арктике. С 1992 г. агломерация потеряла почти 70 % процентов своего населения; с конца 1990-х гг. на уровне правительств Республики Коми и Российской Федерации обсуждались планы «свертывания» Воркуты. В результате среди жителей агломерации распространилась убежденность, что их город и поселки обречены на исчезновение. В то же время некоторые крупные экономические проекты прошедших двух десятилетий вызывали у населения Воркуты «вспышки надежды», приводившие даже к заметному увеличению цен на недвижимость. Среди жителей постоянно идут разговоры, что градообразующее предприятие собирается постепенно, по мере выработки имеющихся шахт, «уходить» из

Воркутинского района, что, разумеется, означает конец для города и окружающих его поселков. Как жители города воспринимают такие резкие переходы от надежды к пессимизму? Как они справляются с неопределенностью судьбы города и своей собственной судьбы? Каковы стратегии действий в условиях этой неопределенности, связанные, например, с созданием «запасных аэродромов» в плане работы и места жительства? Как такую неопределенность переживает молодежь, представители которой родились и выросли в условиях постоянного ожидания «закрытия» города?

(3) В небольших арктических сообществах, в значительной мере полагающихся в своем жизнеобеспечении на промысловые практики, источником неопределенности может быть не только постоянная вариативность окружающей среды, то есть в данном случае климатические изменения и связанные с ними изменения биологических циклов и ареалов обитания животных и растений, но и изменения в экономической конъюнктуре: востребованность того или иного промыслового ресурса, колебания рыночной стоимости сбываемых ресурсов, цен на продукты и технику, уровня оплаты труда и возможностей занятости. Природные и социальные факторы здесь работают в комплексе, и, кроме того, существуют общие социальные механизмы преодоления этих неопределенностей. Какие объяснения происходящих изменений избирают жители этих районов? Как они справляются с неопределенностью результатов жизнеобеспечения, какими средствами компенсируют возможные потери?

(4) Уже в течение нескольких лет летние лесные пожары вынуждают жителей Якутии существенно менять свою жизнь, отводя часть лета на борьбу с огнем в ущерб другой сезонной работе. Лесные пожары затрагивают многие районы Якутии, в ряде случаев подходя вплотную к населенным пунктам. Последним таким центром внимания якутских СМИ стало сгоревшее село Бясь-Кюёль; для исследования интерес представляют также и «рядовые» населенные пункты, рутинно противостоящие огню, например пос. Черский, где прошлым и позапрошлым летом лесной пожар угрожал местной ЛЭП. Как появление подобной неопределенности меняет жизнь населения поселка? Каковы социальные механизмы, позволяющие людям продолжать нормальную жизнь в этих условиях? Что, по мнению жителей, является причиной участившихся пожаров?

Число подобных примеров легко умножить. Объединяет их, однако, то, что для ответа на поставленные в них вопросы — а вопросы эти имеют не только теоретический интерес, но и существенную практическую значимость — недостаточно анализировать риски и их восприятие местным населением. Восприятие рисков должно быть поставлено в социальный, культурный, экономический и, возможно, исторический контекст. Понятие неопределенности позволяет провести такой анализ в рамках антропологического исследования.

Одновременно с определением объектов удалось определить и вопросы, ответы на которые составляют в нашем случае задачу исследования. В общей форме эти вопросы можно сформулировать так: какова роль природной и социальной неопределенности в тех или иных жизненных ситуациях, поведении и мотивациях постоянного населения Арктики? Каковы стратегии действий населения в условиях неопределенности, в том числе — дискурсивные стратегии, позволяющие объяснить растущую неопределенность? Как видится жителям роль различных акторов (органов государственной власти, промышленных предприятий, местных организаций, городских и поселковых сообществ) в преодолении негативных последствий при-

родных и социальных неопределенностей? Как в решении ситуаций, связанных с неопределенностью, задействованы социальные связи и сети? В поисках ответа на эти, в значительной степени теоретические, вопросы мы предполагаем опираться на примеры, имеющие практическую значимость; кроме перечисленных выше, можно указать и такие вопросы, как создание компенсаторной инфраструктуры спасения на случай аварий на Колымской трассе, стратегии преодоления нерегулярности Северного завоза (топлива и продуктов) в поселки бассейнов рек Индигирка и Анадырь, механизмы преодоления неопределенностей в промысловой деятельности и сбыте добытого на востоке Таймыра и др.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ КОНТЕКСТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Существующие этнографические исследования жизни с неопределенностью многообразны, но не систематичны. Среди них можно выделить несколько тематических и методологических фокусов: 1) микросоциология неопределенности — сконцентрированный на деталях анализ неясных коммуникативных ситуаций [23]; 2) анализ структуры чувств (structure of feeling): проявлений надежды, тревоги, волнения, предвосхищения и других аффективных реакций по поводу будущего [24–26], в т. ч. Б. Андерсон и соавторы предлагают рассматривать разные структуры чувства в связи с неопределенностью как разные «режимы неопределенности» [24]; 3) формирование специфических, обусловленных неопределенностью субъективностей [24, 25, 27, 28, 30]; 4) анализ неопределенности как техники власти — т. е. управления посредством создания неопределенности [26, 29–31]. Важное место в этнографических исследованиях неопределенности занимает описание разнообразных тактик жизни в неопределенности: сосредоточение на практиках заботы о домашнем пространстве на фоне финансового кризиса [32], в частности на рукоделии [33], развитие терпения в ситуации долгой хронической болезни [34], отказ от планирования в пользу использования случая [27], запрос компенсаций, привлечение ученых и экспериментирование в случае радиоактивной катастрофы [28], обращение к духам предков [35] и т. п. Эти тактики в значительной степени определяются контекстом.

