

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 66, № 2, 2020**

**ARCTIC AND ANTARCTIC  
RESEARCH**

**Volume 66, No 2, 2020**

Санкт-Петербург  
2020  
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 — чл.-корр. РАН, д-р геогр. наук И.Е. Фролов,  
научный руководитель ААНИИ, Санкт-Петербург, Россия**

#### Заместители главного редактора:

д-р физ.-мат. наук **В.В. Иванов** (Санкт-Петербург, Россия), чл.-корр. РАН **В.Д. Каминский** (Санкт-Петербург, Россия),  
канд. геогр. наук **В.Я. Липенков** (Санкт-Петербург, Россия), академик РАН **Г.Г. Матишов** (Ростов-на-Дону, Россия),  
д-р физ.-мат. наук **Л.А. Тимохов** (Санкт-Петербург, Россия)

#### Члены редколлегии:

д-р геогр. наук <b>Г.В. Алексеев</b> (Санкт-Петербург, Россия)	проф. <b>А.В. Марченко</b> (Лонгйир, Норвегия)
канд. физ.-мат. наук <b>Л.П. Бобылев</b> (Санкт-Петербург, Россия)	д-р геогр. наук <b>Е.У. Миронов</b> (Санкт-Петербург, Россия)
чл.-корр. РАН <b>Н.Б. Вахтин</b> (Санкт-Петербург, Россия)	доктор биол. наук <b>С.Г. Денисенко</b> (Санкт-Петербург, Россия),
проф. <b>Т. Вихма</b> (Хельсинки, Финляндия)	д-р геогр. наук <b>А.Ю. Прошутинский</b> (Вулс-Хоул, США)
д-р геогр. наук <b>М.Н. Григорьев</b> (Якутск, Россия)	академик РАН <b>О.Н. Пугачев</b> (Санкт-Петербург, Россия)
д-р <b>Д.В. Дивин</b> (Тромсё, Норвегия)	канд. геогр. наук <b>В.Ф. Радионов</b> (Санкт-Петербург, Россия)
чл.-корр. РАН <b>С.А. Добролюбов</b> (Москва, Россия)	проф. <b>Д. Райно</b> (Гренобль, Франция)
д-р физ.-мат. наук <b>В.М. Катцов</b> (Санкт-Петербург, Россия)	д-р физ.-мат. наук <b>В.А. Рожков</b> (Санкт-Петербург, Россия)
д-р физ.-мат. наук <b>Б.В. Козлов</b> (Мурманск, Россия)	акад. РАН <b>В.А. Румянцев</b> (Санкт-Петербург, Россия)
академик РАН <b>В.М. Котляков</b> (Москва, Россия)	д-р техн. наук <b>К.Е. Сазонов</b> (Санкт-Петербург, Россия)
д-р геол.-минерал. наук <b>Г.Л. Лейченко</b> (Санкт-Петербург, Россия),	д-р техн. наук <b>К.Г. Ставров</b> (Санкт-Петербург, Россия)
проф. <b>М. Леппаранта</b> (Хельсинки, Финляндия)	проф. <b>Й. Тиде</b> (Германия)
канд. техн. наук <b>В.А. Лихоманов</b> (Санкт-Петербург, Россия)	чл.-корр. РАН <b>А.А. Тишков</b> (Москва, Россия)
академик НАН <b>В.Ф. Логинов</b> (Минск, Беларусь)	д-р физ.-мат. наук <b>О.А. Трошичев</b> (Санкт-Петербург, Россия)
д-р геогр. наук <b>А.С. Макаров</b> (Санкт-Петербург, Россия)	чл.-корр. РАН <b>Н.Н. Филатов</b> (Петрозаводск, Россия)
д-р геогр. наук <b>В.Н. Малинин</b> (Санкт-Петербург, Россия)	д-р геогр. наук <b>К.В. Чистяков</b> (Санкт-Петербург, Россия)
д-р физ.-мат. наук <b>А.П. Макштас</b> (Санкт-Петербург, Россия)	

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

Литературный редактор – **Е.В. Миненко**

Оригинал-макет и подготовка к печати: **А.А. Меркулов**. Англоязычное редактирование: **Д.Г. Хвостенко**.

*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 25.00.25, 25.00.27, 25.00.28, 25.00.29, 25.00.30, 25.00.31.

Адрес редакции журнала «Проблемы Арктики и Антарктики»:

199397 Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38.

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

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт.

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

Подписной индекс издания в каталоге «Газеты. Журналы» ОАО «Агентство Роспечать»  
48657 – на полгода

© ГНЦ РФ ААНИИ, 2020; © Росгидромет, 2020.

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

DOI-prefix: 10.30758



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

#### EDITORIAL BOARD:

**Editor-in-Chief – Ivan E. Frolov**  
**corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Dr of Sci. (Geography),**  
**AARI Research Supervisor, St. Petersburg, Russia**

#### Deputy of the Editor-in-Chief:

**Vladimir V. Ivanov**, Dr. of Sci. (Geography), Moscow, Russia;  
**Valery D. Kaminsky**, RAS corr.member, Dr. of Sci. (Geology and mineralogy), St. Petersburg, Russia;  
**Vladimir Ya. Lipenkov**, Cand. of Sci. (Geography), St. Petersburg, Russia;  
**Genady G. Matishov**, academician, Dr. of Sci. (Geography), Rostov on the Don;  
**Leonid A. Timokhov**, Dr. of Sci. (Physics and mathematics), St. Petersburg, Russia.

#### Members of the editorial board:

**Genrikh V. Alekseev**, Dr. of Sci. (Geography), St. Petersburg, Russia; **Alexey V. Marchenko**, Dr. of Sci. (Physics and mathematics), Longyearbyen, Norway;  
**Leonid P. Bobylev**, Cand. of Sci. (Physics and mathematics) St. Petersburg, Russia; **Evgeny U. Mironov**, Dr. of Sci. (Geography), St. Petersburg, Russia;  
**Kirill V. Chistyakov**, Dr. of Sci. (Geography), St. Petersburg, Russia; **Stanislav G. Denisenko**, Dr. of Sci. (Biology), St. Petersburg, Russia;  
**Dmitry V. Divine**, Cand. of Sci. (Geography), Tromsø, Norway; **Andrey Yu. Proshutinsky**, Dr. of Sci. (Geography), Woods Hole, USA;  
**Sergey A. Dobrolyubov**, RAS corr. member, Dr. of Sci. (Geography), Moscow, Russia; **Oleg N. Pugachev**, academician, Dr. of Sci. (Geography), St. Petersburg, Russia;  
**Nikolay N. Filatov**, RAS corr. member, Dr. of Sci. (Geography), Petrozavodsk, Russia; **Vladimir F. Radionov**, Cand. of Sci. (Geography), St. Petersburg, Russia;  
**Mikhail N. Grigoriev**, Dr. of Sci. (Geography), Yakutsk, Russia; **Dominique Raynaud**, Prof. emer., Grenoble, France  
**Vladimir M. Kattsov**, Dr. of Sci. (Physics and mathematics), St. Petersburg, Russia; **Valentin A. Rozhkov**, Dr. of Sci. (Physics and mathematics), St. Petersburg, Russia;  
**Vladimir M. Kotlyakov**, academician, Dr. of Sci. (Geography), Moscow, Russia; **Vladislav A. Rumiantsev**, academician, Dr. of Sci. (Geography), St. Petersburg, Russia;  
**Boris V. Kozelov**, Dr. of Sci. (Physics and mathematics), Murmansk, Russia; **Kirill E. Sazonov**, Dr. of Sci. (Technology), St. Petersburg, Russia;  
**German L. Leitchenkov**, Dr. of Sci. (Geology and mineralogy), St. Petersburg, Russia; **Konstantin G. Stavrov**, Dr. of Sci. (Technology), St. Petersburg, Russia;  
**Matti Leppäranta**, Ph.D. (Geography), Prof. emer., Helsinki, Finland; **Jörn Tiede**, Prof., Bremerhaven, Germany  
**Vladimir A. Likhomanov**, Cand. of Sci. (Technology, P.E.), St. Petersburg, Russia; **Arkady A. Tishkov**, RAS corr. member, Dr. of Sci. (Geography), Moscow, Russia;  
**Vladimir F. Loginov**, academician, Dr. of Sci. (Geography), Minsk, Belarus; **Oleg A. Troshichev**, Dr. of Sci. (Physics and mathematics), St. Petersburg, Russia;  
**Alexander S. Makarov**, Dr. of Sci. (Geography), St. Petersburg, Russia; **Nikolay B. Vakhtin**, corr. member, Dr. of Sci. (Linguistics), St. Petersburg, Russia;  
**Alexander P. Makshtas**, Dr. of Sci. (Geography), St. Petersburg, Russia; **Timo Vihma**, Prof., Helsinki, Finland.  
**Valery N. Malinin**, Dr. of Sci. (Geography), St. Petersburg, Russia;

Executive Secretary – **Irina A. Alekhina**

Literary Editor – **Elena V. Minenko**

Original layout and preparation for printing: **Alexander A. Merkulov**. English language editor: **Dmitry G. Khvostenko**.

*Registration Certificate for the print publishing III № ФС 77-73644 of September 7, 2018.*

*Registration Certificate for the web publishing ЭИ № 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 Commission in Moscow (VAK). The Journal publishes papers on the next scientific specialties of the Supreme Certification Commission: 25.00.25, 25.00.27, 25.00.28, 25.00.29, 25.00.30, 25.00.31.

#### Contacts:

199397 Saint Petersburg, Bering str, 38; phone: +7 (812) 416-4251; e-mail: [aaresearch@aari.ru](mailto:aaresearch@aari.ru).  
State Scientific Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute  
<https://www.aaresearch.science>

Subscription index of the journal in the Agency Rospechat OJSC catalog "Newspapers. Journals"  
48657 – for half a year

© SSC RF AARI, 2020; © Roshydromet, 2020.

---

## СОДЕРЖАНИЕ

### ОКЕАНОЛОГИЯ

*А.Г. Егоров.* Изменение возрастного состава и толщины зимнего ледяного покрова арктических морей России в начале XXI в. .... 124

### МЕТЕОРОЛОГИЯ И КЛИМАТОЛОГИЯ

*В.Ф. Логинов, С.А. Лысенко, Ю.А. Бровка, В.С. Микуцкий.* Циклическая структура и предпосылки прогнозирования продолжительности арктических вторжений на ближайшее десятилетие..... 144

### ЛЕДОТЕХНИКА

*В.Н. Смирнов, С.М. Ковалев, А.И. Шушлебин, Н.В. Колабутин, М.С. Знаменский.* Мониторинг физико-механического состояния морского льда и краткосрочное прогнозирование экстремальных ледовых явлений ..... 162

### ЭКОЛОГИЯ, БИОЦЕНОЛОГИЯ И БИОГЕОГРАФИЯ

*Е.С. Колтакова, А.В. Вельямидова.* Хлорорганические соединения в субарктических малых озерах..... 180

*С.В. Смирнова, О.Я. Чаплыгина, А.Ф. Лукницкая.* Сообщества водорослей водоемов оазиса Ширмахера, Восточная Антарктида ..... 198

### СОЦИАЛЬНАЯ ГЕОГРАФИЯ И СОЦИАЛЬНАЯ АНТРОПОЛОГИЯ

*М.В. Фомин, В.А. Безвербный, И.А. Селезнев, И.С. Шушпанова, Е.А. Лукашенко, Т.Р. Мирязов.* Проблемы пространственного развития регионов севера Дальнего Востока России: социологический анализ..... 217

---

## CONTENTS

### OCEANOLOGY

- A.G. Egorov.* The Russian Arctic seas ice age composition and thickness variation in winter periods at the beginning of the 21st century ..... 124

### METEOROLOGY AND CLIMATOLOGY

- V.F. Loginov, S.A. Lysenko, Yu.A. Brovka, V.S. Mikutsky.* Cyclical structure and the prerequisites for forecasting of the duration of Arctic invasions for the next decade .. 144

### ICE TECHNOLOGY

- V.N. Smirnov, S.M. Kovalev, A.I. Shushlebin, N.V. Kolabutin, M.S. Znamenskiy.* Monitoring of the physical and mechanical state of sea ice and short-term prediction of extreme ice phenomena ..... 162

### ECOLOGY, BIOCEENOLOGY AND BIOGEOGRAPHY

- E.S. Kolpakova, A.V. Velyamidova.* Organochlorine compounds in subarctic small lakes ..... 180

- S.V. Smirnova, O.Y. Chaplygina, A.F. Luknitskaya.* Algal communities of the waterbodies of Schirmacher Oasis, East Antarctica ..... 198

### SOCIAL GEOGRAPHY AND SOCIAL ANTHROPOLOGY

- M.V. Fomin, V.A. Bezverbny, I.A. Seleznev, I.S. Shushpanova, E.A. Lukashenko, T.R. Miriazov.* Regions spatial development problems of the Russian Far East North: sociological analysis ..... 217

ОКЕАНОЛОГИЯ  
OCEANOLOGY

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-2-124-143>  
УДК 551.326.7 (268.5)



ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

ORIGINAL ARTICLE

ИЗМЕНЕНИЕ ВОЗРАСТНОГО СОСТАВА И ТОЛЩИНЫ ЗИМНЕГО  
ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ РОССИИ  
В НАЧАЛЕ XXI В.

А.Г. ЕГОРОВ

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

*ego@aari.ru*

## Резюме

По данным электронных карт ААНИИ за 1997–2018 гг. выполнен анализ изменчивости возрастного состава и средневзвешенной толщины ледяного покрова в арктических морях России в течение холодного периода. Установлено, что исходный ряд состоит из двух существенно различающихся частей, до и после зимы 2003/04 г. В среднем для 2004–2018 гг. (по сравнению с периодом 1997–2003 гг.) наблюдается увеличение (на 12 %) площади всех возрастных градаций льдов толщиной менее 70 см и, соответственно, уменьшение (на 18 %) площади всех возрастных градаций льдов толщиной более 70 см; наиболее радикально (примерно на порядок) уменьшилось количество двухлетних (и многолетних) льдов, а однолетние льды стали достигать реперных значений толщины позже примерно на 1–2 месяца. В соответствии с изменением структуры возрастного состава происходит уменьшение зимней средневзвешенной толщины льдов примерно на 40 см; при этом скачкообразные изменения в начале 2000-х гг. происходят не постепенно, шаг за шагом, накапливая аномалии от года к году, но — в климатическом отношении — практически мгновенно, в течение одного гидрологического года.

**Ключевые слова:** возрастной состав льдов, зимний период, ледяной покров арктических морей России, многолетние льды, многолетняя изменчивость ледовых условий, однолетние льды, толщина льдов, уменьшение толщины ледяного покрова

**Для цитирования:** *Егоров А.Г.* Изменение возрастного состава и толщины зимнего ледяного покрова арктических морей России в начале XXI в. // Проблемы Арктики и Антарктики. 2020. Т. 66. № 2. С. 124–143. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-2-124-143>.

Поступила 13.03.2020

После переработки 16.05.2020

Принята 19.05.2020

THE RUSSIAN ARCTIC SEAS ICE AGE COMPOSITION  
AND THICKNESS VARIATION IN WINTER PERIODS  
AT THE BEGINNING OF THE 21<sup>ST</sup> CENTURY

ALEXANDER G. EGOROV

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

*ego@aari.ru*

## Summary

The purpose of the paper is to analyze the large-scale peculiarities of ice age composition and thickness in winter period (October–May) along the entire stripe of the Russian Arctic seas from the Novaya Zemlya Archipelago to Alaska, as well as to assess the multi-year changes taking place in early 21st century. The source of the information used for the present paper is the electronic ice charts at the end of every month, developed in the AARI from 1997 to 2018.

On the average, during the period 1997–2018, from month to month, the consecutive and ordered changes of ice area of given age take place in accordance with the general ice thickness increase. In October–December the grey-white and first year thin ice (15–70 cm) prevails in the Arctic seas, in January–February — the first-year medium ice (70–120 cm), in March–May — the first-year thick ice (more than 120 cm).

The period from 1997 to 2018 consists of two parts (1997–2003 and 2004–2018) principally differing from one another by the peculiarities of ice age composition. The basic content of the changes in the 21st century is the decrease of relatively thicker ice area and increase of that of relatively thinner ice.

On the average, in the winter periods of 2004–2018, (1) the area of ice thinner than 70 cm (nilas, grey, grey-white and first year thin) became 12 % less than in 1997–2003, and (2) the area of ice thicker than 70 cm (first year medium, first year thick, second year and multi-year) became 18 % larger than in 1997–2003. The most significant changes regard to the second year and multi-year ice, their area in winter period decreased about 10 times. Decrease of the rate of first year ice growth is accompanied with delay of the dates when the first year ice reaches the values of 70 and 120 cm.

Correspondingly, the weighted mean ice thickness also changes. On the average, in 2004–2018 ice thickness has got about 40 cm less than in 1997–2003; by the end of cold period (May), ice thickness decrease from 153 to 117 cm.

The typical feature of the observed changes is an abrupt transformation from one climatic state of ice cover to another during only one hydrological year.

**Keywords:** first year ice, ice age composition, ice cover of the Russian Arctic seas, ice thickness, ice thickness decrease, multi-year ice, multi-year variability of ice conditions, winter period.

**For Citation:** Egorov A.G. The Russian Arctic seas ice age composition and thickness variation in winter periods at the beginning of the 21st century. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2020, 66 (2): 124–143. [In Russian]. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-2-124-143>.

Received 13.03.2020

Revised 16.05.2020

Accepted 19.05.2020

## ВВЕДЕНИЕ

Одной из наиболее характерных особенностей колебаний современного климата является кардинальная трансформация состояния природной среды прежде всего в высоких широтах Северного полушария Земли; в частности, происходит беспрецедентное сокращение площади льдов и их средней толщины [1], как зимой, так и летом [2], как в целом по Арктике, так и в отдельных арктических акваториях [3]. Дистанционные методы зондирования ледяного покрова, а также контактные измерения показывают заметное уменьшение толщины арктических льдов на акватории Арктического бассейна и окраинных арктических морей [4]. Наиболее значимым изменением возрастного состава льдов Северного Ледовитого океана в течение холодного сезона считается сокращение количества старых (двухлетних и многолетних) льдов и замещение их на однолетние льды [5]. Отмечено также, что наибольшие пространственные изменения в состоянии льдов северной полярной области происходят вдоль евразийского мелководья [6]. Однако более подробный анализ крупномасштабных особенностей зимнего изменения возрастного состава

и толщины ледяного покрова на суммарной протяженности арктических морей России от Новой Земли до Аляски, где проходят трассы Северного морского пути, пока не проводился. Целью такого анализа является количественная оценка многолетних изменений в состоянии ледяного покрова, а также ледовых условий на трассах Северного морского пути, проходящих по акватории арктических морей России.

### ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

Традиционно основной систематизированной информацией о состоянии ледяного покрова в арктических морях России являются ледовые карты, представленные на тех или иных носителях. В последние годы в структурных подразделениях ААНИИ разработана технология выделения на электронных картах однородных ледовых зон на геопривязанных спутниковых изображениях с последующим преобразованием замкнутых контуров (границ выделенных зон) в полигональные объекты в виде векторного файла [7]. В результате для зимнего сезона появляется возможность количественного расчета площади зон того или иного возраста льдов (или определенного диапазона толщин ледяного покрова). Региональные ледовые карты, составленные по отдельным арктическим морям, доступны в электронном каталоге Мирового центра данных по морскому льду [8] начиная с осени 1997 г.; карты, составленные в более ранний период, на данный момент находятся в процессе оцифровки. Архив электронных ледовых карт и их анализ с помощью ГИС-технологий позволяют регулярно оценивать количество льдов различного возраста в период формирования ледяного покрова, выявлять с месячной (или декадной) дискретностью особенности последовательного перехода возрастных градаций дрейфующих и припайных льдов от начала формирования ледяного покрова в октябре до его завершения в мае. В частности, такой анализ, включая сравнение возрастного состава дрейфующих и припайных льдов, выполнен для отдельных арктических акваторий [9, 10].

Для продолжительного холодного сезона, охватывающего в арктическом регионе осенний, зимний и весенний календарные периоды, возрастной состав ледяного покрова определяется сложным ансамблем из семи основных составных частей, который включает [11]:

- ниласовые льды толщиной 0–10 см,
- серые льды толщиной 10–15 см,
- серо-белые льды толщиной 15–30 см,
- однолетние тонкие льды толщиной 30–70 см,
- однолетние средние льды толщиной 70–120 см,
- однолетние толстые льды толщиной более 120 см,
- двухлетние и многолетние льды толщиной более 250 см.

Сочетание льдов этих 7 градаций в различной количественной пропорции формирует реальную картину пространственной неравномерности распределения толщины льдов по акватории арктических морей [12].

### ВОЗРАСТНОЙ СОСТАВ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ РОССИИ В ТЕЧЕНИЕ ХОЛОДНОГО СЕЗОНА (ОКТАБРЬ–МАЙ) В СРЕДНЕМ ЗА ПЕРИОД 1997–2018 гг.

После момента осеннего ледообразования, по мере понижения температуры воздуха и увеличения толщины льдов, в течение холодного сезона (от октября к маю) происходит изменение соотношения площади льдов различных возрастных

градаций. В среднем для 1997–2018 гг. существуют хронологически упорядоченные особенности в соотношении площади льдов различного возраста в течение осенне-зимнего периода (табл. 1).

В октябре, в условиях только что начавшегося ледообразования, в арктических морях преобладают (29 % площади) относительно тонкие серо-белые толщиной 15–30 см, а совместная площадь серых и серо-белых льдов суммарной толщиной 10–30 см составляет около 45 % (при общей площади всех льдов около 70 %).

В ноябре на акватории начинают доминировать однолетние тонкие льды толщиной 30–70 см, площадь которых увеличивается до 39 %, а совместная площадь серо-белых и однолетних тонких льдов суммарной толщиной 15–70 см составляют около 72 % (при общей площади всех льдов около 89 %). В декабре в арктических морях продолжают преобладать однолетние тонкие льды, площадь которых относительно стабильна и составляет примерно 38 %.

В январе впервые с начала ледообразования наибольшую площадь (почти 42 %) начинают занимать однолетние льды средней толщины. В феврале наблюдается примерно схожая картина, с той лишь разницей, что площадь средних льдов несколько уменьшается (до 36 %).

В марте–мае в арктических морях отмечается достаточно стабильный возрастной состав, в котором преобладают однолетние толстые льды, их площадь постоянно увеличивается и составляет в марте 41 %, в апреле 48 %, в мае 51 %.

Общей особенностью для всех возрастных градаций является тот факт, что преобладающая за месяц возрастная градация в среднем составляет около 40 % (разброс от 29 % для серо-белых льдов в октябре до 51 % для однолетних толстых льдов в мае); в первой половине холодного сезона (октябрь–декабрь) площадь преобладающего возраста составляет в среднем 35 %, а во второй половине холодного сезона (январь–май) она увеличивается до 44 %. Другими словами, после достижения ледяным покровом толщины примерно в 1 м происходит определенная стабилизация возрастного состава ледяного покрова, т.е. увеличение вклада преобладающего возраста и соответствующее уменьшение вклада остальных (миноритарных) возрастов.

Таблица 1

**Площадь (%) льдов различного возраста в холодный сезон (октябрь–май) на суммарной акватории арктических морей России в среднем за 1997–2018 гг.**

Table 1

**Ice relative area (%) of various ages in cold season (October–May) on the total area of the Russian Arctic seas averaged for 1997–2018**

Месяц	Нилас (0–10 см)	Серые (10–15 см)	Серо-белые (15–30 см)	Тонкие (30–70 см)	Средние (70–120 см)	Толстые (120+)	2-летние
X	8,9	16,1	29,2	7,0	0,8	0,1	7,9
XI	2,8	5,7	33,4	38,6	1,9	0,3	6,7
XII	1,4	3,5	24,0	38,1	22,3	0,2	5,3
I	1,4	1,7	15,6	22,2	41,8	9,9	5,0
II	1,1	1,7	13,1	14,7	35,9	26,7	4,1
III	1,2	0,7	11,4	11,7	28,5	41,2	4,1
IV	1,8	0,3	9,4	9,2	23,8	48,3	4,0
V	0,6	0,2	8,0	7,3	20,9	50,9	4,0
Ср. (X–IV)	2,4	3,7	18,0	18,6	22,0	22,2	5,1

Осреднение месячных вкладов каждой возрастной градации за все 8 месяцев холодного периода (октябрь–май) показывает, льды какой толщины количественно доминировали на акватории арктических морей России в среднем за осенне-зимний период нарастания толщины ледяного покрова. Возрастной состав ледяного покрова четко делится на две характерные группы.

Первая группа льдов повышенной площади. Наибольшую среднесезонную площадь примерно по 20 % занимают серо-белые (площадь 18,0 %), однолетние тонкие (площадь 18,6 %), однолетние средние (площадь 22,0 %) и однолетние толстые (площадь 22,2 %) льды; эти 4 возрастные градации примерно равны по площади в сезонном осреднении и суммарно занимают в среднем более 80 % площади арктической акватории.

Вторая группа льдов пониженной площади. Вклад каждой из остальных возрастных градаций в несколько раз меньше и составляет в среднем за сезон только 2–5 %; ниласовые льды (площадь 2,4 %), серые льды (площадь 3,7 %), двухлетние льды (площадь 5,1 %) суммарно занимают только 11,2 % площади арктических морей, т.е. примерно вдвое меньше, чем любая из возрастных градаций первой группы льдов повышенной площади.

Льды первой и второй группы различаются не только среднесезонными количественными показателями, но и особенностями внутрисезонных (от месяца к месяцу) изменений.

Характерной особенностью льдов второй (миноритарной по площади) группы является достаточно простой, однонаправленный характер изменений в течение зимы, когда происходит устойчивое и последовательное уменьшение их площади в течение всего зимнего периода. Так, площадь ниласовых льдов постоянно сокращается от октября к маю и составляет в октябре около 9 %, в ноябре около 3 %, а в дальнейшем в течение декабря–мая примерно 0,5–1,5 %. Примерно те же особенности у серых льдов, площадь которых составляет в октябре около 16 %, в ноябре около 6 %, в декабре около 4 %, в январе–феврале — менее 2 %, а в марте–мае — менее 1 %. У двухлетних льдов наблюдается более плавная эволюция: их площадь медленно сокращается от 8 % в октябре, до 7 % в ноябре, примерно до 5 % в декабре–январе и примерно до 4 % в феврале–мае. В результате суммарная площадь ниласовых, серых и многолетних льдов второй группы уменьшается от 33 % в октябре до 15 % в ноябре, до 10 % в декабре, до 7–8 % в январе–феврале и до 5–6 % в марте–мае.

Напротив, характерной особенностью льдов первой (доминирующей по площади) группы является более сложный характер изменений в течение зимы, когда период увеличения площади льдов сменяется периодом их уменьшения. Для серо-белых, однолетних тонких и однолетних средних льдов наблюдается некоторый общий типовой сценарий изменения их площади в течение холодного периода.

Так, площадь серо-белых льдов является преобладающей в октябре (около 29 %), достигает сезонного максимума в ноябре (около 33 %) и затем устойчиво и постоянно уменьшается до 24 % в декабре, до 16 % в январе, до 13 % в феврале, до 11 % в марте и до 8–9 % в апреле–мае. После достижения сезонного максимума в ноябре интенсивность сокращения площади постоянно уменьшается: в декабре–январе средняя скорость уменьшения площади составляет около 8 % в месяц, а в феврале–мае — только около 2 % в месяц.

После серо-белых преобладающими становятся однолетние тонкие льды, площадь которых является преобладающей в ноябре (около 39 %) и в декабре (около 38 %), тогда же наблюдается их сезонный максимум, после чего количество льдов начинает устойчиво и постоянно уменьшаться до 22 % в январе, до 15 % в феврале, до 12 % в марте, до 9 % в апреле и до 7 % в мае. Скорость уменьшения площади составляет 8–16 % в январе–феврале и 2–3 % в марте–мае.

После доминирования однолетних тонких преобладающими становятся однолетние льды средней толщины, площадь которых является преобладающей в январе (около 42 %) и в феврале (около 36 %); в январе наблюдается их сезонный максимум, после чего количество льдов начинает устойчиво и постоянно уменьшаться до 28 % в марте, до 24 % в апреле, до 21 % в мае. Скорость уменьшения площади составляет 6–8 % в феврале–марте и 3–4 % в апреле–мае.

После однолетних льдов средней толщины доминирующими становятся однолетние толстые льды, площадь которых является преобладающей в марте (около 41 %), в апреле (около 48 %), в мае (около 51 %). Режим однолетних толстых льдов кардинально отличается от остальных возрастов группы льдов повышенной площади: в октябре–декабре толстые льды в арктических морях практически отсутствуют; в январе–марте их площадь ежемесячно увеличивается в среднем на 14 % (разброс от 9 % до 17 %). После достижения сезонного максимума количество толстых льдов уже не уменьшается, так как холодный сезон заканчивается.

Таким образом, наблюдаются различные типовые особенности внутрисезонной изменчивости льдов пониженной и льдов повышенной площади. Для возрастной группы пониженной площади характерно различное по интенсивности, но однопавленное в течение нескольких месяцев подряд уменьшение количества льдов. Суммарная площадь ниласовых, серых и двухлетних льдов в октябре составляет около 33 % и в дальнейшем достаточно быстро уменьшается до 15 % в ноябре, до 10 % в декабре, до 7–8 % в январе–феврале и до 5–6 % в марте–мае. Наибольшее уменьшение площади происходит в течение ноября–декабря, когда количество льдов сокращается от 33 % до 10 %; в январе–мае интенсивность уменьшения резко падает и составляет только 1–2 %.

Для возрастной группы повышенной площади характерно изменение количества льдов по типу ледовой волны (рис. 1). Площадь льдов определенного возраста сначала растет, затем достигает максимума и, наконец, начинает постепенно уменьшаться. Гребень, т.е. максимум площади этой волны, в октябре формируют серые льды, в ноябре и декабре — однолетние тонкие льды, в январе и феврале — однолетние средние льды, в марте–мае — однолетние толстые льды. Последовательно переходя от одного доминирующего по площади возраста к другому, чередующаяся совокупность сменяющих друг друга серых, тонких, средних, толстых льдов образует характерную сезонную стояче-поступательную волну, которая характеризует особенности сезонной эволюции возрастного состава ледяного покрова в течение всего холодного периода. Среди особенностей волновых сезонных колебаний группы повышенной площади можно выделить следующие.

Во-первых, количественной особенностью этой волны является то обстоятельство, что по мере увеличения толщины (возраста) льдов гребень волны становится все выше и выше. Наибольшее месячное значение площади льдов составляет: для серо-белых льдов около 29 %, для тонких льдов около 38 %, для средних льдов около

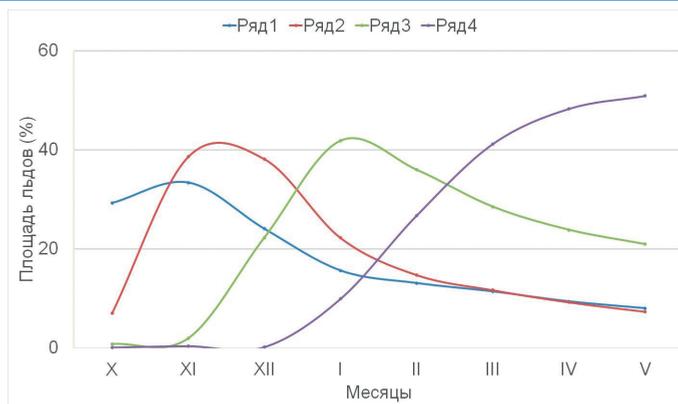


Рис. 1. Площадь (%) серо-белых (ряд 1), однолетних тонких (ряд 2), однолетних средних (ряд 3), однолетних толстых (ряд 4) льдов в течение октября–мая в среднем за 1998–2018 гг.

Fig. 1. Relative area (%) of grey-white (1), first year thin (2), first year medium (3) and first year thick (4) ice during October–May averaged for 1998–2018

42 %, для толстых льдов примерно 48–51 %; т.е. в первой половине зимы высота гребня ледовой волны соответствует примерно 1/3 площади арктических морей, а во второй половине зимы высота гребня увеличивается примерно до 1/2 площади арктических морей.

Во-вторых, восходящая ветвь ледовой волны, по мере нарастания толщины ледяного покрова, становится все более пологой. Так, для однолетних льдов увеличение их площади до рубежа примерно в 40 % происходит: у тонких льдов — за 1 месяц (от 7 % в октябре до 39 % в ноябре), у средних льдов — за 2 месяца (от 2 % в ноябре до 42 % в январе), у толстых льдов — за 3 месяца (от 0 % в декабре до 41 % в марте). То есть чем толще льды, тем медленнее происходит рост ледовой волны до наибольших за сезон величин.

В-третьих, на нисходящей ветви ледовой волны, по мере нарастания толщины ледяного покрова, уровень успокоения волнового колебания становится все более высоким. Так, после сезонного максимума площадь серо-белых и однолетних тонких льдов постепенно уменьшается до уровня примерно в 10 %, а площадь однолетних средних льдов постепенно уменьшается до уровня примерно в 20–25 %.

Представляется, что эти особенности связаны со своеобразной природой ледяного покрова, постепенностью нарастания его толщины в течение холодного периода и сезонными различиями в скорости образования льдов разных возрастов.

Эволюция колебаний ледовой волны во времени позволяет провести периодизацию холодного сезона (октябрь–май) и разделить его на три части в зависимости от преобладания волновых гребней различной высоты того или иного возраста ледяного покрова. Первый этап включает период октябрь–декабрь, когда в арктических морях преобладают серо-белые и однолетние тонкие льды суммарной толщиной 15–70 см; их площадное доминирование доходит до 72 % в ноябре и до 62 % в декабре (в среднем за октябрь–декабрь 57 %). Второй этап включает период январь–февраль, когда в арктических морях преобладают однолетние средние льды толщиной 70–120 см; их доминирование доходит до 42 % в январе (в среднем за январь–февраль около 38 %). Третий этап включает период март–май, когда в арктических морях преобладают

однолетние толстые льды толщиной более 120 см; их доминирование доходит до 51 % в мае (в среднем за март–май около 47 %). Отметим, что такая периодизация характеризует общее состояние суммарной акватории арктического мелководья и не учитывает региональные особенности отдельных локальных акваторий.

Начальный первый период (преобладания льдов толщиной 15–70 см) и завершающий третий период (преобладания льдов толщиной более 120 см) характеризуются определенным постоянством ледовых показателей, когда площадь доминирования превышает 50 %, т.е. половину суммарной площади арктических морей; оба эти периода обладают повышенной протяженностью и длятся по три месяца. Напротив, промежуточный, срединный второй период (преобладания льдов толщиной 70–120 см) характеризуется отсутствием преобладающего ледово-возрастного постоянства, когда площадь доминирования заведомо меньше 50 % и не превышает половину площади арктических морей; длительность этого периода в полтора раза короче остальных и ограничена всего двумя месяцами. Отметим, что период январь–февраль является наиболее вариативным в течение периода нарастания толщины ледяного покрова относительно возрастного состава льдов; так, в феврале отсутствует преобладание льдов какой-либо толщины: льды толщиной 0–70 см составляют 31 % площади арктических морей, льды толщиной 70–120 см — 36 %, льды толщиной более 120 см — 31 %; т.е. вклад трех основных возрастных толщин примерно одинаков.

#### **ОСНОВНЫЕ РАЗЛИЧИЯ ВОЗРАСТНОГО СОСТАВА АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ РОССИИ В XX И XXI вв.**

Анализ показывает, что ряд наблюдений за возрастным составом льдов в течение 1990–2010-х гг. характеризуется повышенной изменчивостью и фактически состоит из двух разных, достаточно сильно отличающихся друг от друга частей, граница между которыми проходит по началу гидрологического года 2003/04. Начиная с зимнего сезона 2003/04 г. в возрастном составе происходят однонаправленные кардинальные изменения, которых не наблюдалось в течение XX в. В каждом из месяцев холодного сезона происходят свои характерные возрастные изменения, связанные с общей месячной толщиной льдов. Основное содержание изменений состоит в том, что в возрастном составе всех зимних месяцев уменьшается площадь относительно толстых (по толщине) льдов и, соответственно, увеличивается площадь относительно тонких (по толщине) льдов. Все эти изменения носят статистически значимый характер, т.е. превышают 0,674 величины среднего квадратичного отклонения и, как следствие, сопровождаются кардинальной трансформацией режимных особенностей формирования ледяного покрова.

Так, в декабре наблюдается перераспределение площади между однолетними тонкими и однолетними средними льдами: происходит заметное увеличение количества однолетних тонких льдов и соответствующее уменьшение количества однолетних льдов средней толщины (рис. 2). В течение периода 1998–2003 гг., который демонстрирует характерное состояние ледяного покрова в конце XX в., площадь однолетних тонких льдов составляла около 19 %, а в течение периода 2003–2018 гг., который показывает характерное состояние ледовых условий в начале XXI в., площадь однолетних тонких льдов увеличилась примерно в 2,5 раза и составляла около 48 %. Напротив, одновременно в многолетнем режиме однолетних средних льдов произошли прямо противоположные изменения: в течение периода 1998–2003 гг. площадь однолетних средних льдов составляла 41 %, а в течение 2003–2018 гг.

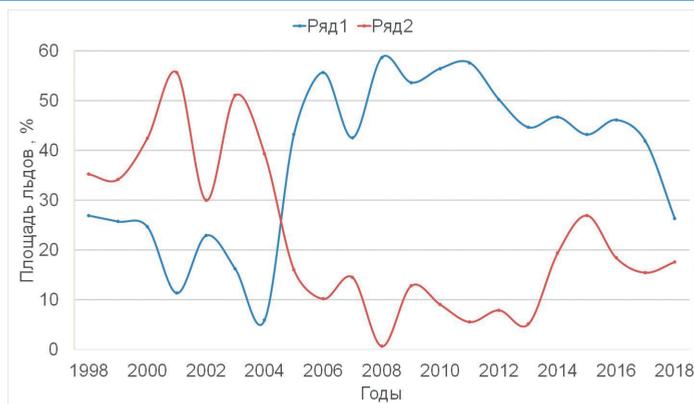


Рис. 2. Площадь (%) однолетних тонких льдов (ряд 1) и однолетних средних льдов (ряд 2) в арктических морях России в конце декабря в течение 1998–2018 гг.

Fig. 2. Relative area (%) of first year thin (1) and first year medium (2) ice in the Arctic seas in late December during 1998–2018

площадь однолетних средних льдов уменьшилась примерно в 3 раза и составляла около 13 %. То есть если в арктических морях России в декабре в XX в. относительно преобладали однолетние льды средней толщины, то в XXI в. — уже однолетние тонкие льды; от одного столетия к другому произошли зеркальные изменения в соотношении тонких и средних льдов, в результате чего ледяной покров стал тоньше.

Напротив, в январе наблюдается перераспределение площади уже между однолетними льдами средней толщины и однолетними толстыми и многолетними льдами: происходит заметное увеличение количества однолетних средних льдов и соответствующее уменьшение суммарного количества однолетних толстых и многолетних льдов (рис. 3). В течение периода 1998–2003 гг. площадь однолетних средних льдов

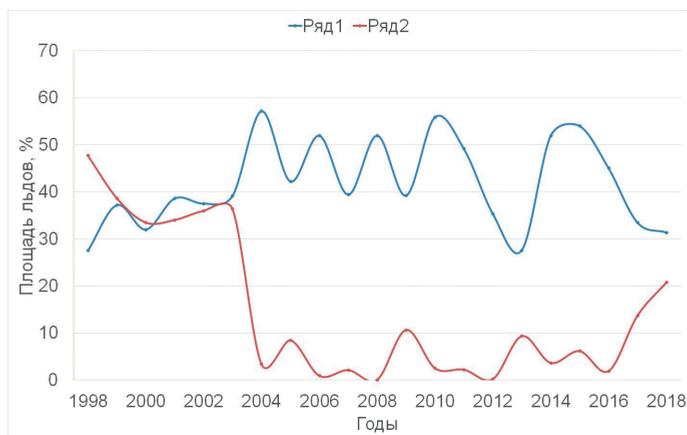


Рис. 3. Площадь (%) однолетних средних льдов (ряд 1) и однолетних толстых и многолетних льдов (ряд 2) в арктических морях России в конце января в течение 1998–2018 гг.

Fig. 3. Relative area (%) of first year medium (1) and first year thick and multi-year (2) ice in the Arctic seas in late January during 1998–2018

составляла около 35 %, а в течение периода 2003–2018 гг. площадь однолетних тонких льдов увеличилась примерно на 1/4 и составляла около 44 %. В многолетнем режиме однолетних толстых и многолетних льдов произошли прямо противоположные изменения: в течение периода 1998–2003 гг. площадь однолетних толстых и многолетних льдов составляла 38 %, а в течение 2003–2018 гг. площадь однолетних толстых и многолетних льдов уменьшилась примерно в 6 раз и составляла около 6 %. То есть если в XX в. в январе количество однолетних средних и однолетних толстых (и многолетних) льдов было примерно равным, то в XXI в. средние льды абсолютно преобладали (разница примерно в 7 раз); т.е. от одного столетия к другому происходят существенные изменения во взаимном соотношении средних и толстых (и многолетних) льдов, что соответствует общей тенденции к уменьшению толщины ледяного покрова в арктических морях России.

Для каждой возрастной градации с соответствующей толщиной льдов наблюдаются свои характерные особенности изменения возрастного состава ледяного покрова в XXI в. по сравнению с возрастным составом в XX в. (табл. 2).

*Ниласовые и серые льды суммарной толщиной 0–15 см.* С момента осеннего ледообразования эти льды сначала появляются, и в месяц появления (в октябре) их площадь является наибольшей в течение холодного периода, а затем количество льдов достаточно быстро уменьшается в течение оставшейся зимы, так что в январе–мае их площадь не превышает 4 %. В XXI в. (относительно XX в.) произошли следующие изменения в режиме ниласовых и серых льдов:

- во-первых, льды образуются позже примерно на две декады, в среднем соответственно в третьей декаде октября и в первой декаде октября;
- во-вторых, количество льдов в течение месяца сезонного максимума (октябрь) больше примерно в 3 раза, соответственно 30,5 % и 11,2 %;
- в-третьих, уже в ноябре площадь льдов быстро уменьшается соответственно от 30 % до 9 % и от 11 % до 8 %;

Таблица 2

**Изменение площади (%) льдов различного возраста (толщины) в холодный сезон (октябрь–май) на суммарной акватории арктических морей России в среднем за период 2003–2018 гг. относительно среднего за период 1997–2003 гг.**

Table 2

**Change of the ice relative area (%) of various ages (thickness) on the total area of the Russian Arctic seas averaged for 2003–2018 relatively to that for 1997–2003**

Месяц	Нилас+серые (0–15 см)	Серо-белые (15–30 см)	Тонкие (30–70 см)	Средние (70–120 см)	Толстые (120+)	2-летние
X	19,3	–8,8	–9,7	–0,6	–0,2	–17,8
XI	1,3	21,2	–12,7	–4,3	–1,2	–16,5
XII	3,1	8,0	23,6	–26,8	–0,5	–13,5
I	3,2	5,5	12,5	9,1	–19,8	–12,2
II	1,7	4,7	9,7	11,9	–19,0	–10,7
III	1,0	3,7	5,7	1,8	–2,8	–10,6
IV	1,2	3,1	–2,6	–4,8	12,1	–10,7
V	0,2	2,9	–3,3	–3,2	10,6	–11,5
Ср. (X–IV)	3,9	5,0	2,9	–2,1	–2,6	–12,9

– в-четвертых, во второй половине зимы площадь льдов уменьшается более плавно, так что их количество примерно вдвое больше, хотя и невелико (в декабре–апреле соответственно 2–6 % и около 1 %).

В целом наибольшие изменения в XXI в. наблюдаются в самом начале осенне-зимнего периода — в октябре (площадь больше на 19 %), а в остальные месяцы различия незначительны и составляют 1–3 %.

*Серо-белые льды толщиной 15–30 см.* С момента осеннего ледообразования эти льды сначала появляются, достаточно быстро их суммарная площадь увеличивается в течение 1–2 месяцев от 0 % до 35–40 %, затем достигают сезонного максимума в октябре–ноябре и, наконец, затем плавно и постепенно уменьшаются примерно в 3–4 раза (до 5–10 %) в течение 5–6 месяцев вплоть до мая. В XXI в. (относительно XX в.) произошли следующие изменения в режиме серо-белых льдов:

– во-первых, вследствие более позднего ледообразования, в октябре их площадь меньше (соответственно 26,7 % и 35,5 %);

– во-вторых, позже происходит формирование сезонного максимума их площади, соответственно в ноябре и в октябре;

– в-третьих, количество льдов в течение месяца сезонного максимума больше, соответственно 39,4 % в ноябре и 35,5 % в октябре;

– в-четвертых, во второй половине зимы площадь льдов уменьшается более плавно, так что их количество больше примерно на 3–5 % (в марте–мае соответственно 9–12 % и 6–9 %).

Наибольшие изменения в XXI в. наблюдаются в первой половине осенне-зимнего периода — в ноябре (площадь больше на 21 %), а в дальнейшем различия быстро уменьшаются и составляют в январе–мае примерно 3–5 %.

*Однолетние тонкие льды толщиной 30–70 см.* В течение осенне-зимнего периода площадь этих льдов сначала достаточно быстро увеличивается в течение 1–2 месяцев до величины 40–50 %, достигает сезонного максимума в ноябре–декабре и затем плавно и постепенно уменьшается до величины около 10 % в апреле–мае. В XXI в. (относительно XX в.) произошли следующие изменения в режиме однолетних тонких льдов:

– во-первых, в октябре, вследствие более позднего ледообразования, площадь тонких льдов в несколько раз меньше (соответственно 4 % и 14 %);

– во-вторых, позже происходит формирование сезонного максимума их площади, соответственно в ноябре (площадь около 48 %) и в октябре (площадь около 45 %);

– в-третьих, после месяца сезонного максимума, в течение декабря–марта, площадь льдов уменьшается более плавно, так что их количество больше на 5–25 %;

– в-четвертых, в самом конце холодного периода (апрель–май) уменьшающееся количество льдов стремится к предельному порогу около 10 %.

Наибольшие изменения в XXI в. наблюдаются в первой половине осенне-зимнего периода — в декабре (площадь больше на 24 %), а в дальнейшем различия быстро уменьшаются.

*Однолетние средние льды толщиной 70–120 см.* В течение зимы площадь этих льдов сначала увеличивается в течение 2–3 месяцев до величины 40–50 %, достигает сезонного максимума в декабре–январе и затем плавно уменьшается до величины около 20–25 % в апреле–мае. В XXI в. (относительно XX в.) произошли следующие изменения в режиме однолетних льдов средней толщины:

– во-первых, вследствие более позднего и медленного ледообразования, средние льды на акватории появляются только в декабре (а не в ноябре);

– во-вторых, позже происходит формирование сезонного максимума их площади, соответственно в январе и в декабре;

– в-третьих, количество льдов в течение месяца сезонного максимума больше, соответственно 44,4 % в январе и 41,4 % в декабре;

– в-четвертых, после месяца сезонного максимума, в течение второй половины зимы площадь льдов уменьшается более резко, до величины около 20 % в мае.

Наибольшие различия в XXI в. наблюдаются примерно в середине холодного периода, в феврале, когда площадь составляет соответственно 39 % и 27 %.

*Однолетние толстые льды толщиной более 120 см.* В течение первой половины холодного сезона (октябрь–декабрь) толстые льды в море отсутствуют и появляются только в январе, затем их площадь увеличивается в течение нескольких месяцев до 40–50 % и во второй половине зимы (с февраля–апреля), достигнув сезонного максимума, в течение нескольких месяцев почти не изменяется. В XXI в. (относительно XX в.) произошли следующие изменения в режиме однолетних толстых льдов:

– во-первых, вследствие более позднего и медленного ледообразования, количество толстых льдов в течение первого месяца их появления (в январе) существенно меньше (соответственно 4 % и 24 %);

– во-вторых, до месяца сезонного максимума в середине зимы площадь толстых льдов меньше примерно на 20 %;

– в-третьих, период однонаправленного увеличения площади толстых льдов от 0 % до 40–50 % увеличивается до 4 месяцев (январь–апрель) против 2 месяцев (январь–февраль);

– в-четвертых, позже происходит формирование устойчиво повышенной (40–50 %) площади толстых льдов во второй половине зимы (соответственно в апреле и в феврале);

– в-пятых, количественный порог преобладания толстых льдов во второй половине зимы несколько увеличивается (соответственно около 50 % и около 40 %).

Наибольшие изменения в XXI в. наблюдаются примерно в середине холодного периода, в январе и феврале.

*Двухлетние (и многолетние) льды.* В течение всех зимних месяцев благодаря выносному дрейфу площадь двухлетних льдов постепенно и последовательно уменьшается от октября к маю. В XXI в. (относительно XX в.) произошли следующие изменения в режиме двухлетних (и многолетних) льдов:

– во-первых, сразу после момента ледообразования, в октябре, двухлетних льдов было меньше примерно в 7,5 раз (соответственно 2,8 % и 20,6 %);

– во-вторых, в течение холодного сезона площадь двухлетних льдов уменьшилась соответственно от 3 % до 1 % и от 21 % до 12 %;

– в-третьих, наибольшее в сезоне уменьшение площади льдов происходит от октября к декабрю (соответственно от 2,8 % до 1,4 % и от 20,6 % до 14,9 %).

В целом за холодный период двухлетние льды сократились радикально, уменьшились по площади примерно в 10 раз и почти полностью исчезли как важный элемент ледового режима и составная часть возрастного состава ледяного покрова.

Сравнение среднесезонных (октябрь–май) площадей льдов различного возраста за 1997–2003 гг. и 2004–2018 гг. показывает, какие изменения в возрастном составе

произошли в течение полутора десятилетий XXI в. Наблюдаются две противоположные тенденции:

– во-первых, увеличилась площадь ниласовых и серых льдов толщиной 0–15 см (в среднем на 3,9 %), серо-белых льдов толщиной 15–30 см (в среднем на 5,0 %) и однолетних тонких льдов толщиной 30–70 см (в среднем на 2,9 %); в целом площадь относительно тонких льдов толщиной менее 70 см увеличилась на 11,8 %;

– во-вторых, уменьшилась площадь однолетних средних льдов толщиной 70–120 см (в среднем на 2,1 %), однолетних толстых толщиной более 120 см (в среднем на 2,6 %) и двухлетних (и многолетних) льдов толщиной более 250 см (в среднем на 12,9 %); в целом площадь относительно толстых однолетних и двухлетних (многолетних) льдов толщиной более 70 см уменьшилась на 17,6 %.

Таким образом, в среднем для всего холодного сезона выявляется очень важная граница толщины льдов в 70 см, по разные стороны от которой происходят разнонаправленные изменения в возрастном составе ледяного покрова.

Во временном масштабе не всего холодного сезона, но отдельных месяцев различия еще больше. После 2004 г. в возрастном составе льдов арктических морей:

– во-первых, площадь серо-белых льдов стала больше на 21 % в ноябре, а однолетних тонких — больше на 24 % в декабре;

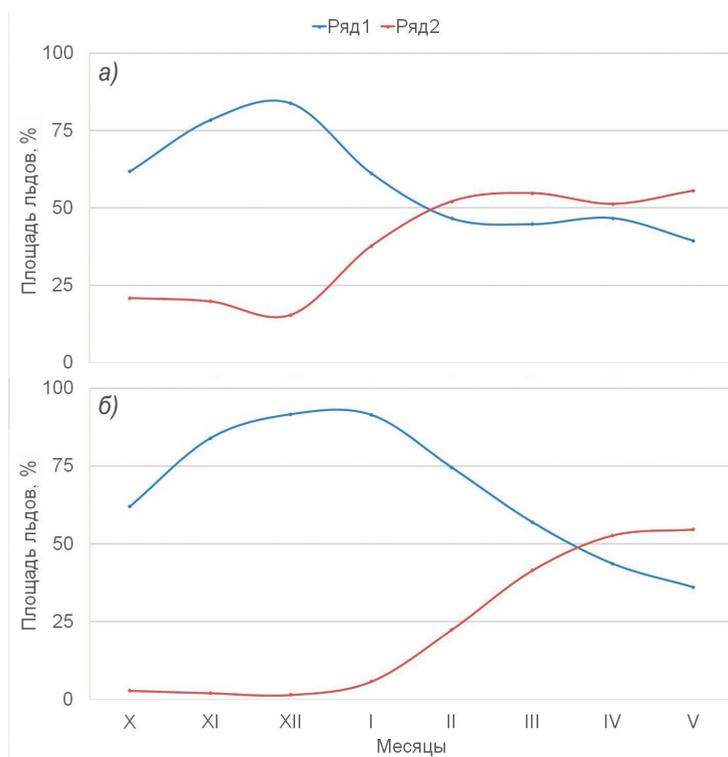


Рис. 4. Площадь (%) льдов толщиной менее 120 см (ряд 1) и более 120 см (ряд 2) в арктических морях России в среднем за 1998–2003 гг. (а) и в среднем за 2004–2018 гг. (б)

Fig. 4. Relative area (%) of ice thinner than 120 cm (1) and thicker than 120 cm (2) in the Russian Arctic seas averaged for 1998–2003 (a) and 2004–2018 (b)

- во-вторых, площадь однолетних средних льдов стала меньше на 27 % в декабре, а однолетних толстых — меньше на 20 % в январе;
- в-третьих, площадь двухлетних и многолетних льдов стала меньше на 18 % в октябре.

Если в XX в. около 62 % возрастного состава льдов суммарно приходились на однолетние средние, однолетние толстые и двухлетние льды, то в XXI в. примерно те же по количеству 62 % возрастного состава льдов суммарно приходятся на однолетние тонкие, однолетние средние и однолетние толстые льды; то есть в общей структуре преобладающих по возрасту льдов произошла замена двухлетних (и многолетних) льдов толщиной более 250 см на однолетние тонкие льды толщиной 30–70 см.

Понятно, что резкие изменения возрастного состава льдов арктических морей после 2003 г. являются составной, региональной частью более глобальных трансформаций природной среды в Арктике, которые происходят последние 20–30 лет [1]. Причины наблюдаемых изменений являются предметом научных дискуссий и требуют отдельного изучения [2, 6]. Настоящая же работа посвящена только исследованию изменений именно возрастного состава льдов в холодный период, без специального анализа атмосферных, океанических и каких-либо иных факторов, являющихся причиной наблюдаемых природных трансформаций.

#### **ИЗМЕНЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ РОССИИ В НАЧАЛЕ XXI в., РАССЧИТАННЫЕ НА ОСНОВЕ ВОЗРАСТНОГО СОСТАВА ЛЬДОВ**

Произошедшие изменения в возрастном составе ледяного покрова делают принципиально возможной косвенную оценку уменьшения средневзвешенной толщины льдов в арктических морях России, которое наблюдается в течение последних полутора десятилетий. Если известна площадь льдов каждой из возрастных градаций, то представляется возможным рассчитать среднюю толщину некоторой условной ледяной пластины постоянной толщины, которая непрерывно покрывает всю суммарную арктическую акваторию. Для такого расчета используются два допущения.

Во-первых, толщина начальных и молодых льдов заменяется на среднее значение для диапазона толщин данной градации, то есть принимается, что толщина ниласовых льдов (0–10 см) составляет 5 см, толщина серых льдов (10–15 см) составляет 12,5 см, толщина серо-белых льдов (15–30 см) составляет 22,5 см.

Во-вторых, для однолетних и многолетних льдов расчет отличается; сначала происходит замена толщины на среднее значение для диапазона (толщина однолетних тонких льдов (30–70 см) составляет 50 см, толщина средних льдов (70–120 см) составляет 95 см, толщина толстых льдов (от 120 см до примерно около 200 см) составляет 160 см, толщина двухлетних льдов (2–3 м) составляет около 250 см), а затем вводится поправка на постепенность увеличения толщины льдов в течение холодного сезона; так, для однолетних тонких льдов (30–70 см) принимается, что в начале осени их толщина была ближе к 30–40 см, а в конце зимы толщина ближе к диапазону 60–70 см; для однолетних толстых льдов (более 120 см) принимается, что в середине зимы их толщина была ближе к 120–130 см, а в конце зимы толщина ближе к диапазону 190–200 см и т.д.

С учетом этих допущений был произведен расчет средневзвешенной толщины ледяного покрова в конце каждого месяца холодного сезона для всего имеющегося

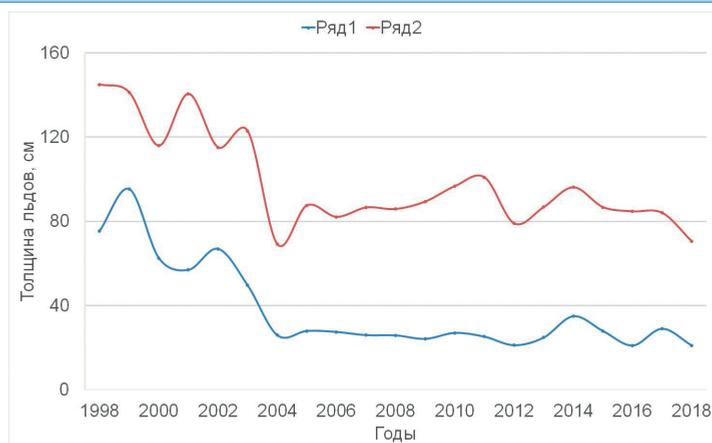


Рис. 5. Средневзвешенная по возрастному составу толщина (см) льдов в арктических морях России в конце ноября (ряд 1) и в конце февраля (ряд 2) в течение 1998–2018 гг.

Fig. 5. Weighted-average ice thickness (cm) in the Russian Arctic seas in late November (1) and late February (2) during 1998–2018

ряда наблюдений. Как видно на примере ноября и февраля (рис. 5), зима 2003/04 г. является важным рубежом в отношении не только возрастного состава ледяного покрова, но и средневзвешенной толщины льдов. Начиная с 2004 г. наблюдается существенное уменьшение толщины льдов в арктических морях в каждом из месяцев холодного сезона. Осреднение значений толщины льдов для двух периодов, до и после 2004 г., позволяет установить основные особенности изменения толщины ледяного покрова в XXI в. (рис. 6).

Во-первых, уже в октябре, сразу после начала устойчивого ледообразования, толщина льдов в XXI в. становится примерно на 40 см меньше, чем в XX в.; это

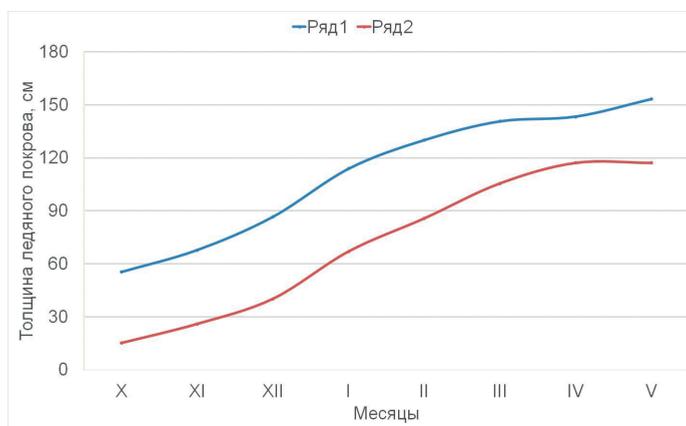


Рис. 6. Средневзвешенная по возрастному составу толщина (см) льдов в арктических морях России в октябре–мае в среднем за 1998–2003 гг. (ряд 1) и 2004–2018 гг. (ряд 2)

Fig. 6. Weighted-average ice thickness (cm) in the Russian Arctic seas in October–May averaged for 1998–2003 (1) and 2004–2018 (2)

связано с резким уменьшением количества остаточных льдов, почти полным исчезновением в возрастном составе двухлетних (и многолетних) льдов.

Во-вторых, в течение 7–8 месяцев холодного сезона наблюдается примерно одинаковая интенсивность нарастания толщины ледяного покрова в XX и XXI вв.; от октября до мая толщина льдов увеличилась: в течение 1998–2003 гг. в среднем примерно на 98 см, а в течение 2004–2018 гг. — в среднем примерно на 102 см. В среднем для двух сценариев (XX и XXI вв.) наиболее активное приращение толщины средневзвешенных льдов наблюдается от декабря к январю — около 27 см за месяц; в ноябре–декабре скорость прироста составляет около 14 см, в феврале–марте — около 16 см, в апреле–мае — около 6 см в месяц.

В-третьих, достижение средневзвешенным льдом одних и тех же реперных возрастных градаций в XXI в. происходит примерно на 2 месяца позже, чем в XX в.; так, нарастание до преобладания тонких льдов в течение 1998–2003 гг. происходит в октябре, а в 2004–2018 гг. — только в декабре; нарастание до преобладания однолетних средних льдов в течение 1998–2003 гг. происходит в декабре, а в 2004–2018 гг. — только в феврале.

В-четвертых, режим нарастания толщины до преобладания однолетних толстых льдов является наиболее характерным отличием XXI в.; в 1998–2003 гг. толщина ледяного покрова достигает стадии толстых льдов в феврале, а в 2004–2018 гг. такого достижения не происходит до самого окончания холодного сезона в мае.

В результате на завершающей стадии зимнего периода (в апреле–мае) толщина льдов в 1998–2003 гг. увеличивается примерно до и несколько более 1,5 м, а в 2004–2018 гг. — не достигает и 1,2 м. В среднем для всего холодного сезона (октябрь–май) средневзвешенная толщина ледяного покрова в XXI в. уменьшается примерно на 40 см, т.е. становится меньше примерно на 1/3 по сравнению с XX в., а наибольшие аномалии (до 45–47 см) наблюдаются в срединной части холодного периода, т.е. в течение декабря–февраля.

Оценки изменений, полученные в настоящей статье, хоть и носят косвенный характер, в целом примерно совпадают с данными непосредственных контактных и дистанционных измерений толщины ледяного покрова в Арктике и арктических морях. Так, согласно работе [4] толщина многолетнего льда в Арктике осенью/зимой сократилась в начале XXI в. в среднем примерно на 60 см, а толщина однолетнего льда осталась в среднем неизменной; при этом, по мнению [5], наиболее значительное уменьшение толщины льда произошло в Центральной и Восточной Арктике. Средняя толщина в целом по Арктике после лета 2007 г. была на 26 см меньше, чем за предшествующий 5-летний период, а в Восточной Арктике (Северное Чукотское плато, море Бофорта) — меньше на 49 см [13]. На разрезе от моря Лаптевых к Северному полюсу средняя толщина льда в августе уменьшилась на 44 см (от 1977 г. к 2005 г.) вследствие значительного уменьшения протяженности пути в старых льдах [14]. По мнению [6], в XXI в. изменение толщины однолетних льдов составило около 26 % относительно базового периода XX в. Площадь льдов старше пяти лет уменьшилась с 16 % в середине 1980-х гг. до 1,2 % в 2016 г. [15].

Также подтверждается и хронологическая локализация временного периода наиболее резких природных изменений. По мнению [5], наибольшая скорость уменьшения средней толщины льда была зафиксирована в период 2003–2008 гг., а по [6] наибольшее уменьшение толщины льдов произошло к 2007 г. Также 2007 г. рассма-

тривается как момент резких изменений относительно предшествующего 5-летнего периода [13]. На трассах Северного морского пути именно в 2003–2007 гг. произошло значимое изменение ледовых условий по маршрутам плаваний [16].

Отметим также, что после 2008 г. интенсивность уменьшения толщины льдов в Арктике существенно (в разы) падает, более того, трансформации, происходящие с многолетним льдом в последние годы, по-разному и противоречиво описываются в различных исследовательских работах [15]; в частности, констатируется, что, например, зимой 2014 г. наблюдалась смена природных тенденций, средняя толщина многолетнего льда в Арктике стала увеличиваться и превысила 4 м, а у берегов Канады — даже и 5 м [17]. В целом в течение 2010-х гг. наблюдается увеличение степени неопределенности в исследовательских оценках происходящих изменений; например, разница оценок в определении площади многолетних арктических льдов у разных авторов и алгоритмов достигает 1 млн км<sup>2</sup> [15].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. По данным электронных карт ААНИИ выполнен анализ особенностей возрастного состава ледяного покрова арктических морей России в течение 1997–2018 гг. В среднем за холодный сезон (октябрь–май) наибольшую площадь занимают: серо-белые (18,0 %), однолетние тонкие (18,6 %), однолетние средние (22,0 %) и однолетние толстые (22,2 %) льды, которые в совокупности занимают более 80 % площади арктических морей.

2. В течение холодного сезона происходит последовательное (от месяца к месяцу) и упорядоченное изменение площади льдов того или иного возраста, в соответствии с общим нарастанием толщины ледяного покрова. В октябре–декабре в арктических морях преобладают серо-белые и однолетние тонкие льды суммарной толщиной 15–70 см, площадь которых составляет до 72 % в ноябре; в январе–феврале преобладают однолетние средние льды толщиной 70–120 см, площадь которых доходит до 42 % в январе; в марте–мае — однолетние толстые льды толщиной более 120 см, площадь которых доходит до 51 % в мае.

3. Ряд наблюдений 1997–2018 гг. состоит из двух принципиально различающихся частей: до и после зимы 2003/04 г. Начиная с зимнего сезона 2003/04 г. в возрастном составе происходят резкие кардинальные изменения, которых не наблюдалось ранее, до начала XXI в. Основное содержание изменений состоит в том, что в возрастном составе всех зимних месяцев уменьшается площадь относительно толстых (по толщине) льдов и, соответственно, увеличивается площадь относительно тонких (по толщине) льдов.

4. В среднем для холодного периода 2004–2018 гг. (по сравнению с периодом 1997–2003 гг.): во-первых, увеличилась (в среднем на 12 %) площадь ниласовых, серых, серо-белых и однолетних тонких льдов общей толщиной менее 70 см, и, во-вторых, уменьшилась (в среднем на 18 %) площадь однолетних средних, однолетних толстых и двухлетних (и многолетних) льдов общей толщиной более 70 см. В результате в среднем для всего холодного сезона выявляется очень важная граница толщины льдов в 70 см, по разные стороны от которой происходят разнонаправленные изменения в возрастном составе ледяного покрова.

5. В XXI в. наиболее значимые изменения происходят с двухлетними и многолетними льдами, площадь которых в целом за холодный период сократилась радикально, примерно в 10 раз, так что эти льды почти полностью исчезли как важный

элемент ледового режима и составная часть возрастного состава ледяного покрова. Однолетние льды стали образовываться примерно на месяц позже, интенсивность их нарастания уменьшилась, так что наблюдается сдвиг на 1–2 месяца сроков достижения реперных отметок толщины льдов (таких, как 70 и 120 см).

6. В общей структуре преобладающих по возрасту льдов произошла замена двухлетних (и многолетних) льдов толщиной более 250 см на однолетние тонкие льды толщиной 30–70 см.

7. В соответствии с эволюцией возрастного состава происходят многолетние изменения средневзвешенной для пространства всех арктических морей России толщины льдов. Для периода 2004–2018 гг. в среднем за холодный период (октябрь–май) наблюдается уменьшение (по сравнению с периодом 1997–2003 гг.) средневзвешенной по возрастному составу толщины ледяного покрова примерно на 40 см. Если для периода 1997–2003 гг. к концу холодного периода (апрель–май) рассчитанная толщина льдов составляла около и более 1,5 м, то для периода 2004–2018 гг. она не превышает 1,2 м.

8. Резкие, скачкообразные изменения в возрастном составе и средневзвешенной толщине льдов происходят в течение одного холодного сезона 2003/04 г., который разделяет два принципиально различающихся многолетних периода, характеризующих состояние льдов в конце XX и начале XXI в.; при этом многолетние изменения происходят не постепенно, шаг за шагом, накапливая аномалии от года к году, но — в климатическом отношении — практически мгновенно, в течение одного гидрологического года.

**Конфликт интересов.** Конфликт интересов отсутствует.

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках ЦНТП Росгидромета, тема 5.1.2.

**Competing interests.** The author has no competing interests.

**Funding.** This work was funded by the Roshydromet Targeted Scientific and Technical Program (TSTP), project 5.1.2.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. 1535 p.
2. Океанография и морской лед. М.: Paulsen, 2011. 432 с.
3. Бобылев Л.П., Йоханнесен О.М., Шалина Е.В., Александров В.Ю., Сандвен С. Изменение ледяного покрова Северного Ледовитого океана в конце 20-го — начале 21-го веков по данным спутникового зондирования и других видов измерений // Океанография и морской лед / Под ред. И.Е. Фролова. М.; СПб.: Паулсен, 2011. С. 338–356.
4. Kwok R., Rothrock D.A. Decline in Arctic sea ice thickness from submarine and ICESat records: 1958–2008 // Geophys. Res. Letters. 2009. V. 36. L15501.
5. Александров В.Ю., Йоханнесен О.М. Изменение толщины льда в Арктике с конца XIX века // Проблемы Арктики и Антарктики. 2012. № 4 (94). С. 63–73.
6. Гудкович З.М., Карклин В.П., Миронов Е.У., Иванов В.В., Лосев С.М., Дымент Л.Н., Смоляницкий В.М., Фролов С.В., Юлин А.В., Усольцева Е.А. Развитие ледовых и метеорологических условий в Арктике в период 2007–2013 гг. // Проблемы Арктики и Антарктики. 2013. № 2 (96). С. 90–102.

7. Афанасьева Е.В., Алексеева Т.А., Соколова Ю.В., Демчев Д.М., Чуфарова М.С., Быченков Ю.Д., Девятаев О.С. Методика составления ледовых карт ААНИИ // Российская Арктика. 2019. № 7. С. 5–20.
8. Файловый сервер ААНИИ WDC Sea Ice. URL: <http://wdc.aari.ru/datasets/d0004> (дата обращения 05.05.2020).
9. Карклин В.П., Хотченков С.В., Юлин А.В., Смоляницкий В.М. Формирование возрастного состава льда в юго-западной части Карского моря в осенне-зимний период // Проблемы Арктики и Антарктики. 2017. № 3 (113). С. 16–26.
10. Хотченков С.В. Формирование возрастного состава ледяного покрова в море Лаптевых // Проблемы Арктики и Антарктики. 2017. № 4 (114). С. 5–15.
11. Международная символика для морских ледовых карт и номенклатура морских льдов / Под ред. Б.А. Крутских. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 56 с.
12. Карклин В.П., Хотченков С.В., Юлин А.В., Смоляницкий В.М. Сезонные изменения возрастного состава льдов в северо-восточной части Карского моря в осенне-зимний период // Проблемы Арктики и Антарктики. 2016. № 4 (110). С. 41–50.
13. Giles K.A., Laxon S.W., Ridout A.L. Circumpolar thinning of Arctic sea ice following the 2007 record ice extent minimum // Geophys. Res. Letters. 2008. V. 35. L22502.
14. Фролов С.В., Федяков В.Е., Третьяков В.Ю., Клейн А.Е., Алексеев Г.В. Новые данные об изменениях толщины льда в Арктическом бассейне // Доклады Академии наук. 2009. Т. 425. № 1. С. 104–108.
15. Шалина Е.В., Бобылев Л.П. Изменение ледовых условий в Арктике согласно спутниковым наблюдениям // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 6. С. 28–41.
16. Третьяков В.Ю., Фролов С.В., Сарафанов М.И. Изменчивость ледовых условий плавания по трассам Северного морского пути за период 1997–2018 гг. // Проблемы Арктики и Антарктики. 2019. Т. 65. № 3. С. 328–340.
17. Kwok R., Cunningham G. F. Variability of Arctic sea ice thickness and volume from CryoSat-2 // Philosophical Transactions of the Royal Society. 2015. <https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0157>.

## REFERENCES

1. IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013: 1535 p.
2. *Okeanografiya i morskoi led*. Oceanography and sea ice. M.: Paulsen, 2011: 432 p. [In Russian].
3. Bobilev L.P., Johanessen O.M., Shalina Ye.V., Aleksandrov V.Yu., Sandven S. Changes of the Arctic Ocean ice cover in late 20th — early 21st centuries by the data satellite remote sensing and other kinds of measurements / Ed. By I.Ye. Frolov. Moscow; St. Petersburg: Paulsen Ltd., 2011: 338–356. [In Russian].
4. Kwok R., Rothrock D.A. Decline in Arctic sea ice thickness from submarine and ICESat records: 1958–2008. *Geophys. Res. Letters*. 2008, 36: L15501.
5. Aleksandrov V.Yu., Johanessen O.M. Changes of ice thickness in the Arctic since the end of 19th century. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Problems of the Arctic and Antarctic. 2012, 4 (94): 63–73. [In Russian].
6. Gudkovich Z.M., Karklin V.P., Mironov Ye.U., Ivanov V.V., Losev S.M., Dymant L.N., Smolyanitsky V.M., Frolov S.V., Yulin A.V., Usoltseva E.A. Development of ice and weather conditions in the Arctic during 2007–2013. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Problems of the Arctic and Antarctic. 2013, 2 (96): 90–102. [In Russian].

7. Afanasieva Ye.V., Alekseyeva T.A., Sokolova Yu.V., Demchev D.M., Chufarova M.S., Bychenkov Yu.D., Devyatayev O.S. Methodology of ice chart compilation. *Rossiyskaya Arktika. The Russian Arctic*. 2019, 7: 5–20. [In Russian].
8. AARI WDC Sea Ice file server. Available at: <http://wdc.aari.ru/datasets/d0004> (accessed 05.05.2020).
9. Karklin V.P., Hotchenkov S.V., Yulin A.V., Smolyanitsky V.M. Formation of the stages of sea ice development composition in the south-western part of the Kara Sea during autumn-winter season. *Problemy Arktiki i Antarktiki. Problems of the Arctic and Antarctic*. 2017, 3 (113): 16–26. [In Russian].
10. Hotchenkov S.V. Stages of sea ice development in the Laptev Sea. *Problemy Arktiki i Antarktiki. Problems of the Arctic and Antarctic*. 2017, 4 (114): 5–15. [In Russian].
11. *Mezhdunarodnaia simvolika dlia morskikh ledovykh kart i nomenklatura morskikh l'dov*. International symbols for the sea ice charts and nomenclature of sea ice / Ed. by B.A. Krutskikh. Leningrad: Gidrometeoizdat Publishers, 1984: 56 p. [In Russian].
12. Karklin V.P., Hotchenkov S.V., Yulin A.V., Smolyanitsky V.M. Seasonal changes in the stages of sea ice development in northeast part of the Kara Sea during the autumn and winter period. *Problemy Arktiki i Antarktiki. Problems of the Arctic and Antarctic*. 2016, 4 (110): 41–50. [In Russian].
13. Giles K.A., Laxon S.W., Ridout A.L. Circumpolar thinning of Arctic sea ice following the 2007 record ice extent minimum. *Geophys. Res. Letters*. 2008, 35: L22502.
14. Frolov S.V., Fedyakov V.Ye., Tretiakov V.Yu., Klein A.E., Alekseyev G.V. New data on ice thickness changes in the Arctic Basin. *Doklady Akademii Nauk*. Reports of the Academy of Science. 2009, 425, 1: 104–108. [In Russian].
15. Shalina Ye.V., Bobylev L.P. Changes of ice conditions in the Arctic in accordance with satellite observations. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. Modern problems of the Earth remote sensing. 2017, 14, 6: 28–41. [In Russian].
16. Tretiakov V.Yu., Frolov S.V., Sarafanov M.I. Variability of ice navigation conditions along the North Sea Route lines during 1997–2018. *Problemy Arktiki i Antarktiki. Problems of the Arctic and Antarctic*. 2019, 65, 3: 328–340. [In Russian].
17. Kwok R., Cunningham G.F. Variability of Arctic sea ice thickness and volume from CryoSat-2. *Philosophical Transactions of the Royal Society*. 2015. <https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0157>.

# МЕТЕОРОЛОГИЯ И КЛИМАТОЛОГИЯ METEOROLOGY AND CLIMATOLOGY

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-2-144-161>  
УДК 551.583



ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

ORIGINAL ARTICLE

## ЦИКЛИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА И ПРЕДПОСЫЛКИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ АРКТИЧЕСКИХ ВТОРЖЕНИЙ НА БЛИЖАЙШЕЕ ДЕСЯТИЛЕТИЕ

*В.Ф. ЛОГИНОВ\**, *С.А. ЛЫСЕНКО*, *Ю.А. БРОВКА*, *В.С. МИКУЦКИЙ*

*Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь*

*\*info@nature.nas.by*

### Резюме

Исследованы пространственно-временные изменения продолжительности арктических вторжений (ПАВ) в различных секторах Северного полушария. В основу исследования положена классификация циркуляционных механизмов по Б.Л. Дзердзеевскому. Детальный анализ линейных трендов и циклических колебаний в изменении продолжительности арктических вторжений с использованием компонентно-гармонического метода позволил получить прогностические оценки ПАВ на ближайшее десятилетие.

**Ключевые слова:** арктическое вторжение, прогноз, тренды, циклы, циркуляционный механизм.

**Для цитирования:** *Логинов В.Ф., Лысенко С.А., Бровка Ю.А., Микуцкий В.С.* Циклическая структура и предпосылки прогнозирования продолжительности арктических вторжений на ближайшее десятилетие // Проблемы Арктики и Антарктики. 2020. Т. 66. № 2. С. 144–161. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-2-144-161>.

Поступила 12.03.2020

После переработки 25.05.2020

Принята 02.06.2020

## CYCLICAL STRUCTURE AND THE PREREQUISITES FOR FORECASTING OF THE DURATION OF ARCTIC INVASIONS FOR THE NEXT DECADE

*VLADIMIR F. LOGINOV\**, *SERGEY A. LYSENKO*, *YULIYA A. BROVKA*,  
*VLADIMIR S. MIKUTSKY*

*Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*

*\*info@nature.nas.by*

## Summary

The Duration of Arctic Invasions (DAI) is known to be connected with various climatological indexes. This paper presents the results of a study of DAI changes in various sectors of the Northern Hemisphere from 1899 to 2017. To this end, we used the classification of circulating mechanisms of the Northern Hemisphere by B.L. Dzerdzeevsky.

The basic attention was paid to the study of the trend component of the temporal variability of the duration of Arctic invasions; to the assessment of long-period cyclic fluctuations of the DAI; and to the forecasting the duration of Arctic invasions over the next decade in the Northern Hemisphere sectors.

To analyze the components of the change in the duration of Arctic invasions and its forecast, we used: a description of the initial data using a linear trend, approximation of time series by the Savitsky-Golay method, spectral analysis and spectral-time analysis, as well as the component-harmonic method.

We found a significant increase in the duration of Arctic invasions in the Pacific and Atlantic sectors and its significant decline in the European and American sectors. In deviations from the trend, a powerful quasi-fifty-year component for five sectors is clearly manifested; whereas in the European sector the deviation is rather weak and quasi-thirty-year fluctuations dominate here. What is more, quasi-20-year fluctuations in the variability of DAI were revealed, we predict DAI estimates for the next 10 years by combining the trend and two quasi-cyclic fluctuations. According to our forecast an increase in the duration of Arctic invasions will occur from 2022 in the European sector. In the Atlantic sector, DAI growth will begin in 2019 and continue until 2023, and then DAI will fall. In other sectors, there will be a decrease in the duration of Arctic invasions starting from 2016. The decrease in American sector starts only from 2022.

**Keywords:** arctic invasion, circulation mechanism, cycles, forecast, trends.

**For Citation:** *Loginov V.F., Lysenko S.A., Brovka Yu.A., Mikutsky V.S.* Cyclical structure and the prerequisites for forecasting of the duration of Arctic invasions for the next decade. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2020, 66 (2): 144–161. [In Russian]. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-2-144-161>.

Received 12.03.2020

Revised 25.05.2020

Accepted 02.06.2020

## ВВЕДЕНИЕ

Арктическое вторжение — это адвекция массы арктического воздуха в средние широты. Оно сопровождается понижением температуры и влагосодержания. Поскольку арктический воздух более тяжелый, арктическое вторжение сопровождается ростом атмосферного давления. Большая повторяемость и продолжительность арктических вторжений приводит к формированию суровых зим в средних широтах. Нередко арктические вторжения достигают субтропических широт. Арктические вторжения происходят в тылу циклонов, развивающихся или регенерирующих на арктическом фронте. Они приводят к образованию малоподвижных барических гребней, соединяющих арктический циклон с субтропическим, и блокируют западный перенос воздушных масс.

Анализ изменений климата с применением типизации элементарных циркуляционных механизмов (ЭЦМ) по Б.Л. Дзердзеевскому был выполнен ранее в работах Н.К. Кононовой [1–2]. В работе [3] исследованы статистические связи изменений суммарной длительности продолжительных арктических вторжений в Атлантическом и Тихоокеанском секторе Северного полушария с вариациями климатических индексов процесса Эль-Ниньо–Южное колебание (ЭНЮК). Установлены значимые связи изменений индексов ЭНЮК в XX в. с суммарной длительностью арктических вторжений в Тихоокеанском секторе в феврале, для некоторых индексов эти связи максимальные при опережении на 2 месяца. Показано, что значимое влияние

межгодовых изменений индексов ЭНЮК на суммарную длительность арктических вторжений в Атлантическом секторе в ноябре и октябре сохраняется и в XXI в. при временных сдвигах между этими процессами до четырех месяцев.

На циркуляцию атмосферы в Северном полушарии, в том числе в умеренных широтах, оказывает влияние площадь морских льдов в арктических морях. Как показано в работе [4], в долговременных изменениях ледовитости морей Евразийской Арктики кроме линейного тренда (уменьшение ледовитости, особенно морей западного региона) выявлены выявлены 50–60-летний цикл и более короткие циклы продолжительностью около 20 и 10 лет. В XX в. вклад линейного тренда и долгопериодных циклов в общую дисперсию ледовитости арктических морей в августе оказался для западной группы морей в 2–2,5 раза большим, чем для восточной. Прогноз изменений площади льда в арктических морях в XXI в. показывает сохранение циклического характера колебаний ледовитости морей с максимумами в 2030-е и 2090-е годы. Можно предположить, что подобная циклическая структура присуща и временным изменениям продолжительности арктических вторжений.

В работе [5] представлены особенности влияния вариаций суммарной продолжительности арктических блокирующих антициклонов в Атлантическом, Европейском и Сибирском секторах Северного полушария на межгодовые изменения температуры поверхности почвы и морей европейской территории России в весенние месяцы. Выявлены районы со значимыми положительными и отрицательными связями поверхностных температур с суммарной продолжительностью арктических блокингов, опережающих их на 0–2 месяца. Показано, что в апреле и мае во многих районах европейской территории России происходит повышение поверхностных температур (что создает предпосылки для возникновения засухи) при увеличении, по сравнению с предыдущим годом, в феврале и в мае суммарной продолжительности арктических антициклонов в Атлантическом секторе, так же как и при увеличении суммарной продолжительности блокирующих процессов в Европейском секторе в апреле и ее уменьшении в марте.

Межгодовые изменения суммарной длительности продолжительных арктических вторжений в Атлантическом секторе при определенных условиях статистически значимо влияют на вариации месячных сумм атмосферных осадков, что показано на примере районов Крымского полуострова и прилегающих акваторий Черного и Азовского морей в работе [6]. Отмечено, что одной из причин увеличения засушливости весной и летом и роста интенсивности зимних и осенних осадков в Крыму являются соответствующие изменения суммарной длительности продолжительных арктических вторжений в Атлантический сектор. Установлена значимая положительная корреляция изменения суммарной длительности арктических вторжений в зимние месяцы с вариациями месячных сумм атмосферных осадков в Крыму, которые запаздывают по времени на 0–1 месяца. Корреляция межгодовых изменений месячных сумм осадков весной, летом и осенью с изменениями суммарной длительности арктических вторжений значимая отрицательная при сдвигах между этими процессами 1–2 месяца.

Методика выявления арктических вторжений по данным реанализа среднесуточных значений атмосферного давления NCEP/NCAR рассмотрена в работе [7]. На примере Азово-Черноморского региона показано, что применение предложенной методики выявления арктических вторжений позволяет получить оценки тенденций

изменения метеоусловий, практически совпадающие с их оценками по данным наблюдений на прибрежных метеостанциях, что дает возможность использовать эту методику в океанических регионах, где систематические наблюдения не проводятся.

Предметом нашего исследования являются изменения продолжительности арктических вторжений (ПАВ) в Атлантическом, Европейском, Сибирском, Дальневосточном, Тихоокеанском и Американском секторах за период с 1899 по 2017 г. В работе представлен детальный пространственно-временной анализ продолжительности арктических вторжений с целью разработки их сверхдолгосрочного прогнозирования в различных секторах Северного полушария.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В работе использована типизация элементарных циркуляционных механизмов Северного полушария по классификации Б.Л. Дзердзеевского [8]. В последние десятилетия исследования школы Б.Л. Дзердзеевского продолжают представителем этой школы Н.К. Кононовой, которая успешно развивает и поддерживает разработанную более 70 лет тому назад классификацию атмосферных процессов в Северном полушарии [1, 2]. В качестве исходных данных, предоставленных Институтом географии РАН, нами использована продолжительность (суммарное годовое количество дней) различных ЭЦМ в Северном полушарии с 1899 по 2017 г. Для каждого сектора (название секторов и их положение приведены в таблице 1) выполнен расчет общей продолжительности арктических вторжений. Элементарные циркуляционные механизмы, при которых отмечаются арктические вторжения и формируются блокирующие процессы в секторах Северного полушария, приведены в табл. 1. ЭЦМ нарушения зональности (типы 3–7) характеризуются одним блокирующим процессом, ЭЦМ меридиональной северной циркуляции (типы 8–12) — двумя-четырьмя блокирующими процессами.

Для сглаживания временных рядов данных использовалась фильтрация методом Савицкого–Голея. В окрестности каждой точки строился аппроксимирующий полином 3-го порядка по методу наименьших квадратов. Окно сглаживания соответствовало примерно 15 % длины временного ряда.

Таблица 1

#### Блокирующие ЭЦМ для различных секторов Северного полушария [3]

Table 1

#### Blocking elementary circulating mechanisms for various sectors of the Northern Hemisphere [3]

Сектор	Блокирующие ЭЦМ
Атлантический (60° з.д. — 0°)	3, 8а, 8бл, 8гз, 8гл, 9а, 9б, 12а, 12бз, 12бл
Европейский (0° — 60° в.д.)	4а, 4б, 4в, 8бз, 10а, 10б, 12вз
Сибирский (60° — 120° в.д.)	5а, 5б, 5в, 5г, 8бз, 8бл, 8вз, 8вл, 8гз, 8гл, 11а, 11б, 11в, 11г, 12а, 12бз, 12бл, 12вз, 12вл, 12г
Дальневосточный (120° — 170° в.д.)	5а, 5б, 5в, 5г, 8бз, 11а, 11б, 11в, 11г, 12а, 12бз, 12вз, 12вл, 12г
Тихоокеанский (170° в.д. — 120° з.д.)	6, 8вз, 8вл, 9а, 12а, 12г
Американский (120° — 60° з.д.)	7аз, 7ал, 7бз, 7бл, 8а, 10а, 10б, 11а, 11б, 11в, 11г, 12а, 12бз, 12бл, 12вз, 12вл, 12г

С целью получения дополнительных доказательств наличия квазипятидесятилетнего колебания в изменении ПАВ в различных секторах Северного полушария, а также других циклов меньшей продолжительности в период с 1899 по 2017 г. можно использовать другие методы и подходы к исследованию структуры временных рядов. Одним из таких методов является спектрально-временной анализ (СВАН) рядов наблюдений, который использовался при исследовании устойчивости циклов, то есть изменений временной структуры спектра ряда температуры [10] с построением соответствующих диаграмм. При построении последних функция амплитудного спектра процесса  $A = A(\nu)$  подвергается временной развертке  $A = A(t, \nu)$ , где  $\nu$  — частота,  $t$  — середина скользящего временного окна, для которого проводится спектральный анализ. Визуализация результатов СВАН возможна в виде графика поверхности функции  $A$  либо в виде контурной диаграммы этой же поверхности, цвета которой представляют интервалы значений. Последнее представление и носит название спектрально-временной диаграммы (СВАН-диаграммы). Ось  $Ox$  представляет середину скользящего окна, ось  $Oy$  — длину периода гармоник. Каждый столбец на таком графике представляет собой соответствующую периодограмму, т.е. амплитудный спектр Фурье с мощностями гармоник, рассчитанный в заданном скользящем временном окне. Стандартным «режимом» при расчете спектров временного ряда являются предварительные преобразования ряда путем вычитания среднего для устранения ложного пика на нулевой частоте, а также удаление тренда для исключения эффекта «ложной корреляции» и появления фиктивных периодичностей на низких частотах.

Спектральный анализ в скользящих окнах температурных рядов проводился с использованием возможностей Фурье-анализа временных рядов, предоставляемых системой STATISTICA (разработчик — компания TIBCO [11]). При наличии большого числа рядов температуры, а также с учетом того, что при длине ряда в 118 лет (1899–2017 гг.) и длине скользящего окна в 48 лет необходимо провести такой анализ многократно, очевидна необходимость автоматизации данной процедуры. Для этих целей на основе открытой COM архитектуры системы STATISTICA была разработана специализированная VBA-программа.

В работе использован многолетний ряд ПАВ длительностью 118 лет. Длина скользящего окна выбиралась в диапазоне 42–52 года и составляла менее 50 % от длины использованного ряда.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Следует отметить, что из-за ограниченного числа наземных станций и низкой плотности радиозондовых наблюдений в начале периода с 1899 по 2017 г. нельзя говорить об однородности данных по изменению циркуляционных процессов по Б.Л. Дзерdzeевскому, по крайней мере в первой части ряда. И только в послевоенное время, в конце 40-х годов прошлого столетия плотность метеорологической сети на территории земного шара превысила 50 % от максимального числа станций, достигнутого к началу 1990-х годов, что, естественно, уменьшило эту неопределенность в изменении циркуляционных процессов. Принимая во внимание это обстоятельство, кроме анализа всего доступного ряда, отдельно более детально нами выполнен анализ ПАВ за последний период с 1948 по 2017 г., для которого выделение ЭЦМ основано на данных, полученных на достаточно плотной метеорологической сети (порядка

70 % от максимума числа станций). Однако и для этого 70-летнего периода плотность сети в таких секторах, как Тихоокеанский и Атлантический, оставалась небольшой.

На основе рабочей базы данных был выполнен статистический анализ общей продолжительности арктических вторжений. Как показали результаты вычисления линейных трендов (табл. 2) для периода 1899–1948 гг., в пяти из шести секторов наблюдается падение ПАВ, и только в Европейском секторе — слабый рост ПАВ. Для 70-летнего ряда (1948–2017 гг.) наблюдаются восходящие линейные тренды продолжительности арктических вторжений для четырех секторов: Тихоокеанского, Атлантического, Дальневосточного и Сибирского. Наиболее существенный рост ПАВ отмечается в Тихоокеанском и Атлантическом секторах. В Европейском секторе наблюдается падение ПАВ со скоростью, близкой к скорости роста ПАВ в Атлантическом секторе. Только для трех секторов отмечаются статистически значимые величины падения (Европейский сектор) и роста (Тихоокеанский и Атлантический секторы) ПАВ как за весь исследуемый период, так и за последние 70 лет. Следует отметить незначительно изменяющуюся скорость падения ПАВ на протяжении 118-летнего периода и отдельных его периодов в Американском секторе.

Различие знаков трендов ПАВ двух пар секторов (Европейский и Американский, Тихоокеанский и Атлантический) за последние 70 лет можно соотнести с их географическим разнесением на  $180^\circ$ : первая пара расположена на западной части Евразийского и Американского континентов, а вторая — локализована в акватории Тихого и Атлантического океанов. Одинаковый знак коэффициентов линейного тренда для каждой пары секторов можно объяснить расположением указанных четырех секторов относительно центров основных круглогодичных центров действия атмосферы (ЦДА) — Исландского и Алеутского. Синхронность изменений ПАВ на восточной и западной сторонах Исландского и Алеутского минимумов свидетельствует о синхронности изменений всех либо части морфометрических характеристик (широты, долготы, интенсивности) указанных ЦДА в их квазивековом изменении.

Результаты проведенного сравнительного анализа коэффициентов детерминации ( $R^2$ ) линейных трендов ПАВ в различных секторах Северного полушария показали, что только в Тихоокеанском и Европейском секторах величина детерминации составляет 0,41–0,48 за весь исследуемый период и последние 70 лет, т.е. линейный

Таблица 2

**Коэффициенты линейных трендов ПАВ ( $\alpha$ ) и детерминаций ( $R^2$ ) для разных секторов и периодов времени**

Table 2

**Coefficients of linear trends of Arctic invasion duration ( $\alpha$ ) and determinations ( $R^2$ ) for different sectors and time periods**

Сектор	$\alpha$			$R^2$		
	1899– 2017 гг.	1899– 1948 гг.	1948– 2017 гг.	1899– 2017 гг.	1899– 1948 гг.	1948– 2017 гг.
Тихоокеанский	0,58	–0,45	0,99	0,41	0,17	0,41
Атлантический	0,45	–0,55	0,98	0,20	0,18	0,27
Европейский	–0,58	0,08	–0,81	0,48	0,0025	0,45
Сибирский	–0,23	–0,98	0,42	0,06	0,22	0,07
Дальневосточный	–0,35	–1,00	0,22	0,13	0,23	0,02
Американский	–0,63	–0,73	–0,59	0,31	0,11	0,11

тренд объясняет около 40–50 % от общей изменчивости исходных значений ПАВ. В Американском секторе этот показатель около 30 % для всего ряда.