С региональной точки зрения исследования неопределенности сосредоточены главным образом в местах с нестабильной военной и/или экономической обстановкой — в странах Африки [27, 36–39] и Израиле [30, 31, 40, 41]. На постсоветском пространстве неопределенность исследовалась опосредованно — в рамках изучения адаптации к экономическим и политическим переменам «переходного» периода 1990-х. Хотя эти исследования почти не оперировали понятием «неопределенность» и сосредотачивались только на нестабильности социальной среды, некоторые наблюдения, сделанные их авторами (напр., [35, 42, 43]), могут быть полезны для сравнения в предлагаемом исследовании. Исследования неопределенности в Арктике также пока единичны [44, 45].

На российском материале хорошо разработана количественная социология риска — в работах О. Н. Яницкого, А. В. Мозговой и сотрудников сектора проблем риска и катастроф Института социологии ФНИСЦ РАН; эти труды выполнены главным образом на материалах социологических опросов и экспериментов. В последние годы социологи риска также исследуют и адаптацию к неопределенности [46–51], однако их фокус направлен на население страны в целом и не учитывает влияния региональных особенностей на восприятие неопределенности и тактики жизни с ней.

«Антропология неопределенности», о создании которой объявлялось уже несколько раз, представляет собой быстро растущее и слабо структурированное направление со множеством подходов, состоит преимущественно из исследований, разрозненных тематически и регионально, и существующих во многом отдельно от них теоретических и методологических наработок. Систематические предметные исследования жизни с неопределенностью, включающей в себя различные виды неопределенности, пока отсутствуют. Представляется, что для дальнейшего развития этого направления необходимы исследования, более сфокусированные как тематически, так и регионально, проводимые не отдельными исследователями, а научными коллективами и создающие, таким образом, основу для широких обобщений.

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД

Постановка нашего исследования в описанный выше теоретический контекст позволила яснее увидеть его методологически важные особенности и наметить методологический подход. Стало ясно, что основная особенность исследования — его региональный характер. Крайний Север, Арктическая зона РФ — стратегически значимый макрорегион, территория экстремальных климатических условий, требующая от ее жителей большой гибкости и приспособляемости. Именно в таких обстоятельствах малейшие изменения в окружающей среде или даже кажущаяся угроза этих изменений особенно сильно отражаются на поведении и жизненных решениях людей. Распространение COVID-19, проекты развития нефтедобывающей отрасли или упадок угледобычи, изменения в практиках судоходства, климатические сдвиги, изменения путей миграций животных, успешность завоза продуктов и топлива на отдаленные территории — примеры очень разных, но в равной мере актуальных для локальных сообществ явлений, так как именно с ними они связывают свое благополучие. В этих условиях особую значимость приобретает выявление и описание универсальных механизмов преодоления неопределенностей, существующих у населения Севера.

Второй особенностью использования является применение качественных методов к конкретным точкам. В науке существуют близкие по тематике исследования, но отсутствуют аналогичные сравнительные исследования, базирующиеся на применении качественных методов и рассматривающие различного рода неопределенности в комплексе. Существующие количественные исследования рисков и восприятия климатических изменений [52, 53] позволяют очертить проблему в общем виде, но не дают возможности описать конкретные тактики жизни с неопределенностью, а именно такое описание позволит создать полезные рекомендации для местных управленцев, сотрудников различных региональных ведомств, администраций муниципального и регионального уровней, может лечь в основу социального прогнозирования.