### Квазипятидесятилетнее колебание в изменении продолжительности арктических вторжений

В отклонениях ПАВ от линейного тренда в разных секторах Северного полушария отчетливо заметно проявление долгопериодных циклических колебаний.

На рис. 1 представлен характер изменения продолжительности, амплитуд и фаз квазипятидесятилетних колебаний ПАВ в различных секторах Северного полушария для двух частей ряда: 1899–1948 и 1948–2017 гг. — после удаления трендов из рядов ПАВ. Рассмотрение параметров 50-летнего колебания для частей ряда диктуется, как было показано ранее, разной надежностью используемых данных ряда ПАВ.

Отклонения ПАВ от линейного тренда (детрендизация ряда) для разных частей ряда ПАВ (см. рис. 1) описаны полиномом 3-й степени (фильтрация методом Савицкого–Голея) и содержат ярко выраженное квазипятидесятилетнее колебание во всех секторах Северного полушария, кроме Европейского, где средняя длительность самого мощного колебания в зависимости от анализируемого периода времени

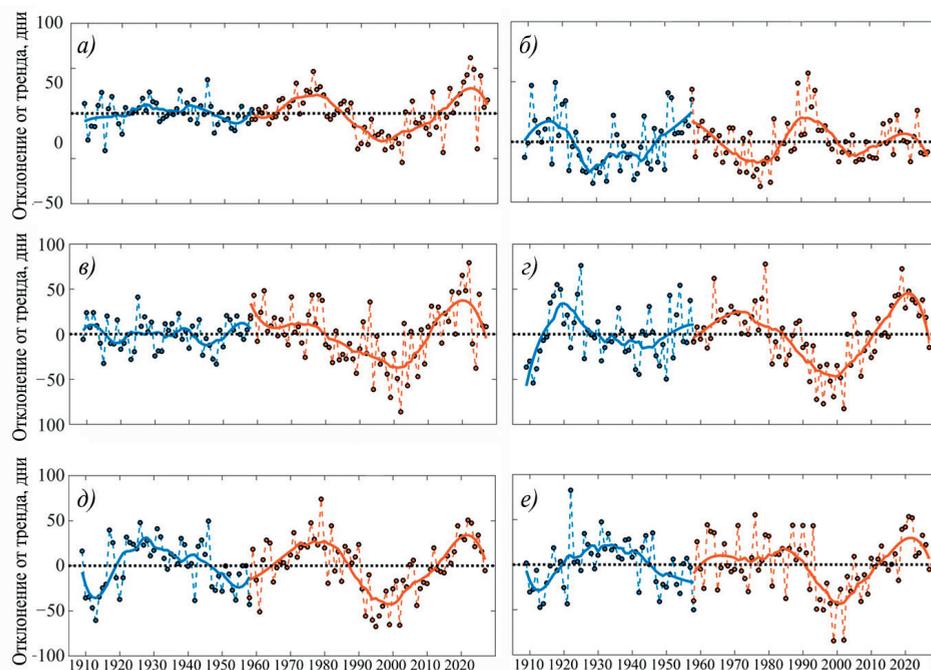


Рис. 1. Отклонения (остатки) частоты арктических вторжений от линейного тренда в секторах Северного полушария и их аппроксимация методом Савицкого–Голея за период с 1899 по 1948 г. и за период с 1948 по 2017 г.; Тихоокеанский (а), Европейский (б), Атлантический (в), Американский (г), Дальневосточный (д), Сибирский (е) секторы

Fig. 1. Deviations (residues) of the Arctic invasion frequency from the linear trend in the Northern Hemisphere sectors and their approximation by the Savitsky–Goley method for the period from 1899 to 1948 to 1948 to 2017; Pacific (a), European (b), Atlantic (c), American (d), Far Eastern (e) sectors

составляет от 27 до 38 лет. Амплитуды квазипятидесятилетних колебаний ПАВ возрастают во второй части ряда. Анализ величины удвоенной амплитуды (размаха) квазипятидесятилетнего колебания в разных секторах Северного полушария показал, что она изменялась в небольших пределах (55–65 дней ПАВ), что составляет от 42 % от величины изменчивости ( $\pm 2\sigma$  ПАВ) для Сибирского сектора до 60 % для Атлантического.

Фазировка максимумов и минимумов ПАВ квазипятидесятилетних колебаний во всех секторах, кроме Европейского, в общем совпадает, хотя в первой части ряда согласие фаз не всегда отчетливое. Например, в Тихоокеанском, Атлантическом и Американском секторах, где амплитуда колебаний ПАВ в первой части ряда мала, трудно говорить о какой-либо определенной фазировке максимумов и минимумов указанного колебания, что, возможно, связано с отмеченной выше ненадежностью данных этого периода.

Сравнивая величины амплитуд квазипятидесятилетнего колебания ПАВ с величинами линейного тренда ПАВ для последней части ряда в разных секторах Северного полушария, можно заключить, что их величины сравнимы, а в таких секторах, как Американский, Сибирский и Дальневосточный, амплитуды квазипятидесятилетних колебаний ПАВ даже больше, чем трендовая составляющая. Фазы максимумов и минимумов квазипятидесятилетних колебаний совпадают в пяти из шести секторов Северного полушария: максимумы указанных колебаний приходятся соответственно на начало двадцатого столетия, 1960-е гг. и начало текущего столетия (2008–2012 гг.), а минимумы на 1930–1940-е гг., конец 1980-х–начало 1990-х гг. Очередной минимум в продолжительности арктических вторжений может наступить в 2030–2040 гг.

Этот результат является предпосылкой использования выявленных циклов при разработке физико-статистических методов сверхдолгосрочных прогнозов ПАВ.

Таким образом, генеральные особенности изменений продолжительности арктических вторжений в Северном полушарии за период времени с 1899 по 2017 г. состоят в следующем. Изменения продолжительности арктических вторжений имеют сложную временную структуру: кроме векового увеличения продолжительности арктических вторжений, на графиках отчетливо проявляется мощное циклическое колебание, продолжительность которого составляет около 50 лет, а также более слабые колебания в полосе частот 20–30 и 2–9 лет. Подобная цикличность характерна для Тихоокеанского многолетнего колебания [9].

Анализ временной структуры изменений продолжительности арктических вторжений в различных секторах Северного полушария показал наличие трех спектральных полос в изменчивости арктических вторжений. Первая полоса — долгопериодная (трендовая составляющая), ее продолжительность, возможно, выходит за рамки использованного ряда (1899–2017 гг.). На фоне этой трендовой составляющей, которая в различных секторах может быть либо восходящей, либо нисходящей, развиваются колебания большей частоты.

Вторая полоса изменчивости циркуляции занята квазиполувековой составляющей в изменении продолжительности арктических вторжений. Фазировка этого колебания в Атлантическом и Европейском секторах противоположная, что, вероятно, связано с наличием отрицательных телеконнекционных (дальних) связей температуры на западной и восточной частях Исландского центра действия атмосфер.

В Тихоокеанском и Американском секторах характер связи продолжительности арктических вторжений для второй полосы частот существенно отличается от характера такой связи в Атлантическом и Европейском секторах. В Тихоокеанском и Американском секторах связь продолжительности арктических вторжений во второй полосе частот остается синхронной, но менее тесной. Здесь существует Тихоокеанское колебание, обеспечивающее асинхронный характер связи температуры на западной и восточной стороне Алеутского минимума. В этих районах заметно также воздействие на изменение ПАВ Дальневосточного муссона.

Знак трендовой составляющей в изменении продолжительности арктических вторжений в Дальневосточном и Американском секторах совпадает: продолжительность арктических вторжений в указанных секторах уменьшается. Вместе с тем знак линейного тренда в Дальневосточном и Тихоокеанском секторах противоположен, тогда как фазировка квазипятидесятилетних колебаний в Дальневосточном и Тихоокеанском секторах совпадает, и их амплитуда соизмерима с величинами линейных трендов продолжительности арктических вторжений. Амплитуда квазипятидесятилетних колебаний в продолжительности ПАВ в Американском секторе не отличается существенно от амплитуд подобного колебания в Сибирском, Дальневосточном и Тихоокеанском секторах. Имеется и синхронизация данного колебания в этих трех секторах.

Третья полоса частот включает короткопериодные колебания продолжительностью 2–10 лет. Изменения их амплитуд не содержат какого-либо тренда.

Спектральный анализ продолжительности арктических вторжений в разных секторах Северного полушария показал, что наибольшая мощность энергии в изменении ПАВ сконцентрирована в полосе частот 46–52 года в подавляющем числе секторов. Продолжительность этого цикла и его амплитуда несколько изменяются в течение периода с 1899 до 2017 г. Поскольку использованный в работе метод спектрального анализа не обеспечивает получение сплошного спектра в полосе низких частот из-за сравнительно коротких рядов наблюдений ПАВ, определить точную продолжительность и мощность этого колебания не представляется возможным, однако само наличие квазипятидесятилетнего колебания в изменении ПАВ с мало изменяющейся амплитудой и фазой по крайней мере в последние 70 лет не вызывает сомнений.

Мощность квазипятидесятилетнего цикла в изменении ПАВ для разных промежутков времени 118-летнего периода наблюдений изменяется. Она является максимальной со второй половины 60-х гг. прошлого столетия до начала 10-х гг. текущего столетия. Экстремумы разнесены на 22–23 года. Минимумы (максимумы) мощности долгопериодного колебания ПАВ в Европейском секторе разнесены по времени на 20–28 лет, но последний минимум (конец XX – начало XXI в.) совпадает с максимумом ПАВ во всех других секторах Северного полушария.

### **Спектр короткопериодных колебаний в межгодовых изменениях ПАВ**

Рассмотрим короткопериодную часть спектров ПАВ. На рис. 2 и 3 в качестве примера приведены скользящие мощности различных гармоник для Тихоокеанского и Европейского секторов (при использовании 48-летнего скользящего окна). На СВАН-диаграммах (рис. 2а, 3а) приведена мощность гармоник от 2 до 24 лет, а в нижней части рисунков (рис. 2б, 3б) — скользящие значения мощности 48-летней

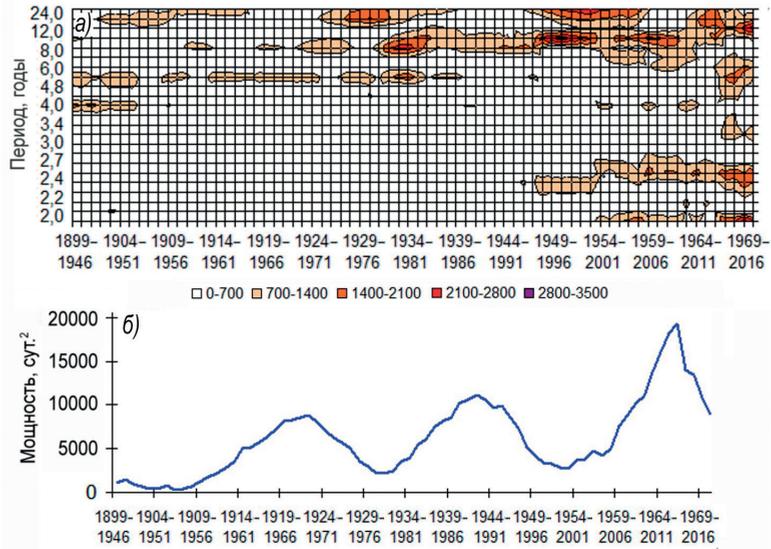


Рис. 2. СВАН-диаграмма продолжительности арктических вторжений для Тихоокеанского сектора Северного полушария с 1899 по 2017 г. (а); скользящие значения мощности 48-летней гармоники (б); скользящее окно — 48 лет

Fig. 2. STAN (spectral-time analysis)-diagrams of the duration of Arctic invasions for the Pacific sector of the Northern Hemisphere from 1899 to 2017 (a); moving spectral power of 48-year harmonic (b); moving window — 48 years

гармоники. В верхней части рисунков густота заливки показывает мощность той или иной гармоники, а горизонтальные контуры, отвечающие периодам гармоник, говорят об устойчивости этих гармоник во времени. В короткопериодной части спектра (2–24 года) определенная устойчивость выявленных квазипериодических компонент в изменении ПАВ во времени характерна лишь для нескольких полос частот в ряде спектров ПАВ в секторах Северного полушария.

1. *Американский сектор.* Устойчивая 8–11-летняя гармоника проявляется в каждом 48-летнем интервале лишь до начала 1990-х гг. Во вторую половину ряда, начиная с 1950-х гг., большая энергия концентрируется в полосе 13–16 лет. Возможная природа последнего цикла может быть связана с 22-летним циклом.

2. *Тихоокеанский сектор.* Начиная с 1930-х гг. устойчивыми во времени гармониками являются 8–10-летние.

3. *Атлантический сектор.* Начиная с конца 1930-х гг. устойчивой во времени гармоникой является 16-летняя, а с конца 1940-х гг. — 2,4–2,5-летняя.

4. *Дальневосточный сектор.* Начиная с 1920-х гг. устойчивыми во времени гармониками являются 3,4–4,2-летние. Другой по продолжительности проявления (с 1940-х гг.) является 16-летняя гармоника.

5. *Европейский сектор.* Для этого сектора только с 1940-х гг. определенной устойчивостью во времени обладают гармоники в интервале около 20–28 лет. Квазидвухлетние колебания имеют пятнистое распределение во времени.

6. *Сибирский сектор.* На СВАН-диаграммах выражена устойчивая во времени полоса спектра 3,4–4,2 года начиная с первого десятилетия прошлого столетия. Вто-

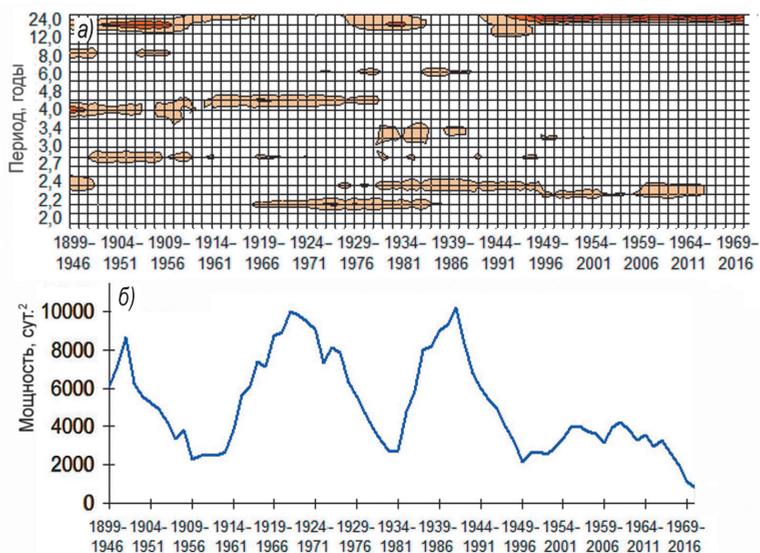


Рис. 3. СВАН-диаграмма продолжительности арктических вторжений для Европейского сектора Северного полушария с 1899 по 2017 г. (а); скользящие значения мощности 48-летней гармоники (б); скользящее окно — 48 лет

Fig. 3. STAN-diagrams of the duration of Arctic invasions for the European sector of the Northern hemisphere from 1899 to 2017 (а); moving spectral power of 48-year harmonic (б); moving window — 48 years

рой менее устойчивой во времени гармоникой является квазидвадцатидвухлетняя гармоника, но она проявилась только с 1940-х гг.

Все вышеназванные гармоники существенно уступают по мощности квазипятидесятилетней.

Что касается короткопериодной полосы частот, результаты спектрального анализа и СВАН-анализа для всего периода времени сводятся к следующему. В океанических секторах и Европейском секторе доминируют циклы продолжительностью около 2,5–3,0 лет. В ряде секторов он устойчив в течение большей части рассмотренного периода. В Дальневосточном и Сибирском секторах более выраженными являются циклы продолжительностью 3,4–3,7 года. В Тихоокеанском секторе большая мощность характерна для полосы частот 8,8–11,0 лет. Продолжительность этого цикла близка к известному 10–11-летнему циклу в солнечной активности. Короткопериодные циклы уступают по мощности квазипятидесятилетнему циклу более чем в 5–10 раз. Исключение составляет циклическая структура ПАВ в Европейском секторе, где амплитуды квазидвадцатидвухлетнего цикла больше, чем квазипятидесятилетнего. 70-летней длины использованных рядов ПАВ крайне недостаточно, чтобы уверенно выделить и тем более обосновать статистическую значимость таких циклов продолжительности арктических вторжений.

Таким образом, спектральный анализ продолжительности арктических вторжений для всего периода времени показал, что, кроме квазипятидесятилетней мощной компоненты в изменении ПАВ, присутствуют еще и слабые по мощности циклы в коротковолновой полосе.

**Компонентно-гармонический метод прогностических оценок изменений климата**

Рассмотрим в деталях структуру временных рядов продолжительности арктических вторжений в разных секторах Северного полушария. Оказалось, что конкурентом квазипятидесятилетнему колебанию по величине вклада в суммарную изменчивость ПАВ является их линейный тренд, превышающий в ряде секторов Северного полушария даже вес квазипятидесятилетнего колебания. Величина линейного тренда ПАВ в Тихоокеанском и Атлантическом секторах для последней

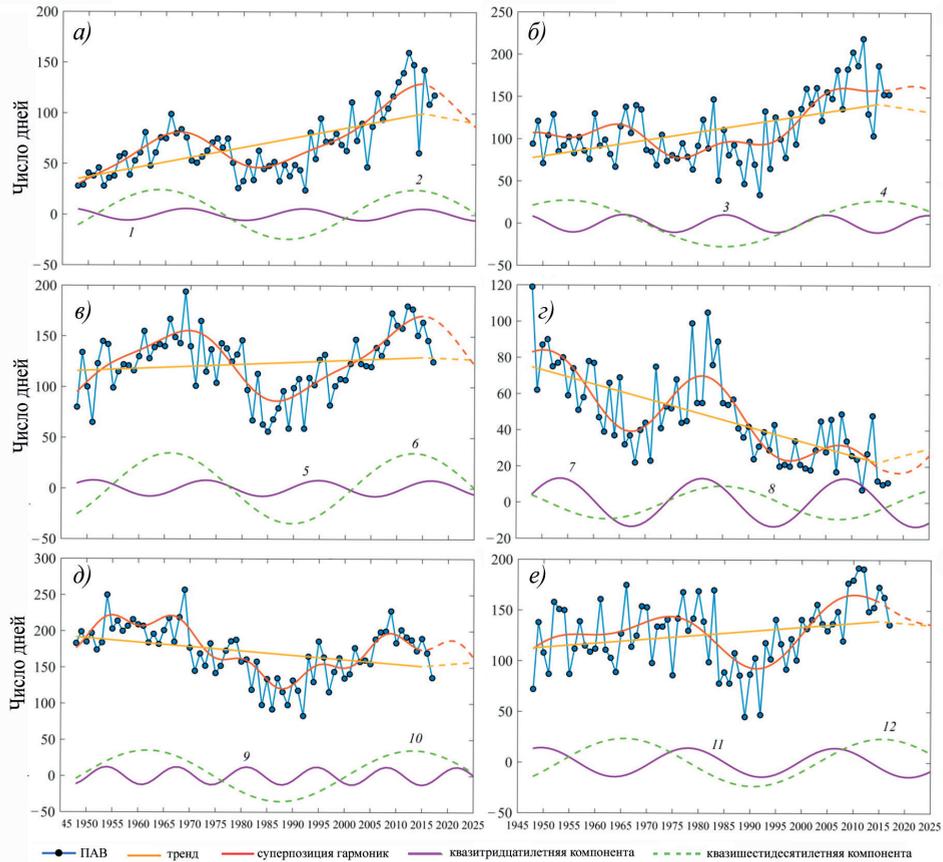


Рис. 4. Временные ряды погодичных продолжительностей арктических вторжений в секторы Северного полушария и их аппроксимация в виде линейного тренда с наложенными на него двумя гармоническими колебаниями с периодами: 23 (1), 49 (2), 20 (3), 61 (4), 22 (5), 47 (6), 27 (7), 45 (8), 14 (9), 51 (10), 28 (11) и 50 (12) лет; Тихоокеанский (а), Атлантический (б), Дальневосточный (в), Европейский (г), Американский (д), Сибирский (е) секторы. Экстраполяция рядов до 2025 г. (пунктир) — расчет по аппроксимационной модели в предположении излома тренда в 2015 г.

Fig. 4. Time series of annual durations of Arctic invasions in the Northern Hemisphere sectors and their approximation by the linear trend with two harmonic fluctuations superimposed on it with periods: 23 (1), 49 (2), 20 (3), 61 (4), 22 (5), 47 (6), 27 (7), 45 (8), 14 (9), 51 (10), 28 (11) and 50 (12) years; Pacific (a), Atlantic (b), Far Eastern (c), European (d), American (d), Siberian (e) sectors. Extrapolation of series to 2025 (dotted line) — calculation based on the approximation model assuming a trend break in 2015

части ряда (1948–2017 гг.), а в Европейском, Тихоокеанском и Американском секторах для всего доступного ряда ПАВ (1899–2017 гг.) была соизмерима с размахом квазипятидесятилетнего колебания.

Тремя компонентами, включающими тренд и две главные гармоники в изменении ПАВ (продолжительность около 50 и 20–28 лет), удовлетворительно описываются изменения ПАВ за период с 1948 по 2017 г. (рис. 4), о чем свидетельствуют высокие коэффициенты корреляции исходных и расчетных (3-компонентная модель) величин. Коэффициенты корреляции сопоставляемых величин оказались максимальными для Тихоокеанского, Европейского и Американского секторов (0,8–0,84) и минимальными для Сибирского сектора (0,65).

Рассчитана доля дисперсии исходного ряда, определяемая  $k$ -ой компонентой модели ( $k_{1,2,3}$ , где  $k_1$  соответствует линии тренда, а  $k_2$  и  $k_3$  — периодическим сигналам), а также доля трехкомпонентной составляющей в общей дисперсии ПАВ с 1948 по 2017 г. (табл. 3).

Таблица 3

**Доля выявленных составляющих в общей дисперсии продолжительности арктических вторжений в секторах Северного полушария, %**

Table 3

**Proportion of detected components in total variance of Arctic invasion duration in the Northern Hemisphere sectors, %**

Сектор	Линейный тренд	Долгопериодные квазициклы (число лет)		Трехкомпонентная составляющая
		20–30-летний	50–60-летний	
Тихоокеанский	41,0	1,3 (23)	26,2 (49)	69,6
Европейский	44,6	16,7 (27)	5,8 (45)	67,7
Атлантический	26,6	4,0 (20)	26,2 (61)	46,6
Американский	11,1	6,7 (14)	44,2 (51)	65,1
Дальневосточный	2,0	2,1 (22)	52,2 (47)	56,9
Сибирский	6,9	9,9 (28)	24,9 (50)	39,0

Из табл. 3 следует, что трехкомпонентная составляющая (линейный тренд и выявленные долгопериодные циклы) достаточно хорошо описывает изменчивость ПАВ в секторах Северного полушария, за исключением Сибирского сектора. Ее доля в общей дисперсии ПАВ в Тихоокеанском и Европейском секторах составляет около 70 %, немного меньше в Американском секторе (65 %) и уменьшается до 39 % в Сибирском секторе.

Полученные результаты были использованы для получения прогностических оценок ПАВ на ближайшие десять лет, при этом был принят ряд допущений:

1) изменение знака тренда ПАВ в период с 2010 по 2012 г., о чем свидетельствуют графики изменений ПАВ в различных секторах Северного полушария (см. рис. 4);

2) одинаковая абсолютная величина коэффициентов нисходящего и восходящего линейных трендов ПАВ после точки перелома тренда в 2010–2012 гг.;

3) сохранение в ближайшее десятилетие устойчивости амплитуды и фазы выявленных первой квазипятидесятилетней и второй гармоник в изменении ПАВ.

В табл. 4 приведены рассчитанные с учетом этих предположений прогностические значения повторяемости арктических вторжений в шести секторах Северного полушария до 2025 г. В скобках указаны фактические значения ПАВ в 2016–2017 гг.

**Прогностические значения повторяемости арктических вторжений  
в шести секторах Северного полушария до 2025 г.**

Table 4

**Prognostic values of Arctic invasion recurrence  
in six sectors of the Northern Hemisphere until 2025**

Год	Сектор					
	Тихоокеанский	Европейский	Атлантический	Американский	Дальневосточный	Сибирский
2016	127 (109)	18 (10)	158 (153)	175 (170)	170 (146)	155 (163)
2017	124 (118)	17 (11)	159 (153)	177 (136)	168 (125)	152 (136)
2018	121	17	160	181	164	149
2019	116	16	161	185	160	146
2020	112	17	162	187	155	144
2021	107	17	163	188	149	141
2022	101	19	163	185	142	140
2023	96	21	163	180	135	138
2024	91	23	161	173	129	137
2025	87	26	158	164	122	136

Из табл. 4 следует, что в ближайшее десятилетие произойдет уменьшение продолжительности арктических вторжений в Сибирском, Дальневосточном и Тихоокеанском секторах, то есть на большей части Восточного полушария произойдет уменьшение ПАВ и, как следствие, уменьшение повторяемости холодных зим.

В Европейском секторе после 20-х гг. текущего столетия произойдет увеличение продолжительности арктических вторжений и, как следствие, увеличение повторяемости холодных зим начиная с 2022 г.

В Американском секторе в ближайшие несколько лет увеличится продолжительность арктических вторжений, но после 20-х гг. текущего столетия наступит их уменьшение. В Атлантическом секторе эта тенденция менее выражена, и ПАВ изменится незначительно.

Использованные подходы к получению прогностических оценок ПАВ на ближайшее десятилетие требуют отдельного комментария.

Первые два из приведенных выше предположений укладываются в наличие векового цикла, на существование которого обращалось внимание в работах [12, 13]: трендовая составляющая ПАВ во всех секторах в последние 70 лет является восходящей ветвью этого цикла. Если судить об изменениях продолжительности арктических вторжений в последнее десятилетие, то экстремальная точка этого цикла уже пройдена и начиная со второго десятилетия текущего столетия наступила нисходящая ветвь квазивекового цикла. В Тихоокеанском и Европейском секторах скорость падения (роста) составит около 1 дня в год, а в Атлантическом — около 0,8 дня в год. В Дальневосточном и Сибирском секторах скорость падения ПАВ составит соответственно 0,2 и 0,4 дня в год. Предполагается, что в Американском секторе может наступить рост ПАВ со скоростью около 0,5 дня в год. Собственно откорректированные на принятую экспертным путем величину линейного тренда прогностические значения представлены в табл. 4.

Поскольку трендовая составляющая выбирает большую часть дисперсии ряда ПАВ для Тихоокеанского и Европейского секторов Северного полушария, то и коэф-

фициенты корреляции исходных и расчетных (трендовых) значений ПАВ оказались самыми высокими. Прогноз в этом случае сводится в значительной мере к прогнозу тенденций (трендов) в изменении продолжительности арктических вторжений.

Оказалось, что в Тихоокеанском секторе можно ожидать уменьшение значений ПАВ в ближайшее десятилетие, тогда как в Европейском секторе намечился слабый рост ПАВ. Величины трендовых составляющих ПАВ в Американском и Сибирском секторах и особенно в Дальневосточном секторе существенно уступают вкладу квазипятидесятилетнего колебания в изменение ПАВ, и, следовательно, точность прогностических оценок зависит от устойчивости амплитуд и фаз этого колебания. Расчет параметров данной составляющей за весь доступный период наблюдений показал ее устойчивость для всех названных выше секторов.

В меньшей мере это справедливо для Сибирского сектора, где в последние годы (1948–2017 гг.) амплитуда квазипятидесятилетнего цикла только в 1,5 раза превышает амплитуду второго по значимости колебания — 28-летнего. Здесь может наступить слабое уменьшение ПАВ в ближайшее десятилетие, тогда как в изменении продолжительности арктических вторжений в Дальневосточном и Американском секторах Северного полушария намечилось ее устойчивое падение. Прогностические оценки ПАВ в Атлантическом секторе менее определенные: в ближайшие несколько лет скорее может наступить ее стабилизация.

Короткопериодные флуктуации носят случайный характер. Попытка использования авторегрессионных моделей для описания изменчивости ПАВ в короткопериодной области спектра не привела к каким-либо обнадеживающим результатам. Оценки показывают, что спектр короткопериодных составляющих можно описать скорее моделью «белого шума», что не позволяет спрогнозировать изменения ПАВ в этой области спектра.

Следует отметить, что природа выявленных циклов до сих пор остается дискуссионной. Долгопериодное квазипятидесятилетнее колебание считается в большинстве работ автоколебательным [14, 15, 16]. Иногда его связывают с планетными влияниями (Юпитера и Сатурна) [17]. Квазиодинадцатилетние и квазидвадцатидвухлетние колебания приписывают влиянию солнечной активности, а квазидевятнадцатилетнее колебание — деklinационному лунному приливу в океане [13, 17–19].

Подробное исследование природы квазিশестидесятилетнего и квазидвадцатилетнего колебаний в климатической системе изложены в последней монографии В.Ф. Логинова [20].

## ВЫВОДЫ

В изменении ПАВ за период с 1899 по 2017 г. выявлены трендовые и циклические составляющие. Наибольший по величине положительный тренд характерен для Тихоокеанского и Атлантического секторов, а отрицательный — для Европейского и Американского секторов.

Трендовая составляющая изменения продолжительности арктических вторжений в Тихоокеанском и Европейском секторах выбирает более 40 % от общей изменчивости исходных значений ПАВ. В Американском секторе тренд ПАВ сохраняет отрицательный знак весь период наблюдений (1899–2017 гг.), коэффициент детерминации составляет около 30 %.

Спектральный анализ продолжительности арктических вторжений, а также спектрально-временной анализ позволили установить наличие в спектрах трендовой

составляющей, квазипятидесятилетней, квазитридцатилетней (для Европейского сектора), квазидвадцатилетней и более короткопериодных квазициклических колебаний: 14–16-, 8–11-, 3–4- и 2-летних.

Наличие таких циклов выявлено не только в результате проведенного спектрального анализа и СВАН, но и более простыми методами сглаживания, а также описания исходных данных полиномом 3-й степени. В совокупности результаты анализа позволяют считать квазипятидесятилетнее колебание достоверно установленным. Исключение составляют изменения ПАВ в Европейском секторе, где в долгопериодной полосе частот доминирующими являются циклы в интервале 20–30 лет.

В отклонениях от тренда отчетливо проявляется достаточно мощная квазипятидесятилетняя составляющая для пяти секторов, кроме Европейского, где доминируют квазитридцатилетние колебания. Большой вклад трендовой и квазипятидесятилетней составляющей в общую изменчивость ПАВ позволил подойти к разработке компонентно-гармонического метода получения прогностических оценок ПАВ на ближайшие 10 лет.

Полученная с помощью метода наименьших квадратов 3-компонентная модель изменчивости ПАВ, включающая линейный тренд, квазипериодические (20–30-летние и 50–60-летние) колебания, описывает более 50 % изменчивости продолжительности арктических вторжений в большинстве секторов. На основании этой модели получены прогнозные оценки повторяемости арктических вторжений в шести секторах Северного полушария до 2025 г.: произойдет уменьшение ПАВ в Сибирском, Дальневосточном и Тихоокеанском секторах, увеличение ПАВ в Европейском секторе, после 20-х гг. текущего столетия, текущий рост ПАВ в Американском, в меньшей степени в Атлантическом секторах сменится после 2020 года снижением..

**Конфликт интересов.** Авторы статьи не имеют конфликта интересов.

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках задания 1.06 Государственной программы научных исследований «Природопользование и экология» на 2016–2020 гг.

**Competing interests.** The authors have no competing interests.

**Funding.** The study was supported by the project 1.06 in the framework of the State Program of Scientific Research “Environmental Management and Ecology” for 2016–2020.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кононова Н.К. Классификация циркуляционных механизмов Северного полушария по Б.Л. Дзердзеевскому. М.: Изд-во РАН, Институт географии, 2009. 370 с.
2. Кононова Н.К. Типы глобальной циркуляции атмосферы: результаты мониторинга и ретроспективной оценки за 1899–2017 гг. // Фундаментальная и прикладная климатология. 2018. Т. 3. С. 108–123.
3. Холопцев А.В., Семенов В.А., Кононова Н.К. Продолжительные арктические вторжения и Эль-Ниньо–Южное колебание // Известия РАН. Сер. Географическая. 2018. № 4. С. 22–32.
4. Фролов И.Е., Гудкович З.М., Карклин В.П., Смоляницкий В.М. Климатические вариации площади ледяного покрова в Евразийской Арктике и ожидаемые их изменения в XXI в. // Материалы Совета-семинара при Президенте Российской академии наук: Возможности предотвращения изменения климата и его негативных последствий. Проблема Киотского протокола. М.: Наука, 2006. С. 353–370.
5. Холопцев А.В., Кононова Н.К., Тимошенко Т.Ю. Арктические блокинги и поверхностные температуры на Европейской территории России // Жизнь Земли. 2017. Т. 39. № 1. С. 20–32.

6. *Холощев А.В., Катунина Е.Н., Тимошенко Т.Ю.* Продолжительные арктические вторжения в Атлантическом секторе и атмосферные осадки в Крыму // Ученые записки Крымского федерального университета им. В. И. Вернадского. География. Геология. 2017. Т. 3 (69). № 2. С. 251–267.
7. *Холощев А.В., Подпорин С.А., Курочкин Л.Е.* Арктические вторжения и метеоусловия в Азово-Черноморском регионе // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. География. Геология. 2019. Т. 5 (71). № 2. С. 322–331.
8. *Дзержевский Б.Л., Курганская В.М., Витвицкая З.М.* Типизация циркуляционных механизмов в Северном полушарии и характеристики синоптических сезонов / Тр. науч.-исслед. учрежд. Гл. управления гидрометеорологической службы при Совете Министров СССР. Сер. 2. Синоптическая метеорология. Вып. 21. М., Л.: Гидрометеиздат, 1946. 80 с.
9. *Полонский А.Б.* Роль океана в изменениях климата. Киев: Наукова думка, 2008. 183 с.
10. Атлас временных вариаций природных, антропогенных и социальных процессов. Т. 3. Природные и социальные сферы как части окружающей среды и как объекты воздействий. М.: Янус-К, 2002. 652 с.
11. StatSoft (Электронный ресурс). URL: <http://statsoft.ru/company/> (дата обращения 18.10.2019).
12. *Рубашев Б.М.* Проблемы солнечной активности. М., Л.: Наука, 1964. 362 с.
13. *Герман Дж.Р., Голдберг Р.А.* Солнце, погода и климат. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 320 с.
14. *Шулейкин В.В.* Физика моря. М.: Наука, 1968. 1083 с.
15. *Угрюмов А.И.* Тепловой режим океана и долгосрочные прогнозы погоды. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 176 с.
16. *Яковлева Н.И.* Эмпирические исследования автоколебательных процессов глобального масштаба в гидросфере и атмосфере Земли // Проблемы Арктики и Антарктики. 1974. № 43–44. С. 37–47.
17. *Scafetta N.* A shared frequency set between the historical mid-latitude aurora records and the global surface temperature // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2012. V. 74. P. 145–163.
18. *Максимов Н.В.* Геофизические силы и воды океана. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 447 с.
19. *Максимов И.В., Смирнов Н.П., Воробьев В.Н.* Долгосрочный прогноз многолетних изменений общей ледовитости Баренцова моря, составленный компонентно-гармоническим методом // Материалы рыбохозяйственных исследований Северного бассейна. 1964. Вып. 4. С. 73–85.
20. *Логинов В.Ф.* Космические факторы климатических изменений. Минск, 2020. 168 с.

## REFERENCES

1. *Kononova N.K.* Klassifikatsiia tsirkuliatsonnykh mekhanizmov Severnogo polushariia po B.L. Dzerdzevskomu. Classification of circulation mechanisms of the Northern hemisphere by B.L. Dzerdzevsky. Moscow: Russian Academy of Sciences, Institute of geography, 2009: 370 p. [In Russian].
2. *Kononova N.K.* Types of global circulation of the atmosphere: the results of monitoring and retrospective evaluation for 1899–2017 years. *Fundamental'naia i prikladnaia klimatologiya*. Fundamental and applied climatology. 2018, 3: 108–123. [In Russian].
3. *Kholoptsev A.V., Semenov V.A., Kononova N.K.* Long Arctic invasion and the El Niño–southern oscillation. *Izvestiia Rossiiskoi Akademii nauk. Seriya Geograficheskaiia*. News of the Russian Academy of Sciences. Geographic series. 2018, 4: 22–32. [In Russian].
4. *Frolov I.E., Gudkovich Z.M., Karklin V.P., Smolianitskii V.M.* Materialy Soveta-seminara pri Prezidente Rossiiskoi akademii nauk “Vozmozhnosti predotvrashcheniia izmeneniia klimata i ego negativnykh posledstviu. Problema Kiotskogo protokola”. Climatic variations of the ice cover area in the Eurasian Arctic and their expected changes in the XXI century. Proceedings of the Council-seminar

- under the President of the Russian Academy of Sciences “Opportunities to prevent climate change and its adverse effects. The problem of the Kyoto Protocol”. Moscow: Nauka, 2006, 353–370. [In Russian].
5. *Kholoptsev A.V., Kononova N.K., Timoshenko T.Iu.* Arctic blocking and surface temperatures in the European territory of Russia. *Zhizn' Zemli.* Earth life. 2017, 39, 1: 20–32. [In Russian].
  6. *Kholoptsev A.V., Katunina E.N., Timoshenko T.Iu.* Continued Arctic invasions in the Atlantic sector and precipitation in Crimea. *Uchenye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta im. V.I. Vernadskogo. Geografiia. Geologiya.* Scientific notes of the Crimean Federal University named after V.I. Vernadsky. Geography. Geology. 2017, 3 (69), 2: 251–267. [In Russian].
  7. *Kholoptsev A.V., Podporin S.A., Kurochkin L.E.* Arctic invasions and weather conditions in the Azov-Black Sea region. *Uchenye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta im. V.I. Vernadskogo. Geografiia. Geologiya.* Scientific notes of the Crimean Federal University named after V.I. Vernadsky. Geography. Geology. 2019, 5 (71), 2: 322–331. [In Russian].
  8. *Dzherdzeevskii B.L., Kurganskaia V.M., Vitvitskaia Z.M.* *Tipizatsiia tsirkulatsionnykh mekhanizmov v Severnom polusharii i kharakteristiki sinopticheskikh sezonov.* Typification of circulation mechanisms in the Northern hemisphere and characteristics of synoptic seasons. Proceedings of the research institution of the Main Department of hydrometeorological service of the Council of Ministers of the USSR. Ser. 2. Synoptic meteorology. V. 21. Moscow, Leningrad: Hydrometeoizdat, 1946: 80 p. [In Russian].
  9. *Polonskii A.B.* *Rol' okeana v izmeneniakh klimata.* The role of the ocean in climate change. Kiev: Naukova dumka, 2008: 183 p. [In Russian].
  10. *Atlas vremennykh variatsii prirodnykh, antropogennykh i sotsial'nykh protsessov.* Atlas of temporal variations of natural, anthropogenic and social processes. V. 3. Natural and social spheres as part of the environment and as objects of influence. Moscow: Ianus–K, 2002: 652 p. [In Russian].
  11. StatSoft (Elektronnyi resurs). URL: <http://statsoft.ru/company/>. StatSoft (Electronic resource). [In Russian]. Available at: <http://statsoft.ru/company/> (accessed 18.10.2019).
  12. *Rubashev B.M.* *Problemy solnechnoi aktivnosti.* Problems of solar activity. Moscow; Leningrad: Nauka, 1964: 362 p. [In Russian].
  13. *German Dzh.R., Goldberg R.A.* *Solntse, pogoda i klimat.* The sun, weather and climate. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1981: 320 p. [In Russian].
  14. *Shuleikin V.V.* *Fizika moria.* Physics of the sea. Moscow: Nauka, 1968: 1083 p. [In Russian].
  15. *Ugriumov A.I.* *Teplovoi rezhim okeana i dolgosrochnye prognozy pogody.* Thermal mode of ocean and long-term weather forecasts. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1981: 176 p. [In Russian].
  16. *Iakovleva N.I.* Empirical studies of global-scale self-oscillating processes in the earth's hydrosphere and atmosphere. *Problemy Arktiki i Antarktiki.* Problems of Arctic and Antarctic. 1974, 43–44: 37–47. [In Russian].
  17. *Scafetta N.* A shared frequency set between the historical mid-latitude aurora records and the global surface temperature. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics.* 2012, 74: 145–163.
  18. *Maksimov N.V.* *Geofizicheskie sily i vody okeana.* Geophysical forces and ocean waters. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1970: 447 p. [In Russian].
  19. *Maksimov I.V., Smirnov N.P., Vorob'ev V.N.* Long-term forecast of long-term changes in the total ice content of the Barents sea, compiled by the component-harmonic method. *Materialy rybokhoziaistvennykh issledovaniy Severnogo basseina.* Materials of fisheries research in the Northern basin. 1964, 4: 73–85. [In Russian].
  20. *Loginov V.F.* *Kosmicheskie faktory klimaticheskikh izmenenii.* Space factors of climate change. Minsk, 2020: 168 p. [In Russian].

ЛЕДОТЕХНИКА  
ICE TECHNOLOGY

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-2-162-179>  
УДК 532.332 + 550.8.07



ОБЗОРНАЯ СТАТЬЯ

REVIEW PAPER

МОНИТОРИНГ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ  
МОРСКОГО ЛЬДА И КРАТКОСРОЧНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ  
ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ЛЕДОВЫХ ЯВЛЕНИЙ

*В.Н. СМОРНОВ, С.М. КОВАЛЕВ\*, А.И. ШУШЛЕБИН, Н.В. КОЛАБУТИН,  
М.С. ЗНАМЕНСКИЙ*

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

*\*skovalev@aari.ru*

## Резюме

В статье дается обзор двух дополняющих друг друга направлений исследований морского льда, которые осуществляются Арктическим и антарктическим научно-исследовательским институтом (ААНИИ). Рассмотрены новые методы инструментального исследования физико-механических характеристик ледяного покрова. Приведены результаты определения локальной прочности льда на научно-исследовательском стационаре ААНИИ «Ледовая база Мыс Баранова». Рассмотрено применение контактного дистанционного метода мониторинга динамического состояния ледяного покрова с целью получения новых данных для создания метода прогнозирования явлений сжатия и разрушения морских льдов в режиме реального времени.

**Ключевые слова:** волновые процессы, зонд-индентор, ледники, ледяной покров, мониторинг, подвижки, прогноз, прочность, сейсмометр, торошение.

**Для цитирования:** *Смирнов В.Н., Ковалев С.М., Шушлебин А.И., Колабутин Н.В., Знаменский М.С.* Мониторинг физико-механического состояния морского льда и краткосрочное прогнозирование экстремальных ледовых явлений // Проблемы Арктики и Антарктики. 2020. Т. 66. № 2. С. 162–179. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-2-162-179>.

Поступила 07.05.2020

После переработки 10.06.2020

Принята 17.06.2020

MONITORING OF THE PHYSICAL AND MECHANICAL STATE  
OF SEA ICE AND SHORT-TERM PREDICTION OF EXTREME ICE  
PHENOMENA

*VICTOR N. SMIRNOV, SERGEY M. KOVALEV\*, ALEKSANDR I. SHUSHLEBIN,  
NIKOLAY V. KOLABUTIN, MAKSIM S. ZNAMENSKIY*

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

*\*skovalev@aari.ru*

### Summary

The article presents the results of studies that complement each other. New methods of instrumental studies of the physical and mechanical characteristics of ice and ice cover are considered.

There is briefly described the complex system to developed in the AARI (Arctic and Antarctic research Institute) to determine the strength characteristics of ice formations in natural conditions. The results of determining the ice strength in wells (local strength) at the research station of AARI “Ice Base Cape of Baranov” are presented. The coefficient of comparison of local strength and strength of samples under uniaxial compression is obtained. This allows to determine the ice strength without sampling and testing of samples. On a large experimental material, linear and quadratic approximations for local ice strength were obtained. The influence of the indenter penetration rate on the local ice strength is studied.

There is considered the application of the contact remote method for monitoring the dynamic state of the ice cover in order to obtain new data for creating a method of predicting the phenomena of compression and destruction of sea ice in real time.

To study the large-scale mechanics of ice during dynamic processes in the air — ice — water system, a modular-block system for ice cover monitoring was developed. The layout of the system was tested in Arctic expeditions.

The developed complex system for determining the strength characteristics of ice formations in natural conditions and the modular-block system for monitoring the state of the ice cover complement each other, suggest their further development and improvement, provide wide opportunities for ice research

**Keywords:** borehole jack, forecast, glaciers, ice cover, monitoring, ridge, seismometer, shifts, strength, wave processes.

**For Citation:** Smirnov V.N., Kovalev S.M., Shushlebin A.I., Kolabutin N.V., Znamenskiy M.S. Monitoring of the physical and mechanical state of sea ice and short-term prediction of extreme ice phenomena. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2020, 66 (2): 162–179. [In Russian]. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-2-162-179>.

Received 07.05.2020

Revised 10.06.2020

Accepted 17.06.2020

### ВВЕДЕНИЕ

Стремительные темпы освоения шельфовых зон и расширение маршрутов движения судов в арктических морях вызвали необходимость усиленного изучения состояния ледяного покрова полярных областей.

Решение задачи краткосрочного прогнозирования опасных динамических процессов в ледяном покрове, приводящих к разрушениям арктического льда различного масштаба, стало возможным в результате развития научно-технических средств и приемов мониторинга для надежного и оперативного контроля действующих внешних и внутренних сил в системе «атмосфера–лед–вода» и мониторинга крупномасштабных прочностных характеристик ледяного покрова. Для этого проводятся исследования льда как материала, как конструкции и как геофизической среды. Такой подход обеспечивает решение научных задач, задач безопасного пребывания людей и технических средств на ледяном покрове, проектирование и эксплуатацию гидротехнических сооружений, расширяет возможности ледового плавания.

Развитие методологии исследования морского льда проводится по следующим основным направлениям:

– разработка методов получения данных по характеристикам полномасштабной прочности морского льда как одного из основных параметров, учитываемых при создании математических моделей и решении научных и прикладных задач;

– совершенствование возможностей мониторинга физико-механического состояния ледяного покрова и выявление прогностических признаков явлений сжатия и торошения.