Методологически наше исследование должно прежде всего различать факторы, влияющие на неопределенность, и механизмы приспособления к ней. С точки зрения факторов, влияющих на неопределенность в Арктике, можно выделить такие явления, как неопределенность в отношениях с (дикой) природой, прежде всего с холодом, а также с хищниками (медведи и др.); для более южных районов Севера — с лесными пожарами (и страхом перед ними). Сюда же относится неопределенность, связанная с постоянными природными изменениями (климатические изменения, наступление моря и обрушение суши, раннее таянье льдов и др.), а также распространение вирусов и прочих патогенов. Кроме того, можно выделить неопределенность

в традиционном жизнеобеспечении (охота, промыслы), связанную с экономическими колебаниями и конъюнктурой рынка, а также неопределенность, связанную с поставками на Север продуктов и топлива (Северным завозом). Сюда же можно отнести неопределенность будущего (явления депопуляции, то есть сокращение населения в поселках и городах, появление поселков-призраков, распространение угроз здоровью и разреженная инфраструктура для борьбы с ними), страх перед будущим (ожидание закрытия градообразующего предприятия или падежа оленей) и дискурсивные объяснения этих явлений среди местного населения.

Механизмы приспособления к неопределенностям и их преодоления могут включать социальные сети и их сознательное конструирование как страховки от неопределенности, а также восприятие государственных служб и механизмов, призванных страховать от рисков (санавиация, пункты спасения на трассе, экстренные формы доставки и государственной поддержки и др.).

Таким образом, наше исследование должно включать различные аспекты жизни населения Крайнего Севера, в том числе:

– осознаваемые изменения сроков, форм, эффективности традиционной хозяйственной деятельности местного населения;

– роль частного транспорта, механизмы компенсации дефицита, социальные сети взаимопомощи;

– рост неопределенности и рисков чрезвычайных ситуаций и отношение к ним;

– соотношение дискурсов о природных и социальных изменениях «сверху» и «снизу»;

– этические и моральные установки и социальные нормы, повышающие предсказуемость поведения членов сообщества перед лицом неопределенности и, таким образом, уменьшающие эту неопределенность;

– рождение социальных мифов, страхов, прежде всего — иррациональных и конспирологических интерпретаций происходящих процессов, а также действий местной, региональной и федеральной власти по преодолению негативных последствий таких изменений;

– проблема доверия местного населения к власти (местной, региональной, федеральной).

При этом учитываются локальные особенности, возрастные, гендерные и другие аспекты восприятия и переживания неопределенности и использования механизмов ее преодоления.

Основной класс методов нашего исследования — качественные: включенное наблюдение в условиях полевой работы и углубленные интервью с представителями постоянного населения Крайнего Севера. Выбор этого региона исследования представляется обоснованным с методологической точки зрения по двум причинам. Во-первых, малая плотность населения, скудость транспортных связей, существенная роль охоты, рыболовства и собирательства ведут к тому, что природные неопределенности (сроки ледостава, сроки промерзания почв, определяющие сроки открытия зимников, и т. д.) гораздо сильнее влияют на жизнь местного населения по сравнению с центральными областями России, и поэтому существующая здесь неопределенность не только объективно выше, но и воспринимается острее. Во-вторых, природные изменения в арктической зоне происходят заметно быстрее и резче, чем в целом по стране [53], о чем населению постоянно напоминают СМИ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанные в настоящей работе теоретические выборы и наработки позволили сформировать программу исследований, оказавшуюся достаточно убедительной для того, чтобы привлечь финансирование Российского научного фонда. С мая 2022 г. мы приступили к осуществлению нашего проекта. В настоящее время пилотные полевые исследования по проекту проведены в Ненецком АО (пос. Шойна), в Республике Коми (г. Воркута), в Республике Саха (Якутия) (пос. Черский), в Чукотском АО (поселки по течению р. Анадырь). Коллективу исследователей предстоит еще работать в Ямало-Ненецком АО (г. Салехард, поселки и тундровые районы), на Таймыре (пос. Сындаско и Попигай) и в Магаданской области (Колымская трасса).

Есть и первые, пока предварительные, результаты. Предварительно можно утверждать, что ситуация с неопределенностью и реакции на нее в настоящее время заметно изменились по сравнению с ситуацией год назад. Так, можно видеть рост различных «конспирологических» интерпретаций происходящего, например объяснение падежа оленей сознательными злонамеренными действиями газодобывающих компаний. Полезным кажется и понятие «предсказуемой неопределенности»: сезонной, связанной с погодой или с регулярно неудачными действиями снабженцев.

Мы надеемся, что дальнейшая работа по этому проекту принесет не только интересные результаты как теоретического, так и практического плана, но и будет полезна для людей, населяющих Крайний Север РФ.

Обобщая наш опыт разработки программы исследований, мы считаем возможным подчеркнуть следующие основные моменты.

Во-первых, наш опыт не может быть полностью скопирован в других исследовательских коллективах: очень многие методологические и теоретические моменты в нашем исследовании обусловлены институциональной направленностью и личным интересом членов нашего коллектива к исследованиям Севера и его населения. Хотя этот регион, несомненно, глубоко интегрирован с другими регионами страны, связан с ними многочисленными социальными, экономическими и инфраструктурными связями, нельзя не признать, что он имеет свою специфику, которая ярко проявилась в нашем выборе объектов исследования и, скорее всего, сопряженных с ними исследовательских задач. Тем не менее нашим опытом выбора и операционализации предмета исследования вполне можно воспользоваться и в других исследовательских контекстах.

Во-вторых, наш опыт показывает, что при разработке исследовательских программ важно не оставаться привязанным к понятийному и концептуальному аппарату «своей» основной дисциплины (в нашем случае — социальной антропологии). Привлечение понятий и концепций иных дисциплин — вещь, конечно, достаточно опасная, но возникающие в связи с этим риск и неопределенность часто вполне оправдывают себя.

Мы надеемся, что наш опыт окажется полезным и востребованным нашими коллегами.

Конфликт интересов. Конфликты интересов отсутствуют.

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-18-00238, https://rscf.ru/project/22-18-00238/.

Благодарности. Авторы признательны А.И. Карасевой за ценные дополнения к тексту настоящей статьи.

Competing interest. There is no conflict of interests.

Funding. The work was supported by the Russian Science Foundation within the framework of a grant No 22-18-00238, https://rscf.ru/project/22-18-00238/.

Acknowledgment. The authors are grateful to Anastasia Karaseva for important additions and comments to the text of the present article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ulturgasheva O., Bodenhorn B.* (eds). Risky Futures: Climate, Geopolitics and Local Realities in the Uncertain Circumpolar North. New York: Berghahn, 2022. 236 p.

2. *Bravo M.* Afterword: Risk Constellations and the Politics of Polarity // Risky Futures: Climate, Geopolitics and Local Realities in the Uncertain Circumpolar North / Edited by Ulturgasheva O. and Bodenhorn B. New York: Berghahn, 2022. P. 206–212.

3. *Bodenhorn B., Ulturgasheva O.* On Constellations and Connected-Up Thinking in the Face of the Future // Risky Futures: Climate, Geopolitics and Local Realities in the Uncertain Circumpolar North / Edited by Ulturgasheva O. and Bodenhorn B. New York: Berghahn, 2022. P. 1–25.

4. *Douglas M., Wildavsky A.* Risk and Culture: An Essay on the Selection of Technological and Environmental Dangers. Berkeley: University of California Press, 1984. 221 p.

5. *Beck U.* Risk Society: Towards a New Modernity. Los Angeles: SAGE Publications Ltd., 1992. 272 p.

6. *Chaney D.* Lifestyles. London: Routledge, 1996. 196 p.

7. *Zinn J.O.* Introduction: The Contribution of Sociology to the Discourse on Risk and Uncertainty // Social Theories of Risk and Uncertainty: An Introduction / Edited by J.O. Zinn. Malden: Blackwell, 2008. P. 1–17.

8. *Samimian-Darash L., Rabinow P.* (eds.) Modes of Uncertainty: Anthropological cases. Chicago: University of Chicago Press, 2015. 251 p.

9. *Crate S.A.* Gone the bull of winter? Grappling with the cultural implications of and anthropology's role (s) in global climate change // Current anthropology. 2008. V. 49. № 4. P. 569–595.

10. *Анисимов О.А., Жильцова Е.Л., Жегусов Ю.И.* Общественное восприятие изменения климата в холодных регионах России: пример Якутии // Лед и снег. 2017. Т. 57. № 4. С. 565–574. doi: 10.15356/2076-6734-2017-4-565-574.

11. *Anisimov O., Orttung R.* Climate change in Northern Russia through the prism of public perception // Ambio. 2019. V. 48. № 6. P. 661–671. doi: 10.1007/s13280-018-1096-x.

12. *Анисимов О.А., Жильцова Е.Л., Шаповалова К.О., Ершова А.А.* Анализ индикаторов изменения климата. Часть 2. Северо-Западный регион России // Метеорология и гидрология. 2020. № 1. С. 23–25.

13. *Leiserowitz A.* Climate change risk perception and policy preferences: The role of affect, imagery, and values // Climatic Change. 2006. V. 77. № 1–2. P. 45–72. doi: 10.1007/s10584-006-9059-9.

14. *Pietsch J., McAllister I.* "A diabolical challenge": Public opinion and climate change policy in Australia // Environmental Politics. 2010. V. 19. № 2. P. 217–236. doi: 10.1080/09644010903574509.

15. *Telešienė A., Gross M.* How Green are Green Europeans? // Green European: Environmental Behaviour and Attitudes in Europe in a Historical and Cross-Cultural Comparative Perspective. London: Routledge, 2017. P. 1–11. doi: 10.4324/9781315648491.