Основы такого подхода закладывались еще в прошлом веке, например, в работе Ф. Мальмгрена, посвященной исследованиям свойств морского льда [1]. Также можно отметить статью Г. Робина, который проследил особенности распространения волн океанической зыби под дрейфующими льдами Антарктиды [2]. Последующие исследования подтвердили, что зыбь оказывает постоянное динамическое воздействие на ледяной покров. В прикромочных и припайных областях это воздействие приводит к разрушению льда. В Центральном Арктическом бассейне происходит энергетическая накачка, особенно контактных зон ледяных полей, находящихся в условиях сжатия, тем самым повышается энергонасыщенность среды, что может приводить к лавинообразному распаду поля напряжений всей системы. Поэтому гравитационные волны в океане, покрытом льдом, можно рассматривать как структурообразующий фактор по отношению к ледяному покрову [3]. Кроме того, ледяной покров является сложной механической системой, сформированной из большого числа элементов (льдин), горизонтальные размеры которых намного больше вертикальных, т.е. представляет собой «мозаику пластин». Отличительной особенностью такой структуры является относительная подвижность отдельных блоков и способность среды испытывать значительные деформации без разрушения ее элементов за счет деформирования межблочных зон. При этом плотность упаковки льдин наименьшая в прикромочных зонах и максимальная в Центральном Арктическом бассейне. Исходя из сказанного, ледяной покров можно считать дискретной механической средой, подобной земной коре, плавающей на мантии, его отличительной особенностью является скорость протекания в нем деформационных процессов, и поэтому ледяной покров можно рассматривать как своеобразную механическую модель земной коры. Таким образом, методы, применяемые в сейсмологии и в сейсмометрии, можно адаптировать для изучения ледяного покрова, особенно в области формирования трещин и разломов [4], а также с точки зрения механики дискретных сред [5].

В рамках первого направления в ААНИИ применяется оригинальный инструментальный комплекс для определения физико-механического состояния припайных и дрейфующих льдов [6]. Разработан метод определения характеристик прочности льда на сжатие в натуральных условиях в скважинах и на образцах. С помощью скважинного зонд-индентора осуществляется съемка локальной прочности как по площади, так и по толщине ровного льда, консолидированного слоя в торосах и стамухах. Получены данные по локальной прочности в зависимости от температуры и солености, скорости внедрения индентора и анизотропии льда.

В рамках второго направления, основы которого заложены в работе В.Н. Смирнова [7], предложен дистанционный метод мониторинга динамического состояния льдов, позволяющий получать масштабные характеристики как волновых процессов в ледяном покрове, так и процессов сжатия, торошения и образования разрывов.

Задача обзора — познакомить читателя с двумя направлениями деятельности ААНИИ, показать достигнутые результаты и перспективы их применения и развития.

## **МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ ПРОЧНОСТИ ЛЬДА В НАТУРНЫХ УСЛОВИЯХ В СКВАЖИНАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЗОНД-ИНДЕНТОРА**

Определение прочности льда с помощью скважинного зонд-индентора рекомендовано в российских строительных нормах СП 11-114-2004 [8] и международном стандарте ISO [9]. Возможности скважинного зонд-индентора позволяют существенно повысить качество измерений и улучшить точность вычислений ледовых нагрузок на сооружения, а также более корректно проводить сравнительный анализ характеристик прочности льда в различных регионах.

Известен гидравлический зонд-индентор (borehole jack) [10, 11, 12], который используется за рубежом для определения характеристик прочности льда в скважинах, представляющий собой гидроцилиндр с выдвижным штоком, на котором закреплен индентор в виде круга, вырезанного из стенки цилиндра. При этом радиус кривизны индентора совпадает с радиусом скважины, что обеспечивает плотное прилегание индентора к стенке скважины. Противоположная опорная часть гидроцилиндра также выполнена с радиусом кривизны, совпадающим с радиусом скважины. Площадь опорной части и площадь индентора равны. При проведении испытаний происходит внедрение как индентора в стенку скважины, так и противоположной опорной его части.

Недостатком являются частые перекосы устройства при испытаниях, что ведет к искажению информации. Внедрение устройства в обе стороны скважины уменьшает глубину проникновения индентора и не дает возможности получить полную характеристику прочности при разрушении льда. Кроме того, существенным недостатком является уменьшающаяся скорость выдвижения штока с индентором при увеличении давления в гидросистеме устройства.

В связи с этим в ААНИИ была разработана технология определения прочности льда в натуральных условиях при внедрении индентора в стенку скважины, выбуренной в ледяном покрове. Для этого был сконструирован и изготовлен специализированный комплекс оборудования и разработана методика его применения [6].

Оригинальность определения характеристик прочности ледяных образований в натуральных условиях связана с устройством гидравлического типа, которое обеспечивает измерение силы при внедрении индентора (штампа) определенной площади в стенку скважины с разрушением льда. При этом внедрение индентора происходит с одной стороны скважины при отсутствии внедрения с другой за счет наличия опорной плиты, превосходящей площадь индентора в десять раз. Кроме того, скорость внедрения остается постоянной, но ее можно регулировать от очень низкой до 4,5 мм/с для различных задач.

Во время испытаний фиксируются заглубление зонда в скважине, давление в гидросистеме, время нагружения, глубина внедрения индентора в стенку скважины, а также регистрируются процессы трещинообразования во льду.

При взаимодействии зонда со льдом наблюдаются три этапа внедрения индентора в стенку скважины.

Первый этап завершается возникновением первой трещины и характеризует начальный момент внедрения индентора.

Второй этап нагружения завершается разрушением некоторого объема льда (локальная прочность), приводящим к образованию зоны смятия и радиальных трещин. Этот процесс носит лавинообразный характер, и его длительность не превышает нескольких секунд.

На третьем этапе нагружения наблюдаются в основном три типа взаимодействия индентора со льдом. Первый тип характеризуется проникновением индентора сквозь зону смятия при практически постоянном напряжении, которое ниже разрушающего на 20–40 % (постразрушающее напряжение). Второй тип взаимодействия характеризуется тем, что постразрушающее напряжение не меньше локальной прочности. При третьем типе взаимодействия одна из радиальных трещин превращается в магистральную сразу же после достижения разрушающих напряжений. Прочность льда определяется в трехмерном напряженном состоянии локального объема, поэтому используется термин «локальная прочность льда».

### **Сравнение прочности образцов льда при одноосном сжатии и локальной прочности льда в скважинах**

По разным литературным данным, локальная прочность превышает прочность образцов льда при одноосном сжатии в 2–5 раз [10–15]. До сих пор еще не разработан универсальный коэффициент для надежной связи локальной прочности с прочностью образцов льда при одноосном сжатии. Это связано с тем, что вокруг индентора при его внедрении в стенку скважины развивается сложное поле напряжений, отличающееся от того, которое встречается в образце в прессе даже при трехосном нагружении. Факторы, которые влияют на прочность малых образцов льда при нагружении в прессе (скорость деформации, направление нагрузки), менее важны для определения локальной прочности. Дело осложняется и тем, что в нормативных документах [8, 9, 16] не регламентированы некоторые условия при проведении испытаний образцов льда при одноосном сжатии. Тем не менее результаты испытаний ледяного покрова с помощью скважинного зонда могут быть использованы для оценки прочности льда при одноосном сжатии. В работе [10] приведено следующее соотношение:

$$2 \leq \frac{\sigma_u}{\sigma_{||}} \leq 4,$$

где:  $\sigma_u$  — напряжения во льду при внедрении индентора;  $\sigma_{||}$  — прочность образцов льда при одноосном сжатии в направлении, параллельном поверхности льда, и с поперечными размерами, соизмеримыми с диаметром индентора.

Нижний предел соответствует напряжениям в начальный момент внедрения индентора в ледяной покров. Верхний предел обусловлен прочностью льда в условиях всестороннего сжатия.

В работе [12] выполнен сравнительный анализ результатов определения локальной прочности льда с помощью скважинного зонда при диаметре индентора 9 см и данных испытаний на одноосное сжатие цилиндрических образцов диаметром 7,5 см. Среднее значение соотношения  $\sigma_u / \sigma_{||}$  оказалось равным 4,1. Имеются данные, где соотношение между напряжением внедрения и прочностью образцов льда при одноосном сжатии достигает большей величины [13–15].

При проведении сравнительных экспериментов мы придерживались однотипных условий для определения прочности льда при одноосном сжатии.

В нормативных документах используется прочность льда, измеренная на основании испытания образцов. Поэтому был предложен способ сравнения прочности льда, полученной на образцах, и локальной прочности, определенной в натуральных

условиях. Для этого комплексная система была дополнена специально разработанным прессом, который подключается к той же гидростанции, что и зонд-индентор.

Скорость выдвижения пуансона прессы регулируется в том же диапазоне скоростей, что и скорость выдвижения штока зонд-индентора, это обеспечивает хрупкое разрушение и согласование времени нагружения до разрушения льда в скважине и образца льда в прессе. Такой подход повышает корректность сравнения прочности льда в натуральных условиях и прочности образцов льда.

Для определения коэффициента сравнения прочности образцов льда при одноосном сжатии и локальной прочности льда в скважинах образцы изготавливаются из цилиндрических кернов, выбуренных параллельно поверхности ледяного покрова.

В таблице приведены результаты определения соотношения между локальной прочностью ледяного покрова ( $\sigma_{lc}$ ) и прочностью образцов льда при одноосном сжатии, изготовленных параллельно поверхности льда ( $\sigma_{||}$ ), для различных замерзающих морей России.

Таблица

**Соотношения между локальной прочностью ледяного покрова ( $\sigma_{lc}$ ) и прочностью образцов льда ( $\sigma_{||}$ ), отобранных параллельно поверхности намерзания, при одноосном сжатии**

Table

**Relations between the local strength of ice cover ( $\sigma_{lc}$ ) and the strength of ice samples ( $\sigma_{||}$ ), taken parallel to the freezing surface under uniaxial compression**

Параметры наблюдения	Обская губа	Охотское море, шельф о. Сахалин	Байдарцкая губа	Байдарцкая губа	Пролив Невельского	Карское море	Карское море	Море Лаптевых	Карское море	Море Лаптевых
Период исследования	05.2004	04.2006	05.2007	05.2010	03.2010	05.2013	04.2014	05.2014	04.2015	05.2015
Диапазон изменения температуры льда, °С	-2,9... -6,2	-2,0... -4,8	-0,6... -3,1	-0,4... -3,2	-1,6... -7,3	-1,8... -5,2	-1,8... -6,2	-2,2... -3,9	-1,9... -5,1	-1,8... -4,5
Диапазон изменения солености льда, ‰	0	0,4-7,9	1,2-5,8	0,2-5,8	0,9-2,3	2,0-9,5	1,0-7,0	4,5-6,4	3,3-5,7	3,5-7,0
$\sigma_{lc}/\sigma_{  }$	4,7	4,8	4,6	4,7	4,1	4,9	4,7	4,5	5,0	4,9

Среднее значение соотношений составляет 4,6, стандартное отклонение 0,3. Полученные значения соотношений достаточно однородны (коэффициент изменчивости всего 6,5 %).

Таким образом можно допустить, что на основании испытаний локальной прочности льда возможно оценивать прочность ледяного покрова при сжатии, не выбуривая керны и не испытывая образцы льда под нагрузкой. Такой подход позволяет устранить несовершенство традиционной методики испытания прочности образцов льда. Коэффициент сравнения  $\sigma_{lc}/\sigma_{||}$  в соответствии с существующими, в том числе и международными, нормативными документами [9] может служить одним из пара-

метров для определения расчетной прочности льда и, соответственно, для расчета ледовых нагрузок на морские сооружения арктического шельфа.

### Зависимость локальной прочности от температуры льда

В настоящее время научно-исследовательский стационар (НИС) «Ледовая база Мыс Баранова» является единственной станцией в западной части моря Лаптевых, на которой можно проводить регулярные комплексные наблюдения за состоянием морского снежно-ледяного покрова и материкового льда [17]. Стационар на о. Большевик арх. Северная Земля возобновил постоянную работу в 2013 г. Практически сразу были организованы ледоисследовательские работы. С 2016 г. был начат мониторинг локальной прочности льда. За прошедшее время было проведено достаточно большое количество измерений. На ровном однолетнем льду испытания проводились на ледовых полигонах размером  $100 \times 100$  м.

Полученные данные позволили установить зависимость локальной прочности льда от его температуры:

$$\sigma_{ic} = 15,6 - 1,23T_i, R^2 = 0,60; \quad (1)$$

$$\sigma_{ic} = 13,61 - 1,88T_i - 0,04T_i^2, R^2 = 0,61, \quad (2)$$

где:  $\sigma_{ic}$  — локальная прочность в МПа,  $T_i$  — температура льда в °С,  $R$  — коэффициент корреляции.

Зависимости (1) и (2) получены на большом количестве экспериментальных данных (759 значений), в диапазоне температур от  $-18$  до  $-1,8$  °С дают близкие значения и имеют неплохой коэффициент корреляции. В указанном диапазоне температур льда значения локальной прочности, рассчитанные по формуле (1), изменяются от 17,1 до 37,7 МПа, рассчитанные по формуле (2) — от 16,9 до 34,5 МПа. При температуре льда  $-18$  °С 99-процентный доверительный интервал для формулы (2) имеет наибольшее значение от 31,3 до 37,7 МПа. С увеличением температуры льда размах такого интервала уменьшается. При  $-1,8$  °С его значения от 16,0 до 17,8 МПа. Для формулы (1) 99-процентный доверительный интервал имеет меньший размах: от 36,6 до 38,8 МПа при температуре льда  $-18$  °С и от 17,1 до 18,5 МПа при  $-1,8$  °С. Это позволяет сделать вывод, что температура льда является одним из самых значимых факторов для локальной прочности. Наибольшие расхождения с экспериментальными данными формулы (1) и (2) имеют при высоких температурах льда. В холодное время высокие температуры льда наблюдаются вблизи нижней поверхности. В таких экспериментах невозможно визуально наблюдать сколы льда и, соответственно, отбраковывать полученные данные. Высокие температуры льда наблюдаются также и в летний период, когда идут процессы разрушения ледяного покрова. В таких случаях даже при одинаковой температуре ледяной покров может находиться в разных стадиях своего разрушения и иметь отличающиеся значения локальной прочности.

В работе М. Джонстона (Johnston) [18] приведена квадратичная зависимость локальной прочности однолетнего льда от его температуры:

$$\sigma = 4,53T_i - 3,07 - 0,08T_i^2 \quad (3)$$

Зависимость (3) также получена на достаточно большом количестве экспериментальных данных (431 измерение в 102 скважинах), на недеформированном припае в Канадском секторе Арктики в зимнее, весеннее и летнее время.

Зависимости (1) — (3) приведены на рис. 1.

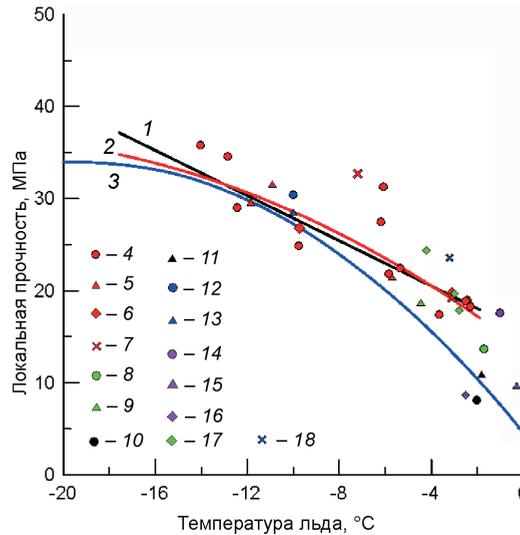


Рис. 1. Зависимость локальной прочности льда от температуры:

1 — линейная аппроксимация по данным на НИС «Ледовая база Мыс Баранова» (2017–2019 гг.); 2 — аппроксимация полиномом 2-й степени по данным на НИС «Ледовая база Мыс Баранова» (2017–2019 гг.); 3 — аппроксимация полиномом 2-й степени Джонстона [18]; 4–7 — среднее значение локальной прочности на НИС «Ледовая база Мыс Баранова» в 2019, 2018, 2017 и 2016 гг. соответственно; 8 — среднее значение локальной прочности в Анадырском лимане в 2008 г.; 9 — среднее значение локальной прочности льда пролива Невельского (экспедиция «Сахалин-2010»); 10, 11 — среднее значение локальной прочности в Байдаратской губе в 2007 и 2010 гг. соответственно; 12 — из работы [14]; 13 — из работы [19]; 14–16 — среднее значение локальной прочности в Каспийском море в 2001–2003, 2004–2008 и 2013 гг. соответственно; 17 — среднее значение локальной прочности в экспедиции «Трансарктика-2019»; 18 — среднее значение локальной прочности в экспедиции MOSAiC

Fig. 1. Dependence of the local ice strength on the ice temperature:

1 — linear approximation based on data at the station «Ice Base Cape Baranov» (2017–2019); 2 — approximation by the polynomial to the power of 2 based on data at station «Ice Base Cape Baranov» (2017–2019); 3 — approximation by the Johnston’s polynomial to the power of 2 [18]; 4–7 — average local ice strength value at the station «Ice Base Cape Baranov» in 2019, 2018, 2017 and 2016, respectively; 8 — average local ice strength value in Anadyr’ estuary in 2008; 9 — average local ice strength value of Nevelskoy Strait («Sakhalin-2010» Expedition); 10, 11 — average local ice strength value in Baidaratskaya Bay in 2007 and 2010, respectively; 12 — from [14]; 13 — from [19]; 14–16 — average local ice strength value in the Caspian Sea in 2001–2003, 2004–2008 and 2013, respectively; 17 — average local ice strength value in the “Transarctic-2019” Expedition; 18 — average local ice strength value in the MOSAiC Expedition

Из рис. 1 видно, что зависимости (2) и (3) в диапазоне температур льда от  $-20$  до  $-8$  °C дают близкие значения. При температуре льда выше  $-8$  °C значения локальной прочности, рассчитываемые по формуле (3), ниже значений, получаемых по формуле (2). Наибольшие расхождения наблюдаются при температурах, близких к температуре плавления льда.

На рис. 1 приведены также средние значения локальной прочности, полученные в различных экспедициях. Видно, что полученные данные согласуются с предложенными зависимостями. При высоких температурах льда зависимость (3) лучше согласуется с данными, полученными для льда, находящегося на высокой стадии разрушения (Каспийское море в 2004, 2008 и 2013 гг.; Байдаратская губа в 2007

и 2010 гг.). Зависимость (2) при высоких температурах лучше описывает локальную прочность льда, находящегося на начальных стадиях разрушения (Каспийское море в 2001–2003 гг.).

### Локальная прочность льда при разных скоростях внедрения индентора

Исследования влияния скорости внедрения индентора на локальную прочность проводились на НИС «Ледовая база Мыс Баранова». При работе от гидростанции внедрение индентора происходило при скоростях 4,0, 2,0 и 0,5 мм/с.

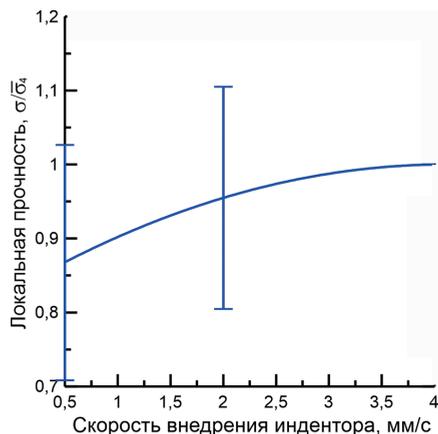


Рис. 2. Изменение локальной прочности льда в зависимости от скорости внедрения индентора

Fig. 2. Change in ice local strength depending on the borehole jack penetration rate

Изменение значений локальной прочности льда в зависимости от скорости внедрения индентора представлено на рис. 2.

Экспериментальных данных пока немного, поэтому стандартное отклонение велико. Квадратичная аппроксимация полученных значений имеет вид:

$$\sigma_V / \bar{\sigma}_4 = 0,829 + 0,083 \cdot V - 0,010 \cdot V^2, \quad (4)$$

где  $\sigma_V$  — локальная прочность льда при внедрении индентора со скоростью  $V$ ;  $\bar{\sigma}_4$  — средняя локальная прочность льда при внедрении индентора со скоростью 4,0 мм/с;  $V$  — скорость внедрения индентора,  $0,5 \leq V \leq 4,0$  мм/с.

В исследованном диапазоне скоростей внедрения индентора локальная прочность изменялась мало. Наибольшая локальная прочность наблюдалась при внедрении индентора со скоростью 4,0 мм/с; наименьшая — со скоростью 0,5 мм/с. В среднем такая локальная прочность была меньше максимальной на 13 %. При внедрении индентора со скоростью 2,0 мм/с локальная прочность уменьшается на 4,5 % по сравнению с максимальной.

Небольшое влияние скорости нагружения на локальную прочность отмечается Джонстоном [18]. Следует отметить, что в этой работе изменяется не скорость внедрения индентора, а скорость напряжений. При уменьшении скорости напряжений в 5 раз локальная прочность уменьшилась на 6 %. При уменьшении в 5 раз скорости внедрения индентора по формуле (4) локальная прочность должна уменьшиться на 11 %.

## **ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЙ МОНИТОРИНГ ДИНАМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МОРСКИХ ЛЬДОВ И АРКТИЧЕСКИХ ЛЕДНИКОВ**

Исследование крупномасштабной механики льдов при динамических процессах в системе «воздух–лед–вода» позволяет выявлять пространственно-временные связи различного масштаба. Для этого применяются сейсмометры, наклонометры, деформометры, датчики давления и напряжения, которые расставляются по ледяному покрову по разным схемам и в различном сочетании в зависимости от решаемых задач. Как пример можно привести явление крупномасштабных сдвиговых подвижек в сплошном ледяном покрове, возникающих на разрывах в дрейфующем льду. В этом случае на протяженном контакте лед–лед наблюдаются периодические горизонтальные подвижки и упругие волны с периодичностью до 30 мин [20].

На основе большого объема натуральных данных в ААНИИ разработаны методические пособия [6, 21], в которых представлено состояние вопроса по данной теме, дается описание устройств, приборов и методик их применения.

### **Измерительная техника**

Инструментальный мониторинг состояния арктического льда основывается на применении комплекса первичных датчиков, передающих устройств, регистрирующей и обрабатывающей техники. При этом датчики как первичные приборы должны регистрировать целый комплекс физических параметров: смещение, деформации, наклоны, напряжения, ускорения. Деформометры применяются для измерения относительного смещения двух точек сплошного льда; наклонометры — для наблюдений за колебательными процессами с периодами от 1 с до квазистатических наклонов; измерители давления во льду используются совместно с сейсмометрами и наклонометрами с целью определения напряжений при деформировании вплоть до разрушения ледяных полей. Молекулярно-электронные сейсмометры типа СМЕ-4111LT применяются для регистрации колебаний и волн в ледяном покрове в широком частотном диапазоне от 0,0167 до 50 Гц. Регистрация сигналов осуществляется через плату АЦП на ноутбук или на специализированный накопитель информации «Байкал». Мобильный регистратор сейсмических сигналов высокого разрешения «Байкал-7HR» предназначен для автономной записи сигналов от СМЕ в широком диапазоне частот с привязкой к абсолютному времени. Такой регистратор можно применять как для оперативных, так и для длительных измерений с встроенным высокостабильным генератором и модулем GPS в совокупности с аналого-цифровым трактом.

Накопленный материал натуральных исследований позволил создать макет измерительного комплекса для мониторинга механического состояния морских ледяных полей и метод оповещения о возможных опасных ледовых явлениях [22]. Метод основан на разработанной измерительной системе, состоящей из трех модульно-блочных полевых станций, которые расставляются по треугольной схеме в вершинах прямоугольного треугольника, модуля базовой станции сбора и обработки данных, поступающих с полевых станций. При этом базовая станция может устанавливаться на судне, на берегу или на ледяном покрове. Передача данных с полевых станций осуществляется по радиоканалу в автоматическом режиме. Временная синхронизация между полевыми станциями осуществляется посредством приема сигнала глобальной спутниковой системы позиционирования GPS. Одновременно с записью на сервер осуществляется обработка данных по определенному алгоритму в режиме реального времени с выводом на дисплей, что позволяет оперативно выделять разломы льда.

Необходимо отметить, что модульно-блочное строение измерительной системы мониторинга обеспечивает возможность гибкого формирования схем наблюдений и измерений для решения как научных, так и практических задач. Как пример можно рассмотреть крупномасштабные эксперименты с использованием ледокола [23].

В экспедициях в морях Карском и Лаптевых для определения характеристик прочности полей ровного льда на изгиб проведены крупномасштабные эксперименты разрушения льда ледоколом «Ямал» (рис. 3).



Рис. 3. Схема размещения приборов на ровном льду при проведении экспериментов при движении ледокола (а), фотография эксперимента (б):

1 — сейсмомер, 2 — наклономер, 3 — деформометр, 4 — регистратор, 5 — набор аккумуляторов

Fig. 3. The scheme of the arrangement of devices on level ice during experiments with the icebreaker movement (a), experiment photo (b):

1 — seismometer, 2 — tiltmeter, 3 — deformometer, 4 — recorder, 5 — battery pack

В ровном ледяном поле регистрировались параметры вертикальных и горизонтальных смещений льда, а также относительные деформации в верхнем слое ледяного поля, создаваемые при ломке льда и возбуждении колебательных и волновых процессов в системе «лед–вода». Расстояние по профилю «ледокол–приборы» составляло сотни метров. Получаемые параметры волновых процессов, сопровождаемые деформациями изгиба ледяного поля, дают возможность оценить возникающие напряжения при изгибе.

Начальный момент движения ледокола сопровождался прорезанием льда. Механика прорезания создавала вибрацию в системе «ледокол–лед», передающуюся через контакт в ледяное поле и регистрируемую приборами на льду на расстоянии до 500 м. Это позволяет оценить скорость упругих волн в ледяном поле на частотах десятки Гц. Одновременно с прорезанием льда форштевнем ледокола наступал период ломки ледяного поля изгибом. Возникающие при этом вертикальные колебания в системе «лед–ледокол» создавали изгибно-гравитационные волны, распространяющиеся на сотни метров от ледокола.

Расчет проводился при толщине льда 1 м. Максимальное напряжение сжатия-растяжения в верхнем слое льда при изгибе ледяного поля оценивалось как 20 кПа при относительной деформации  $4 \cdot 10^{-6}$  и модуле упругости  $5 \cdot 10^3$  МПа. Данные совпадают со значениями относительной деформации, измеренными непосредственно деформометром в одной точке в верхнем слое ледяного поля. Разрушающие напряжения можно измерить только в случае непосредственного разлома рядом с приборами.

Разработанные методы открывают возможности для получения новых результатов при определении крупномасштабной прочности льдов и учета динамических нагрузок на сооружения шельфа.

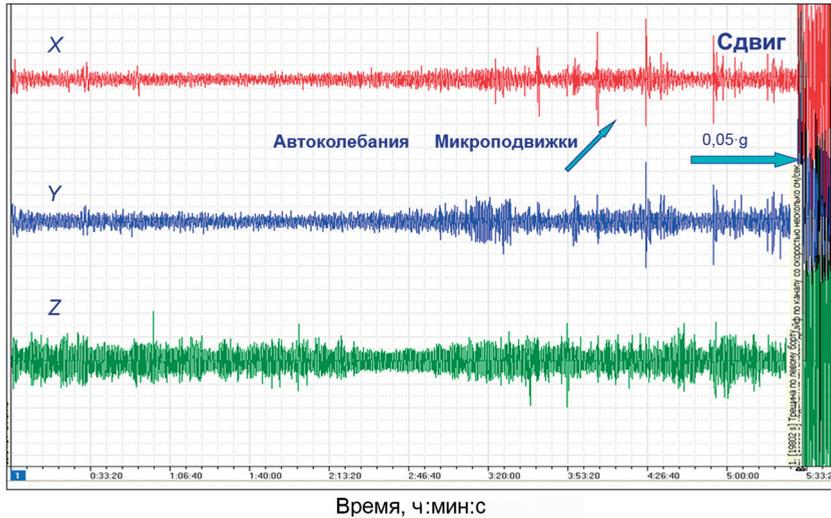


Рис. 4. Запись сейсмометров в дрейфующем ледяном покрове, Карское море, 18.04.14. Длительность процесса 5 ч 45 мин.

Fig. 4. Recording of seismometers in a drifting ice cover, the Kara Sea, 18.04.14. The duration of the process is 5 hours 45 min

Пример уникальной информации и возможности прогнозирования разломов ледяных полей и начала сжатия и торошения представлен на рис. 4.

При мониторинге состояния льда в Карском море за 3 часа до разлома возникли ледовые импульсы, рассматриваемые нами как прогностические признаки развития магистральной трещины, а также дальнейшей сдвиговой подвижки.

Динамику морских льдов необходимо рассматривать как сумму факторов, приводящую к значительным ускорениям при дрейфе. К динамическим процессам следует отнести кроме сжатия и торошения льдов волновые и колебательные явления в диапазоне периодов ветровых волн и зыби. На многих ледовых станциях регистрировались автоколебательные процессы, отражающие сжатия и подвижки при дрейфе. Длительность автоколебательных процессов составляла десятки минут, в спектре колебаний при этом устойчиво сохранялись низкочастотные горизонтально-поляризованные составляющие. Параметры этих колебаний в основном определялись свойствами системы взаимодействия «лед–лед». Автоколебательные процессы развиваются на пространстве десятков километров и могут служить прогностическими признаками возникновения сдвиговых подвижек в морских льдах.

#### Схема расстановки приборов на льду

В натурных экспериментах по изучению физики распространения волн во льду используются различные схемы расстановки датчиков. Линейные расстановки с интервалом между датчиками от 2 до 500 м позволяют определять скорость распространения упругих (продольных, поперечных, изгибных) и гравитационных волн в широком частотном диапазоне. В экспериментах с заранее известным расположением источника волн (например, от взрыва, удара, движения трактора, ледокола...) фазовая скорость  $C$  определяется по коррелируемым фазам групп волн.

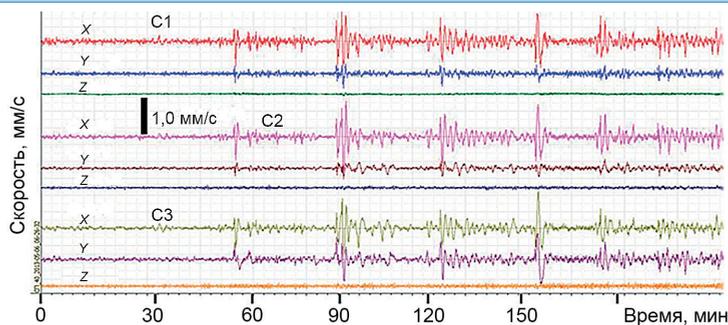


Рис. 5. Фрагмент исходной записи динамического процесса в дрейфующем ледяном покрове при пространственной расстановке трехкомпонентных ( $X, Y, Z$ ) сейсмометров по треугольнику со сторонами 300 м, «Северный полюс-40», 06.05.13

Fig. 5. Fragment of the initial recording of the dynamic process in drifting ice cover during the spatial arrangement of three-component ( $X, Y, Z$ ) seismometers on a triangle with sides of 300 m, «North Pole-40», 06.05.13

Разработанные схемы расстановки приборов позволяют получать данные, способные раскрыть новые явления, их физику, а также применить их в теоретических моделях. На рис. 5 представлен один из примеров периодических горизонтальных смещений в сплоченном ледяном покрове Северного Ледовитого океана (СЛО), которые можно представить как крупномасштабные релаксационные автоколебания [20].

Процесс может длиться несколько часов и состоять из периодических сбросов напряжений с интервалами от единиц до десятков минут. Формирование автоколебаний обусловлено процессами сжатия сплоченных льдов, образованием протяженного разрыва в ледяном покрове и периодическим смещением по разрыву. Периодичность смещения может быть объяснена на основе упруго-вязких свойств льда на контакте протяженной трещины/разрыва. Механика разрыва ледяного покрова горизонтальным сдвигом и последующее периодическое смещение в зоне разлома сопровождаются излучением упругих горизонтально поляризованных волн с частотой от 0,02 Гц до 0,10 Гц.

Подобные схемы расстановки приборов на дрейфующем льду для определения параметров волновых процессов при сжатии и торошении, а также океанической зыби применялись в экспедициях «Северный полюс-22, 24», «Трансарктика» и MOSAiC. Эти наблюдения позволяют исследовать динамику морского льда и ее связь с глобальной, мезомасштабной и локальной циркуляциями, а также с энергообменом в системе «атмосфера–океан» через пограничный слой. Также система имеет практическое применение при мониторинге, что обеспечивает возможность характеризовать состояние конкретного ледяного поля и давать прогностические оценки степени стабильности данного региона в ближайший промежуток времени [22, 24].

Первичными звеньями системы являются полевые станции сбора данных от присоединенных датчиков: трехкомпонентные датчики скорости движения поверхности; трехкомпонентные датчики скорости вращения поверхности; трехкомпонентные датчики ускорения движения поверхности; датчики внутренних напряжений во льду; датчики давления во льду; двухкомпонентные датчики наклона/ускорения движения поверхности. Полевые станции производят оцифровку данных от датчиков с дискретной частотой. При этом сбор данных со всех каналов на станциях

синхронизирован с помощью глобальной системы позиционирования. Информация сохраняется в локальном хранилище и, кроме того, по радиоканалу отправляется на сервер сбора данных базовой станции в режиме реального времени. Каждая полевая станция оснащается геолокационным модулем, который передает ее координаты через спутниковый радиоканал на базовую станцию, что позволяет знать точное расположение полевых станций вне зависимости от работоспособности основного радиоканала. Кроме того, учитывая значительную удаленность полевых станций (до 20 км), это обеспечивает сохранность оборудования, значительно облегчает поиск станции для проведения профилактических работ, настройки датчиков, замены энергоносителей, экономит авиатопливо и время. Расстановка полевых станций по прямоугольному треугольнику позволяет определять физические параметры проходящих волн, такие как фазовая скорость и азимут распространения волн.

Базовая станция может располагаться на судне или в полевом лагере. Она состоит из приемника/передатчика основного радиоканала, вторичного радиоканала для локальной передачи данных между выносным передатчиком основного радиоканала и сервером сбора данных. Сервер сбора данных принимает информацию от полевых станций в режиме реального времени по радиоканалу. Также сервер сбора данных осуществляет вывод получаемой информации на графический дисплей в виде волновых профилей с принимаемых каналов от всех полевых станций с возможностью частотной обработки для выделения интересующей дежурного оператора информации. В дальнейшем предполагается создание программного комплекса, позволяющего рассчитывать и отображать необходимые элементы для более полного и точного мониторинга текущей динамической обстановки, а также выделять прогностические предикторы, позволяющие осуществлять краткосрочный прогноз динамической обстановки в наблюдаемой области.

В настоящее время возникает необходимость проведения натуральных исследований для изучения динамических процессов и их связи с другими геофизическими

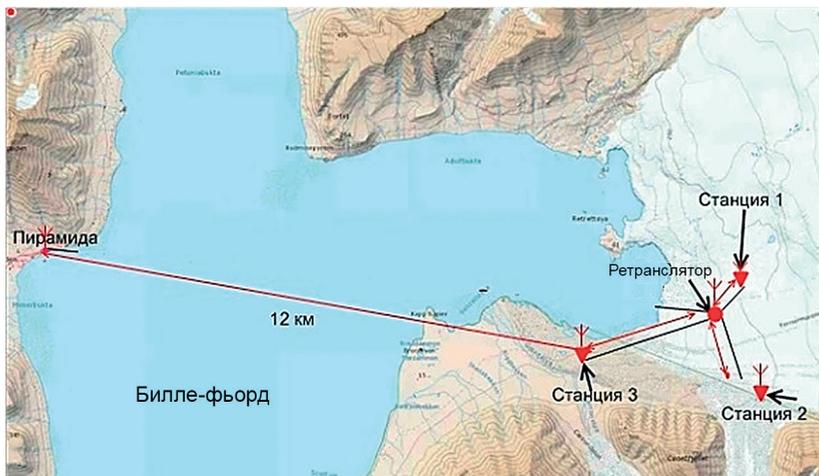


Рис. 6. Схема мониторинга состояния ледника Норденшельда с сейсмическими станциями 1, 2 и 3, расположенными на леднике и на берегу

Рис. 6. Monitoring scheme of the Nordenskiöldbreen Glacier with seismic stations 1, 2 and 3 located on the glacier and on the shore

явлениями: приливами в земной коре, воздействием сейсмических волн как спусковых механизмов динамики ледников и образования айсбергов. В связи с этим был проведен мониторинг физико-механических параметров ледника Норденшельда с применением измерительного комплекса с дистанционной передачей сигналов на базу экспедиции в пос. Пирамида на расстояние до 12 км (рис. 6).

На леднике были установлены приборы для постоянных наблюдений, разнесенные друг от друга на некоторое расстояние. На берегу устройства располагались на скальном грунте в бухте Адольфа по обе стороны от фронта ледника. Установка волнографа была выполнена в южной части бухты недалеко от границы ледника. По радиоканалу в режиме реального времени на базу передавались данные, представляющие собой волновой профиль каналов  $Z$ ,  $N$ ,  $E$ ,  $X$ ,  $Y$  на частоте дискретизации 100 Гц. На базовой станции на мониторе можно было наблюдать в режиме реального времени волновые процессы, происходящие в районе фронта ледника.

На данный момент в ААНИИ разрабатывается дополнительный модуль, который обеспечивает звуковую и визуальную сигнализацию дежурному оператору о высокой вероятности появления опасного события.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанные комплексная система для определения характеристик прочности ледяных образований в натуральных условиях и модульно-блочная система мониторинга состояния ледяного покрова дополняют друг друга, предполагают их дальнейшее развитие и усовершенствование, обеспечивают широкие возможности исследования льдов в следующих направлениях:

- получение и анализ результатов инструментального мониторинга физико-механических ледовых процессов в системе «атмосфера–лед–океан» и выявление пространственно-временных связей различного масштаба с использованием контактной и спутниковой информации;

- проведение теоретических и экспериментальных исследований крупномасштабных физико-механических процессов в морских льдах с целью совершенствования методов прогнозирования явлений сжатия и торошения в режиме реального времени;

- создание аппаратно-программного обеспечения автоматической обработки динамических процессов в припайных и дрейфующих льдах, обусловленных явлениями приливного и ветрового сжатия и торошения, воздействия поверхностных и внутренних волн океана;

- получение натуральных данных по локальной и масштабной прочности льда для расчета ледовых нагрузок на берега, морское дно и инженерные сооружения на арктическом шельфе;

- разработка параметризации и математического описания исследуемых динамических явлений воздействия на лед волн зыби, автоколебаний и создание соответствующих численных моделей;

- разработка программных средств для численного моделирования и выявления прогностических признаков сжатия и разрушения ледяных полей.

**Конфликт интересов.** У авторов нет конфликта интересов.

**Финансирование.** Обработка данных выполнена в рамках плановой научной тематики ААНИИ по разделу проекта 5.1.5 НИТР Росгидромета «Исследование

крупномасштабной динамики, физических процессов, механики деформирования и разрушения морских льдов с целью совершенствования методов краткосрочного прогнозирования сжатия и торошения».

**Competing interests.** The authors have no competing interests.

**Funding.** Data processing was carried out a part of the AARI planned scientific topic under the project section 5.1.5 SRTW of Roshydromet “Research of large-scale dynamics, physical processes, mechanics of deformation and destruction of sea ice in order to improve methods for short-term forecasting of compression and ridging”.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Malmgren F.* On the properties of sea-ice. Bergen: a/s J. Griegs boktrykkeri, 1927. 67 p.
2. *Robin G.Q.* Wave propagation through fields of pack ice // *Phil. Trans. Rou. Soc. London. A.* 1963. V. 225 (1057). P. 313–223.
3. *Smirnov V.N., Nikitin V.A., Shushlebin A.I., Sheikin I.B.* Results of studies of the effect of wind-induced waves and swell on the ice cover of the Barents Sea // *Natural Conditions of the Kara and Barents Seas. Proceedings of the Russian-Norwegian Workshop-95, Norsk Polarinstitut. Oslo, 1997.* P. 325–327.
4. *Мячкин В.И.* Процессы подготовки землетрясений. М.: Наука, 1978. 232 с.
5. *Садовский М.А., Писаренко В.Ф.* Сейсмический процесс в блоковой среде. М.: Наука, 1991. 95 с.
6. *Смирнов В.Н., Ковалев С.М., Бородкин В.А., Нюбом А.А., Шушлебин А.И.* Инструментальный мониторинг и краткосрочный прогноз явлений сжатия и торошения. СПб.: ААНИИ, 2017. 174 с.
7. *Смирнов В.Н.* Динамические процессы в морских льдах. СПб.: Гидрометеоздат, 1996. 162 с.
8. Свод правил 11-114-2004. Инженерные изыскания на континентальном шельфе для строительства морских нефтегазопромысловых сооружений. М.: Госстрой России, 2004. 88 с.
9. *Petroleum and natural gas industries — Arctic offshore structures. ISO/FDIS 19906:2010(E).* 2010. 435 p.
10. *Masterson D.M.* Interpretation of in situ borehole ice strength measurement tests // *Proc. of IAHR Ice Symposium, Banff, Alberta.* 1992. V. 3. P. 802–815.
11. *Masterson D.M.* Interpretation of in situ borehole ice strength measurement tests // *Can. J. Civ. Eng.* 1996. V. 23 (1). P. 165–179.
12. *Masterson D.M., Graham W.P., Jones S.J., Childs G.R.* A comparison of uniaxial and borehole jack tests at Fort Providence ice crossing // *Can. Geotech. J.* 1997. V. 34. P. 471–475.
13. *Kovalev S.M., Korostelev V.G., Nikitin V.A., Smirnov V.N., Shushlebin A.I.* Application of a borehole jack for determination the local strength of fresh and sea ice // *Proc. of the 17th Int. Symp. on Ice. St. Petersburg: IAHR, 2004.* P. 147–153.
14. *Sinha N.K.* The Borehole Jack — Is it a useful tool? // *Proc. 5th International Offshore Mechanics and Arctic Engineering Symposium (OMAЕ), Tokyo, Japan.* 1986. P. 328–335.
15. *Sinha N.K., Shkhinek K.N., Smirnov V.N.* On borehole indenter (BHI) measurements and analysis // *Cold Reg. Sci. Technol.* 2012. V. 76–77. P. 109–120.
16. Свод правил 38.13330.2018. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). СНиП 2.06.04-82\*. М.: Минстрой России, 2018. 122 с.
17. *Kovalev S.M., Smirnov V.N., Borodkin V.A., Kolabutina N.V.* Research of the physical-mechanical properties of sea ice at the scientific research station “Ice Base the Cape of Baranov” // *Тр. V Всероссийской конференции с международным участием «Полярная механика», 9–11 окт. 2018, г. Новосибирск.* URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/193/1/012030/pdf> (дата обращения 01.06.2020)

18. *Johnston M.E.* Strength-Temperature Relationships for First-year, Second-year and Multi-year Sea Ice // Proc. of the 29th (2019) Int. Ocean and Polar Eng. Conf. Honolulu, Hawaii, USA, June 16–21, 2019. P. 707–714.
19. *Sinha N.* Borehole-indentor // J. OMAE. 1987. V. 109. P. 391–397.
20. *Смирнов В.Н., Ковалев С.М., Ньюбом А.А.* Автоколебания в дрейфующем ледяном покрове Северного Ледовитого океана // Океанологические исследования. 2019. Т. 47. № 3. С. 122–138.
21. *Смирнов В.Н., Шушлебин А.И., Ковалев С.М., Шейкин И.Б.* Методическое пособие по изучению физико-механических характеристик ледяных образований как исходных данных для расчета ледовых нагрузок на берега, дно и морские сооружения. СПб: ААНИИ, 2011. 178 с.
22. *Смирнов В.Н., Знаменский М.С., Ковалев С.М., Шушлебин А.И.* Универсальная модульно-блочная система мониторинга состояния ледяного покрова. Патент на изобретение № 2683806 от 02.04.2019.
23. *Ковалев С.М., Смирнов В.Н., Шушлебин А.И., Павлов В.А., Корнишин К.А., Ефимов Я.О.* Крупномасштабные испытания прочности дрейфующих и припайных льдов арктического шельфа // Тр. 12-й междунар. конф. и выставки по освоению ресурсов нефти и газа Российской Арктики и континентального шельфа стран СНГ (RAO/CISOffshore 2015). 15–18 сентября 2015 г. Санкт-Петербург. СПб.: Химиздат, 2015. С. 246–250.
24. *Смирнов В.Н., Знаменский М.С., Шушлебин А.И., Ковалев С.М.* Способ мониторинга состояния дрейфующего ледяного поля или припая и прогноза его разлома при сжатии льдов и воздействия волн зыби. Патент на изобретение № 2621276. 02.06.2017.

## REFERENCES

1. *Malmgren F.* On the properties of sea-ice. Bergen: a/s J. Griegs boktrykkeri, 1927: 67 p.
2. *Robin G.Q.* Wave propagation through fields of pack ice. Phil. Trans. Rou. Soc. London, A. 1963, 225 (1057): 313–223.
3. *Smirnov V.N., Nikitin V.A., Shushlebin A.I., Sheikin I.B.* Results of studies of the effect of wind-induced waves and swell on the ice cover of the Barents Sea. Natural Conditions of the Kara and Barents Seas. Proceedings of the Russian-Norwegian Workshop-95. Norsk Polarinstitut. Oslo, 1997: 325–327.
4. *Mjachkin V.I.* Processy podgotovki zemletrjasenij. Earthquake preparation processes. Moscow: Nauka, 1978: 232 с. [In Russian].
5. *Sadovskij M.A., Pisarenko V.F.* Sejsmicheskij process v blokovej srede. Seismic process in a block environment. Moscow: Nauka, 1991: 95 p. [In Russian].
6. *Smirnov V.N., Kovaljov S.M., Borodkin V.A., Njubom A.A., Shushlebin A.I.* Instrumental'nyj monitoring i kratkosrochnyj prognoz javlenij szhatija i toroshenija. Instrumental monitoring and short-term forecast of compression and ridging phenomena. St. Petersburg: AARI, 2017: 174 p. [In Russian].
7. *Smirnov V.N.* Dinamicheskie processy v morskikh l'dah. Dynamic processes in sea ice. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 1996: 162 p. [In Russian].
8. Set of Rules 11-114-2004. *Inzhenernye izyskanija na kontinental'nom shel'fe dlja stroitel'stva morskikh neftegazopromyslovych sooruzhenij.* Engineering surveys on the continental shelf for the construction of offshore oil and gas facilities. Moscow: Gosstroy of Russia, 2004: 88 p. [In Russian].
9. Petroleum and natural gas industries — Arctic offshore structures, ISO/FDIS 19906:2010(E), 2010: 435 p.
10. *Masterson D.M.* Interpretation of in situ borehole ice strength measurement tests. Proc. of IAHR Ice Symposium, Banff, Alberta. 1992, 3: 802–815.
11. *Masterson D.M.* Interpretation of in situ borehole ice strength measurement tests. Can. J. Civ. Eng. 1996, 23 (1): 165–179.