16. *Krupnik I., Rubis J., Nakashima D.* Indigenous Knowledge for Climate Change Assessment and Adaptation: Epilogue // Indigenous Knowledge for Climate Change: Assessment and Adaptation / Edited by Igor Krupnik, Jennifer Rubis and Douglas Nakashima. Cambridge: Cambridge UP, 2018. P. 280–291. doi: 10.1017/9781316481066 3.

17. *Slovic P.* The Perception of Risk. London: Routledge, 2000. 512 p.

18. *Nakashima D., Rubis J., Krupnik I.* Indigenous Knowledge for Climate Change: Assessment and Adaptation: Introduction // Indigenous Knowledge for Climate Change: Assessment and Adaptation / Edited by Igor Krupnik, Jennifer Rubis and Douglas Nakashima. Cambridge: Cambridge UP, 2018. P. 1–20. doi: 10.1017/9781316481066 3.

19. *Boholm Å.* The cultural nature of risk: Can there be an anthropology of uncertainty? // Ethnos. 2003. V. 68. № 2. P. 159–178.

20. *Krupnik I.* At the Frontline or Very Close. Living with Change on St. Lawrence Island, Alaska, 1999–2017 // Climate and Culture: Multidisciplinary Perspectives on a Warming World. Edited by Giuseppe Feola, Hilary Geoghegan, and Alex Arnall, eds. Cambridge: Cambridge University Press, 2019. P. 168–187.

21. *Норт Д.* Понимание процесса экономических изменений. М.: Изд-во ВШЭ, 2010. 253 с.

22. *Пилясов А.Н., Цукерман В.А.* Арктические корпорации и освоенческие риски: вызов и ответ // Арктика и Север. 2021. № 44. С. 103–129.

23. *Berthomé F., Bonhomme J., Delaplace G.* Preface: cultivating uncertainty // HAU: Journal of Ethnographic Theory. 2012. V. 2. № 2. P. 129–137.

24. *Anderson B., Wilson H.F., Forman P.J., Heslop J., Ormerod E., Maestri G.* Brexit: Modes of uncertainty and futures in an impasse // Transactions of the Institute of British Geographers. 2020. V. 45. № 2. P. 256–269.

25. *Cooper E., Pratten D.* Ethnographies of uncertainty in Africa: An introduction // Ethnographies of uncertainty in Africa. London: Palgrave Macmillan, 2015. P. 1–16.

26. *Griffiths M.* Living with uncertainty: Indefinite immigration detention // Journal of Legal Anthropology. 2013. V. 1. № 3. P. 263–286.

27. *Johnson-Hanks J.* When the future decides: uncertainty and intentional action in contemporary Cameroon // Current anthropology. 2005. V. 46. № 3. P. 363–385.

28. *Rosenberger N. J*apanese organic farmers: Strategies of uncertainty after the Fukushima disaster // Ethnos. 2016. V. 81. № 1. P. 1–24.

29. *Button G.* Disaster culture: knowledge and uncertainty in the wake of human and environmental catastrophe. London: Routledge, 2010. 312 p.

30. *Samimian-Darash L.* Practicing uncertainty: Scenario-based preparedness exercises in Israel // Cultural Anthropology. 2016. V. 31. № 3. P. 359–386.

31. *Samimian-Darash L., Rabi M.* Governing uncertainty, producing subjectivity: from Mode I to Mode II scenarios // Subjectivity. 2021. V. 14. P. 1–18.

32. *Bird T.* The creativity of everyday uncertainty: Improvisation, material security, and wellbeing in urban households in the Northeastern United States // Journal of Organizational Ethnography. 2019. V. 9. № 1. P. 1–16. doi: 10.1108/JOE-12-2017-0073.

33. *Buchczyk M.* Making certainty and dwelling through craft // Journal of American Folklore. 2020. V. 133. № 528. P. 178–192.

34. *Honkasalo M.L.* Enduring as a mode of living with uncertainty // Health, Risk Society. 2008. V. 10. № 5. P. 491–503.

35. *Buyandelgeriyn M.* Dealing with uncertainty: shamans, marginal capitalism, and the remaking of history in postsocialist Mongolia // American Ethnologist. 2007. V. 34. № 1. P. 127–147.

36. *Calkins S.* Who knows tomorrow?: Uncertainty in north-eastern Sudan. New York: Berghahn Books, 2016. 282 p.

37. *Coope E., Pratten D.* (Eds.) Ethnographies of uncertainty in Africa. New York: Palgrave Macmillan, 2015. 216 p.

38. *Dungey C.E., Ansell N.* 'I go to school to survive': Facing physical, moral and economic uncertainties in rural Lesotho // Children's Geographies. 2020. V. 18. № 6. P. 614–628.

39. *Verhoeven H.* Climate water in a changing Africa: uncertainty, adaptation the social construction of fragile environments // Dædalus. 2021. V. 150. № 4. P. 260–277.

40. *Kelly T.* Documented lives: fear and the uncertainties of law during the second Palestinian intifada // Journal of the Royal Anthropological Institute. 2006. V. 12. № 1. P. 89–107.

41. *Sosis R., Handwerker W.P.* Psalms and coping with uncertainty: Religious Israeli women's responses to the 2006 Lebanon war // American Anthropologist. 2011. V. 113. № 1. P. 40–55.

42. *Burawoy M., Verdery K.* (Eds.) Uncertain transition: ethnographies of change in the postsocialist world. Lanham: Rowman and Littlefield, 1999. 330 p.

43. *Shevchenko O.* Crisis and the everyday in postsocialist Moscow. Bloomington: Indiana University Press, 2009. 256 p.

44. *Hébert K.* Enduring capitalism: instability, precariousness, and cycles of change in an Alaskan salmon fishery // American Anthropologist. 2015. V. 117. № 1. P. 32–46.

45. *Wentze S.I.* State of uncertainty: educating the first railroaders in Central Sakha (Yakutiya) // Transfers. 2020. V. 10. № 2–3. P. 175–194.

46. *Мозговая А.В.* Идентификация, оценка и адаптация к риску в условиях неопределенности // Социологическая наука и социальная практика. 2019. Т. 7. № 4. С. 151–165.

47. *Мозговая А.В., Шлыкова Е.В.* Адаптация к неопределенности среды: ресурсы жителей больших городов // Logos et Praxis. 2019. Т. 18. № 3. С. 124–130.

48. *Зорина А.Е., Мозговая А.В.* Работники вредных производств: средовые и личностные факторы адаптации к социальным изменениям // Социологическая наука и социальная практика. 2020. Т. 8. № 4. С. 54–68.

49. *Мозговая А.В.* Адаптация к средовым изменениям: риски социальных и технологических нововведений // Социологический журнал. 2021. Т. 27. № 3. С. 60–77.

50. *Шлыкова Е.В.* Субъективная оценка безопасности как показатель адаптированности к рискам социальных изменений: методологическое и эмпирическое обоснование исследовательского подхода // Социологическая наука и социальная практика. 2020. Т. 8. № 4. С. 105–120.

51. *Солдатенко С.А., Алексеев Г.В., Иванов Н.Е., Вязилова А.Е., Харланенкова Н.Е.* Об оценке климатических рисков и уязвимости природных и хозяйственных систем в морской арктической зоне РФ // Проблемы Арктики и Антарктики. 2018. Т. 64. № 1. С. 55–70.

52. *Davydov A., Mikhailova G.* Climate change and consequences in the Arctic: perception of climate change by the Nenets people of Vaigach Island // Global Health Action. 2011. V. 4. № 1. P. 8436.

53. *Катцов В.М., Семенов С.М.* Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации: Общее резюме. НИЦ "Планета", 2014. URL: http://downloads.igce.ru/publications/OD_2_2014/v2014/pdf/resume_ob.pdf (дата обращения 20.11.2022)

REFERENCES

1. *Ulturgasheva O., Bodenhorn B.* (eds). Risky Futures: Climate, Geopolitics and Local Realities in the Uncertain Circumpolar North. New York: Berghahn, 2022: 236 p.

2. *Bravo M.* Afterword: Risk Constellations and the Politics of Polarity. Risky Futures: Climate, Geopolitics and Local Realities in the Uncertain Circumpolar North. Edited by Ulturgasheva O. and Bodenhorn B. New York: Berghahn, 2022: 206–212.

3. *Bodenhorn B., Ulturgasheva O.* On Constellations and Connected-Up Thinking in the Face of the Future Risky Futures: Climate, Geopolitics and Local Realities in the Uncertain Circumpolar North. Edited by Ulturgasheva O. and Bodenhorn B. New York: Berghahn, 2022: 1–25.

4. *Douglas M., Wildavsky A.* Risk and Culture: An Essay on the Selection of Technological and Environmental Dangers. Berkeley: University of California Press, 1984: 221 p.

5. *Beck U.* Risk Society: Towards a New Modernity. Los Angeles: SAGE Publications Ltd., 1992: 272 p.

6. *Chaney D.* Lifestyles. London: Routledge, 1996: 196 p.

7. *Zinn J.O.* Introduction: The Contribution of Sociology to the Discourse on Risk and Uncertainty. Social Theories of Risk and Uncertainty: An Introduction. Edited by J.O. Zinn. Malden: Blackwell, 2008: 1–17.

8. *Samimian-Darash L., Rabinow P.* (eds.) Modes of Uncertainty: Anthropological cases. Chicago: University of Chicago Press, 2015: 251 p.

9. *Crate S.A.* Gone the bull of winter? Grappling with the cultural implications of and anthropology's role (s) in global climate change. Current anthropology. 2008, 49 (4): 569–595.