12. Masterson D.M., Graham W.P., Jones S.J., Childs G.R. A comparison of uniaxial and borehole jack tests at Fort Providence ice crossing. *Can. Geotech. J.* 1997, 34: 471–475.
13. Kovalev S.M., Korostelev V.G., Nikitin V.A., Smirnov V.N., Shushlebin A.I. Application of a borehole jack for determination of the local strength of fresh and sea ice. *Proc. of the 17th Int. Symp. on Ice.* St. Petersburg: IAHR, 2004: 147–153.
14. Sinha N.K. The Borehole Jack — Is it a useful tool? *Proc. 5th International Offshore Mechanics and Arctic Engineering Symposium (OMAE), Tokyo, Japan.* 1986: 328–335.
15. Sinha N.K., Shkhinek K.N., Smirnov V.N. On borehole indenter (BHI) measurements and analysis. *Cold Reg. Sci. Technol.* 2012, 76–77: 109–120.
16. Set of Rules 38.13330.2018. *Nagruzki i vozdejstviya na gidrotehicheskie sooruzhenija (volnovye, ledovye i ot sudov).* Loads and impacts on hydraulic structures (wave, ice and from ships). SNiP 2.06.04-82\*. Moscow: Ministry of Construction of Russia, 2018: 122 p. [In Russian].
17. Kovalev S.M., Smirnov V.N., Borodkin V.A., Kolabutina N.V. Research of the physical-mechanical properties of sea ice at the scientific research station “Ice Base the Cape of Baranov”. *Proc. V All-Russia Conference with international participation “POLAR MECHANICS”, 9–11 Oct. of 2018, Novosibirsk.* Available at <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/193/1/012030/pdf> (accessed 01.06.2020).
18. Johnston M.E. Strength-Temperature Relationships for First-year, Second-year and Multi-year Sea Ice. *Proc. of the 29th (2019) Int. Ocean and Polar Eng. Conf., Honolulu, Hawaii, USA, June 16–21, 2019:* 707–714.
19. Sinha N. Borehole-indenter. *J. OMAE.* 1987, 109: 391–397.
20. Smirnov V.N., Kovalev S.M., Njubom A.A. Self-oscillations in the drifting ice cover of the Arctic Ocean. *Okeanologicheskie issledovanija. Oceanological studies.* 2019, 47, 3: 122–138. [In Russian].
21. Smirnov V.N., Shushlebin A.I., Kovalev S.M., Sheikin I.B. *Metodicheskoe posobie po izucheniju fiziko-mehaničeskikh harakteristik ledjanyh obrazovanij kak ishodnyh dannyh dlja rasčeta ledovyh nagruzok na berega, dno i morskije sooruzhenija.* Methodological aid for study of physical-mechanical characteristics of ice features as initial data for calculation of ice loads on shores, seabed and offshore structures. St. Petersburg: AARI, 2011: 178 p. [In Russian].
22. Smirnov V.N., Znamensky M.S., Kovalev S.M., Shushlebin A.I. Universal'naja modul'no-bločnaja sistema monitoringa sostojanija ledjanogo pokrova. Universal module-block system of monitoring of the ice cover state. Patent RF, no. 2683806, 02.04.2019.
23. Kovalev S.M., Smirnov V.N., Shushlebin A.I., Pavlov V.A., Kornishin K.A., Efimov Ya.O. Large-scale trials of the strength of drifting and landfast ice of the Arctic shelf. *Trudy 12-i mezhd. konf. i vystavki po osvoeniju resursov nefi i gaza Rossijskoi Arktiki i kontinental'nogo shel'fa stran SNG (RAO/CISOffshore 2015). 15–18 sentjabria.* Proc. 12th International Conference and exhibition on the development of oil and gas resources of the Russian Arctic and the continental shelf of the CIS countries (RAO/CIS Offshore 2015). 15–18 September of 2015, St. Petersburg. St. Petersburg: Khimizdat, 2015: 246–250. [In Russian].
24. Smirnov V.N., Znamensky M.S., Shushlebin A.I., Kovalev S.M. Sposob monitoringa sostojanija drejfujushhego ledjanogo polja ili pripaja i prognoza ego razloma pri szhatii l'dov i vozdejstviya voln zybi. Method of monitoring of the state of the drifting ice floe or landfast ice and prediction of its breakup at ice compression and impact of swell waves. Patent RF, no. 2621276, 02.06.2017.

# ЭКОЛОГИЯ, БИОЦЕНОЛОГИЯ И БИОГЕОГРАФИЯ ECOLOGY, BIOCEENOLOGY AND BIOGEOGRAPHY

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-2-180-197>  
УДК 502.48 / 504.054



ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

ORIGINAL ARTICLE

## ХЛОРОРГАНИЧЕСКИЕ СОЕДИНЕНИЯ В СУБАРКТИЧЕСКИХ МАЛЫХ ОЗЕРАХ

Е.С. КОЛПАКОВА\*, А.В. ВЕЛЪЯМИДОВА

ФГБУН Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики  
имени академика Н.П. Лаверова УрО РАН, Архангельск, Россия

\*kolpelen@yandex.ru

### Резюме

Статья посвящена изучению поведения хлорорганических соединений (ХОС) в специфических условиях субарктических водоемов Большеземельской тундры (на примере малых озер гидротермального урочища Пымвашор и сопредельной территории, бассейн р. Адзва). Впервые для озерных экосистем района исследования получены данные по количественному содержанию, особенностям распределения и компонентному составу ХОС в течение исторического периода формирования осадочной толщи. Рассмотрено влияние микроклиматических условий гидротермальной системы на состав и распределение в осадках индивидуальных ХОС, отличающихся по физико-химическим свойствам и происхождению. Установлено, что присутствие в донных осадках хлорфенольных соединений обусловлено протеканием естественных энзиматических и биохимических процессов в компонентах водных экосистем. Показано, что ввиду удаленности района исследования присутствие и уровни стойких хлорорганических загрязнителей в осадках связаны с поступлением атмосферным переносом от источников антропогенного (техногенного) воздействия из близлежащих регионов и с территорий в низких широтах.

**Ключевые слова:** газовая хроматография, донные осадки, малые озера, стойкие органические загрязнители, субарктическая гидротермальная система, урочище Пымвашор, хлорорганические соединения.  
**Для цитирования:** Колпакова Е.С., Вельямидова А.В. Хлорорганические соединения в субарктических малых озерах // Проблемы Арктики и Антарктики. 2020. Т. 66. № 2. С. 180–197. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-2-180-197>.

Поступила 17.01.2020

После переработки 25.04.2020

Принята 07.05.2020

## ORGANOCHLORINE COMPOUNDS IN SUBARCTIC SMALL LAKES

ELENA S. KOLPAKOVA\*, ANNA V. VELYAMIDOVA

N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Arkhangelsk, Russia

\*kolpelen@yandex.ru

### Summary

The article presents the results of studies of the environmental properties of organochlorines which differ in properties and origin, in the lake ecosystems of the Bolshezemelskaya tundra (Nenets Autonomous Okrug, Russia). The purpose of this study was to evaluate and assess the levels, distribution characteristics and composition of organochlorines in the bottom sediments of small lakes located in the Adzva river basin in Pymvashor natural boundary (the northernmost location of the exit of thermal-mineral springs of the continental Europe) and in the adjacent area, outside this unique subarctic hydrothermal zone.

In order to meet this goal, multi-method (hydrochemical, geochemical, etc.) research was carried out using standard generally approved laboratory practices with their adaptation to the study goals. The quantitative content and composition of the target individual organochlorines were determined by gas chromatographic method with electron-capture detection.

The presence of chlorophenol compounds and polychlorinated benzenes (including persistent organic pollutants) was shown in the lakes sediments. The influence of specific microclimatic conditions of subarctic hydrothermal system on the composition and distribution of chlorophenol compounds in lake sediments was considered. In the small lake sediment core in Pymvashor natural boundary a reducing trend in the levels of organochlorines with depth has been recorded (conditioned among other things by the lithological features of bottom sediments). The chlorophenol compounds were found at highest concentrations (619.3–765.5 ng/g) in the sediment upper layers, rich in organic matter; chlorophenol composition was represented mainly by chlorinated phenols, most likely of biotic origin. A lower concentration (185.0 ng/g) of chlorophenol compounds of predominantly abiogenic origin was determined in the lake sediments outside hydrothermal system. The presence and levels of persistent organochlorine pollutants (pentachlorophenol 0.1–2.4 ng/g; hexa- and pentachlorobenzenes 0.4–3.6 ng/g) in the lake sediments were associated with long-range atmospheric transport from various origin sources in nearby regions and low-latitude territories.

**Keywords:** bottom sediments, chlorophenols, gas chromatography, persistent organic pollutants, polychlorobenzenes, Pymvashor natural boundary, small lakes, subarctic hydrothermal system.

**For Citation:** Kolpakova E.S., Velyamidova A.V. Organochlorine compounds in subarctic small lakes. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2020, 66 (2): 180–197. [In Russian]. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-2-180-197>.

Received 17.01.2020

Revised 25.04.2020

Accepted 07.05.2020

### ВВЕДЕНИЕ

Арктические и субарктические регионы играют важную стратегическую роль в социально-экономическом развитии России [1]. Основные слагаемые значимости этих территорий — обилие невозобновляемых и частично возобновляемых природных ресурсов суши и шельфа. Здесь сконцентрировано более 50 % имеющихся в стране запасов нефти и газа, сосредоточены крупные месторождения твердых полезных ископаемых, богатейшие запасы биоресурсов. Ресурсно-добычное направление при этом может сопровождаться изменением естественного функционирования природных экосистем вплоть до такой степени, что они теряют способность саморегулирования и самовосстановления [2]. Северные экосистемы, как известно, отличаются слабой устойчивостью к любому виду воздействиям и крайне медленной скоростью восстановления [3]. Проблема антропогенной (техногенной) трансформации природной среды особо актуальна для северо-западной части России с обширными тундровыми территориями, экосистемы которых пока еще не утратили биосферные функции.

Окружающая среда Арктики и Субарктики подвержена антропогенному влиянию источников не только регионального значения, но и удаленных [1, 4], среди выбросов которых особое место занимают так называемые стойкие органические

загрязнители. Эти вещества, представленные, в том числе, хлорорганическими соединениями (ХОС), устойчивы к разложению, способны к трансграничному переносу с последующей циркуляцией в объектах окружающей среды и по трофическим цепям, накоплению в природных экосистемах и жировых тканях, обладают высокой биологической активностью и многоплановым долгосрочным токсичным воздействием на живые организмы. Стойкие органические загрязнители признаны международным сообществом веществами, которые представляют значительную опасность для окружающей среды и здоровья человека и в отношении которых предусмотрен комплекс глобальных практических мер согласно Стокгольмской конвенции о СОЗ (22 мая 2001 г.). В целом же хлорорганические соединения широко распространены в окружающей среде — источниками их являются не только промышленное производство и применение, но и естественные процессы (термические, энзиматические, биохимические) [5, 6]. Эффективными природными «накопительными системами» являются малые озера, экосистемы с замедленным водообменом, в донных осадках которых аккумулируются и «консервируются» соединения, поступающие атмосферным путем, с водосборных территорий и образующиеся в водоеме [7]. Малые озера высокоширотных территорий могут рассматриваться как естественные модельные объекты для изучения путей формирования уровней содержания и компонентного состава хлорорганических соединений различных свойств и происхождения, а также процессов их преобразования и деградации в компонентах водных экосистем.

Цель данного исследования — выявить уровни содержания, особенности распределения и компонентный состав ХОС, включая хлорфенольные соединения и полихлорбензолы, в донных осадках высокоширотных малых озер, расположенных в долине субарктического гидротермального урочища Пымвашор и вне этой термальной системы (Большеземельская тундра, бассейн реки Адзва).

### РАЙОН И ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Урочище Пымвашор является единственным известным к настоящему времени самым северным в континентальной части Европы местом, где действуют термально-минеральные источники [8]. Урочище расположено в юго-восточной части Большеземельской тундры (рис. 1); административно его территория принадлежит Ненецкому автономному округу. В целом для данного региона характерен суровый климат, формирующийся под действием арктических и в меньшей степени атлантических масс воздуха, с длительной холодной зимой, устойчивым снежным покровом, коротким вегетационным периодом и большим количеством осадков. Особенностью природных условий является наличие островных и редко-островных многолетнемерзлых пород. Низкие температуры и слабая испаряемость в сочетании с переувлажненностью почв способствуют образованию болот. Холмистая равнина тундры прорезана густой речной сетью и бесчисленным количеством озер, происхождение которых в основном связано с развитием термокарстовых процессов [9]. Зональная растительность представлена в основном различными вариантами ерниковых и ивняковых тундр [10].

Собственно урочище представляет собой широкий и протяженный лог тектонического происхождения, пересекающий гряды Чернышева в поперечном направлении, борта которого образованы вертикальными или наклонными скальными обнажениями палеозойских известняков и песчаников [8]. По дну лога течет ручей Пымвашор,

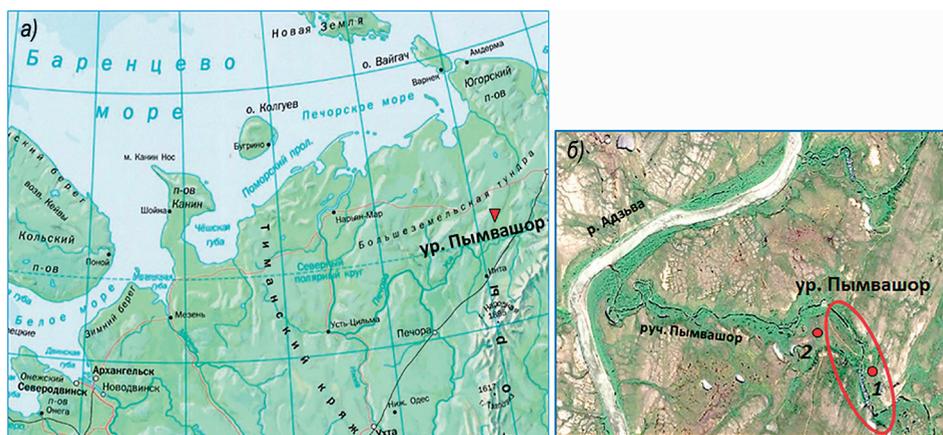


Рис. 1. Географическое положение гидротермального урочища Пымвашор (а) и схема расположения исследованных озер (б).

1 — оз. Тундровое-5; 2 — оз. Тундровое-2

Fig. 1. Geographical position of hydrothermal Pymvashor natural boundary (а) and location of investigated lakes (б).

1 — Tundrovoe-5 Lake; 2 — Tundrovoe-2 Lake

принимающий в себя воды минерально-термальных источников (всего 13) и впадающий в реку Адзья (бассейн р. Печоры). Разгрузка пластовых подземных вод, обладающих повышенной температурой и/или минерализацией, происходит через трещины скал. Температура теплых источников — 19,5–28,5 °С круглогодично, холодных — 1,2–6,0 °С. Вследствие пониженного положения долины ручья Пымвашор по отношению к водоразделу и одновременного сильного изгиба русла образуются участки, хорошо защищенные от ветра и подогреваемые термальными водами; тем самым создаются условия для развития и функционирования специфических растительных и бентосных сообществ, нехарактерных для субарктических тундровых ландшафтов, сохраняет активность почвенная биота [8, 11, 12]. Формирующиеся в условиях повышенной теплообеспеченности экосистемы сохраняют способность к активному функционированию даже при экстремально низких температурах, отличаясь высокой стабильностью условий среды и устойчивостью к внешним климатическим воздействиям, что должно накладывать отпечаток на элементы биогеохимических процессов, протекающих в компонентах этой уникальной гидротермальной системы.

С 2000 г. термальное урочище Пымвашор имеет статус особо охраняемой природной территории, включающей как минерально-термальные источники, так и гидрогеологические и биологические комплексы, археологические объекты [13]. Поскольку район исследования располагается в труднодоступной и практически ненаселенной тундровой местности, антропогенная (техногенная) нагрузка здесь выражена слабо и урочище сохранилось в слабонарушенном состоянии со всем комплексом естественных водных и наземных экосистем.

С учетом удаленности района исследования и с целью изучения возможного воздействия микроклиматических условий на интенсивность и направленность биогеохимических процессов, в которые вовлечены хлорорганические соединения,

были обследованы озера, расположенные в урочище Пымвашор (Тундровое-5) и на сопредельной территории (Тундровое-2) (см. рис. 1). Озера являются малыми с глубинами не более 1–2 м, по происхождению термокарстовыми. По ионному составу воды озер относятся к гидрокарбонатному классу группы кальция, общая минерализация очень низкая (0,04–0,05 г/л); по уровню рН воды — умеренно кислые (6,2–6,3) [8].

Озеро Тундровое-5 находится в центре урочища, на правом берегу ручья Пымвашор. Дно озерной впадины подстилается глинами [14]. Визуально донные осадки четко стратифицированы: верхние 15 см представлены илом темного цвета с включениями волокон органического вещества (растительных остатков) и характерным запахом гниения, нижележащие слои — глинистый ил темно-серого цвета с примесью песка. Озеро Тундровое-2 расположено ниже по течению ручья, в небольшой котловине; болотистое, сильно зарастающее. Проба верхнего (0–10 см) слоя донных осадков визуальна представлена волокнистым (торфянистым) илом со специфическим запахом гниющей растительности. По величине рН (5,8–6,3) озерные осадки характеризовались как средне/умеренно кислые.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Пробы донных осадков были отобраны во время работы комплексной экспедиции сотрудниками Института экологических проблем Севера УрО РАН (ныне ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН) в сентябре 2010 г. Отбор проб осуществлялся с помощью ударной прямоточной грунтовой трубки с внутренним диаметром 110 мм и длиной 1 м. В озере Тундровое-5 (в точке с координатами 67°09,867' с.ш., 60°51,167' в.д.) отобрана колонка донных осадков длиной 36 см с разделением на отдельные слои через каждые 3 см, в озере Тундровое-2 (в точке с координатами 67°09,917' с.ш., 60°50,333' в.д.) — проба верхнего (0–10 см) слоя осадков.

Для определения целевых хлорорганических соединений из одной пробы донных осадков применялась следующая схема пробоподготовки и анализа (рис. 2). Извлечение ХОС из воздушно-сухих проб осадков проводилось методом ускоренной жидкостной проточной экстракции горячей смесью органических растворителей (гексан:ацетон) при температурах ниже точки кипения [15]. Полученный экстракт обрабатывался раствором гидроксида натрия для разделения кислых и нейтральных соединений. Определение концентраций хлорированных фенолов и их производных (хлоргваяколов и хлоркатехолов) проводилось в соответствии со стандартом ISO 14154:2005 [16], полихлорированных бензолов (гекса- и пентахлорбензолов) — согласно Method 8081B (US EPA) [17]. Общее содержание хлорфенольных соединений (ХФС) определялось суммированием их концентраций в легко- и трудноэкстрагируемых фракциях. Для извлечения фракции легкоэкстрагируемых ХФС щелочной раствор кислых соединений реэкстрагировался гексаном. Остаток анализируемой пробы после экстракции обрабатывался концентрированным раствором NaOH с целью дополнительного выделения фракции трудноэкстрагируемых ХФС. Затем полученные в обеих фракциях соединения дериватизировались уксусным ангидридом в слабощелочной среде с последующим инструментальным анализом полученных ацетильных производных. Выделенная после обработки экстракта гидроксидом натрия органическая фаза, содержащая нейтральные соединения, включая гексахлорбензол (ГХБ) и пентахлорбензол (ПeХБ), очищалась от сопутствующих примесей методом адсорбционной очистки с использованием многослойных колонок и далее анализировалась. Количественное определение и идентификация индивидуальных

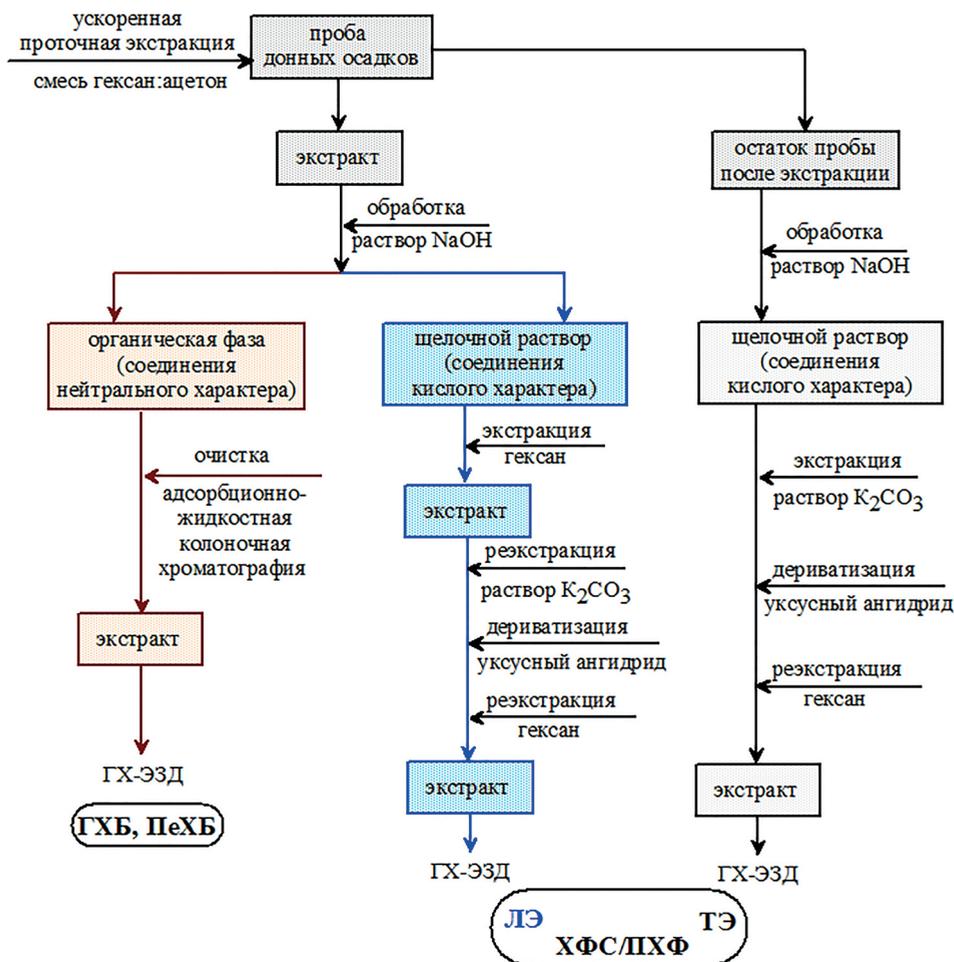


Рис. 2. Схема пробоподготовки и анализа донных осадков для определения целевых хлороорганических соединений из одной пробы.

ГХБ — гексахлорбензол; ПеХБ — пентахлорбензол; ХФС — хлорфенольные соединения; ПХФ — пентахлорфенол

Fig. 2. Scheme of sample preparation and analysis of sediments for determine the target organochlorine compounds from one sample.

HCB — hexachlorobenzene; PeCB — pentachlorobenzene; CPs — chlorophenol compounds; PCP — pentachlorophenol

соединений проводились методом капиллярной газовой хроматографии с электронозахватным детектированием (ГХ «Кристалл 5000.1», СКБ «Хроматэк»; Россия) при программировании температур термостатов колонок (фаза состава 5 % фенил, 95 % диметилполисилоксан); для обработки хроматографических данных применялся программный пакет «Хроматэк-Аналитик». Идентификация проводилась по времени удерживания, количественное определение — по высотам соответствующих пиков методом абсолютной калибровки с применением стандартных образцов производства

“Sigma Aldrich”, “Accu Standart” (США) и ООО «Экохим» (Россия). Нижний предел обнаружения индивидуальных ХОС — 0,1 нг/г в.с.в.

Анализ донных осадков на содержание органического углерода ( $C_{\text{орг}}$ ) выполнялся методом высокотемпературного сжигания пробы (700–1200 °С) в токе кислорода в реакторе с последующим разделением образующихся продуктов сгорания на хроматографической колонке (анализатор элементного состава EuroEA3000, Eurovector, S.p.A., Италия). Предварительно проба обрабатывалась 20 %-ной соляной кислотой для удаления неорганического углерода. Диапазон измерения массовой доли элемента — от 0,01 до 100 % [18].

Гранулометрический состав проб донных осадков определялся с использованием комбинации пипеточного и ситового методов в соответствии с методикой измерений МИ № 88-16365-010-2017 «Донные отложения водоемов. Определение гранулометрического состава ситовым и пипеточным методами». Относительная погрешность измерения для всех гранулометрических фракций — от 19 до 29 %.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Результаты определения содержания индивидуальных ХОС в донных отложениях озера Тундровое-5, расположенного в урочище Пымвашор, представлены в табл. 1.

Хлорфенольные соединения идентифицированы во всех слоях осадочной колонки, при явной зависимости в распределении соединений по глубине от литологического состава донных отложений. Так, наибольшие концентрации ХФС были найдены в верхних (0–15 см) слоях осадка — от 113,7 до 765,5 нг/г. Эти слои сложены волокнистым алеврито-пелитовым илом темного цвета, в гранулометрическом составе которого довольно большая (37,37–77,44 %) доля принадлежала самой мелкой пелитовой фракции (размер частиц < 0,01 мм) при невысоком содержании песчаной фракции (> 0,10 мм) — 2,73–21,33 %. Для этих осадков характерно и очень высокое содержание органического вещества ( $C_{\text{орг}}$  37,74–47,62 %) за счет большого количества растительных остатков различной степени разложения. В нижележащих слоях,

Таблица 1

Содержание хлорорганических соединений в толще донных осадков озера Тундровое-5

Table 1

Levels of organochlorine compounds in the sediment core from Tundrovoye-5 Lake					
Горизонт, см	$C_{\text{орг}}$ , %	ХФС, нг/г	ПХФ, нг/г	ГХБ, нг/г	ПеХБ, нг/г
0–3	45,91	619,3	0,1	2,5	1,1
3–6	44,21	765,5	1,7	2,0	0,9
6–9	47,62	628,3	2,4	2,4	1,2
9–12	44,43	555,1	2,2	1,3	0,5
12–15	37,74	115,8	Не обнаружено	1,8	0,7
15–18	5,64	13,2	Не обнаружено	1,2	0,1
18–21	2,36	1,1	Не обнаружено	1,1	0,4
21–24	1,92	1,6	0,1	1,4	0,3
24–27	1,77	9,6	0,1	0,3	0,1
27–30	2,17	4,2	Не обнаружено	1,1	0,3
30–33	1,76	2,6	Не обнаружено	1,0	0,2
33–36	2,21	8,7	Не обнаружено	2,7	0,7

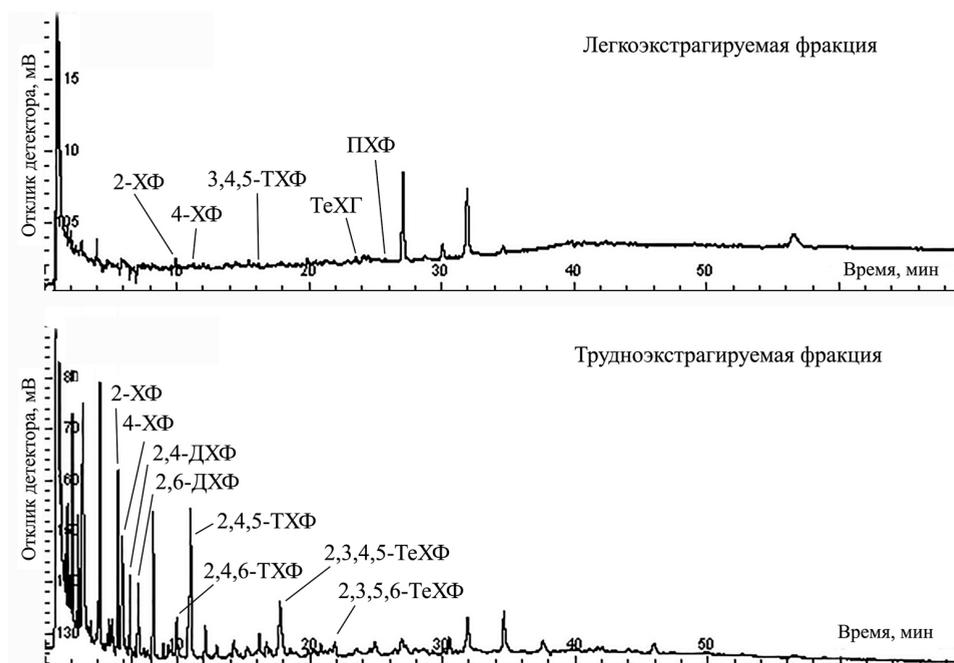


Рис. 3. Типичные хроматограммы хлорфенольных соединений, выделенных из озерных осадков. ХФ — хлорфенол; ДХФ — дихлорфенол; ТХФ — трихлорфенол; ТеХФ — тетрахлорфенол; ПХФ — пентахлорфенол; ТеХГ — тетрахлоргваякол

Fig. 3. Typical chromatogram of chlorophenol compounds extracted from lake sediments.

CP — chlorophenol; DCP — dichlorophenol; TCP — trichlorophenol; TeCP — tetrachlorophenol; PCP — pentachlorophenol; TeCG — tetrachloroguaiacol

представляющих собой илистые пески (песчаный алеврит) темно-серого цвета при уровне  $C_{\text{орг}}$  1,76–5,64 %, концентрации ХФС были на порядок меньше — 1,1–13,2 нг/г. Единая тенденция в распределении содержания ХФС и  $C_{\text{орг}}$ , а также ХФС и пелитовой фракции в толще осадка подтверждалась хорошей корреляционной связью между этими показателями ( $r = 0,91$  и  $0,79$  соответственно, при величине выборки  $n = 12$ ).

В общем содержании ХФС повсеместно преобладали хлорированные фенолы (80–99 %), тогда как доля их производных не превышала 1 % в верхних (0–15 см) слоях, достигая 20 % в толще озерных осадков.

Рассматривая хроматограммы экстрактов донных осадков (рис. 3), можно отметить, что наибольшее количество (до 24) пиков соединений кислого характера (ХФС) регистрировалось в верхних слоях (0–15 см), преимущественно в трудноэкстрагируемой фракции. Число зарегистрированных пиков в нижних слоях (15–36 см) не превышало 10. При этом хроматограммы экстрактов осадков озера вне термальной зоны характеризовались таким же числом зарегистрированных пиков (22), но в основном в легкоэкстрагируемой фракции.

В составе хлорфенолов компоненты распределились следующим образом (рис. 4). В верхней части (до 15 см) осадочной колонки основная доля (98 %) приходилась на низкохлорированные соединения, с преобладанием 2- и 4-хлорфенолов; 2,4-, 2,5- и 2,6-дихлорфенолы обнаружены в меньших количествах. Известно,

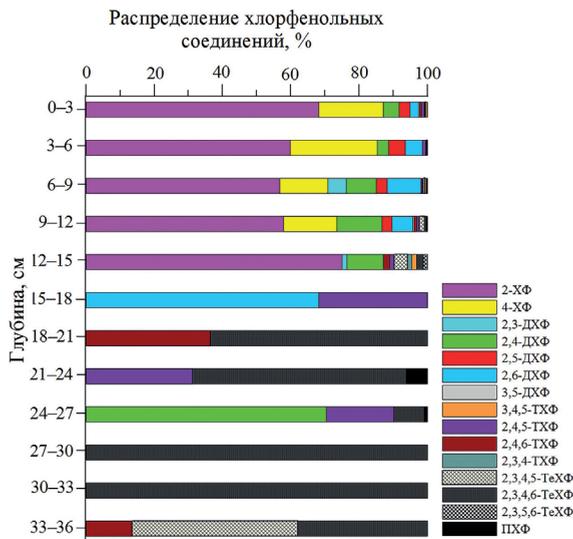


Рис. 4. Распределение хлорфенольных соединений в толще донных осадков оз. Тундровое-5, %. ХФ — хлорфенол; ДХФ — дихлорфенол; ТХФ — трихлорфенол; ТеХФ — тетрахлорфенол; ПХФ — пентахлорфенол

Fig. 4. Distribution of chlorophenol compounds in the sediment core from Tundrovoye-5 Lake, %. CP — chlorophenol; DCP — dichlorophenol; TCP — trichlorophenol; TeCP — tetrachlorophenol; PCP — pentachlorophenol

что эти соединения могут образовываться в результате энзиматических процессов и процессов дехлорирования полихлорированных фенолов (три-, тетра- и пента-) в условиях, благоприятных для их протекания (рН 3–6, положительные температуры среды и присутствие достаточного количества микробной биомассы [6]), с участием наземных и водных продуцентов, чему способствовала густая береговая растительность, а также обилие водной растительности в самом озере [14].

В толще (15–36 см) осадков доминировали уже высокохлорированные соединения, представленные преимущественно три- и тетрахлорфенолами, присутствие и уровни которых, скорее всего, связаны как с особенностями самих донных отложений (осадки этих слоев менее обогащены органическим веществом при более грубодисперсном их составе, что обуславливает низкую сорбцию ХОС на частицах осадка), так и с малой активностью протекающих здесь природных процессов. Учитывая, что антропогенная (техногенная) нагрузка на гидротермальную систему урочища Пымвашор слабая, поступление таких соединений в осадки, вероятнее всего, обусловлено атмосферным дальним переносом от различных источников.

Озеро Тундровое-5 расположено в долине урочища, поэтому специфические микроклиматические условия гидротермальной системы [14] могли способствовать протеканию как энзиматических, так и биохимических процессов. Напротив, в донных осадках озера на сопредельной территории (Тундровое-2), вне термальной зоны, из-за низких температур и скудной растительности зонального субарктического ландшафта природные процессы образования хлорированных фенолов в почвах и компонентах собственно водоема малоактивны, подтверждение тому — отсут-

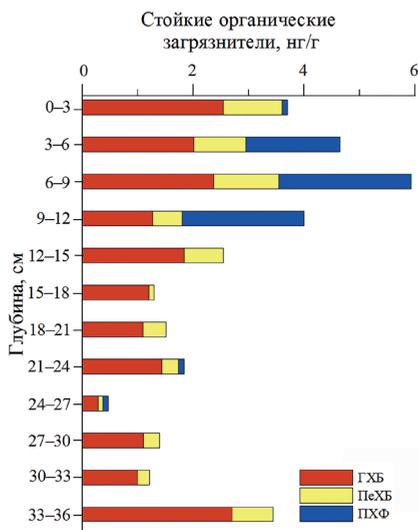


Рис. 5. Уровни содержания стойких органических загрязнителей в толще донных осадков оз. Тундровое-5, нг/г.

ГХБ — гексахлорбензол; ПeХБ — пентахлорбензол; ПХФ — пентахлорфенол

Fig. 5. Levels of persistent organic pollutants in the sediment core from Tundrovoye-5 Lake, ng/g dry wet.

HCB — hexachlorobenzene; PeCB — pentachlorobenzene; PCP — pentachlorophenol

ствие в донных осадках как низкохлорированных соединений, так и производных хлорфенолов [19]. При этом концентрации хлорированных фенолов (185,0 нг/г) в поверхностных осадках этого субарктического озера были ниже по сравнению с их содержанием в верхних слоях (0–9 см) осадков оз. Тундровое-5 в центре урочища (619,3–765,5 нг/г).

При детальном рассмотрении состава высокохлорированных фенолов установлено, что во всех слоях осадочной колонки оз. Тундровое-5 представлены 2,4,6- и 2,4,5-трихлорфенолы и 2,3,4,5- и 2,3,4,6-тетрахлорфенолы (см. рис. 4). Пентахлорфенол, введенный в перечень стойких органических загрязнителей в 2015 г., определялся эпизодично (см. табл. 1, рис. 5). При этом в общем содержании хлорфенольных соединений содержание антропогенного ПХФ не превышало 1 %. Известно [20], что набор из четырех хлорфенолов (ПХФ, 2,4,6-трихлорфенол, 2,3,4,6-тетрахлорфенол, 2,4-ДХФ) представляет собой профиль соединений, образующихся при естественных и техногенных термических процессах (лесные пожары, сжигание топлива/сырья органического происхождения, например угля, древесины и пр.). Эти соединения в различных комбинациях были обнаружены во всех слоях исследованных осадков, но данный профиль наиболее характерен для осадочных слоев 9–12 см, а также 21–24 и 24–27 см, в большей мере свидетельствуя в пользу аэротехногенного пути распространения этих соединений от источников, связанных с процессами сжигания/горения.

При установленной средней скорости осадконакопления 2 мм/год [14] и мощности озерных отложений (36 см) период их накопления со времени образования до момента отбора (2010 г.) составляет примерно 180 лет. Временной интервал

нижних слоев (15–36 см) осадочной колонки ориентировочно относится к первой трети XIX в. — началу XX в., периоду становления и развития различных отраслей промышленности в России и Европе в целом, включая угольную и добывающую [21]. С середины XIX в. началось активное освоение месторождений полезных ископаемых в регионах центрально-европейской и северо-западной частей России, а с начала XX в. — развитие нефтедобычи. Дальнейшая интенсификация производств горнодобывающей, металлургической, нефтедобывающей отраслей промышленности усилила загрязнение окружающей среды азротехногенными выбросами. Верхние 15 см донных отложений отражают не только «индустриальный» период в целом, но и так называемый его «химический/хлорный» этап (1930–2010 гг.), характеризующийся масштабным производством и применением различных хлорорганических соединений и продуктов на их основе на территориях европейской части России, ближнего зарубежья и стран Европы [22, 23]. Этот факт позволяет предположить активное поступление ПХФ и других высокохлорированных ХОС в этот «исторический» период атмосферным путем от техногенных источников. Ожидаемо, что в нижележащих осадочных слоях ПХФ практически отсутствует, определен лишь на глубине 24–27 см, причем на уровне предела обнаружения. Свое влияние на уровни и распределение этого загрязнителя оказали особенности литологического состава осадков: именно в верхних слоях колонки, обогащенных органическим веществом и преобладанием пелитовой фракции в гранулометрическом составе, содержание ПХФ наибольшее — от 1,7 до 2,4 нг/г. Причем в большинстве своем это соединение присутствовало в трудноэкстрагируемом (малодоступном для микробной деградации) состоянии, что предполагало дальнейшее сохранение ПХФ в донных отложениях.

Более высокими концентрации ПХФ были в осадках озера Тундровое-2 (8,0 нг/г), хотя в суммарном содержании хлорированных фенолов его количества тоже не превышали 1 %. При этом, однако, ПХФ был обнаружен в осадках исключительно в легкоэкстрагируемой фракции. Вероятнее всего, в условиях отсутствия отепляющего эффекта урочища природные процессы преобразования этого загрязнителя малоактивны, о чем свидетельствовали выявленное в озерных отложениях количество ПХФ и «скудный» состав обнаруженных хлорфенолов.

Производные хлорфенолов хотя и эпизодически, но также обнаруживались в толще осадков оз. Тундровое-5; количества их в общем содержании ХФС максимально составляли 20 %, варьируя от 0,5 до 2,9 мкг/г. Состав этих соединений представлен как хлоргваяколами (3,4-дихлогваякол, 3,4,5- и 4,5,6-трихлоргваяколы, тетрахлоргваякол), так и хлоркатехолами (3,6- и 4,5-дихлоркатехолы, 3,4,5-трихлоркатехол, тетрахлоркатехол). При этом в наибольших количествах содержались тетрахлоргваякол и тетрахлокатехол — продукты окислительного дехлорирования антропогенного ПХФ [6], присутствие которых в осадках свидетельствовало о наличии в водоеме оптимальных условий для протекания процессов преобразования этого загрязнителя (относительно более благоприятные климатические условия урочища, присутствие соответствующих микробных сообществ [6]). Можно предполагать, что при формировании озерных отложений ПХФ в окислительных условиях поверхностных слоев отложений преобразовывался в продукты окислительного дехлорирования, которые впоследствии накапливались и «захоранивались» в осадках. Но, с другой стороны, низкие уровни содержания и эпизодичность хлорпроизводных позволяют говорить о том, что процессы окислительного дехлорирования в компонентах озерной

экосистемы все же малоактивны, поскольку большую часть года в промерзающем почти до дна водоеме кислород отсутствует.

Полученные данные позволяют предполагать, что окислительные процессы трансформации хлорфенолов мало активны в рассматриваемом озере, а выявленный состав хлорированных фенолов предполагает активность процессов продуцирования хлорметаболитов, главным образом в верхних слоях отложений (0–15 см).

Полихлорбензолы, еще одна группа высокотоксичных соединений из перечня стойких органических загрязнителей, также обнаружены во всех слоях осадочной колонки оз. Тундровое-5 (см. табл. 1). Уровни содержания ГХБ в донных отложениях варьировали от 0,3 до 2,7 нг/г, количества ПсХБ были в несколько раз меньше, составляя 0,2–1,2 нг/г. При этом для обоих загрязнителей характерна общая тенденция в распределении концентраций в осадках по глубине (см. рис. 5).

Наибольшие суммарные количества полихлорбензолов (1,8–3,6 нг/г) зафиксированы в верхних 15 см донных отложений, соответствующие, как уже было сказано выше, «химическому/хлорному» периоду (с 30-х гг. XX в. по настоящее время). Эти слои осадка, представленные волокнистым алеврито-пелитовым илом, отличались не только большим процентным содержанием самой мелкой пелитовой фракции (37,37–77,44 %), но и значительным количеством  $C_{\text{орг}}$  (37,74–47,62 %). Высокая скорость осадконакопления (в среднем 2 мм/год) в озере Тундровое-5 предполагала сравнительно слабую минерализацию органического вещества и его постепенное «захоронение» в донных отложениях. Все это могло способствовать накоплению и «консервации» в озерных осадках таких загрязнителей, как ГХБ и ПсХБ, активно сорбирующихся органическим веществом, что подтверждается положительной корреляционной связью между суммарным содержанием указанных полихлорбензолов и  $C_{\text{орг}}$  ( $r = 0,65$ ,  $n = 12$ ). Тесная взаимосвязь определена и между содержанием в пробах осадков пелитовой фракции и  $C_{\text{орг}}$  ( $r = 0,93$ ,  $n = 12$ ), что объясняет положительную корреляцию суммарной концентрации загрязнителей именно с этой тонкодисперсной фракцией осадков ( $r = 0,93$ ,  $n = 12$ ).

При смене гранулометрического типа осадка в нижележащих слоях на заилыстый алевро-песок и значительном снижении  $C_{\text{орг}}$  (1,76–5,64 %) концентрации полихлорбензолов в озерных отложениях тоже заметно уменьшились — до 0,4–1,7 нг/г. Присутствие ГХБ и ПсХБ в осадочных слоях (ниже 15 см), приуроченных к более раннему временному периоду (первая треть XIX — начало XX в.), скорее всего, обусловлено только процессами сжигания/горения — естественными (например, лесные пожары) и техногенными (сжигание ископаемого топлива, древесины и др., термические процессы металлургической, горнодобывающей промышленности и пр.) [24, 25]; а выявленные уровни их содержания при отсутствии близкорасположенных источников свидетельствуют в пользу дальнего атмосферного переноса как наиболее вероятного пути поступления этих загрязнителей в озерные осадки [26].

Уместным представлялось провести сравнение полученных данных с результатами исследования оз. Тундровое-2, расположенного на прилегающей к урочищу Пымвашор территории [27]. В его поверхностных осадках (0–10 см), проанализированных только на содержание ГХБ, загрязнитель найден в количестве 10,2 нг/г, тогда как концентрация его в верхних (0–9 см) слоях осадочной колонки Тундрового-5 в среднем составила 2,3 нг/г. Более эффективная аккумуляция ГХБ может быть обусловлена хорошей удерживающей способностью торфянистых осадков Тундрового-2 ( $C_{\text{орг}}$  38,44 %)

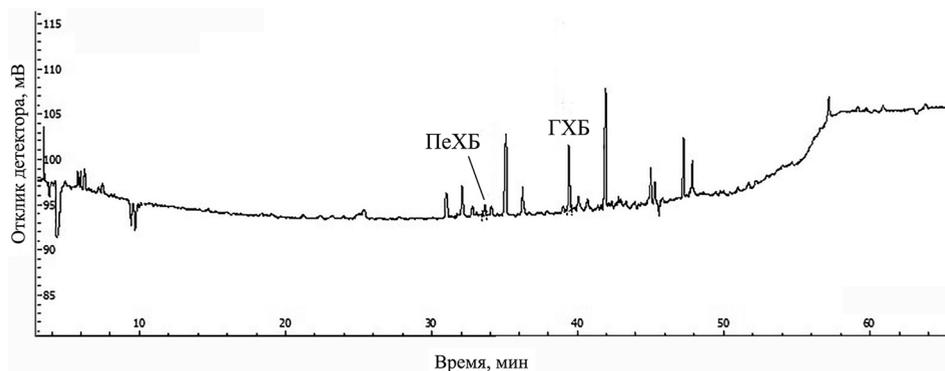


Рис. 6. Типичная хроматограмма нейтральных хлорорганических соединений, выделенных из озерных осадков.

ГХБ — гексахлорбензол; ПeХБ — пентахлорбензол

Fig. 6. Typical chromatogram of neutral organochlorine compounds extracted from lake sediments. HCB — hexachlorobenzene; PeCB — pentachlorobenzene

по отношению к загрязнителю со свойствами неионогенного высоколипофильного устойчивого соединения. Возможно, играет свою роль еще и тот факт, что это озеро расположено на более открытом, чем оз. Тундровое-5, пространстве. Сказывается отсутствие отепляющего эффекта от действующих в урочище гидротерм на интенсивность внутриводоемных процессов в целом и процессов микробальной деструкции в частности, которые при низких среднегодовых температурах протекают довольно медленно, способствуя тем самым накоплению значительного количества загрязняющих веществ в озерных осадках. Хотя, судя по характеру распределения зарегистрированных пиков ХОС на хроматограммах экстрактов осадков оз. Тундровое-5 (рис. 6), даже в специфических микроклиматических условиях гидротермальной системы процессы биodeградации в донных отложениях все же недостаточно эффективны. Так, в области выхода низкокипящих соединений, предполагающей наличие менее хлорированных бензолов (продуктов термических процессов и/или микробальной деградации непосредственно ГХБ и ПeХБ [24, 25]), пики единичны и слабо выражены по высоте или практически отсутствуют. Наоборот, большей нагруженностью пиками выделялась область высококипящих ХОС, позволяя предполагать присутствие наряду с полихлорбензолами других высоколипофильных соединений (например, изомеров гексахлорциклогексана, которые тоже относятся к стойким органическим загрязнителям и способны к трансграничному переносу в высокоширотные регионы [4, 26]).

В целом найденные в озерных осадках концентрации полихлорбензолов были сопоставимы с приводимыми в литературе данными для удаленных пресноводных озер арктического и субарктического поясов, загрязнение которых связывается с атмосферным переносом от различных источников в низких широтах. Так, в поверхностных осадках арктических озер Гренландии максимальные концентрации ГХБ составляли 0,1 нг/г в.с.в. [28]. В осадках пресноводных озер на о. Медвежий (Норвегия) в Баренцевом море уровни содержания загрязнителя не превышали 0,8 нг/г [29], а в озерах материковой части этой страны варьировали от 0,1 до 1,4 нг/г [30, 31]. Практически в таких же количествах ГХБ выявлен в поверхностных осадках ряда

арктических озер на территориях Северной Канады (0,09–1,8 нг/г) и Аляски (0,06–0,27 нг/г), содержание ПсХБ в этих же водоемах определено на уровне от < 0,01 до 0,73 нг/г [26, 32]. Более высокие концентрации ГХБ (1,0–5,5 нг/г) найдены в донных отложениях озер Финляндии [31].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены первые данные о специфике протекания биогеохимических процессов с участием хлорорганических соединений (хлорфенолов и их производных, полихлорбензолов) в малых озерах субарктического гидротермального урочища Пымвашор и на сопредельной с ним территории. Рассмотрено влияние специфических микроклиматических условий гидротермальной системы на компонентный состав и распределение ХОС в озерных осадках. В осадочной колонке озера в долине урочища Пымвашор выявлена тенденция к снижению концентраций ХОС с возрастанием глубины отбора, обусловленная и литологическими особенностями донных отложений (в частности, гранулометрическим составом, содержанием органического углерода), и спецификой источников поступления. При этом в верхних обогащенных органическим веществом слоях осадка состав ХФС представлен в основном хлорированными фенолами биотического происхождения. В донных отложениях озера вне термальной системы концентрации ХФС ниже по сравнению с их количествами в осадках озера в урочище, а состав хлорфенолов представлен соединениями преимущественно абиогенного происхождения. Исходя из удаленности района исследования от прямых источников антропогенного (техногенного) воздействия, присутствие и уровни содержания в осадках стойких хлорорганических загрязнителей (ПХФ, ГХБ и ПсХБ) связаны, скорее всего, с поступлением в прошлом и настоящем, как из близлежащих регионов, так и с территорий в низких широтах за счет переноса воздушными массами с последующим мокрым и сухим осаждением из атмосферы.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Финансирование.** Работа выполнена за счет средств Минобрнауки РФ проект № АААА-А18-118012390167-1 «Изучение закономерностей биогеохимических процессов циклов хлора и серы в экосистемах Арктики и Субарктики под влиянием природных и техногенных факторов».

**Благодарности.** Авторы благодарят всех сотрудников ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН (г. Архангельск), участвовавших в экспедиционных работах, за отбор и транспортировку проб донных осадков. Отдельная благодарность сотрудникам лаборатории экоаналитических исследований ФИЦКИА Р.Б. Ивахновой и Г.Н. Лосюк — за анализ образцов донных осадков на содержание органического углерода, Е.А. Вахрамеевой — за определение гранулометрического состава донных осадков, Н.М. Кокрятской — за полезные советы при подготовке статьи.

**Вклад авторов.** Авторы внесли равные вклады в исследование и публикацию. Авторами сформулированы цель и задачи исследования; проведена подготовка проб донных осадков к анализу и газохроматографическое исследование; получены и интерпретированы результаты определения количественного содержания хлорфенольных соединений (Е.С. Колпакова) и полихлорбензолов (А.В. Вельямидова) в пробах донных осадков; выполнена обработка экспериментальных данных. Оба автора участвовали в обсуждении результатов исследования, а также написании, оформлении/форматировании и пересмотре текста статьи.

**Competing interests.** The authors declare no conflict of interest.

**Funding.** This work was carried out at the expense of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, project No. AAAA-A18-118012390167-1 “Study of biogeochemical process pattern of chlorine and sulfur cycles in the ecosystems of the Arctic and Subarctic under the influence of natural and industry-related factors”.

**Acknowledgments.** The authors thank all employees of the N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research (Arkhangelsk) who participated in the expeditionary work for bottom sampling and transportation of samples. Special thanks to the employees of the FCIARctic Laboratory of Eco-Analytical Research: Raisa B. Ivakhnova and Galina N. Losyuk — for data on the organic carbon content in sediment samples, Elena A. Vakhrameeva — for data on the particle size distribution in sediment samples, and Natalya M. Kokryatskaya — for her useful advice in preparing the manuscript.

**Authors contribution.** The authors made equal contributions to the study and the publication. The authors formulated the purpose and objectives of the study; prepared of sediment samples for analysis and carried out gas chromatographic testing of samples; obtained and interpreted the results of determining the quantitative contents of chlorophenol compounds (E.K.) and polychlorobenzenes (A.V.) in sediment samples; performed the processing of experimental data. The authors participated in the discussion of the research insights, as well as writing, design/formatting and review of the manuscript text.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ивантер В.В.* Арктическое пространство России в XXI веке: факторы развития, организация управления. СПб.: Наука, 2016. 1016 с.
2. *Тишков А. А., Белоновская Е.А., Глазов П.М.* Антропогенная трансформация арктических экосистем России: подходы, методы, оценки // Арктика: экология и экономика. 2019. № 4 (36). С. 38–51.
3. *Моисеев Т.И.* Теоретические основы нормирования антропогенных нагрузок на водоемы Субарктики. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 1997. 261 с.
4. AMAP Assessment Report: Arctic Pollution Issues. Arctic Monitoring and Assessment Programme. Oslo: AMAP, 1998. xii+859 p.
5. *Gribble G.W.* Naturally Occurring Organohalogen Compounds — a Comprehensive Update. Wien; New York: Springer, 2010. 613 p.
6. *Field J.A.* Natural production of organohalide compounds in the environment / Organohalide-Respiring Bacteria. 2016. P. 7–29.
7. *Даувальтер В.А.* Геоэкология донных отложений. Мурманск: Изд-во МГТУ, 2012. 242 с.
8. *Боголицын К.Г., Болотов И.Н.* Функционирование субарктической гидротермальной экосистемы в зимний период. Екатеринбург: УрО РАН, 2011. 252 с.
9. *Голдина Л.П.* География озер Большеземельской тундры. Л.: Наука, 1972. 103 с.
10. Атлас Архангельской области. М.: Главное управление геодезии и картографии при Совете Министров СССР, 1976. 72 с.
11. *Беспалая Ю.В., Болотов И.Н., Усачева О.В.* Население моллюсков субарктической гидротермальной экосистемы в зимний период // Зоологический журнал. 2011. Т. 90. № 11. С. 1304–1322.
12. *Полякова Е.В., Гофаров М.Ю., Скютте Н. Г., Игловский С.А.* Спутниковые и подспутниковые методы исследований наземных гидротермальных экосистем (на примере субарктического термального урочища Пымвапор в Большеземельской тундре) // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. 2013. Т. 10. № 2. С. 115–128.

13. Кадастровый отчет по ООПТ Памятник природы регионального значения «Пым-Ва-Шор». URL: <http://оорт.aari.ru> (дата обращения 12.12.2019).
14. Шевченко В.П., Любас А.А., Стародымова Д.П., Болотов И.Н., Аксенова О.В., Алиев Р.А., Гофаров М.Ю., Изловский С.А., Кокрятская Н.М. Особенности геохимии тяжелых металлов в донных осадках малых озер урочища Пымвадор (Большеземельская тундра) // Успехи современного естествознания. 2017. № 1. С. 105–110.
15. Клюев Н.А., Шелепчиков А.А., Сойфер В.С., Бродский Е.С. Метод проточного экстрагирования из твердых веществ // Журнал аналитической химии. 2003. Т. 58. № 7. С. 707–708.
16. ISO 14154:2005(E). Soil quality — Determination of some selected chlorophenols — Gas-chromatographic method with electron-capture detection. International standard. 2005. 15 p.
17. Method 8081B (SW-846): Organochlorine pesticides by gas chromatography. Revision 2. EPA. 2007. URL: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-12/documents/8081b.pdf> (дата обращения 12.12.2019).
18. Гельман Н.Э. Методы количественного органического элементного микроанализа. М.: Химия, 1987. 296 с.
19. Колпакова Е.С. Хлорфенольные соединения в пресноводных озерах субарктических регионов // Проблемы Арктики и Антарктики. 2018. Т. 64. № 4. С. 366–376.
20. Briois C., Gullett B., Ryan S., Tabor D., Touati A. Temperature and concentration effects on the dioxin and furan formation from a mixture of chlorophenols over fly ash // Organohalogen Compounds. 2006. V. 68. P. 850–856.
21. Кафенгауз Л.Б. Эволюция промышленного производства России (последняя треть XIX в. — 30-е годы XX в.). М.: Эпифания, 1994. 848 с.
22. Мотузова Г.В., Карпова Е.А. Химическое загрязнение биосферы и его экологические последствия. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2013. 304 с.
23. Ровинский Ф.Я., Воронова Л.Д., Афанасьев М.И. Фоновый мониторинг загрязнений экосистем суши хлороорганическими соединениями. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 270 с.
24. Barber J., Sweetman A., Jones K. Hexachlorobenzene — Sources, environmental fate and risk characterization: Science Dossier / Euro Chlor. 2005. 116 p.
25. Bailey R.E., van Wijk D., Thomas P.C. Sources and prevalence of pentachlorobenzene in the environment. Review // Chemosphere. 2009. V. 75. P. 555–564.
26. Muir D.C.G., Grift N.P., Lockhart W.L. Spatial trends and historical profiles of organochlorine pesticides in Arctic lake sediments // Science of the Total Environment. 1995. V. 160/161. P. 447–457.
27. Троянская А.Ф., Вельямидова А.В. Стойкие органические загрязнители в субарктических озерах на Европейском Крайнем Севере России // Водные ресурсы. 2017. № 4. С. 465–474.
28. Cleemann M., Riget F., Paulsen G.B. Organochlorines in Greenland lake sediments and landlocked Arctic char (*Salvelinus alpinus*) // Science of the Total Environment. 2000. V. 245. P. 173–185.
29. Skotvold T., Wartena E., Christensen G.N. Organochlorine contaminants in biota and sediment from lakes on Bear Island. Report APN510.1443.1 / Akvaplan-NIVA. Tromsø, 1999. 63 p.
30. Christensen G.N., Savinov V., Savinova T. Screening studies of POP levels in bottom sediments from selected lakes in the Paz watercourse. Report APN514.3665.01 / Akvaplan-NIVA. Tromsø, 2007. 48 p.
31. Skotvold T., Wartena E., Rognerud S. Heavy metals and persistent organic pollutants in sediments and fish from lakes in Northern and Arctic regions of Norway. Report APN514.660.1 / Akvaplan-NIVA. Tromsø, 1997. 97 p.
32. Allen-Gil S.M., Gubala C.P., Wilson R. Organochlorine pesticides and polychlorinated biphenyls (PCBs) in sediments and biota from four US Arctic lakes // Archives of Environmental Contamination and Toxicology. 1997. V. 33. P. 378–387.

## REFERENCES

1. Ivanter V.V. *Arkticheskoe prostranstvo Rossii v XXI veke: faktory razvitiya, organizatsiya upravleniya*. Arctic space of Russia in the XXI century: development factors, management organization. St. Petersburg: Science, 2016: 1016 p. [In Russian].
2. Tishkov A. A., Belonovskaya Ye.A., Glazov P.M. Anthropogenic transformation of the Russian Arctic ecosystems: approaches, methods, assessments. *Arktika: ekologiya i ekonomika*. Arctic: Ecology and Economics. 2019, 4 (36): 38–54. [In Russian].
3. Moiseyenko T.I. *Teoreticheskiye osnovy normirovaniya antropogennykh nagruzok na vodoyemy Subarktiki*. Theoretical foundations of the regulation of anthropogenic pressures on the water bodies of the Subarctic. Apatity: KSC RAS, 1997: 261 p. [In Russian].
4. AMAP Assessment Report: Arctic Pollution Issues. Arctic Monitoring and Assessment Programme. Oslo: AMAP, 1998: xii+859 p.
5. Gribble G.W. *Naturally Occurring Organohalogen Compounds — a Comprehensive Update*. Wien; New York: Springer, 2010: 613 p.
6. Field J., Sierra-Alvarez R. Natural production of organohalide compounds in the environment. *Organohalide-Respiring Bacteria*. 2016, 1: 7–29.
7. Dauval'ter V. A. *Geoekologiya donnykh otlozheniy*. Geoecology of bottom sediments. Murmansk: MGTU, 2012: 224 p. [In Russian].
8. Bogolitsyn K.G., Bolotov I.N. *Funktsionirovaniye subarkticheskoy gidrotermal'noy ekosistemy v zimniy period*. The functioning of the subarctic hydrothermal ecosystem in winter. Ekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2011: 252 p. [In Russian].
9. Goldina L.P. *Geografiya ozer Bol'shezemel'skoy tundry*. The geography of the lakes of the Bolshezemelskaya tundra. Leningrad: Science, 1972: 103 p. [In Russian].
10. *Atlas Arkhangel'skoy oblasti*. Atlas of the Arkhangelsk region. Moscow: Main Directorate of Geodesy and Cartography under the Council of Ministers of the USSR, 1976: 72 p. [In Russian].
11. Bespalaya Yu.V., Bolotov I.N., Usacheva O.V. Population of mollusks of the subarctic hydrothermal ecosystem in winter. *Zoologicheskyy zhurnal*. Zoological Journal. 2011, 90, 11: 1304–1322. [In Russian].
12. Polyakova Ye.V., Gofarov M.Yu., Skyutte N. G., Iglovskiy S.A. *Sputnikovyye i podsputnikovyye metody issledovaniy nazemnykh gidrotermal'nykh ekosistem (na primere subarkticheskogo termal'nogo urochishcha Pymvashor v Bol'shezemel'skoy tundre)*. Satellite and sub-satellite methods for investigating terrestrial hydrothermal ecosystems (on the example of the subarctic thermal tract Pymvashor in the Bolshezemelskaya tundra). *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya zemli iz kosmosa*. Modern problems of remote sensing of the Earth from space. 2013, 10, 2: 115–128. [In Russian].
13. *Kadastrivnyy otchet po OOPT Pamyatnik prirody regional'nogo znacheniya "Pym-Va-Shor"*. Cadastral report on protected areas Monument of nature of regional significance "Pym-Va-Shor". Available at: <http://oopt.aari.ru> (accessed 12.12.2019).
14. Shevchenko V.P., Lyubas A.A., Starodymova D.P., Bolotov I.N., Aksonova O.V., Aliyev R.A., Gofarov M.YU., Iglovskiy S.A., Kokryatskaya N.M. Features of the geochemistry of heavy metals in bottom sediments of small lakes in the Pymvashor tract (Bolshezemelskaya tundra). *Uspekhi sovremennogo yestestvoznaniya*. The successes of modern science. 2017, 1: 105–110. [In Russian].
15. Klyuyev N.A., Shelepchikov A.A., Soyfer V.S., Brodskiy Ye.S. Solids Flow Extraction Method. *Zhurnal analiticheskoy khimii*. Journal of Analytical Chemistry. 2003, 58, 7: 707–708.
16. ISO 14154:2005(E). Soil quality — Determination of some selected chlorophenols — Gas-chromatographic method with electron-capture detection. International standard. ISO, 2005: 15 p.

17. Method 8081B (SW-846): Organochlorine pesticides by gas chromatography. Revision 2. EPA. 2007. Available at: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-12/documents/8081b.pdf> (accessed 12.12.2019).
18. Gel'man N.E. *Metody kolichestvennogo organicheskogo elementnogo mikroanaliza*. Methods of quantitative organic elemental microanalysis. Moscow: Chemistry, 1987: 296 p. [In Russian].
19. Kolpakova E.S. Chlorophenol compounds in freshwater lakes of subarctic regions. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Problems of Arctic and Antarctic. 2018, 64 (4): 366–376. [In Russian].
20. Briois C., Gullett B., Ryan S., Tabor D., Touati A. Temperature and concentration effects on the dioxin and furan formation from a mixture of chlorophenols over fly ash. *Organohalogen Compounds*. 2006, 68: 850–856.
21. Kafengauz L.B. *Evolyutsiya promyshlennogo proizvodstva Rossii (poslednyaya tret' XIX v. — 30-ye gody XX v.)*. The evolution of industrial production in Russia (the last third of the 19th century — the 30s of the 20th century). Moscow: Epifaniya, 1994: 848 p. [In Russian].
22. Motuzova G.V., Karpova E.A. *Khimicheskoe zagriaznenie biosfery i ego ekologicheskie posledstviia*. Chemical pollution of the biosphere and its environmental effects. Moscow: University of Moscow, 2013: 304 p. [In Russian].
23. Rovinskiy F.YA., Voronova L.D., Afanas'yev M.I. *Fonovyy monitoring zagryazneniy ekosistem sushi khlororganicheskimi soyedineniyami*. Background monitoring of pollution of land ecosystems by organochlorine compounds. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1990: 270 p. [In Russian].
24. Barber J., Sweetman A., Jones K. Hexachlorobenzene — Sources, environmental fate and risk characterization: Science Dossier. *Euro Chlor*, 2005: 116 p.
25. Bailey R.E., van Wijk D., Thomas P.C. Sources and prevalence of pentachlorobenzene in the environment. *Review. Chemosphere*. 2009, 75: 555–564.
26. Muir D.C.G., Grift N.P., Lockhart W.L. Spatial trends and historical profiles of organochlorine pesticides in Arctic lake sediments. *Science of the Total Environment*. 1995, 160/161: 447–457.
27. Troyanskaya A.F., Vel'yamidova A.V. Persistent organic pollutants in subarctic lakes in the European Far North of Russia. *Vodnyye resursy*. Water resources. 2017, 4: 465–474. [In Russian].
28. Cleemann M., Riget F., Paulsen G.B. Organochlorines in Greenland lake sediments and landlocked Arctic char (*Salvelinus alpinus*). *Science of the Total Environment*. 2000, 245: 173–185.
29. Skotvold T., Wartena E., Christensen G.N. Organochlorine contaminants in biota and sediment from lakes on Bear Island. Report APN510.1443.1. Akvaplan-NIVA. Tromsø, Norway, 1999: 63 p.
30. Christensen G.N., Savinov V., Savinova T. Screening studies of POP levels in bottom sediments from selected lakes in the Paz watercourse. Report APN514.3665.01. Akvaplan-NIVA. Tromsø, Norway, 2007: 48 p.
31. Skotvold T., Wartena E., Rognerud S. Heavy metals and persistent organic pollutants in sediments and fish from lakes in Northern and Arctic regions of Norway. Report APN514.660.1. Akvaplan-NIVA. Tromsø, Norway, 1997: 97 p.
32. Allen-Gil S.M., Gubala C.P., Wilson R. Organochlorine pesticides and polychlorinated biphenyls (PCBs) in sediments and biota from four US Arctic lakes. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*. 1997, 33: 378–387.

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-2-198-216>  
УДК УДК 582.232 581.93



ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

ORIGINAL ARTICLE

## СООБЩЕСТВА ВОДОРΟΣЛЕЙ ВОДОЕМОВ ОАЗИСА ШИРМАХЕРА, ВОСТОЧНАЯ АНТАРКТИДА

С.В. СМЕРНОВА\*, О.Я. ЧАПЛЫГИНА, А.Ф. ЛУКНИЦКАЯ

*Ботанический институт им. В.Л. Комарова РАН, Санкт-Петербург, Россия*

\*SSmirnova@binran.ru

### Резюме

Континентальные водоемы антарктических оазисов содержат специфические сообщества водорослей. Целью исследования было изучение и описание различных типов сообществ водорослей континентальных водоемов оазиса Ширмахера (Земля Королевы Мод) и выявление их приуроченности к различным типам водоемов. Пробы были отобраны из 173 водных объектов: 151 со стоячей водой и 22 ручьев.

В результате проведенного исследования была выявлена разнообразная по видовому составу альгофлора. Основная часть выявленных таксонов была зафиксирована в сообществах водорослей бентоса, которые образуют маты и скопления разного цвета, толщины и структуры. В континентальных водоемах оазиса Ширмахера выделено 8 регулярно встречающихся типов бентосных сообществ водорослей, распределение которых зависит от типа водоема и глубины. Отмечены бедный видовой состав и низкая численность фитопланктона большинства исследованных озер оазиса, их зависимость от антропогенного фактора.

**Ключевые слова:** бентос, водорослевые маты, водорослевые пленки, планктон, Bacillariophyta, Charophyta, Chlorophyta, Cyanoprokaryota, Desmidiaceae, Dinoflagellata.

**Для цитирования:** Смирнова С.В., Чаплыгина О.Я., Лукницкая А.Ф. Сообщества водорослей водоемов оазиса Ширмахера, Восточная Антарктида // Проблемы Арктики и Антарктики. 2020. Т. 66. № 2. С. 198–216. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-2-198-216>.

Поступила 23.04.2020

После переработки 04.06.2020

Принята 09.06.2020

## ALGAL COMMUNITIES OF THE WATERBODIES OF SCHIRMACHER OASIS, EAST ANTARCTICA

SVETLANA V. SMIRNOVA\*, OLGA Y. CHAPLYGINA, ALIYA F. LUKNITSKAYA

*Komarov Botanical Institute RAS, Saint-Petersburg, Russia*

\*SSmirnova@binran.ru

### Summary

In continental waterbodies of Antarctic oases specific algal communities are forming. The structure and dominating complex of species of this communities due to different distance from the seashore and latitude, the composition of the constituent rocks, altitude and the presence in the past of periods of contact with sea water is unique for different oases. It may vary in different waterbodies within one oasis besides.

Aim of the research is to describe different types of algal communities from the continental waterbodies of Schirmacher Oasis and its confinement to the different types of waterbodies.

Samples were collected from 173 waterbodies: 151 with stagnant water and 22 streams.

During the study 64 species of Cyanoprokaryotes were found, and this group usually dominated in communities. Also 14 most frequent species of Chlorophyta, 12 most frequent species of Bacillariophyta, 6 species of desmid algae, 2 species of Xanthophyceae, 1 species of Eustigmatophyceae were noted in benthos. Usually resting stages and in one case — life cells of Golden algae (Chrysophyceae, Synurophyceae) were found in mats on the bottom of big lakes. Plankton algae in most of the waterbodies had very low abundance and diversity and were strongly influenced by trophic level. Benthic algal communities were much more diverse and abundant. Eight sustainable types of benthic algal communities were revealed in continental waterbodies of Schirmacher Oasis. Form, colour, and species composition of benthic films and mats strongly depended on temperature, conductivity and pH of the waterbody and its depth.

**Keywords:** algal films, algal mats, Bacillariophyta, benthos, Charophyta, Chlorophyta, Cyanoprokaryota, Desmidiaceae, Dinoflagellata, plankton.

**For Citation:** Smirnova S.V., Chaplygina O.Y., Luknitskaya A.F. Algal communities of the waterbodies of Schirmacher Oasis, East Antarctica. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2020, 66 (2): 198–216. [In Russian]. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-2-198-216>.

Received 23.04.2020

Revised 04.06.2020

Accepted 09.06.2020

### ВВЕДЕНИЕ

В континентальных водоемах Антарктиды в силу изолированности и уникальных климатических особенностей континента слагаются своеобразные водорослевые сообщества. Разные антарктические оазисы отличаются друг от друга удаленностью от берега моря и широтой, составом слагающих горных пород (что, в свою очередь, влияет на минеральный состав воды в водоемах), высотой над уровнем моря и наличием в прошлом периодов контакта с морской водой. Кроме того, многие оазисы расположены на значительном расстоянии друг от друга и кросс-контаминация видами водорослей между ними незначительна или отсутствует. Все это приводит к тому, что в каждом оазисе слагается свой неповторимый набор водорослевых сообществ, который внутри оазиса может варьировать от водоема к водоему.

На территории оазиса Ширмахера расположено более 200 стоячих и текущих водоемов, довольно сильно отличающихся друг от друга по степени близости к леднику, типу водного питания, pH, минерализации, глубине, максимальной температуре воды. Все эти параметры сильно влияют на набор видов водорослей, которые там обитают, поэтому альгофлора разных водоемов может сильно отличаться, что часто приводит к образованию собственных, неповторимых комплексов видов в разных типах водоемов.

Существует несколько флористических статей, посвященных разнообразию водорослей оазиса Ширмахера. Однако разнообразие типов водорослевых сообществ различных водоемов, их внешнего вида, комплексов доминирующих видов, их слагающих, и их приуроченность к различным гидрохимическим параметрам водоемов, на наш взгляд, описаны недостаточно полно.

К настоящему моменту в публикациях для водоемов оазиса Ширмахера в сумме отмечено 309 видов и внутривидовых таксонов водорослей: 179 видов и внутривидовых таксонов цианопрокариот (Cyanophyta/Сyanobacteria/Сyanoprokaryota), 64 вида диатомовых водорослей (Bacillariophyta), 46 видов зеленых водорослей (Chlorophyta), 11 видов и 3 внутривидовых таксона десмидиевых водорослей (Charophyta, Zygnematomphyceae, Desmiales), 4 вида желтозеленых водорослей (Ochrophyta, Xanthophyceae) и по одному виду динофитовых (Dinoflagellata) и золотистых водорослей (Ochrophyta, Chrysophyceae) [1–7].

Существует одна статья, посвященная анализу водорослевых сообществ оазиса Ширмахера, — в ней рассмотрены ручьи [2]. Было выделено 5 типов сообществ: А — черные корки на ярко освещенных поверхностях, периодически заливаемых водой, — 11 видов, доминант *Leptolyngbya frigida* (F.E. Fritsch) Anagnostidis et Komárek; В — частично затемненное пространство между камней — 8 видов, по большей части диазотрофы, доминант *Nostoc commune* Vaucher ex Bornet et Flahault; С — красно-коричневые и сине-зеленые маты на боковых и нижних поверхностях свободно расположенных крупных камней в местах, хорошо освещаемых солнцем и постоянно находящихся в воде. В таких матах насчитывалось до 6 видов, доминировала зеленая нитчатая водоросль *Uronema* sp. и цианопрокариота *Calothrix gracilis* F.E. Fritsch; D — плоские или с пальцеобразными выступами 0,5–2,5 см высотой войлочные скопления осцилляторий красно-коричневого до сине-зеленого и черного цвета на дне небольших неглубоких луж, в местах, всегда находящихся под водой. Они состояли из 13 видов с доминированием *Oscillatoria limosa* C. Agardh ex Gomont и *Leptolyngbya frigida*; E — пятна цианобактерий на прибрежных участках, иногда заливаемых водой, и в ямках от сдвинутых камней. Доминировали *Nostoc commune*, *Cosmarium laeve* Rabenhorst, *Uronema* sp. Наиболее типичными для различных водоемов оазиса являются виды цианопрокариот: *Nostoc commune* и представители родов *Oscillatoria*, *Phormidium*; в некоторых водоемах доминировали *Leptolyngbya frigida*, *L. fragilis* (Gomont) Anagnostidis et Komárek, *Anabaena* sp., *Nostoc commune*, *N. sphaericum* Vaucher ex Bornet et Flahault, *Oscillatoria tenuis* C. Agardh ex Gomont, *Pseudanabaena limnetica* (Lemmermann) Komárek, также зеленые и диатомовые водоросли. В куртинах мха, растущих по берегам ручьев, доминировала *Stigonema minutum* Hassall ex Bornet et Flahault, кроме нее встречались *Nostoc commune* и *Gloeocapsa* spp.

В данной статье описано разнообразие типов водорослевых сообществ различных континентальных водоемов оазиса Ширмахера и их приуроченность к различным типам водоемов.

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Оазис Ширмахера — район центральной части берега Принцессы Астрид (Земля Королевы Мод, Антарктида), представляет собой свободный ото льда участок коренных пород 19,55 км длиной, 3,35 км шириной, площадью 34 км<sup>2</sup> [8], отделенный от моря Лазарева шельфовым ледником. Максимальная высота — 228 м н.у.м. Климат оазиса с преобладанием признаков континентальности [9], средняя годовая температура воздуха около –10 °С, среднее годовое количество осадков 250–300 мм. Сплошного снежного покрова нет, так как большую часть выпадающего снега сдувает ветрами. В летнее время воздух прогревается до +6 °С, скальная поверхность иногда нагревается до +26,5 °С. Относительная влажность воздуха в среднем за год не превышает 52 % [10]. В оазисе расположены две круглогодичные полярные

станции — российская станция Новолазаревская на берегу оз. Глубокое, индийская станция Мейтри на берегу оз. Зуб и функционирующий летом туристический лагерь на берегу оз. Подпрудное.

Оазис находится ниже континентального ледника, талыми водами которого и питается большинство водоемов, но выше шельфового. Классификация озер приведена по D.A. Hodgson [11]. Вдоль южного края оазиса расположено около 16 приледниковых озер. Большая часть озер оазиса находится в центре и со всех сторон окружена сушей, многие из них открытые (проточные) и сообщаются ручьями с ледником или приледниковыми озерами, а также между собой. Ближе к северному краю оазиса встречаются небольшие бессточные озера, не имеющие постоянного притока воды от ледника и пополняющиеся только редкими осадками в виде снега, в основном зимой. Их площадь и глубина существенно сокращаются в течение летнего сезона. На поверхности шельфового льда у северного края оазиса находятся около 15 эпишельфовых озер. Вода во многих приледниковых и эпишельфовых водоемах мутная из-за попадающих в нее вместе с талой водой частичек глины. Самое глубокое озеро оазиса — оз. Глубокое, глубина 34,5 м, самое большое по площади — оз. Зуб (Приадаршины) 0,5 км<sup>2</sup> [8].

Гидрологические исследования показали, что кондуктивность воды приледниковых озер в среднем составляет 5,5 мкСм/см, а в озерах, окруженных сушей, — до 546,44 мкСм/см; pH варьирует в пределах (4,8)–6–8,8 и увеличивается с повышением кондуктивности [12, 13].

Проточные озера с питанием от ледника богаты ионами Ca<sup>2+</sup>, HCO<sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> и SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, а большая часть окруженных сушей и эпишельфовых — Na<sup>+</sup> и Cl<sup>-</sup> [2, 12]. Содержание биогенов от озера к озеру значительно варьирует [13], большинство озер олиготрофны [14, 15], а концентрация хлорофилла *a* во многих озерах низка [13]. Приток биогенных элементов происходит главным образом за счет птиц. Трофность незначительно повышена в тех озерах, на берегах которых расположены гнезда поморников (озера Западное, О43, Длинное, Зуб, О22, Поморник), и в различной степени в тех, которые испытывают антропогенное воздействие, то есть на берегах которых расположены станции и лагерь (озера Подпрудное, Зуб, Глубокое).

Пробы были собраны в континентальных водоемах в окрестности станции Новолазаревская на протяжении летнего сезона и начала южнополярной осени — с 9 декабря 2018 г. по 6 апреля 2019 г. Из близких к станции водоемов пробы были собраны по 3–4 раза за сезон, из удаленных от станции — по 1–3 раза. Всего была собрана 491 проба. Координаты точек сбора были зафиксированы с помощью GPS-навигатора Garmin eTrex.

Разница между большими и маленькими озерами и между маленькими озерами и лужами условна, так как их площадь меняется (некоторые даже могут полностью высыхать) в зависимости от водного питания, которое, в свою очередь, зависит от скорости таяния ледника и количества осадков и может меняться год от года. Нами была принята условная нижняя граница в 20 тыс. м<sup>2</sup> для больших озер и в 5 тыс. м<sup>2</sup> для маленьких.

Отбор проб фитопланктона проводился при помощи ведра и планктонной сети Апштейна с размером ячеек 70 мкм в диаметре. Планктон из наиболее близких к станции озер (Верхнее (Питьевое), Поморник, Смирнова, Геодезистов, Глубокое) был собран три раза за сезон — 1–2 января, 30 января и 24 февраля, из остальных озер — по

два раза. Для грубого подсчета обилия водорослей планктон зачерпывался ведром объемом 5 л и проливался через сетку (по 75 л на пробу), полученный осадок сгущался до объема 15 мл. Количество клеток подсчитывалось в одной капле воды — 0,05 мл. Пробы фитобентоса были отобраны в стерильные контейнеры объемом 25 мл, снабженные индивидуальной стерильной ложечкой. Пробы фиксировались формалином (40 %) с конечной концентрацией 2 %. Сбор водорослей, обитающих на глубине, проведен с появлением на водоемах прочного льда (середина марта) методом бурения лунок, в которые были опущены пробоотборник и видеокамера GoPro Hero 3 в водонепроницаемом боксе для съемки глубоководных сообществ водорослей.

В период исследования в местах сбора проб проводилось фотографирование водоемов, отмечались цвет и структура водорослевых скоплений, измерялись температура, удельная электропроводность (УЭП) и водородный показатель (рН) воды. Для измерения рН воды использовали карманный рН-метр марки НМ digital РН-80. Для измерения температуры и УЭП использовали кондуктометр-термометр марки НМ digital СОМ-80. Идентификацию водорослей проводили на световом микроскопе МИКМЕД-6 вар. 7 с использованием планхроматических объективов 40/0,65 и 100/1,25. С каждой пробы было изготовлено и просмотрено не менее двух препаратов. Оценки обилия приводили по С.М. Вислоуху [16]. В бентосных сообществах виды считались доминантными, если в каждом поле зрения микроскопа при использовании объектива 40/0,65 и покровного стекла 20×20 мм было встречено более чем по одной клетке. Фотографирование свежих проб на станции Новолазаревская сделано через окуляр микроскопа цифровым фотоаппаратом Canon PowerShot A460. Фотографии фиксированных проб в Ботаническом институте сделаны на световом микроскопе Zeiss AxioImager A1 с применением контраста Номарского и системой документации изображения AxioCam MRc5.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

В окрестностях ст. Новолазаревская было собрано 490 проб. Всего было обследовано 173 водных объекта: 17 больших озер (приледниковые: О44, Подпрудное, О35, Смирнова, Верхнее (Питьевое); окруженные сушей: оз. Западное, О43, Искристое, Длинное, О26, О22, Зуб, Мелкое, Поморник, Глубокое; эпিশельфовые: Зигзаг, Ожидания) и 30 маленьких озер, 104 лужи и 22 ручья (рис. 1).

Температура водных объектов в период сбора проб колебалась от 0 до +19 °С, в больших озерах в разгар летнего сезона достигала +7... +13 °С, в приледниковых и эпিশельфовых водоемах, как правило, не поднималась выше +6 °С, некоторые из них так и не освободились полностью ото льда за летний сезон; отдельные мелкие бессточные лужи прогревались до +14... +19 °С. Показатель рН варьировал от 6 до 12; кондуктивность от 3,5 до 3500 мкСм/см. Приледниковые и окруженные сушей открытые водоемы имели невысокую кондуктивность (как правило, не выше 50 мкСм/см) и слабощелочной рН (7,5–8,5). Бессточные водоемы отличались высокими значениями рН (9,5 и выше) и кондуктивности (300 мкСм/см и выше). Самые высокие показатели были отмечены в двух лужах, расположенных к северо-западу от озера Зуб: температура в разгар сезона достигала +19 °С, кондуктивность 1925–3500 мкСм/см, рН 10,1–11,7.

В результате проведенного исследования в водоемах оазиса Ширмахера выявлено 64 вида цианопрокариот, 15 наиболее распространенных в различных водоемах оазиса видов зеленых водорослей, 12 наиболее распространенных видов диатомовых

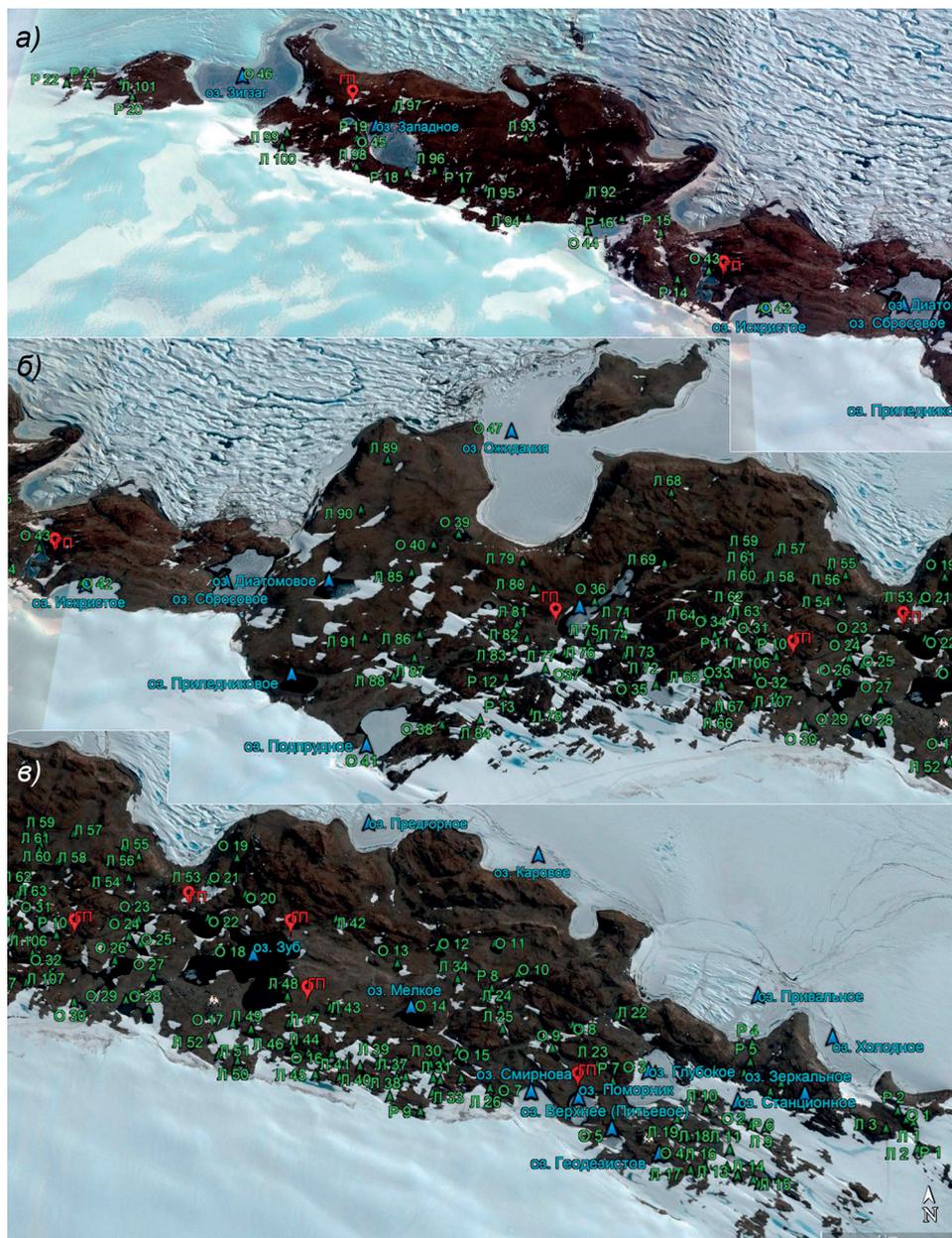


Рис. 1. Карта озиса Ширмахера и обследованные водоемы:

*a* — западная часть озиса; *б* — центральная часть озиса; *в* — восточная часть озиса. О — озера, Л — лужи, Р — ручьи, ГП — гнезда поморников

Fig. 1. Map of the Schirmacher oasis and waterbodies investigated:

*a* — western part of the oasis; *б* — central part of the oasis; *в* — eastern part of the oasis. O — lakes, Л — ponds, Р — streams, ГП — Skujas' nests

водорослей, шесть видов десмидиевых водорослей, два вида динофитовых, два вида желтозеленых, один вид эустигматофитовых. В матах на дне крупных водоемов были обнаружены стоматоцисты и, в одном случае, живые клетки золотистых. Несмотря на то, что десмидиевые водоросли в водоемах были представлены всего лишь 6 видами, иногда в некоторых сообществах они являлись доминантами.

В небольших, плотно прилегающих к леднику и, соответственно, плохо прогреваемых приледниковых лужах водорослей либо вообще не было отмечено, либо встречались представители зеленых одноклеточных водорослей. Самые богатые и разнообразные водорослевые сообщества были обнаружены в окруженных сушей водоемах. Водорослевые сообщества крупных приледниковых озер, площадь поверхности соприкосновения которых с ледником невелика (например, озера Верхнее (Питьевое), Подпрудное), и окруженных сушей проточных озер в целом были схожи между собой. Они отличались от бессточных водоемов с высокой кондуктивностью комплексом доминирующих видов. В эпишельфовых озерах заметных невооруженному глазу водорослевых скоплений не наблюдалось.

### Фитопланктон

Планктонные водоросли были обнаружены в больших и средних проточных озерах, вода в которых не была замутнена частичками глины (озера Западное, О43, Подпрудное, Длинное, О35, О34, О31, О22, О21, Зуб, Смирнова, Поморник, Глубокое, Верхнее (Питьевое), Геодезистов). В бессточных озерах с высокой кондуктивностью и мелких водоемах планктонные водоросли не были обнаружены. Фитопланктон большинства антропогенно нарушенных озер оазиса Ширмахера в летний период отличался крайне низкими показателями обилия (5–100 кл./л) и разнообразия водорослей (всего 8 видов, по 2–4 вида в каждом отдельном озере). В фитопланктоне почти всех озер Ширмахера была встречена зеленая водоросль *Gonium* sp., довольно часто обнаруживались два вида динофитовых водорослей (*Dinoflagellata*) *Gymnodinium* sp. 1 и *Gymnodinium* sp. 2, реже — десмидиевые водоросли *Cosmarium laeve* и *Cylindrocystis brebissonii* (Menegh ex Ralfs) De Bary (рис. 2). В конце летнего сезона десмидиевые водоросли встречались чаще, а в озерах Верхнее (Питьевое) и Поморник стали доминирующей группой. В озерах, которые испытывали антропогенную нагрузку разной интенсивности или на берегах которых были отмечены гнезда поморников, отмечено появление цианопрокариот *Aphanocapsa* sp., *Pseudoanabaena* sp. и *Anabaena* sp.

С наличием на берегу гнезд поморников или антропогенной нагрузки (и, соответственно, увеличением трофности) отмечено повышенное обилие планктонных водорослей. Так, в озерах Зуб и Подпрудное количество клеток планктона ненамного превышало таковое в большинстве озер (160–180 кл./л) и сравнимо с теми, на берегах которых выводили птенцов поморники. Самым высоким обилием планктонных водорослей отличалось озеро Глубокое, испытывающее сильное антропогенное влияние: в середине декабря  $\approx 25000$  кл./л, в конце февраля  $\approx 64000$  кл./л, доминирующим видом был *Gonium* sp. Примерно с середины сезона (конца января) помимо *Gonium* sp. в планктоне озера появились десмидиевые водоросли и цианопрокариоты. В планктоне озера, расположенного на самом восточном краю оазиса, в которое зимой сливают сточные воды, отсутствовали типичные для оазиса планктонные водоросли, отмечены только единичные коккоидные синезеленые водоросли и гетеротрофные организмы.

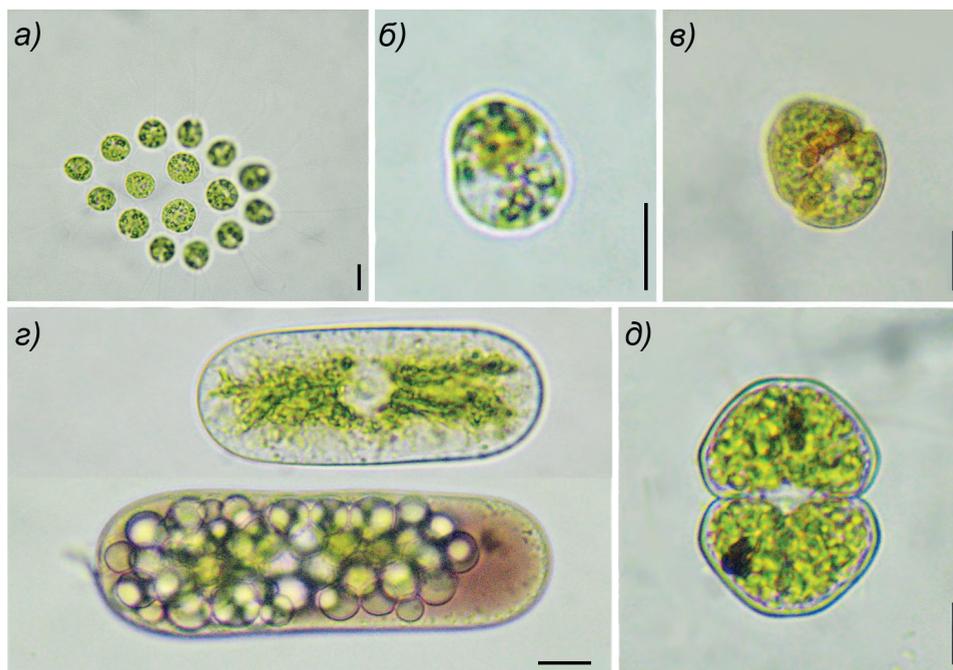


Рис. 2. Типичные планктонные водоросли озер оазиса Ширмахера:

*a* — *Gonium* sp.; *б* — *Gymnodinium* sp. 1; *в* — *Gymnodinium* sp. 2; *г* — *Cylindrocystis brebissonii*; *д* — *Cosmarium laeve*. Масштабная линейка — 10 мкм

Fig. 2. Typical planktic algae of Scirmacher oasis:

*a* — *Gonium* sp.; *б* — *Gymnodinium* sp. 1; *в* — *Gymnodinium* sp. 2; *г* — *Cylindrocystis brebissonii*; *д* — *Cosmarium laeve*. Scale bar — 10 mkm

### Фитобентос

В мелких приледниковых лужах и ручьях разнообразие водорослей было невысоко. В них под небольшим слоем песка встречались нитчатки *Lyngbya antarctica* Gain, *L. fritschii* Anagnostidis, *L. martensiana* Meneghini ex Gomont и *Microcoleus* cf. *autumnalis* (Gomont) Strunecky et al., *Phormidium corium* Gomont ex Gomont и другие нитчатые цианопрокарियोты (таблица, тип № 1). В некоторых случаях были отмечены только зеленые водоросли (cf. *Chlamydomonas* sp.).

В лужах, находящихся недалеко от ледника и питающихся его талой водой, и в некоторых озерах, в основном холодных приледниковых, на камнях и песке были распространены тонкие ровные или слегка бугристые пленки коричневого или черного цвета, состоящие из переплетенных между собой тонких нитчатых с вкраплением одноклеточных цианопрокарियोтов и зеленых водорослей (рис. 3а). Коричневую и черную окраску им придает доминирование *Gloeocapsopsis tagma* (Brébisson) Komárek et Anagnostidis и *Phormidesmis nigrescens* (Komárek) Raabová et al. (рис. 3б). Схожий состав доминантов отмечен в скоплениях водорослей, образующих игольчатую форму и обитающих на вертикальных поверхностях камней и скал в прибрежной зоне проточных низкокондуктивных озер. Иногда на поверхности таких сообществ заметны кустистые скопления *Coelodesmis* sp. (таблица, тип № 2).