10. *Anisimov O.A., Zhiltsova E.L., Zhegusov Yu.I.* Public perception of climate change in the cold regions of Russia: the example of Yakutia. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2017, 57 (4): 565–574. doi: 10.15356/2076-6734-2017-4-565-574. [In Russian].

11. *Anisimov O., Orttung R.* Climate change in Northern Russia through the prism of public perception. Ambio. 2019, 48 (6): 661–671. doi: 10.1007/s13280-018-1096-x.

12. *Anisimov O.A., Zhiltsova E.L., Shapovalova K.O., Ershova A.A.* Analysis of climate change indicators. Part 2. Northwestern region of Russia. *Meterologiia i Gidrologiia.* Meteorology and Hydrology. 2020, 1: 23–25. [In Russian].

13. *Leiserowitz A.* Climate change risk perception and policy preferences: The role of affect, imagery, and values. Climatic Change. 2006, 77 (1–2): 45–72. doi: 10.1007/s10584-006-9059-9.

14. *Pietsch J., McAllister I.* "A diabolical challenge": Public opinion and climate change policy in Australia. Environmental Politics. 2010, 19 (2): 217–236. doi: 10.1080/09644010903574509.

15. *Telešienė A., Gross M.* How Green are Green Europeans? Green European: Environmental Behaviour and Attitudes in Europe in a Historical and Cross-Cultural Comparative Perspective. London: Routledge, 2017: 1–11. doi: 10.4324/9781315648491.

16. *Krupnik I., Rubis J., Nakashima D.* Indigenous Knowledge for Climate Change Assessment and Adaptation: Epilogue. In Indigenous Knowledge for Climate Change: Assessment and Adaptation. Edited by Igor Krupnik, Jennifer Rubis and Douglas Nakashima. Cambridge: Cambridge UP, 2018: 280–291. doi: 10.1017/9781316481066 3.

17. *Slovic P.* The Perception of Risk. London: Routledge, 2000: 512 p.

18. *Nakashima D., Rubis J., Krupnik I.* Indigenous Knowledge for Climate Change: Assessment and Adaptation : Introduction. Indigenous Knowledge for Climate Change: Assessment and Adaptation. Edited by Igor Krupnik, Jennifer Rubis and Douglas Nakashima. Cambridge: Cambridge UP, 2018: 1–20. doi: 10.1017/9781316481066 3.

19. *Boholm Å.* The cultural nature of risk: Can there be an anthropology of uncertainty? Ethnos. 2003, 68 (2): 159–178.

20. *Krupnik I.* At the Frontline or Very Close. Living with Change on St. Lawrence Island, Alaska, 1999–2017. Climate and Culture: Multidisciplinary Perspectives on a Warming World. Edited by Giuseppe Feola, Hilary Geoghegan, and Alex Arnall. Cambridge: Cambridge University Press, 2019: 168–187.

21. *North D. Ponimaniye protsessa ekonomicheskikh izmeneniy.* Understanding the process of economic change. Moscow: HSE Publishing House, 2010: 253 p. [In Russian].

22. *Piliasov A.N., Tsukerman V.A.* Arctic corporations and development risks: challenge and response. *Arktika i Sever*. Arctic and North. 2021. 44: 103–129. [In Russian].

23. *Berthomé F., Bonhomme J., Delaplace G.* Preface: cultivating uncertainty. HAU: Journal of Ethnographic Theory. 2012, 2 (2): 129–137.

24. *Anderson B., Wilson H.F., Forman P.J., Heslop J., Ormero E., Maestri G.* Brexit: Modes of uncertainty and futures in an impasse. Transactions of the Institute of British Geographers. 2020, 45 (2): 256–269.

25. *Cooper E., Pratten D.* Ethnographies of uncertainty in Africa: An introduction. Ethnographies of uncertainty in Africa. London: Palgrave Macmillan, 2015: 1–16.

26. *Griffiths M.* Living with uncertainty: Indefinite immigration detention. Journal of Legal Anthropology. 2013, 1 (3): 263–286.

27. *Johnson-Hanks J.* When the future decides: uncertainty and intentional action in contemporary Cameroon. Current anthropology. 2005, 46 (3): 363–385.

28. *Rosenberger N.* Japanese organic farmers: Strategies of uncertainty after the Fukushima disaster. Ethnos. 2016, 81 (1): 1–24.

29. *Button G.* Disaster culture: knowledge and uncertainty in the wake of human and environmental catastrophe. London: Routledge, 2010: 312 p.

30. *Samimian-Darash L.* Practicing uncertainty: Scenario-based preparedness exercises in Israel. Cultural Anthropology. 2016, 31 (3): 359–386.

31. *Samimian-Darash L., Rabi M.* Governing uncertainty, producing subjectivity: from Mode I to Mode II scenarios. Subjectivity. 2021, 14: 1–18.