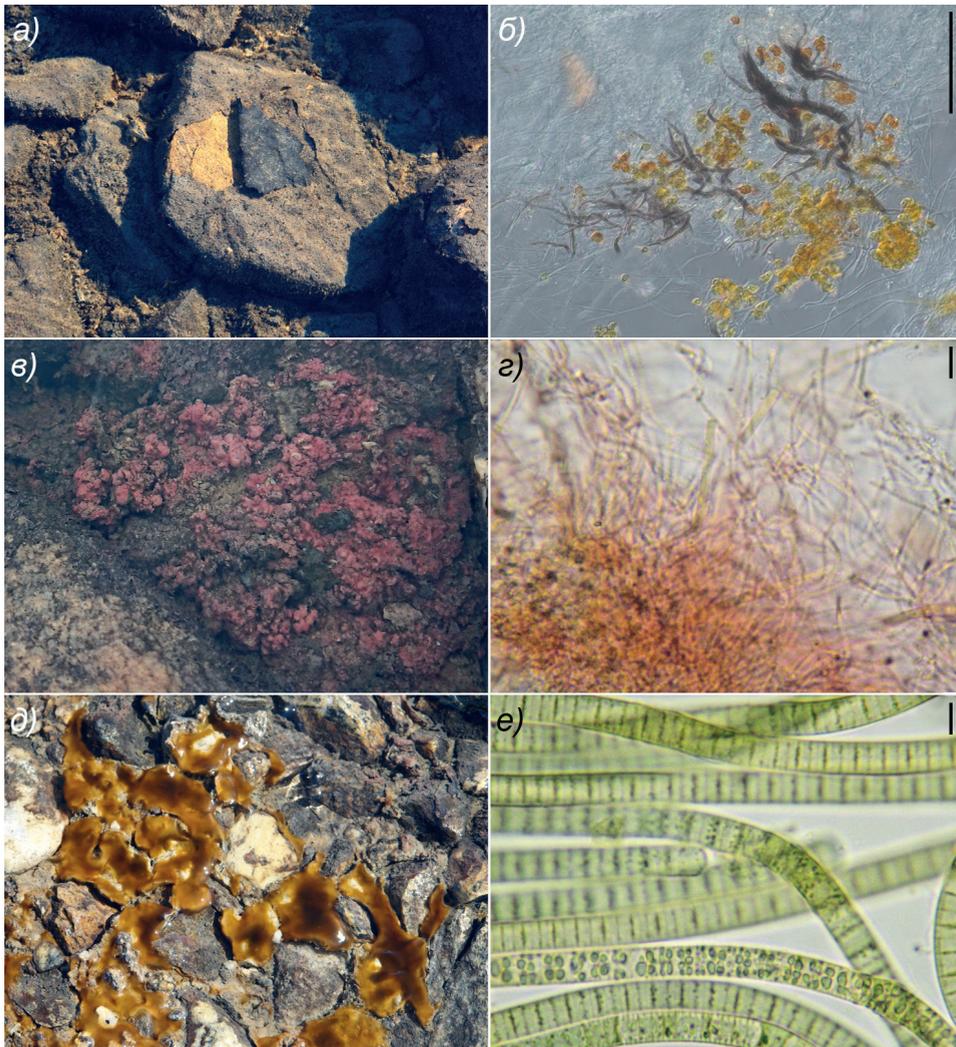


Рис. 3. Водорослевые сообщества мелких ручьев и луж:

*а, б* — тонкие водорослевые пленки в низкоминерализованных лужах с доминированием *Gloeocapsopsis magma*, *Phormidesmis nigrescens* и *Leptolyngbya* spp.; *в, г* — розоватые бугорчатые маты в ручье с доминированием *Leptolyngbya frigida*, *L. cf. perelegans*, *Wilmottia murrayi*, *Phormidium cf. corium*; *д, е* — волокнистые темно-оливковые скопления *Oscillatoria cf. sancta* в ручье. Масштабная линейка — 10 мкм

Fig. 3. Algal communities of shallow streams and pools of Scirmacher oasis:

*а, б* — thin algal films in low-mineralized puddles dominated by *Gloeocapsopsis magma*, *Phormidesmis nigrescens* and *Leptolyngbya* spp.; *в, г* — pinkish tuberous mats in a creek dominated by *Leptolyngbya frigida*, *L. cf. perelegans*, *Wilmottia murrayi*, *Phormidium cf. corium*; *д, е* — fibrous dark olive clusters of *Oscillatoria cf. sancta* in a creek. Scale bar — 10 mkm

Во временных водоемах и водотоках, образованных талой водой, а также в прибрежной зоне озер были обнаружены маты по структуре плотные, гладкие или бугорчатые, сверху бледно-коричневые или розоватые до бордового, снизу сине-зеленые (рис. 3в). В верхней розовой части таких матов доминировали тонкие нитчатые цианопрокариоты *Leptolyngbya frigida* и *L. cf. perelegans* Anagnostidis et Komárek, *Wilmottia murrayi* (W. et G.S. West) Strunecký et al., *Phormidium cf. corium* Gomont ex Gomont и другие виды рода *Phormidium*, среди которых изредка встречались одиночные экземпляры *Calothrix* sp. и *Hassallia* sp. (рис. 3з). Нижнюю сине-зеленую часть мата составляли *Phormidium cf. autumnale* (Agardh) Trevisan ex Gomont и виды родов *Lyngbya* Agardh ex Gomont, *Oscillatoria* Vaucher ex Gomont и *Phormidium* Kützing ex Gomont (таблица, тип № 3). В тех же мелководных ручьях рядом с описанными выше матами часто можно было заметить волокнистые скопления темно-оливкового или коричневого цвета (рис. 3д). Они состояли практически исключительно из *Oscillatoria sancta* Kützing ex Gomont (рис. 3е) (таблица, тип № 4).

В бессточных озерах с повышенной минерализацией у берега встречались тонкие черные пленки, внешне и по составу видов водорослей похожие на черные пленки из временных водоемов (таблица, тип № 2). На более глубоких участках можно было встретить довольно толстые (до 6 см) маты, имеющие игольчатую или ячеистую структуру. Верхняя часть таких матов, как правило, имела светло-коричневую, коричнево-оранжевую или желто-оранжевую окраску, состояла из тонких нитчатых цианопрокариот рода *Leptolyngbya* Anagnostidis et Komárek. Нижняя часть — темно-зеленая или темно-сине-зеленая, состояла из представителей *Lyngbya antarctica*, *L. fritschii*, *L. martensiana* и *Microcoleus cf. autumnalis*, либо из *Leptolyngbya* spp., *Nostoc cf. punctiforme* с добавлением *Phormidium* spp. (рис. 4б) (таблица, тип № 5). Часто в таких водоемах на дне у берега или поверх матов в большом количестве встречались субшаровидные довольно крупные (до 5 мм в диаметре) темно-оливковые колонии *Nostoc sphaericum* (рис. 4а) (таблица, тип № 6).

В водоемах различных типов в обилии встречались хламидомонады в пальмелоидном состоянии, часто с гранулами красного пигмента; подвижные клетки отмечались гораздо реже. Клетки *Scotinosphaera paradoxa* Klebs встречались обычно в матах, образованных *Leptolyngbya* sp. на дне некоторых озер. Также в матах разных водоемов встречались ярко-оранжевые клетки эустигматофитовой водоросли *Chlorobotrys cf. regularis* (West) Bohlin. Во многих, особенно в высокоминерализованных водоемах отмечены нитчатая стадия и начальная стадия образования пластины *Prasiola* sp. Из диатомовых водорослей наиболее часто в матах встречались *Hantzschia amphioxys* (Ehrenberg) Grunow, *Pinnularia borealis* Ehrenberg и *Stauroneis anceps* Ehrenberg. Довольно широко были распространены стоматоцисты золотистых водорослей.

Богатые по видовому разнообразию водорослевые маты, состоящие в начале сезона из коротких иголок, а ближе к концу — длинных тяжей ярко-зеленого и ярко-оранжевого цвета, были обнаружены в толще и на поверхности воды двух небольших бессточных озер с щелочным рН и высокой проводимостью (1925–3500 мкСм/см), расположенных к северо-западу от оз. Зуб, у северного края оазиса (J155 и J156) (рис. 4в, 4з). Зеленые участки матов состояли из зеленых водорослей *Binuclearia* sp. и *Prasiola* sp., бледно-оранжевые участки — из цианопрокариот *Geitlerinema* sp., *Phormidesmis* sp., колоний *Aphanothece cf. caldariorum* P. Richter, *Chamaesiphon*

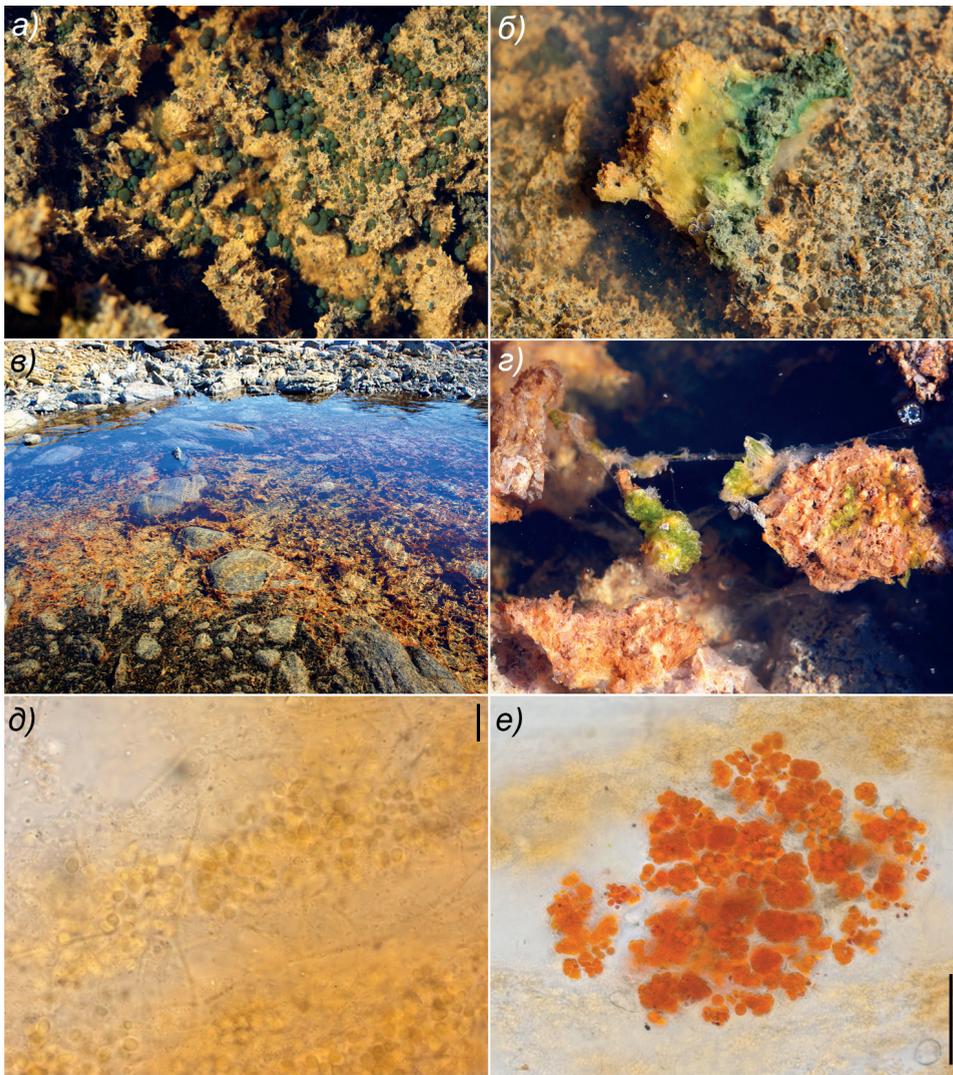


Рис. 4. Водорослевые сообщества бессточных водоемов:

*a, б* — игольчатые маты с *Nostoc sphaericum* в озере к северо-западу от оз. Длинное; *в* — небольшое бессточное озерцо к северо-западу от оз. Зуб, декабрь; *г* — небольшое бессточное озерцо к северо-западу от оз. Зуб, зеленые и оранжевые маты на поверхности, конец января; *д* — *Chamaesiphon subglobosus*, *Geitlerinema* sp.; *е* — *Tetracystis* sp. и *Chlorobotrys* cf. *regularis*. Масштабная линейка — 10 мкм

Fig. 4. Algal communities of closed waterbodies:

*a, б* — pinnacle mats with *Nostoc sphaericum* in the lake to the NW from lake Dlinnoye; *в* — small closed pond to the NW from lake Zub; *г* — small closed pond to the NW from lake Zub, green and orange algal mats on the surface; *д* — *Chamaesiphon subglobosus*, *Geitlerinema* sp.; *е* — *Tetracystis* sp. and *Chlorobotrys* cf. *regularis*. Scale bar — 10 mkm

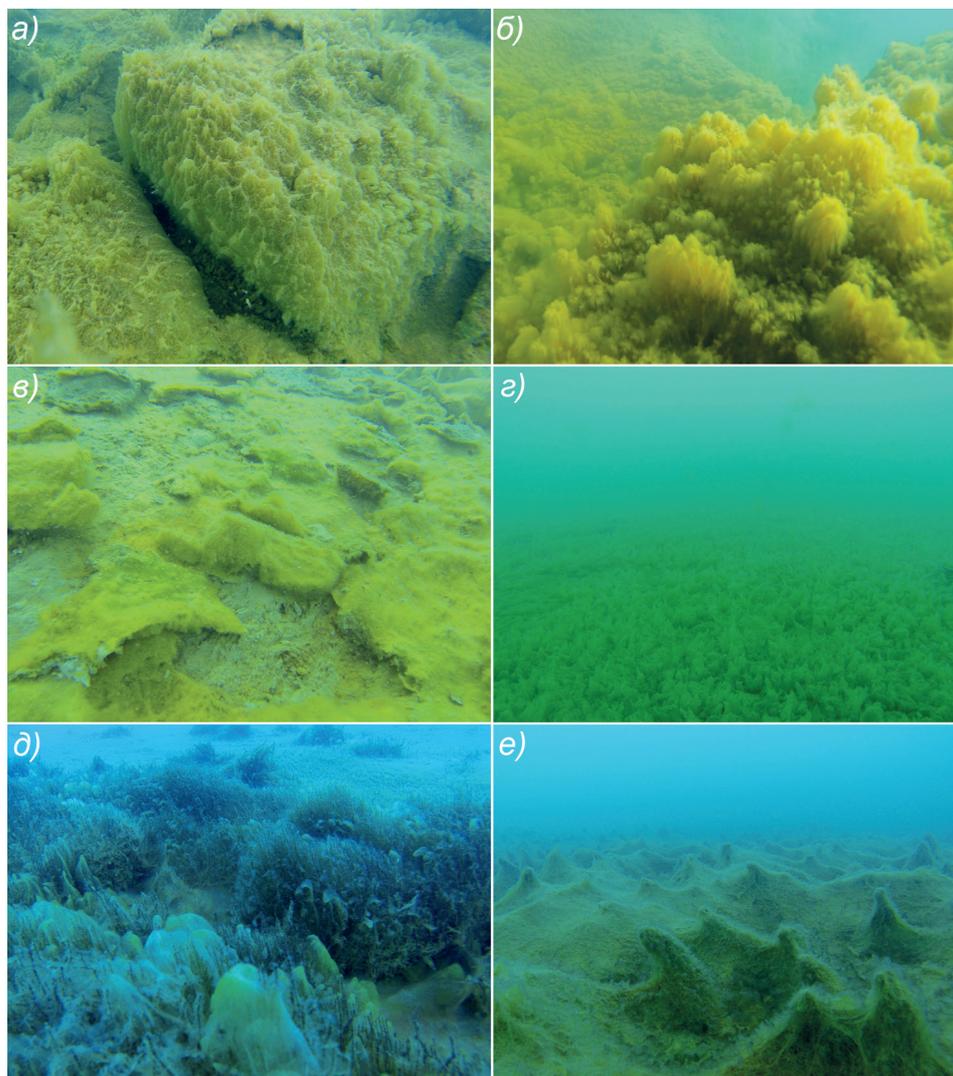


Рис. 5. Глубоководные маты:

*a* — оз. Длинное, глубина 5 м; *б* — оз. к северу от оз. Зуб, глубина 3 м; *в* — оз. Верхнее (Питьевое), глубина 10 м; *г* — оз. Подпрудное, глубина 10 м; *д* — оз. к югу от г. Приметной, под однолетним льдом, глубина 5,5 м; *е* — оз. к югу от г. Приметной, под многолетним льдом, глубина 4,5 м

Fig. 5. Deep-water mats:

*a* — lake Dlinnoye, depth 5 m; *b* — lake to the north from the lake Zub, depth 3 m; *в* — lake Verkhneye (Pit'evoye), depth 10 m; *г* — lake Podprudnoye, depth 10 m; *д* — lake to the South from mount. Primetnaya, under annual ice cover, depth 5,5 m; *e* — lake to the South from mount. Primetnaya, under perennial ice cover, depth 4,5 m

*subglobosus* (Rostafinski) Lemmermann (рис. 4д), более ярко-оранжевые — из скопления зеленой водоросли *Tetracystis* sp. и эустигматофитовой *Chlorobotrys* cf. *regularis* (рис. 4е) (таблица, тип № 7). В придонных участках мата были встречены небольшие скопления диатомовых водорослей *Luticola muticopsis* и *Hantzschia amphioxys*. В некоторых частях мата, имевших более темный оттенок, преобладала цианопрокариота *Gloeocapsopsis magma*. По краям водоемов на дне были отмечены темно-оливковые скопления колоний *Nostoc sphaericum*.

В большинстве крупных приледниковых (с небольшой площадью поверхности контакта с ледником) и окруженных сушей проточных озер на глубинах от 2,5 до 25 м обнаружены донные водорослевые сообщества бледно-зеленого цвета, полупрозрачные, слизистые на ощупь, легко распадающиеся в руках, на срезе тонкослоистые. На более мелководных участках верхние слои были окрашены в коричнево-оранжевый цвет. Толщина таких матов — 1,5–6 см или более. Поверхность могла иметь игольчато-сетчатую структуру, как в оз. Длинное (рис. 5а); быть в виде ребристых столбцов, как в озере к северу от оз. Зуб (О21) (рис. 5б); почти гладкой, как, например, в западной части оз. Западное, озерах Зуб и Верхнее (Питьевое) (рис. 5в); или как в центральной части оз. Западное, оз. Подпрудное, безымянном озере к западу от оз. Искристое (О43) и оз. Поморник на глубинах 8–25 м — в виде полупрозрачных иголок (рис. 5г). Их основу составляют десмидиевые водоросли: *Cosmarium laeve*, реже — *Staurostrum* sp. и в одном случае *Actinotaenium cucurbitinum* (Bisset) Teiling и выделяемая ими слизь (таблица, тип № 8). Кодоминантами были цианопрокариоты *Leptolyngbya* spp., *Phormidesmis priestleyi* (F.E. Fritsch) Komárek et al., *Plectonema* sp., *Stigonema* cf. *mesentericum* Geitler. Чем больше в таком мате содержалось нитчатых цианопрокариот, тем плотней он был на ощупь. Изредка встречались обрывки нитей cf. *Trichormus* sp. Под этими матами в песке находились пустые створки диатомовых водорослей, обычно представителей родов *Humidophila* и *Stauroneis*. В оз. Верхнее (Питьевое) на глубине 10 м (рис. 5в) в матах доминантом была зеленая водоросль *Schizochlamys* sp. с участием нитчатых цианопркариот *Plectonema* sp. и *Leptolyngbya* sp. и колоний золотистых водорослей *Dinobryon* sp. В восточной части озера, расположенного к югу от г. Приметной (О35), под однолетним льдом на глубине 5,5 м были отмечены куртины мха, местами покрытые полупрозрачными скоплениями *Cosmarium laeve* (рис. 5г), а в центральной части озера под многолетним льдом на глубине 4,5 м — водорослевые сообщества в виде крупных конусов, пробы которых собрать не удалось ввиду их большой плотности (рис. 5д). В других приледниковых озерах, покрытых многолетним льдом, глубоководные сообщества либо отсутствовали, либо были недоступны из-за большой толщины льда.

### ОБСУЖДЕНИЕ

В результате изучения видового разнообразия водорослей и образуемых ими сообществ бентоса континентальных водоемов оазиса Ширмахера выявлена довольно разнообразная альгофлора и многообразие водорослевых сообществ. Это явление связано с тем, что на территории оазиса представлены многочисленные водоемы и ручьи, отличающиеся друг от друга гидрохимическими показателями воды — температурой, кондуктивностью, рН. Водоросли приурочены к этим параметрам, а также на их развитие влияет наличие или отсутствие течения, освещенность, глубина, минеральный состав воды. Учитывая вышеперечисленные факторы, нами выделены 8 типов устойчивых бентосных сообществ водорослей, отличающихся друг от друга

## Основные типы водорослевых сообществ и их приуроченность к различным типам водоемов оазиса Ширмахе́ра

C.B. СМІРНОВА и др.

S.V. SMIRNOVA et al.

Table

## The main types of algal communities and their confinement to various types of waterbodies of the Schirmacher Oasis

№	Внешний вид сообщества	Виды-доминанты	Тип водоема	Кондуктивность, мксм/см	pH	Максимальная температура, °C
1	Песок, на поверхности скрепленный нитчатыми водорослями в тонкий слой	<i>Lyngbya antarctica</i> , <i>L. fritschii</i> , <i>L. marteniana</i> и <i>Microcoleus</i> cf. <i>autumnalis</i> , <i>Phormidium corium</i>	Приледниковые лужи	7–39	6,9–8	8,5–9
2	Тонкие ровные или слегка бугристые пленки или короткие иголки коричневого или черного цвета	<i>Gloeocapsopsis magna</i> , <i>Phormidismis nigrescens</i> , <i>Coelodesmis</i> sp.	Лужи недалеко от ледника, связанные с ним ручьями, и приледниковые озера, имеющие большую площадь контакта с ледником	3,5–29(401)	7,5–8 (8,7)	7–12
3	Маты плотные, гладкие или бугорчатые, сверху бледно-коричневые или розоватые до бордового, снизу синие-зеленые	<i>Leptolyngbya frigida</i> и <i>L. cf. perelegans</i> , <i>Wilmotia mirgayi</i> , <i>Phormidium</i> cf. <i>corium</i> , <i>Ph. cf. autumnale</i> , <i>Lyngbya</i> spp., <i>Oscillatoria</i> spp., <i>Oscillatoria sancta</i>	Временные ручьи и проточные лужи талой воды, проточные озера (глубина 1–20 см)	8–93(186)	7,3–8,6	7,5–11(16)
4	Волокнистые скопления темно-оливкового или коричневого цвета	<i>Leptolyngbya</i> spp., <i>Lyngbya antarctica</i> , <i>L. fritschii</i> , <i>L. marteniana</i> и <i>Microcoleus</i> cf. <i>autumnalis</i> , <i>Nostoc</i> cf. <i>punctiforme</i> , <i>Phormidium</i> spp., <i>Nostoc sphaericum</i>	Временные ручьи и проточные лужи талой воды	8–93(186)	7,3–8,6	7,5–11(16)
5	Толстые маты, имеющие игольчатую или ячеистую структуру, сверху светло-коричневые, коричнево-оранжевые или желто-оранжевые, снизу темно-зеленые или темно-синие-зеленые	<i>Leptolyngbya</i> spp., <i>Lyngbya antarctica</i> , <i>L. fritschii</i> , <i>L. marteniana</i> и <i>Microcoleus</i> cf. <i>autumnalis</i> , <i>Nostoc</i> cf. <i>punctiforme</i> , <i>Phormidium</i> spp., <i>Nostoc sphaericum</i>	Бессточные озера	(153)300–933(1684)	7,7–9,8	11–16
6	Круглые или суб-шаровидные темно-оливковые колонии	<i>Bimolecularia</i> sp., <i>Prasiola</i> sp., <i>Geitlerinema</i> sp., <i>Phormidismis</i> sp., <i>Aphanothece</i> cf. <i>caldariorum</i>	Бессточные озера	300–933 (1684)	7,7–9,8	11–16
7	Длинные тяжи ярко-зеленого и ярко-оранжевого цвета	<i>P. Richter</i> , <i>Chamaesiphon subglobosus</i> , <i>Tetracystis</i> sp., <i>Chlorobaryx</i> cf. <i>regularis</i>	Бессточные озера	1925–3500	10,1–11,7	14–19
8	Маты бледно-зеленого цвета, полупрозрачные, слизистые на ощупь, легко распадающиеся в руках, на срезе тонкостолстые, толщиной 1,5–6 см	<i>Cosmarium laeve</i> , <i>Staurastrum</i> sp., <i>Actinotaenium sucirbitinum</i> , <i>Leptolyngbya</i> spp., <i>Phormidismis priestleyi</i> , <i>Plectonema</i> sp., <i>Stigonema cf. mesentericum</i> , <i>Humidophila</i> sp., <i>Stauroneis</i> sp., <i>Schizochlamys</i> sp.	Глубокие проточные озера, окруженные сушей или имеющие небольшую площадь контакта с ледником (глубина 2,5–25 м)	6–104	7,1–9	7,5–13

внешним видом и набором видов-доминантов и приуроченных к определенным типам водоемов (см. табл.). Кроме этих 8 типов встречались и другие водорослевые маты и пленки, но четкой связи их внешнего вида с видовым составом и привязки к конкретным типам водоемов нами не выявлено.

Гидрохимические показатели водоемов оазиса, такие как температура, проводимость и рН, могут в большей или меньшей степени меняться в течение сезона, так как зависят от погодных факторов (поступления в водоемы воды от таяния ледника, наметенных за зиму локальных сугробов или снегопадов в летнее время). Однако определенная связь типов водоемов и указанных параметров имеется — водоемы, расположенные ближе к континентальному леднику, обычно имеют более низкую температуру и проводимость, а вот в далеких от ледника бессточных водоемах проводимость и температура заметно выше. Не столь отчетливую связь с близостью к леднику имеет рН, но в бессточных озерах этот показатель обычно выше, чем в проточных.

Выявленные нами максимальные значения рН и проводимости значительно выше отмеченных ранее в водоемах оазиса [12, 13] (рН 11,7 против 8,8 и проводимость 3500 мкСм/см против 546,44 мкСм/см), что связано не с резкими повышениями этих значений в исследованных водоемах, а с включением в наш анализ проб из маленьких бессточных водоемов, не обследованных ранее другими исследователями (Л55 и Л56). Внешний вид их водорослевых сообществ отличался от тех, что были обнаружены в водоемах с более низкими значениями рН и проводимости, но виды, доминировавшие в них (кроме *Chlorobotrys cf. regularis*), ранее были отмечены для этого оазиса [1–7].

Фитопланктон водоемов оазиса оказался бедным как по видовому составу, так и по численности водорослей. Выявлено 8 видов водорослей — типичных обитателей планктона. Отмечено антропогенное влияние на состав и численность планктонных водорослей, так как в испытываемом сильное антропогенное влияние оз. Глубокое численность клеток планктонных водорослей была заметно выше, чем в других озерах. В то же время бентосные мелководные сообщества этого озера по внешнему виду и составу видов водорослей были схожи с таковыми в большинстве крупных проточных озер оазиса.

Описанные нами сообщества водорослей ручьев (см. табл., тип сообщества № 4) сходны с типом сообществ D с доминированием *Oscillatoria limosa* и *Leptolyngbya frigida*, описанных в работе К.Д. Pandey с соавторами [2]. Однако в этой статье «скопления осцилляторий красно-коричневого до сине-зеленого и черного цвета» отнесены к одному типу. Мы же хотим подчеркнуть, что это два разных, четко отличающихся по цвету, структуре и составу доминантов типа сообществ — (1) розоватые до бордового, гладкие или с пальцеобразными выростами, с доминированием *Leptolyngbya* (см. рис. 3в) и (2) темно-оливковые волокнистые скопления *Oscillatoria sancta* (см. рис. 3д). *Oscillatoria limosa*, отмеченная в [2] и *O. sancta*, выявленная нами, — морфологически схожие виды и отличаются друг от друга только наличием у *O. sancta* калиптры (выrost в виде колпачка на завершающей клетки трихома). В нашем материале нити с выраженными калиптрами встречались редко, можно предположить, что со схожей проблемой могли столкнуться другие исследователи, поэтому *O. sancta* при беглом просмотре могла быть определена как *O. limosa*.

Интересной особенностью озиса Ширмахера является преобладание насыщенных красных и розовых пигментов в верхних слоях матов в мелководных ручьях и лужах талой воды. Кирпично-красный цвет характерен для мелководных матов приморской Антарктики (острова Кинг Джордж, Джеймс Росс) [17], но ее климат довольно сильно отличается от прибрежных озисов Восточной Антарктиды, а в лужах и ручьях талой воды более близкого к Ширмахеру по широте и климатическим условиям озиса Холмы Ларсеманн, по нашим наблюдениям, маты имеют темно-коричневую, почти черную окраску за счет интенсивно окрашенных в коричневый цвет чехлов цианопрокариот.

Окраска розово-красно-оразежевых тонов, обусловленная, видимо, высоким содержанием каротиноидов, встречается и во многих других типах водорослевых сообществ озиса. При этом такую окраску приобретают обычно не столько слизистые чехлы, сколько клетки как прокариотических, так и эукариотических водорослей. Окрашиваются даже такие виды, для которых подобная цветовая гамма нетипична. Как правило, наиболее яркие водоросли красно-оранжевого оттенка встречаются в высокоминерализованных мелких водоемах вдоль северного края озиса. Похожий эффект был отмечен нами и другими авторами в водоемах озиса Холмы Ларсеманн: на глубине 3–4 м маты имели окрашенный оранжевыми пигментами слой 5–7 мм толщиной. Анализ пигментов таких матов, проведенный J.C. Ellis-Evans с соавторами, показал, что в них наблюдается довольно высокое отношение каротиноидов к хлорофиллам [18]. Однако, по нашим визуальным оценкам, верхний слой некоторых матов озиса Ширмахера имеет значительно более яркий оранжево-красный оттенок, чем таковой озиса Холмы Ларсеманн.

Согласно литературным источникам [4] в альгофлоре водоемов озиса Ширмахера отмечен только один вид динофитовых водорослей — *Ceratium hirundinella* f. *piburgense* (Zederbauer) Bachmann. Нами данный вид отмечен не был, но были выявлены еще два новых для данной территории вида из этой систематической группы — представители рода *Gymnodinium*, которые были довольно широко распространены в планктоне исследованных озер. Вероятно, причина того, что они не были зафиксированы ранее, заключается в том, что их обнаружение и идентификация возможны только тогда, когда клетки находятся в живом состоянии.

Легко распадающиеся маты, состоящие главным образом из десмидиевых, примечательны тем, что это нетипичный для Антарктиды тип сообществ. Обычно основу мата составляют цианопрокариоты, они же придают ему структуру. В литературе упоминание водорослевых сообществ материка, в которых бы эдификатором был какой-нибудь вид десмидиевой водоросли, встречается редко: в одном из озер озиса Холмы Ларсеманн (Heart lake) в больших количествах обнаружен *Cosmarium* sp. [18], а *Actinotaenium cucurbita* и *Cosmarium clepsydra* Nordstedt доминировали в водоемах долины Yukidori Zawa в окрестностях японской полярной станции Сёва [19].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования пресных водоемов озиса Ширмахера была выявлена довольно разнообразная по видовому составу альгофлора. Основная часть выявленных таксонов была зафиксирована в сообществах водорослей бентоса, которые образуют маты и скопления разного цвета, толщины и структуры.

Выявлено 8 типов сообществ, общих для схожих по гидрохимическим условиям водоемов, и множество комплексов видов водорослей, встречающихся в одном

или нескольких водоемах. Наблюдалась зависимость внешнего вида водорослевых пленок и матов и видового состава доминантов водорослевых сообществ от типа водоема и глубины, на которой они обитают. Отмечено антропогенное влияние на состав и численность планктонных водорослей.

Впервые для оазиса были зафиксированы представители эустигматофитовых — (*Chlorobotrys cf. regularis*) и динофитовых (*Gymnodinium* sp. 1 и sp. 2) водорослей.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках плановой темы «Региональные таксономические и флористические исследования водорослей морских и континентальных водоемов» (№ 0120125605). Работа проводилась в рамках подпрограммы «Организация и обеспечение работ и научных исследований в Антарктике» Государственной программы Российской Федерации «Охрана окружающей среды» на 2012–2020 гг.

**Вклад авторов.** Смирнова С.В. — полевые работы (сбор проб и измерение параметров среды), первичный просмотр проб и определение видов цианопрокариот и родов динофитовых и диатомовых водорослей, изготовление микрофотографий. Чаплыгина О.Я. — определение зеленых и эустигматофитовых водорослей. Лукницкая А.Ф. — определение десмидиевых водорослей.

**Благодарности.** Микрофотографии были сделаны на оборудовании ЦКП «Клеточные и молекулярные технологии изучения растений и грибов» Ботанического института им. В.Л. Комарова РАН (Санкт-Петербург). За организацию работ на месте и постоянную помощь выражаем искреннюю благодарность начальнику станции Новолазаревская 63-й РАЭ Юрию Ивановичу Нездерову, за активную помощь в подготовке оборудования и сборе материала и фотографировании внешнего вида сообществ — не менее искреннюю благодарность сотрудникам зимовочного состава станции Кириллу Чиликину, Дмитрию Башмашникову и Дмитрию Смирнову, а Елене Шевниной — за консультации по гидробиологии.

**Competing interests.** The authors declare that they have no competing interests.

**Funding.** The work was carried out within the framework of the planned theme “Regional taxonomic and floristic studies of algae in marine and continental waterbodies” (№ 0120125605). The work was carried out within the framework of the subprogram “Organization and support of works and scientific research in the Antarctic” State program of the Russian Federation “Environmental Protection” for 2012–2020.

**Authors input.** Smirnova S.V. — field work and measurements, initial viewing of samples and species identification of cyanoprokaryotes and genera of Dinophyta and Diatoms, taking microphotographs. Chaplygina O.Ya. — identification of Green and Eustigmatophytic algae. Luknitskaya A.F. — identification of Desmid algae.

**Acknowledgments.** Some microphotographs were made on the equipment of the CCP “Cellular and molecular technologies for studying plants and fungi” of the V.L. Komarov Botanical Institute of the Russian Academy of Sciences (Saint-Petersburg). We would like to express our sincere gratitude to Yuri I. Nezderov, the head of the Novolazarevskaya station (63-rd RAE), for the organization of field work, field photos and constant assistance, and to Kirill Chilikin, Dmitry Bashmashnikov, Dmitry Smirnov, and Elena Shevnina for their active assistance in preparing equipment and collecting material.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Веркулич С.Р., Пушина З.В., Татур А., Гиличинский Д.А., Абрамов А.А., Меллес М. Изменения природной обстановки и диатомовая флора в оазисе Ширмахера (Восточная Антарктида) в конце позднего Плейстоцена и в Голоцене // Проблемы Арктики и Антарктики. 2012. № 2 (92). С. 27–42.
2. Pandey K.D., Kashyap A.K., Gupta R.K. Nutrient status, algal and cyanobacterial flora of six fresh water streams of Schirmacher Oasis, Antarctica // Hydrobiol. 1995. V. 299. P. 83–91.
3. Pandey K.D., Shukla S.P., Shukla P.N., Giri D.D., Singh J.S., Singh P. Kashyap A.K. Cyanobacteria in Antarctica: ecology, physiology and cold adaptation // Cell. and Molec. Biol. 2004. V. 50. № 5. P. 575–584.
4. Richter W. Biology // The Schirmacher Oasis, Queen Maud Land, East Antarctica, and its Surroundings / Ed. Bormann P., Fritzsche D. Gotha: Justus Perthes Verlag, 1995. P. 321–347.
5. Shukla S.P., Gupta R.K., Kashyap A.K. Algal colonisation of Schirmacher oasis, Antarctica // Fifteenth Indian Expedition to Antarctica, Scientific Report, Department of Ocean Development, Technical Publication. 1999. № 13. P. 109–116.
6. Singh S.M., Singh P., Thajuddin N. Biodiversity and distribution of cyanobacteria at Dronning Maud Land, East Antarctica // Acta Bot. Malacitana. 2008. V. 33. P. 17–28.
7. Huang J.P., Hoover R.B., Swain A., Murdock C., Andersen D.T., Bej A.K. Comparison of the microbial diversity and abundance between the freshwater land-locked lakes of Schirmacher Oasis and the perennially ice-covered Lake Untersee in East Antarctica // Proc. of SPIE. 2010. V. 7819. doi: 10.1117/12.863131.
8. Swain A.K. Bathymetry of Schirmacher lakes as a tool for geomorphological evolution studies // Geological Society, London, Special Publications. 2017. V. 461. № 1. P. 77–93.
9. Александров В.Я. Климатические особенности российской антарктической станции и аэродрома «Новолазаревская» // Ученые записки РГГМУ. 2014. № 39. С. 109–119.
10. Симонов И.М. Оазисы Восточной Антарктиды. Л.: Гидрометеиздат, 1971. 176 с.
11. Hodgson D.A. Antarctic lakes // Encyclopedia of Lakes and Reservoirs / Ed. Bengtsson L., Herschy R.W., Fairbridge R.W. Dordrecht: Springer, 2012. P. 26–31.
12. Kumar P., Shokri M.R., Mehrotra I. Eighteenth Indian Expedition to Antarctica // Scientific Report. Technical Publication № 16. Department of Ocean Development. New Delhi, India, 2002. P. 273–292.
13. Verlecar X.N., Ingole B.S., Parulekar A.H. Characteristics of the freshwater lakes at the Schirmacher Oasis in Antarctica // Proc. of Workshop on Antarctic Studies / Ed. Dwivedi S.N., Mathur B.S., Hanjura A.K. New Delhi, 1990. P. 144–153.
14. Kaup G. Loads and concentrations of nutrients in the lakes of the Schirmacher Oasis in the season 1983/84 // Limnological studies in Queen Maud Land (East Antarctica) / Ed. Martin J. Tallin: Academy of Science of the Estonian SSR, 1988. P. 66–77.
15. Ingole B.S., Parulekar A.H. Limnology of freshwater lakes at Schirmacher Oasis, East Antarctica // Proc. Indian Nat. Sci. Acad. Part B. 1993. № 59. P. 589–600.
16. Вислоух С.М. К познанию микроорганизмов Невской губы // Изв. Рос. гидрол. ин-та. 1921. № 1–3. С. 3–48.
17. Komárek J., Elster J. Ecological background of cyanobacterial assemblages of the northern part of James Ross Island, Antarctica // Polish Polar Research. 2008. V. 29. № 1. P. 17–32.
18. Ellis-Evans J.C., Layborn-Parry J., Bayliss P.R., Perriss S.J. Physical, chemical and microbial community characteristics of lakes of the Larsemann Hills, Continental Antarctica // Arch. Hydrobiol. 1998. V. 141. № 2. P. 209–230.
19. Hirano M. Freshwater algae from Yukidori Zawa, near Syowa Station, Antarctica // Memoirs of the National Institute of Polar Research, Special Issue. 1979. № 11. P. 1–25.

## REFERENCES

1. Verkulich S.R., Pushina Z.V., Tatur A., Gilichinsky D.A., Abramov A.A., Melles M. Late Pleistocene — Holocene environmental changes and diatom flora in the Schirmacher oasis (East Antarctic). *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Problems of Arctic and Antarctic. 2012, 2 (92): 23–41. [In Russian].
2. Pandey K.D., Kashyap A.K., Gupta R.K. Nutrient status, algal and cyanobacterial flora of six fresh water streams of Schirmacher Oasis, Antarctica. *Hydrobiol.* 1995, 299: 83–91.
3. Pandey K.D., Shukla S.P., Shukla P.N., Giri D.D., Singh J.S., Singh P., Kashyap A.K. Cyanobacteria in Antarctica: ecology, physiology and cold adaptation. *Cell. and Molec. Biol.* 2004, 50, 5: 575–584.
4. Richter W. Biology. The Schirmacher Oasis, Queen Maud Land, East Antarctica, and its surroundings. Ed. Bormann P., Fritzsche D. Gotha: Justus Perthes Verlag, 1995: 321–347.
5. Shukla S.P., Gupta R.K., Kashyap A.K. Algal colonisation of Schirmacher oasis, Antarctica. Fifteenth Indian Expedition to Antarctica, Scientific Report, Department of Ocean Development, Technical Publication. 1999, 13: 109–116.
6. Singh S.M., Singh P., Thajuddin N. Biodiversity and distribution of cyanobacteria at Dronning Maud Land, East Antarctica. *Acta Bot. Malacitana*. 2008, 33: P. 17–28. doi: 10.24310/abm.v33i0.6964.
7. Huang J. P., Hoover R.B., Swain A., Murdock C., Andersen D.T., Bej A.K. Comparison of the microbial diversity and abundance between the freshwater land-locked lakes of Schirmacher Oasis and the perennially ice-covered Lake Untersee in East Antarctica. *Proc. of SPIE*. 2010, 7819. doi: 10.1117/12.863131.
8. Swain A.K. Bathymetry of Schirmacher lakes as a tool for geomorphological evolution studies. Geological Society, London, Special Publications. 2017, 461, 1: 77–93.
9. Alexandrov V.Ya. The climatic conditions of the russian antarctic station and airfield “Novolazarevskaya”. *Uchonyye zapiski rossyskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta*. Scientific notes of the Russian State Hydrometeorological University. 2014, 39: 109–119. [In Russian].
10. Simonov I.M. *Oazisy vostochnoy Antarktity*. The oases of East Antarctica. Leningrad: Gidrometisdat, 1971: 176 p. [In Russian].
11. Hodgson D. A. Antarctic lakes. *Encyclopedia of Lakes and Reservoirs*. Ed. Bengtsson L., Herschy R.W., Fairbridge, R.W. Dordrecht: Springer, 2012: 26–31.
12. Kumar P., Shokri M. R., Mehrotra I. Eighteenth Indian expedition to Antarctica. Scientific Report. Technical Publication. Department of Ocean Development. New Delhi, India, 2002, 16: 273–292.
13. Verlekar X.N., Ingole B.S., Parulekar A.H. Characteristics of the freshwater lakes at the Schirmacher Oasis in Antarctica. *Proc. of Workshop on Antarctic Studies*. Ed. Dwivedi S.N., Mathur B.S., Hanjura A.K. New Delhi, 1990: 144–153.
14. Kaup G. Loads and concentrations of nutrients in the lakes of the Schirmacher Oasis in the season 1983/84. *Limnological studies in Queen Maud Land (East Anlarctica)*. Ed. Martin J. Tallin: Academy of Science of the Estonian SSR, 1988: 66–77.
15. Ingole B.S., Parulekar A.H. Limnology of freshwater lakes at Schirmacher Oasis, East Antarctica. *Proc. Indian Nat. Sci. Acad. Part B*. 1993, 59: 589–600.
16. Wyslouch S.M. To the knowledge of the microorganisms of the Neva Bay. *Izvestiya Rossiyskogo Gidrologicheskogo instituta*. Proceedings of the Russian Hydrological Institute. 1921, 1–3: 3–48. [In Russian].
17. Komárek J., Elster J. Ecological background of cyanobacterial assemblages of the northern part of James Ross Island, Antarctica. *Polish Polar Research*. 2008, 29, 1: 17–32.
18. Ellis-Evans J.C., Layborn-Parry J., Bayliss P.R., Perriss S.J. Physical, chemical and microbial community characteristics of lakes of the Larsemann Hills, Continental Antarctica. *Arch. Hydrobiol.* 1998, 141, 2: 209–230. doi: 10.1127/archiv-hydrobiol/141/1998/209.
19. Hirano M. Freshwater algae from Yukidori Zawa, near Syowa Station, Antarctica. *Memoirs of the National Institute of Polar Research, Special Issue*. 1979, 11: 1–25.

СОЦИАЛЬНАЯ ГЕОГРАФИЯ  
И СОЦИАЛЬНАЯ АНТРОПОЛОГИЯ  
SOCIAL GEOGRAPHY  
AND SOCIAL ANTHROPOLOGY

<https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-2-217-233>

УДК 316.013, 332.143



ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

ORIGINAL ARTICLE

ПРОБЛЕМЫ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАЗВИТИЯ  
РЕГИОНОВ СЕВЕРА ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА РОССИИ:  
СОЦИОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

М.В. ФОМИН\*, В.А. БЕЗВЕРБНЫЙ, И.А. СЕЛЕЗНЕВ, И.С. ШУШПАНОВА,  
Е.А. ЛУКАШЕНКО, Т.Р. МИРЯЗОВ

*Институт социально-политических исследований, ФНИСЦ РАН, Москва, Россия*

*\*myfomin@mail.ru*

Резюме

В статье показаны выявленные особенности и проблемы пространственного развития регионов севера Дальнего Востока России. Исследование выполнено по проекту «Моделирование сценариев пространственного развития Сибири и Дальнего Востока России до 2030 года: особенности системы расселения» (грант РФФИ № 19-010-00836 А), выигравшему конкурс РФФИ «Проекты фундаментальных научных исследований». Исследование ведется коллективом Отдела геоурбанистики и пространственного развития ИСПИ ФНИСЦ РАН начиная с 2019 г. и рассчитано на три года. Основная цель исследования — оценка текущего состояния системы расселения, разработка стратегических перспектив и моделирование вариантных сценариев пространственного развития регионов Сибирского и Дальневосточного федеральных округов. Ключевой особенностью является применение междисциплинарных методов, основанных на сочетании экономико-математических, социологических, статистических и сценарных подходов к исследованию. С практической точки зрения результаты проекта помогут более рационально осуществлять планирование пространственного развития регионов страны. Анализ показывает, что социологические методы пространственных исследований имеют большой резерв, однако пока слабо используются. В данной статье рассматриваются актуальные проблемы пространственного развития севера Дальнего Востока России. На основе авторской разработки эмпирической модели исследования группой ученых ИСПИ ФНИСЦ РАН в августе 2019 г. был проведен опрос респондентов, проживающих в Камчатском крае, Магаданской области и Чукотском автономном округе. Результаты социопроса позволили выделить различия миграционных предпочтений, ряд особенностей экономического потенциала и качества инфраструктуры, социальной сферы дальневосточных регионов страны.

**Ключевые слова:** инфраструктура, миграция, потенциал региона, пространственное развитие, север Дальнего Востока, социальный сектор, экономическое неравенство.