32. *Bird T.* The creativity of everyday uncertainty: Improvisation, material security, and wellbeing in urban households in the Northeastern United States. Journal of Organizational Ethnography. 2019, 9 (1): 1–16. doi: 10.1108/JOE-12-2017-0073.

33. *Buchczyk M.* Making certainty and dwelling through craft. Journal of American Folklore. 2020, 133 (528): 178–192.

34. *Honkasalo M.L.* Enduring as a mode of living with uncertainty. Health, Risk Society. 2008, 10 (5): 491–503.

35. *Buyandelgeriyn M.* Dealing with uncertainty: shamans, marginal capitalism, and the remaking of history in postsocialist Mongolia. American Ethnologist. 2007, 34 (1): 127–147.

36. *Calkins S.* Who knows tomorrow?: Uncertainty in north-eastern Sudan. New York: Berghahn Books, 2016: 282 p.

37. *Cooper E., Pratten D.* (Eds.) Ethnographies of uncertainty in Africa. New York: Palgrave Macmillan, 2015: 216 p.

38. *Dungey C.E., Ansell N.* 'I go to school to survive': Facing physical, moral and economic uncertainties in rural Lesotho. Children's Geographies. 2020, 18 (6): 614–628.

39. *Verhoeven H.* Climate water in a changing Africa: uncertainty, adaptation the social construction of fragile environment. Dædalus. 2021, 150 (4): 260–277.

40. *Kelly T.* Documented lives: fear and the uncertainties of law during the second Palestinian intifada. Journal of the Royal Anthropological Institute. 2006, 12 (1): 89–107.

41. *Sosis R., Handwerker W.P.* Psalms and coping with uncertainty: Religious Israeli women's responses to the 2006 Lebanon war. American Anthropologist. 2011, 113 (1): 40–55.

42. *Burawoy M., Verdery K.* (Eds.) Uncertain transition: ethnographies of change in the postsocialist world. Lanham: Rowman and Littlefield, 1999: 330 p.

43. *Shevchenko O.* Crisis and the everyday in postsocialist Moscow. Bloomington: Indiana University Press, 2009: 256 p.

44. *Hébert K.* Enduring capitalism: instability, precariousness, and cycles of change in an Alaskan salmon fishery. American Anthropologist. 2015, 117 (1): 32–46.

45. *Wentzel S.I.* State of uncertainty: educating the first railroaders in Central Sakha (Yakutiya). Transfers. 2020, 10 (2–3): 175–194.

46. *Mozgovaya A.V.* Identification, assessment and adaptation to risk under uncertainty. *Sotsiologicheskaya nauka i sotsial'naya praktika.* Social Science and Social Praxis. 2019, 7 (4): 151–165. [In Russian].

47. *Mozgovaya A.V., Shlykova E.V.* Adapting to Environmental Uncertainty: Urban Resources. Logos et Praxis. 2019, 18 (3): 124–130. [In Russian].

48. *Zorina A.E., Mozgovaya A.V.* Workers in hazardous industries: environmental and personal factors of adaptation to social changes. *Sotsiologicheskaya nauka i sotsial'naya praktika*. Social Science and Social Praxis. 2020, 8 (4): 54–68. [In Russian].

49. *Mozgovaya A.V.* Adaptation to environmental changes: risks of social and technological innovations. *Sotsiologicheskiy zhurnal.* Sociological Journal. 2021, 27 (3): 60–77. [In Russian].

50. *Shlykova E.V.* Subjective assessment of safety as an indicator of adaptability to the risks of social change: methodological and empirical substantiation of the research approach. *Sotsiologicheskaya nauka i sotsial'naya praktika.* Social Science and Social Praxis. 2020, 8 (4): 105–120. [In Russian].

51. *Soldatenko S.A., Alekseev G.V., Ivanov N.E., Vyazilova A.E., Kharlanenkova N.E.* On the Assessment of Climate Risks and Vulnerability of Natural and Economic Systems in the Marine Arctic Zone of the Russian Federation. *Problemy Arktiki i Antarktiki.* Arctic and Antarctic Research. 2018, 64 (1): 55–70. [In Russian].

52. *Davydov A., Mikhailova G*. Climate change and consequences in the Arctic: perception of climate change by the Nenets people of Vaigach Island. Global Health Action. 2011, 4 (1): 8436.

53. *Kattsov V.M., Semenov S.M.* The second assessment report of Roshydromet on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation: General summary. NITS "Planeta", 2014. [In Russian]. Available at: http://downloads.igce.ru/publications/OD_2_2014/v2014/pdf/resume_ob.pdf (accessed 20.11.2022)

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ ЖУРНАЛА «ПРОБЛЕМЫ АРКТИКИ И АНТАРКТИКИ»

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

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

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

Все статьи проходят двойное рецензирование.

Публикация в нашем журнале полностью бесплатна.

Структура статьи

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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