**Для цитирования:** Фомин М.В., Безвербный В.А., Селезнев И.А., Шушпанова И.С., Лукашенко Е.А., Мирязов Т.Р. Проблемы пространственного развития регионов севера Дальнего Востока России: социологический анализ // Проблемы Арктики и Антарктики. 2020. Т. 66. № 2. С. 217–233. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-2-217-233>.

Поступила 25.03.2020

После переработки 13.04.2020

Принята 22.04.2020

## REGIONS SPATIAL DEVELOPMENT PROBLEMS OF THE RUSSIAN FAR EAST NORTH: SOCIOLOGICAL ANALYSIS

MAXIM V. FOMIN\*, VADIM A. BEZVERBNY, IGOR' A. SELEZNEV, IRINA S. SHUSHPANOVA,  
ELENA A. LUKASHENKO, TIMUR R. MIRIAZOV

*Institute of Socio-Political Research — Branch of the Federal Center of Theoretical and Applied Sociology of the Russian Academy of Sciences (ISPR FCTAS RAS), Moscow, Russia*

\*mvfomin@mail.ru

### Summary

The purpose of the article is to identify the features and problems of spatial development of the regions of the North of the Russian Far East. The research was carried out under the project “Modeling the spatial development scenarios of Siberia and the Far East of Russia until 2030: features of the resettlement system” (RFBR grant No. 19-010-00836 A), which won the RFBR competition “Fundamental Scientific Research Projects”. The study is being conducted by the team of the Department of Geourbanistics & Spatial Development of ISPR FCTAS RAS since 2019 and is intended to last for three years. The main goal is to assess the current state of the resettlement system, develop strategic prospects and model alternative scenarios for the spatial development of the regions of the Siberian and Far Eastern Federal Districts. A key feature is the use of interdisciplinary methods based on a combination of economic, mathematical, sociological, statistical and scenario approaches to research. From a practical point of view, the project results will help to plan more rationally the spatial development the spatial development of the country's regions. The analysis shows that the sociological methods of spatial research have large reserves but are not yet used to the full capacity. This article discusses the current problems of spatial development of the north of the Russian Far East. On the basis of the authors' development of the empirical research model by a group of scientists of ISPR FCTAS RAS, in August 2019, the survey of respondents of the Kamchatka Krai, the Magadan Oblast and the Chukotka Autonomous Okrug was conducted. The results of the opinion poll made it possible to identify differences in migration preferences, a number of features of the economic potential capacity and the quality of infrastructure, and the social sphere of the Far Eastern regions of the country.

**Keywords:** economic inequality, infrastructure, migration, north of the Far East, potential capacity of the region, social sector, spatial development.

**For Citation:** Fomin M.V., Bezverbny V.A., Seleznev I.A., Shushpanova I.S., Lukashenko E.A., Miriazov T.R. Regions spatial development problems of the Russian Far East North: sociological analysis. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2020, 66 (2): 217–233. [In Russian]. <https://doi.org/10.30758/0555-2648-2020-66-2-217-233>.

Received 25.03.2020

Revised 13.04.2020

Accepted 22.04.2020

### ВВЕДЕНИЕ

В феврале 2019 г. Правительство Российской Федерации утвердило Стратегию пространственного развития Российской Федерации на период до 2025 г. Основная цель, указанная в правительственном Распоряжении (№ 207-р от 13 февраля 2019 г.), заключается «в формировании условий и поддержании устойчивого пространственного развития РФ для решения ряда важных социально-экономических задач: повышение уровня и качества жизни граждан регионов страны, рост темпов экономического и технологического развития, укрепление национальной безопасности».

Согласно документу, под термином «пространственное развитие» понимается «совершенствование системы расселения и территориальной организации экономики, в том числе за счет проведения эффективной государственной политики регионального развития».

Пространственное развитие регионов является важной стратегической задачей, стоящей перед государством в условиях укрепления национальной безопасности и поддержания устойчивого роста экономики. В то же время, учитывая территориальную протяженность и региональную диспропорциональность, особую важность приобретает изучение отдаленных субъектов Российской Федерации, среди которых, безусловно, выделяются территории севера Дальнего Востока России: Камчатский край, Магаданская область и Чукотский автономный округ.

Следует отметить, что интерес ученых к проблематике развития территорий и системы расселения севера Дальнего Востока сохраняется на протяжении многих десятилетий. Например, исследованию Камчатки, Чукотки и Колымского края (Магаданской области) посвящен фундаментальный труд Института географии АН СССР «Север Дальнего Востока» [1]. В нем на основе фактического материала анализируются территориальные особенности, природно-климатические и физико-географические условия развития этих регионов.

Причем первично здесь именно географическое положение (широтность климата, многолетняя мерзлота, рельефы местности, сложный термобарический режим, общая суровость природных условий), помноженное на крайнюю удаленность (от основных центров экономической активности), практическое отсутствие сети автомобильных дорог и железнодорожного сообщения, преимущественно непредсказуемую авиационную и сезонную морскую связанность. Это обуславливает определенную сложность в развитии севера Дальнего Востока, несмотря на перспективы ресурсной обеспеченности и стратегическую важность для страны данной территории (см. [2]).

Проблемы развития территорий Магаданской области исследовались проф. Д.И. Валентеем и проф. Б.С. Хоревым [3]; Камчатского края — В.И. Дворцовым [4]; Чукотского автономного округа — К. Кумо и Т.В. Литвиненко [5]; О.В. Тарасовой и А.А. Соколовой [6]. В контексте пространственного развития вопросы демографии и миграции изучались акад. РАН П.А. Минакиром и проф. Е.А. Мотрич [7], проф. Л.Л. Рыбаковским [8] и др.

Социологический подход к изучению системы расселения территорий в северных регионах страны через призму анализа трудовых ресурсов, образа и качества жизни населения применен в трудах П.Е. Терлецкого [9], С.М. Навасардова, В.Л. Свечинского, М.М. Этлиса [10]; В.В. Яновского [11]; З.И. Сидоркиной [12].

Большое внимание комплексному изучению севера Дальнего Востока России уделяли чл.-корр. РАН Л.Н. Лаженцев [13], проф. А.Н. Пилясов [14], проф. Е.Г. Егоров [15], ученые Кольского научного центра РАН [16] и др.

Вместе с тем современные исследования особенностей пространственного развития регионов и страны в целом для оптимизации системы расселения и развития стратегического планирования территорий хотя и построены на основе статистических данных, тем не менее носят теоретико-методологический характер (см. [17]). Социологические методы для изучения данной проблематики практически не используются.

Учитывая, что пространственное развитие, по нашему мнению, это прежде всего «системно-структурный подход к масштабируемым территориальным задачам управления целостным развитием» [18], которое должно быть направлено на оптимизацию баланса социально-экономических процессов и формирование условий привлекательности жизнедеятельности, авторы провели полевое социологическое

исследование регионов севера Дальнего Востока России. Основная задача исследования — изучить особенности пространственного развития дальневосточных регионов России путем анализа мнений их жителей по актуальным вопросам, описывающим современную проблематику данных территорий.

### ЖИТЕЛИ СЕВЕРА ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА О МИГРАЦИОННЫХ НАМЕРЕНИЯХ, УРОВНЕ ЖИЗНИ И ПОТЕНЦИАЛЕ РЕГИОНОВ

Ключевыми показателями, описывающими качество пространственного развития регионов, являются размеры территорий, численность и характер размещения населения, факторы миграционных процессов. Если европейская Россия и юг Дальнего Востока относятся к зонам сплошного расселения, то одной из специфических черт северных регионов Дальнего Востока является очаговое зонирование расселения.

Более того, некоторые ученые — например, сотрудники Брукингского института Ф. Хилл и К. Гэдди — считают, что в системе расселения России существует избыточный перекоп в направлениях Крайнего Севера и Дальнего Востока и, соответственно, даже очаговое постоянное проживание населения и содержание инфраструктуры ввиду климатических условий представляются чрезмерно дорогостоящими [19].

Размеры территории Магаданской области составляют 462,4 тыс. км<sup>2</sup>; Чукотского автономного округа — 721,5 тыс. км<sup>2</sup>; Камчатского края — 464,3 тыс. км<sup>2</sup>. По состоянию на 1 января 2019 г. в Магаданской области проживало 141,2 тыс. чел., на Чукотке — 49,7 тыс. и 314,7 тыс. чел. на Камчатке [20].

Таким образом, немногим более полумиллиона человек являются жителями территорий размером почти в 1,650 млн км<sup>2</sup>. Средняя плотность населения севера Дальнего Востока — 0,31 чел./км<sup>2</sup> (от 0,07 на Чукотке до 0,30 в Магаданской области и 0,67 чел./км<sup>2</sup> на Камчатке). Другими словами, на 9,6 % территории страны

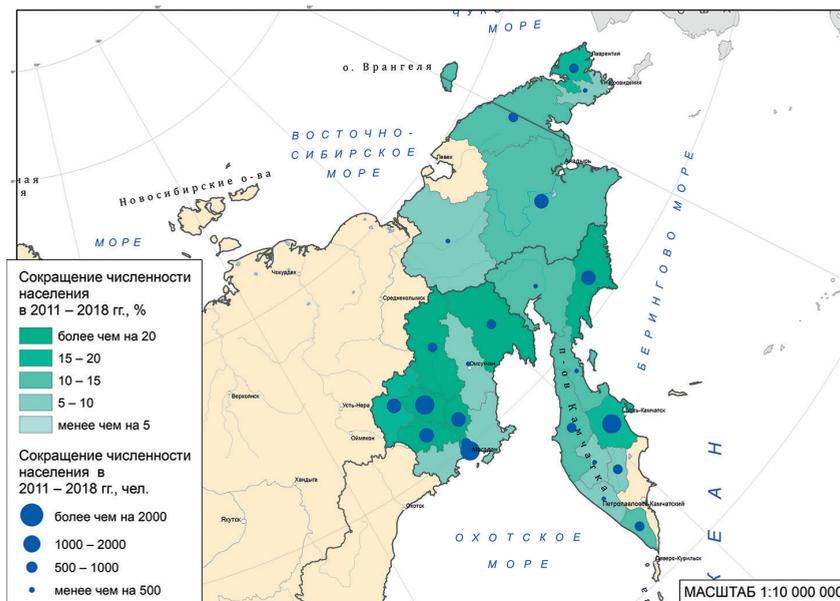


Рис. 1. Динамика численности населения севера Дальнего Востока России

Fig. 1. Population dynamics in the North of the Russian Far East

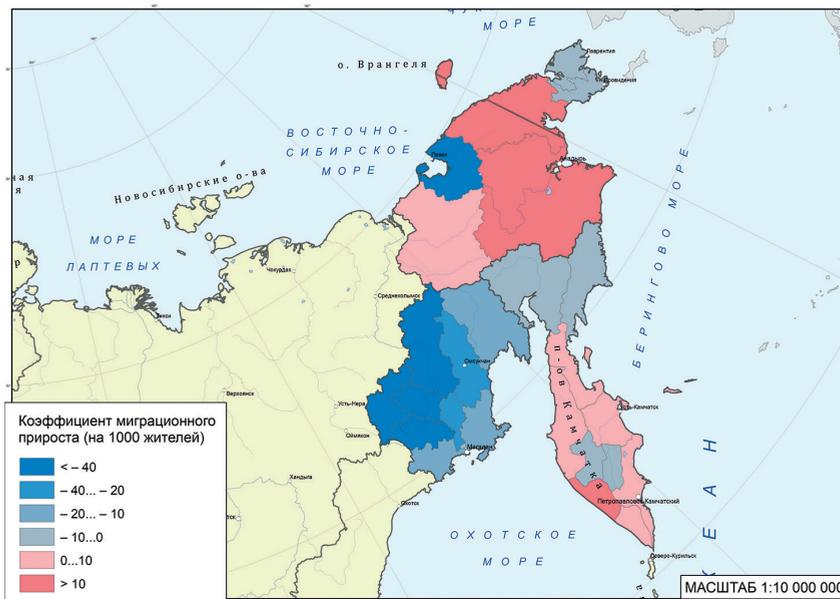


Рис. 2. Внутривососсийская миграция в регионах севера Дальнего Востока России

Fig. 2. Internal Russian migration in the regions of the Russian Far East North

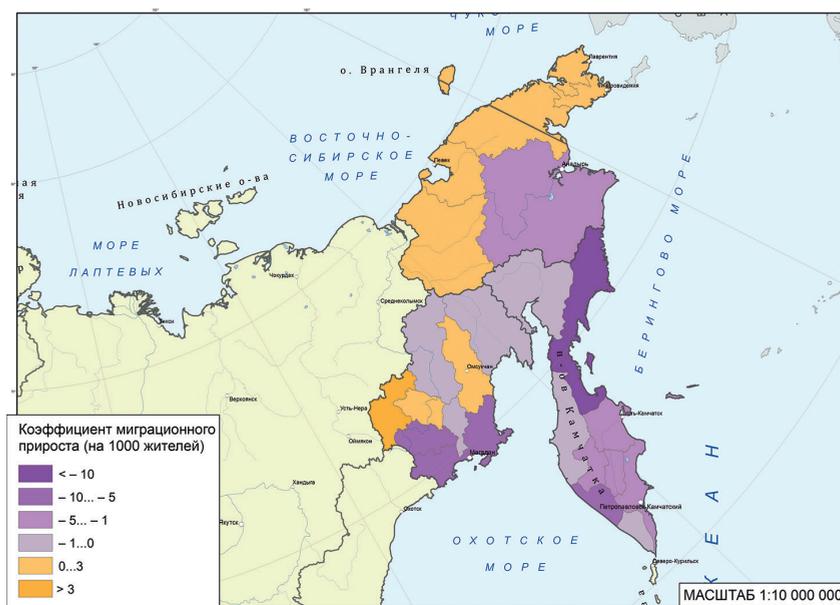


Рис. 3. Международная миграция в регионах севера Дальнего Востока России

Fig. 3. International migration in the regions of the Russian Far East North

проживает 0,33 % населения. Помимо малоосвоенности пространств, север Дальнего Востока России — это пример последовательного (с конца 1980-х гг.) обезлюдивания [8]. Во всех регионах наличествует миграционный отток [20], а в Магаданской области наблюдается еще и естественная убыль (рис. 1–3).

В августе 2019 г. в рамках проекта «Моделирование сценариев пространственного развития Сибири и Дальнего Востока России до 2030 года: особенности системы расселения» было проведено социологическое исследование (руководитель — канд. полит. наук М.В. Фомин). Опрос жителей в возрасте от 18 лет и старше проводился в Камчатском крае (г. Петропавловск-Камчатский, г. Елизово, п. Мильково), Магаданской области (г. Магадан, г. Ола, п. Сокол) и Чукотском АО (г. Анадырь, п. Эгвекинот). Выборка построена на основе модели с использованием ключевых характеристик генеральной совокупности, базируется на принципах квотно-пропорционального и территориального методов, является репрезентативной, ошибка не превышает 5 %.

Эмпирическая модель построена на основе анализа мнений жителей регионов по трем главным направлениям: миграционные намерения и их отношение к мигрантам; возможность комфортного проживания на постоянной основе в течение многих поколений; оценка актуального состояния социально-экономического развития и потенциала региона. Данные индикаторы в целом позволяют описать реальную картину жизнедеятельности местного населения (образ, уровень и качество).

Более половины опрошенных россиян, проживающих в Камчатском крае (78,5 %) и в Магаданской области (55,6 %), имели желание переехать в другой регион (табл. 1). Противоположных взглядов придерживались 20,3 % респондентов в Камчатском крае и 38,9 % — в Магаданской области. Другая ситуация в отношении миграционных намерений сложилась в Чукотском АО, где большинство жителей — 56 % — не хотели бы переезжать.

Ответы респондентов на вопрос о направлении и возможном месте нового проживания позволяют зафиксировать актуальные тенденции миграционного оттока из регионов севера Дальнего Востока России. Наибольшее число жителей Чукотского АО (35,7 %) и Камчатского края (17,7 %) сообщили, что хотели бы переехать в европейскую часть России (табл. 2). Юг России наиболее привлекателен для 25 % граждан Чукотки и 9,7 % — Камчатки. Респонденты, проживающие в Магаданской области, предпочли бы переехать в регионы ДФО, Сибири и Урала (25 %).

Таблица 1

**Мнение респондентов о желании переехать  
(август 2019, % от числа опрошенных респондентов  
в регионах севера Дальнего Востока России)**

Table 1

**Survey findings on respondent's intent to move  
(August 2019, % of the number of respondents surveyed  
in the regions of the Russian Far East North)**

Варианты ответов	Камчатский край	Чукотский АО	Магаданская область
Нет, не хотел(а) бы переехать	20,3	56	38,9
Да, хотел(а) бы переехать	78,5	40	55,6
Загруднились ответить	1,2	4	5,5

Таблица 2

**Мнение респондентов о направлении и месте возможного переезда  
(август 2019, % от числа опрошенных респондентов  
в регионах севера Дальнего Востока России, желающих переехать)**

Table 2

**Survey findings on respondent’s desired direction and place of possible relocation  
(August 2019, % of the number of respondents in the regions  
of the Russian Far East North who want to move)**

Варианты ответов	Камчатский край	Чукотский АО	Магаданская область
Да, хотел(а) бы переехать в Европейскую Россию (ЦФО, Поволжье, СЗФО)	17,7	35,7	10
Да, хотел(а) бы переехать на Юг (Кубань, Крым, Ставрополье)	9,7	25	5
Да, хотел(а) бы переехать в другие регионы ДФО, Сибири, Урала	0	7,1	25
Да, хотел(а) бы переехать (без указания места и причин)	72,6	32,2	60

Основная причина возможного переезда жителей Камчатки — высокие цены (40 %). Кроме того: плохие климатические условия (28 %), низкое качество образовательных услуг (24 %), плохая инфраструктура (24 %), неразвитые культурная и досуговая сферы (16 %), низкое качество медицинских услуг (16 %), низкое качество, отсутствие и доступность продуктов питания (12 %), плохая транспортная доступность (12 %) (рис. 4).



Рис. 4. Мнение респондентов о причинах переезда (август 2019, % от числа опрошенных респондентов в регионах севера Дальнего Востока России, желающих переехать; сумма ответов превышает 100 %, так как респонденты могли сказать о нескольких причинах; открытый вопрос)

Fig. 4. Respondents’ opinion on the reasons for moving (August 2019, % of the number of respondents in the regions of the Russian Far East North who want to move; the sum of responses exceeds 100 %, since the respondents could tell about several reasons)

63,2 % жителей Чукотки как причину их возможного переезда отметили климатические условия. 36,8 % указали на низкое качество, отсутствие и доступность продуктов питания, а 26,3 % — отметили низкое качество образовательных услуг. Также среди причин: низкое качество медицинских услуг (15,8 %), низкая заработная плата и нехватка денег (15,8 %), высокие цены (10,5 %), плохая инфраструктура (10,5 %), неразвитые культурная и досуговая сферы (10,5 %) и плохая транспортная доступность (5,3 %).

Для жителей Магаданской области основной причиной, влияющей на их миграционные намерения, стали плохие климатические условия (64,3 %). Далее в рейтинге причин, усиливающих желание переехать, по степени снижения следовали: высокие цены (28,6 %), плохая инфраструктура (28,6 %), низкая заработная плата (28,6 %), низкое качество образовательных услуг (14,3 %), плохая транспортная доступность (14,3 %), нехватка рабочих мест (14,3 %), неразвитые культурная и досуговая сферы (7,1 %), низкое качество медицинских услуг (7,1 %), низкое качество, отсутствие и доступность продуктов питания (7,1 %).

Очевидно, что в долгожданной Программе развития Дальнего Востока России должны быть заложены специфические для северных территорий этого макрорегиона компенсаторные механизмы, повышающие мотивацию граждан к активной жизни и плодотворной работе. Например, плохие климатические условия в Чукотском АО и Магаданской области, которые стали главной причиной, мотивирующей на переезд, могут быть компенсированы дополнительными льготными отпусками и преференциями на поездки в регионы с теплым климатом. А влияние высоких цен в Камчатском крае может быть снижено до приемлемого уровня за счет принятия эффективных решений государственных органов совместно с представителями бизнеса.

Таблица 3

**Распределение ответов респондентов на вопросы: «Хотели бы Вы, чтобы Ваши дети здесь жили?» и «Как Вы оцениваете ситуацию с мигрантами в регионе?» (август 2019, % от числа опрошенных респондентов в регионах севера Дальнего Востока России)**

Table 3

**Distribution of respondents' answers to the questions: "Would you like your children live here?" and "How do you assess the situation with migrants in the region?" (August 2019, % of the number of respondents in the regions of the Russian Far East North)**

Варианты ответов на вопросы	Камчатский край	Чукотский АО	Магаданская область
<i>«Хотели бы Вы, чтобы Ваши дети здесь жили?»</i>			
Да	16,5	34	22,2
Нет	75,9	62	66,7
Затруднились ответить	7,6	4	11,1
<i>«Как Вы оцениваете ситуацию с мигрантами в регионе?»</i>			
Сложная. Необходимо ограничить миграцию	81	16	38,9
Терпимая. Стабильная	13,9	58	47,2
Регион испытывает недостаток в мигрантах, необходимо расширить их привлечение	2,5	2	5,6
Затруднились ответить	2,6	24	8,3

Отрицательно высказались в отношении проживания их детей на данной территории: в Камчатском крае 75,9 %, в Магаданской области — 66,7 %, в Чукотском автономном округе — 62 %. Данное обстоятельство в ближайшей перспективе еще больше усилит отток населения данных регионов (табл. 3). Наибольшее число противников миграции в их регион наблюдалось на Камчатке — 81 %. На Чукотке (58 %) и в Магаданской области (47,2 %) доминировала точка зрения о том, что ситуация с мигрантами терпимая и стабильная. Мнение о том, что регионы испытывают недостаток в мигрантах и существует необходимость их привлечения, нашло меньше всего сторонников: в Магаданской области на уровне 5,6 %, в Камчатском крае — 2,5 % и в Чукотском АО — 2 %.

Соответственно, социальная стабильность и устойчивость пространственного развития отдельных территорий севера Дальнего Востока России может быть нарушена осложнением ситуации в случае массового притока мигрантов.

Второе направление в исследовании особенностей и проблем пространственного развития регионов севера Дальнего Востока России предполагает измерение такого показателя, как «комфортность проживания населения на постоянной основе в течение многих поколений». Во всех регионах севера Дальнего Востока России наблюдалось позитивное настроение в отношении возможности комфортного проживания населения на постоянной основе в течение многих поколений. Такой точки зрения придерживались 74 % в Чукотском АО, 64,6 % — в Камчатском крае и 58,3 % — в Магаданской области (табл. 4).

Основными мерами для обеспечения комфортного проживания населения на постоянной основе наибольшее число жителей Камчатки (41,7%), Магаданской области (38,5%) и Чукотки (37,9%) посчитали повышение зарплаты и введение дополнительных льгот. Также 37,9 % жителей Чукотского АО посчитали важной такую меру, как улучшение продовольственного снабжения и наличие качественных продуктов питания (рис. 5).

Таким образом, одними из ключевых проблем пространственного развития регионов севера Дальнего Востока России и, соответственно, стратегическими направлениями совершенствования системы расселения [21] являются: низкий уровень доходов граждан в соотношении с уровнем цен; малоэффективная система льгот

Таблица 4

**Распределение ответов респондентов на вопрос: «Возможно ли комфортное проживание в Вашем регионе населения на постоянной основе в течение многих поколений?» (август 2019, % от числа опрошенных респондентов в регионах севера Дальнего Востока России)**

Table 4

**Distribution of respondents' answers to the question: "Is it possible for the population to live comfortably in your region on a permanent basis over many next generations?" (August 2019, % of the number of respondents in the regions of the Russian Far East North)**

Варианты ответов	Камчатский край	Чукотский АО	Магаданская область
Да, возможно	64,6	74	58,3
Нет, невозможно	25,3	22	27,8
Затруднились ответить	10,1	4	13,9



Рис. 5. Мнение респондентов о том, что необходимо для комфортного проживания населения на постоянной основе в течение многих поколений (август 2019, % от числа опрошенных респондентов в регионах севера Дальнего Востока России; сумма ответов превышает 100 %, так как респонденты могли сказать о нескольких причинах; открытый вопрос)

Fig. 5. Respondents' opinion on what is necessary for comfortable living of the population on a permanent basis for many generations moving (August 2019, % of the number of respondents in the regions of the Russian Far East North; the sum of responses exceeds 100 %, since the respondents could tell about several reasons)

и предпочтений, не компенсирующая риски миграционного оттока; неразвитость инфраструктуры; отсутствие качественных продуктов питания.

Третья группа индикаторов, характеризующих особенности пространственного развития регионов севера Дальнего Востока России, измеряет уровень социально-экономического развития и его потенциал повышения качества и уровня жизни населения.

Мнение о том, что экономическая ситуация в их территориальном образовании ухудшается, разделяли 72,2 % респондентов в Магаданской области, 63,3 % — в Камчатском крае и 56 % — в Чукотском АО. «Экономическая ситуация в регионе стабильна» — такой ответ дали 32 % респондентов — на Чукотке, 17,7 % — на Камчатке и 11,1 % — в Магаданской области (табл. 5).

В целом преобладающее среди населения регионов мнение об ухудшающейся ситуации в экономике территориальных образований с достаточной высокой степенью вероятности будет способствовать увеличению уровня миграции, что, в свою очередь, негативно отразится на пространственном развитии. Очевидно, что региональным органам власти необходимо позаботиться о мерах повышения уровня информированности граждан о сложившейся ситуации в экономике и принять эффективные управленческие решения, способствующие улучшению социально-экономических показателей.

Таблица 5

**Мнение жителей о сложившейся экономической ситуации в регионе, неравенстве по доходам и перспективах работы ключевых предприятий (август 2019, % от числа опрошенных респондентов в регионах севера Дальнего Востока России)**

Table 5

**Residents' opinion on the current economic situation in the region, income inequality and prospects for key businesses (August 2019, % of the number of respondents in the regions of the Russian Far East North)**

Варианты ответов на вопросы	Камчатский край	Чукотский АО	Магаданская область
<i>«Как Вы оцениваете экономическую ситуацию в регионе (занятость, доходы)?»</i>			
Ухудшается	63,3	56	72,2
Стабильная	17,7	32	11,1
Улучшается	8,9	2	11,1
Затруднились ответить	10,1	10	5,6
<i>«На Ваш взгляд, нарастает или сокращается неравенство по доходам в регионе?»</i>			
Неравенство по доходам возрастает	75,9	52	50
Неравенство по доходам сокращается	6,3	4	19,4
Неравенство по доходам остается на том же уровне, ситуация стабильная	5,1	14	22,2
Затруднились ответить	12,7	30	8,4
<i>«Как Вы оцениваете перспективы работы ключевых предприятий региона?»</i>			
Предприятия деградируют	31,6	48	30,6
Предприятия развиваются	20,3	12	16,7
Состояние предприятий стабильное, без существенных изменений	1,3	4	5,5
Затруднились ответить	46,8	36	47,2

Среди причин сложившейся ситуации в экономике граждане в первую очередь отмечали низкие доходы и быстрый рост цен. Данную точку зрения разделяли 100 % респондентов в Чукотском АО, 66,7 % — в Камчатском крае и 45,5 % — в Магаданской области. Кроме того, конкретно рост цен на продукты питания, товары и высокие тарифы ЖКХ отметили 45,5 % жителей Магаданской области.

К основным проблемам, снижающим привлекательность данных территориальных образований для жизни и работы населения, также можно отнести такие социально-экономические факторы, как наличие безработицы, отсутствие перспектив и роста малого бизнеса, новых предприятий и рабочих мест. По мнению граждан, данные причины во многом способствовали снижению уровня социально-экономических показателей развития регионов (рис. 6).

Большинство респондентов Камчатки (75,9 %), Чукотки (52 %) и Магаданской области (50 %) сообщили, что в их регионе неравенство по доходам возрастает (табл. 5). Таким образом, доминирующее мнение о росте неравенства по доходам, безусловно, негативно влияет на желание людей жить и работать в своих регионах, повышая риски устойчивости пространственного развития регионов севера Дальнего Востока России.

Неоднозначно местные жители оценили и перспективы работы ключевых предприятий: 46,8 % жителей Камчатки и 47,2 % в Магаданской области затруд-



Рис. 6. Мнение респондентов о причинах сложившейся экономической ситуации в регионе (август 2019, % от числа опрошенных респондентов в регионах севера Дальнего Востока России; сумма ответов превышает 100 %, так как респонденты могли сказать о нескольких причинах; открытый вопрос)

Fig. 6. Respondents' opinion on the reasons for the current economic situation in the region (August 2019, % of the number of respondents in the regions of the Russian Far East North; the sum of responses exceeds 100 %, since the respondents could tell about several reasons)

нились оценить перспективы их работы (табл. 5). На Чукотке среди населения доминировала точка зрения о том, что предприятия деградируют (48 %). 16,7 % опрошенных в Магаданской области, 12 % в Чукотском АО, а также 20,3 % в Камчатском крае полагали, что предприятия в их регионе развиваются. Потенциал региона является ключевым элементом в оценке актуального состояния пространственного развития и его дальнейших перспектив. Согласно результатам исследования, среди жителей Камчатки (72,2 %), Магаданской области (61,1 %) и Чукотки (54 %) доминировала точка зрения о том, что потенциал региона задействован лишь отчасти (табл. 6).

Полное использование допускали лишь 11,1 % респондентов в Магаданской области, 2 % — в Чукотском автономном округе и 1,3 % — в Камчатском крае. Таким образом, уже сейчас неэффективное использование потенциала территорий органами власти является реальной проблемой пространственного развития севера Дальнего Востока России [18, 22].

Наибольшее число респондентов, затруднившихся ответить на вопрос о потенциале региона, зафиксировано в Чукотском АО. В Камчатском крае и Магаданской области число таких граждан составило 26–28 %. Данный факт может свидетельствовать о дистанцированности, отчужденности от общества, когда органы власти принимают решения без учета мнения граждан. Разочарованность жителей регионов в действиях власти проявляется в ответах достаточно большого числа респондентов.

Таблица 6

**Распределение ответов респондентов на вопрос:  
«В полной ли мере используется потенциал региона?»  
(август 2019, % от числа опрошенных респондентов  
в регионах севера Дальнего Востока России)**

Table 6

**Distribution of respondents 'answers to the question:  
“Is the potential of the region used to the full capacity?”  
(August 2019, % of the number of respondents surveyed  
in the regions of the Russian Far East North)**

Варианты ответов	Камчатский край	Чукотский АО	Магаданская область
Потенциал используется полностью	1,3	2	11,1
Потенциал используется не полностью	72,2	54	61,1
Затруднились ответить	26,5	44	27,8

Способы задействования потенциала регионов севера Дальнего Востока России различны. Согласно результатам исследования, основными мерами могут стать: привлечение инвестиций на Камчатке (21,7 %) и развитие добычи полезных ископаемых на Чукотке (36,4 %) По мнению 27,3 % жителей Магаданской области, необходимо развивать сельское хозяйство, туризм, транспортную связь и доступность региона, улучшить работу местной власти (рис. 7).

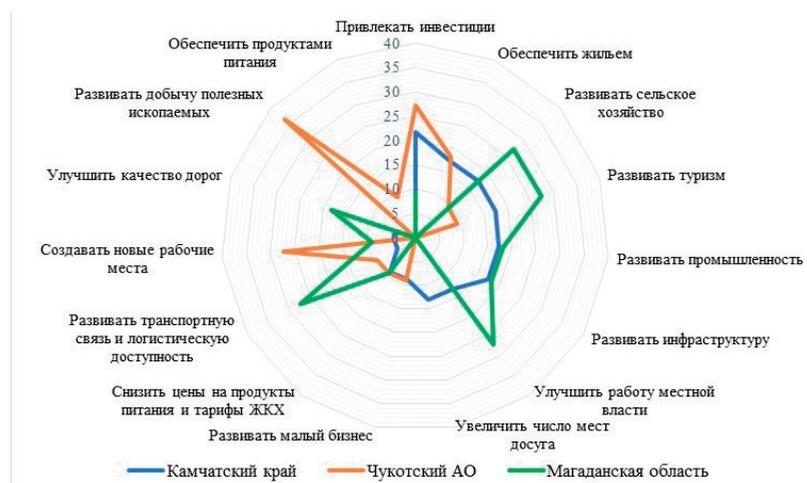


Рис. 7. Мнение респондентов о способах использования потенциала региона с целью развития экономики, улучшения качества жизни населения (август 2019, % от числа опрошенных респондентов в регионах севера Дальнего Востока России; сумма ответов превышает 100 %, так как респонденты могли сказать о нескольких причинах; открытый вопрос)

Fig. 7. Respondents' opinion on ways to use the region's potential to develop the economy and improve the quality of life of the population (August 2019, % of the number of respondents in the regions of the Russian Far East North; the sum of responses exceeds 100 %, since the respondents could tell about several reasons)

## ВЫВОДЫ И КОММЕНТАРИИ

Первая группа ключевых проблем связана с ярко выраженными миграционными намерениями населения переехать в другой регион. Вследствие выездной миграции в два раза может сократиться население Камчатского края и Магаданской области. Здесь задача пространственного развития должна заключаться в снижении роста и стабилизации оттока количества таких жителей. Анализ причин переезда в другие территориальные образования показал, что региональным органам власти необходимо разработать компенсаторные и регулирующие механизмы, снижающие влияние негативных факторов, сдерживающие миграционную убыль и обеспечивающие приток миграции.

Вторая группа проблем пространственного развития данных регионов заключается в повышении уровня комфортности проживания населения на постоянной основе в течение многих поколений. Исследуемые регионы имеют большой резерв по данному направлению. По мнению граждан, властям прежде всего необходимо уделить внимание проблемам, связанным с повышением зарплат и вводом дополнительных, более эффективных льгот, улучшением продовольственного снабжения и наличием качественных продуктов питания, а также развитием инфраструктуры.

Третью группу проблем пространственного развития этих дальневосточных регионов составляют ухудшающаяся экономическая ситуация, рост неравенства по доходам и частичное использование потенциала территорий, который имеет большие резервы. Только эффективное и плодотворное взаимодействие государства, гражданского общества и бизнеса позволит оптимизировать и усовершенствовать стратегию пространственного развития регионов севера Дальнего Востока России с целью создания условий для достойной жизнедеятельности на исследуемых территориях.

**Конфликт интересов.** Авторы статьи не имеют конфликта интересов.

**Финансирование.** Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-010-00836 А.

**Благодарности.** Авторы выражают искреннюю признательность администрациям г. Магадана, г. Ола, п. Сокол, г. Анадыря, п. Эгвекинот, г. Петропавловска-Камчатского, г. Елизово и п. Мильково за помощь в организации анкетирования населения.

**Competing interests.** The authors have no competing interests.

**Funding.** The report study was funded by RFBR, project number 19-010-00836A

**Acknowledgment.** The authors gratefully acknowledge the support from the administrations of Magadan, Ola, Sokol, Anadyr, Egvekinot, Petropavlovsk-Kamchatsky, Yelizovo and Milkovo in organizing the population survey.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Север Дальнего Востока. Монография / Отв. ред. Н.А. Шило. Акад. наук СССР, Ин-т географии. М.: Изд-во «Наука», 1970. 488 с.
2. Фомин М.В. Инфраструктура и связанность севера Дальнего Востока России: миграция и национальная безопасность // Большая Евразия: национальные и цивилизационные аспекты развития и сотрудничества: Материалы международной научно-практической конференции. М.: ИНИОН РАН, 2019. С. 1024–1029.
3. Валентей Д.И., Хорев Б.С. Проблемы расселения и территориальный принцип в планировании // Проблемы развития производительных сил Магаданской области: Материалы Второго

научного совещания по проблемам развития и размещения производительных сил Магаданской области, 3–5 июня 1968 г. Том 1. Магадан: СВКНИИ СО АН СССР, 1969. С. 231–241.

4. Дворцов В.И. К разработке концепции стратегического развития экономики Камчатского края // Региональная экономика: теория и практика. 2007. № 17 (56). С. 2–7.

5. Кумо К., Литвиненко Т.В. Население Чукотки в пространстве и времени // Российские регионы: взгляд в будущее. 2016. № 3 (8). С. 50–66.

6. Население Дальнего Востока России: проблемы и тенденции / Е.А. Бурлаев, В.Н. Дьяченко, Е.Л. Мотрич, Н.В. Фещенко; под ред. П.А. Минакира; Институт экономических исследований ДВО РАН. Хабаровск: ИЭИ ДВО РАН, 2018. 71 с.

7. Тарасова О.В., Соколова А.А. Перспективы комплексного освоения Чукотского АО // Мир экономики и управления. 2018. Т. 18. № 2. С. 69–85. DOI 10.25205/2542-0429-2018-18-2-69-85.

8. Рыбаковский Л.Л., Кожевникова Н.И. Восточный вектор демографического развития России // Народонаселение. 2015. № 1. С. 4–16.

9. Терлецкий П.Е. Проблема заселения Крайнего Севера. М.: Главсевморпуть, 1945. 10 с.

10. Навасардов С.М., Свечинский В.Л., Этлис М.М., Яновский В.В. Социологические и социально-гигиенические обоснования для проектирования новых городов и поселений городского типа на Крайнем Севере. Магадан: СВКНИИ ДВЦ АН СССР, 1988. 12 с.

11. Яновский В.В. Человек и Север. Магадан: Магаданское кн. изд-во, 1968. 158 с.

12. Сидоркина З.И. Территориальная организация и социальная самоорганизация населения в слабозаселенном регионе. Владивосток: Дальнаука, 2014. 240 с.

13. Лажнецов В.Н. Социально-экономическое пространство и территориальное развитие Севера и Арктики России // Экономика региона. 2018. Т. 14. Вып. 2. С. 353–365.

14. Пилясов А.Н. Закономерности и особенности освоения Северо-Востока России: (Ретроспектива и прогноз). Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 1996. 145 с.

15. Егоров Е.Г. Проблемы региональной экономики на примере Северо-Востока СССР. Новосибирск: Наука, 1979. 286 с.

16. Экономическая безопасность и снижение неравномерности пространственного развития российского Севера и Арктики / Под ред. В. С. Селина, Е. П. Башмаковой. Апатиты: Изд-во Кольского НЦ РАН, 2012. 232 с.

17. Фомин М.В. Демографические прогнозы и корректность статистики пространственного развития Сибири и Дальнего Востока России // Народонаселение. 2019. № 3. С. 15–29.

18. Фомин М.В. Проектные федеральные территории как объект пространственного развития // Миграционные процессы и их влияние на демографическое и социально-экономическое развитие Дальнего Востока: Сб. трудов II Межд. научно-практической конференции / Под ред. С.В. Рязанцева, Л.А. Савинкиной. Владивосток: Изд-во ДВФУ, 2018. С. 134–138.

19. Hill F., Gaddy C. The Siberian Curse: How Communist Planners Left Russia Out in the Cold Hardcover. Brookings Institution Press, 2003. 303 p.

20. Регионы России. Социально-экономические показатели (2019). Росстат. URL: [https://www.gks.ru/storage/mediabank/Region\\_Pokaz\\_2019.pdf](https://www.gks.ru/storage/mediabank/Region_Pokaz_2019.pdf) (дата обращения 13.04.2020).

21. Безвербный В.А., Мирязов Т.Р. Трансформация системы расселения в Дальневосточном федеральном округе на уровне муниципальных образований // Научное обозрение. Сер. 1: Экономика и право. 2019. № 5. С. 102–114.

22. Фомин М.В., Безвербный В.А. Пространственный каркас Сибири и Дальнего Востока России в условиях демографического сжатия: «вторые» и «третьи» города // Научное обозрение. Сер. 2. Гуманитарные науки. 2018. № 6. С. 33–53.

## REFERENCES

1. *Sever Dal'nego Vostoka. Monografiya / Otv. red. N.A. Shilo.* North of the Far East. Monograph. Ed. N.A. Shilo. Acad. Sciences of the USSR, Institute of geography. Moscow: Nauka, 1970: 488 p. [In Russian]
2. *Fomin M.V. Infrastruktura i svyazannost' severa Dal'nego Vostoka Rossii: migratsiya i natsional'naya bezopasnost' // Bol'shaya Evraziya: natsional'nye i tsivilizatsionnye aspekty razvitiya i sotrudnichestva: Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii.* Infrastructure & connectivity of the Russian Far East North: migration & national security. Greater Eurasia: national and civilizational aspects of development and cooperation. Materials of the international scientific and practical conference. Moscow: INION RAS, 2019: 1024–1029. [In Russian].
3. *Valentey D.I., Horev B.S. Problemy rasseleniya i territorial'nyi printsip v planirovanii // Problemy razvitiya proizvoditel'nykh sil Magadanskoj oblasti: Materialy Vtorogo nauchnogo soveshchaniya po problemam razvitiya i razmeshcheniya proizvoditel'nykh sil Magadanskoj oblasti, 3–5 iyunya 1968 g.* Problems of settlement and territorial principle in planning. 2-nd scientific meeting on the problems of development and productive forces placement of the Magadan region, June 3–5, 1968. Vol.1. Magadan: SVKNII SO AN SSSR, 1969: 231-241. [In Russian].
4. *Dvortsov V.I.* On conceptualization of the Kamchatka territory economy strategic development. *Regional'naya ekonomika: teoriya i praktika.* Regional economy: theory and practice. 2007, 17 (56): 2–7. [In Russian].
5. *Kumo K., Litvinenko T.* The population of Chukotka in space and time. *Rossiiskie regiony: vzglyad v budushchee.* Russian regions: a look into the future. 2016, 3 (8): 50–66. [In Russian].
6. *Naselenie Dal'nego Vostoka Rossii: problemy i tendentsii / E.A. Burlaev, V.N. D'yachenko, E.L. Motrich, N.V. Feshchenko / pod red. P.A. Minakira.* The population of the Russian Far East: problems and tendencies. E.A. Burlaev, V.N. Dyachenko, E.A. Motrich, N.V. Feshchenko. Ed. by P.A. Minakir. Khabarovsk: ERI FEB RAS, 2018: 71p. [In Russian].
7. *Tarasova O.V., Sokolova A.A.* Prospects for the Chukotka's complex development. *Mir ekonomiki i upravleniya.* World of economics and management. 2018, 18 (2): 69–85. [In Russian].
8. *Rybakovsky L.L., Kozhevnikova N.I.* Eastward vector of the demographic development of Russia. *Narodonaselenie.* Population. 2015, 1: 4–16. [In Russian].
9. *Terlecky P.E.* *Problema zaseleniya Krainego Severa.* The problem of the Far North settlement. Moscow: Glavsevmorput', 1945: 10 p. [In Russian].
10. *Navasardov S.M., Svechinsky V.L., Etlis M.M., Yanovsky V.V.* *Sotsiologicheskie i sotsial'no-gigienicheskie obosnovaniya dlya proektirovaniya novykh gorodov i poseleniy gorodskogo tipa na Krainem Severe.* Sociological and socio-hygienic justifications for the design of new cities and urban-type settlements in the Far North. Magadan: SVKNII DVTs AN SSSR, 1988: 12 p. [In Russian].
11. *Yanovsky V.V.* *Chelovek i Sever.* Man and the North. Magadan: Magadanskoe kn. izd-vo, 1968: 158 p. [In Russian].
12. *Sidorkina Z.I.* *Territorial'naya organizatsiya i sotsial'naya samoorganizatsiya naseleniya v slabozaselennom regione.* Population territorial organization and social self-organization in a sparsely populated region. Vladivostok: Dalnauka, 2014: 240 p. [In Russian].
13. *Lazhentsev V.N.* Socio-economic space and territorial development of the North and the Arctic of Russia. *Ekonomika regiona.* Economy of Region. 2018, 14: 353–365. [In Russian].
14. *Pilyasov A.N.* *Zakonomernosti i osobennosti osvoeniya Severo-Vostoka Rossii: (Retrospektiva i prognoz).* Regularities and features of the North-East Russia development: (retrospective and prediction). Magadan: SVKNII DVO RAS, 1996: 145 p. [In Russian].
15. *Egorov E.G.* *Problemy regional'noi ekonomiki na primere Severo-Vostoka SSSR.* Problems of regional economy on the USSR North-East case. Novosibirsk: Nauka, 1979: 286 p. [In Russian].

16. *Ekonomicheskaya bezopasnost' i snizhenie neravnomernosti prostranstvennogo razvitiya rossiiskogo Severa i Arktiki / Pod red. V.S. Selina, E.P. Bashmakovoi.* Economic security and reducing the uneven spatial development of the Russian North and the Arctic. Eds. V.S. Selin, E.P. Bashmakova. Apatity: Publ. of Kola Sc. Center RAS, 2012: 232 p. [In Russian].
17. *Fomin M.V.* Demographic projections and accuracy of the spatial development statistics of Siberia and Far East of Russia. *Narodonaselenie. Population.* 2019, 3: 15–29. [In Russian].
18. *Fomin M.V.* Project Federal Territories (PFT) as an object of spatial development. Migration processes and their influence on the socio-economic and demographic development of the Russian Far East. II International Research and Practical Conference. Proceedings. Vladivostok: Izd-vo DVFU, 2018: 134–138. [In Russian].
19. *Hill F., Gaddy C.* The Siberian curse: How communist planners left Russia out in the cold hardcover. Brookings Institution Press, 2003: 303 p.
20. Region of Russia. Socio-economic indicators (2019). Rosstat. Available at: URL: [https://www.gks.ru/storage/mediabank/Region\\_Pokaz\\_2019.pdf](https://www.gks.ru/storage/mediabank/Region_Pokaz_2019.pdf) (accessed 13.04.2020). [In Russian].
21. *Bezverbny V.A., Miryazov T.R.* Transformation of the settlement system in the Far Eastern Federal district at the level of municipal formations. *Nauchnoe obozrenie. Ser. 1: Ekonomika i pravo.* Scientific Review. Series 1. Economics and Law. 2019, 5: 102–114. [In Russian].
22. *Fomin M.V., Bezverbny V.A.* The spatial framework of Siberia and Far East of Russia in condition of demographic shrinking: “Second” and “Third” cities. *Nauchnoe obozrenie. Ser. 2. Gumanitarnye nauki.* Scientific review. Series 2. Humanities. 2018, 6: 33–53. [In Russian].

## **ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ ЖУРНАЛА «ПРОБЛЕМЫ АРКТИКИ И АНТАРКТИКИ»**

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

Все материалы направляются в редакцию в электронном виде он-лайн через личный электронный кабинет автора на сайте журнала <https://www.aagresearch.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.

Подписано в печать 29.06.2020  
Формат 70×100 1/16  
Тираж 100

Печать цифровая  
Печ. л. 7,375  
Заказ №

Типография издательства Политехнического университета Петра Великого  
195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29

Signed to print 29.06.2020  
Format 70×100 1/16  
Edition 100

Digital Printing  
P.s. 7,25  
Order No

Printing house of Peter the Great Polytechnic University,  
194044, Russia, St. Petersburg, Politekhnikheskaia str., 9.