

- БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ
- НАУКИ О ЗЕМЛЕ

- ЖИЗНЬ НАУКИ.
- КОНФЕРЕНЦИИ, СЕМИНАРЫ - КНИГОИЗДАНИЕ
- ЮБИЛЯРЫ





0 +

# 3/2018 (10)

издается с декабря 2009 года DOI: 10.25702/KSC.2307-5228.2018.10.3 ISSN 2307-5228



# Кольского научного центра РАН

Научно-информационный журнал

Основан в 2009 году Выходит 4 раза в год

Учредитель — Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Кольский научный центр Российской академии наук»

Свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС77-58458 от 25.06.2014 выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.

Главный редактор, председатель Редакционного совета С. В. КРИВОВИЧЕВ, чл.-корр. РАН, д. г.-м. н., проф.

Заместитель главного редактора Г. Ю. ИВАНЮК, д. г.-м. н.

Ответственный секретарь А. Н. ВИНОГРАДОВ, к. г.-м. н.

#### РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

- В. А. МАСЛОБОЕВ, д. т. н., руководитель редколлегии;
- Н. К. БЕЛИШЕВА, д. б. н.;
- Е. А. БОРОВИЧЕВ; к. б. н.;
- О. Б. ГОНТАРЬ, к. б. н. (ПАБСИ КНЦ РАН);
- П. Б. ГРОМОВ, к. т. н.;
- В. Е. ИВАНОВ, д. ф.-м. н.;
- А. А. КОЗЫРЕВ, д. т. н., проф., заслуженный деятель науки РФ; В. В. МЕГОРСКИЙ, к. м. н.;
- Д. В. МОИСЕЕВ, к. г. н. (ММБИ КНЦ РАН);
- А. Г. ОЛЕЙНИК, д. т. н.;
- Т. В. РУНДКВИСТ, к. г.-м. н.;
- С. В. ФЕДОСЕЕВ, д. э. н.

Публикация статей не является свидетельством того, что издатель разделяет мнения их авторов; ответственность за суждения и оценки, выраженные в публикуемых статьях, лежит исключительно на авторах.

184209, г. Апатиты, Мурманская обл., ул. Ферсмана, 14. Тел.: 8-81555-79-754. E-mail: vestnik2@admksc.apatity.ru.

#### РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

- Б. В. ЕФИМОВ, д. т. н., проф., заслуженный энергетик РФ;
- В. К. ЖИРОВ, чл.-корр. РАН, д. б. н., проф.;
- Б. В. КОЗЕЛОВ, д. ф.-м. н. (ПГИ);
- Н. Е. КОЗЛОВ, д. г.-м. н., проф.;
- С. А. КУЗНЕЦОВ, д. х. н.;
- Ф. Д. ЛАРИЧКИН, д. э. н., проф., заслуженный экономист РФ; С. В. ЛУКИЧЕВ, д. т. н.;
- Д. В. МАКАРОВ, д. т. н.;

Г. Г. МАТИШОВ, академик РАН, д. г. н., проф. (ММБИ КНЦ РАН); А. И. НИКОЛАЕВ, чл.-корр. РАН, д. х. н., проф., заслуженный деятель науки РФ;

- В. А. ПУТИЛОВ, д. т. н., проф.;
- И. А. РАЗУМОВА, д. и. н., проф.

Научное издание

Ответственный редактор А. С. Менделева Редакторы: С. А. Шарам, Е. Н. Еремеева (англ. яз.) Технический редактор В. Ю. Жиганов

Подписано к печати 02.10.2018. Дата выхода в свет 10.11.2018. Формат бумаги 60×84 1/8 Усл. печ. л. 26,97. Заказ № 37. Тираж 300 экз. Свободная цена.

Адрес учредителя, издателя и типографии: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Кольский научный центр РАН» 184209, г. Апатиты, Мурманская обл., ул. Ферсмана, 14

Журнал включен в систему Российского индекса научного цитирования.

Подписной индекс в каталоге «Почта России» — П3898

С требованиями к авторам статей, редакционной политикой журнала, а также с архивом выпущенных номеров можно ознакомиться на сайте журнала по адресу: http://www.naukaprint.ru/zhurnaly/vestnik/.

> © Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Кольский научный центр Российской академии наук», 2018

# СОДЕРЖАНИЕ

## БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Макаревич П. Р., Моисеев Д. В. Комплексные экосистемные исследования в районе архипедага Шлицберген в 2017–2018 гг	8
Мосеев Д. С., Сергиенко Л. А. Состав и структура растительных сообществ островов южной части архипелага Земля	U
Франца-Иосифа	14
Белкина О. А., Лихачев А. Ю. Влияние некоторых экологических факторов на локальные флоры мхов Шпицбергена	25
Конорева Л. А., Чесноков С. В. Лишайники окрестностей бывшего пос. Колсбей (о. Западный Шпицберген)	31
Шмакова Н. Ю., Марковская Е. Ф. Структурно-функциональные особенности и содержание пигментов пластид у растений подушковидных форм в арктических тундрах Западного Шпицбергена	43
Дворецкий В. Г., Дворецкий А. Г. Зимний зоопланктон прибрежных вод Шпицбергена	50
Дикаева Д. Р., Фролова Е. А. Фауна полихет в районе архипелага Шпицберген в июле 2017 г	61
Фролова Е. А., Дикаева Д. Р., Хачетурова К. С. Комплексы полихет к югу и юго-востоку от архипелага Шпицберген по результатам экспедиции 2015 г	68
Жилин А. Ю., Плотицына Н. Ф., Лаптева А. М. Мониторинг стойких органических загрязнителей и тяжелых металлов в промысловых рыбах Медвежинско-Шпицбергенского района	78
Самодова А. В., Добродеева Л. К., Штаборов В. А., Пашинская К. О. Влияние реакций мозгового натрийуретического пептида, ирисина, эндотелина-1 на состояние иммунной системы у лиц, работающих на архипелаге Шпицберген, в зависимости от срока проживания	87
НАУКИ О ЗЕМЛЕ	
Мингалев И. В., Орлов К. Г., Мингалев В. С. Численное моделирование циркуляции нижней и средней арктической атмосферы и влияния на нее горных массивов Шпицбергена	93
Романова Н. Ю. Исследование мелкомасштабных неоднородностей в F-области ионосферы над арх. Шпицберген (пос. Баренцбург)	102
Черноус С. А., Филатов М. В., Шагимуратов И. И., Ефишов И. И. Дискретные полярные сияния на Шпицбергене как индикатор влияния состояния полярной ионосферы на навигационные сигналы	106
Ларченко А. В., Пильгаев С. В., Лебедь О. М., Федоренко Ю. В. Особенности структуры электромагнитного поля ОНЧ-диапазона на арх. Шпицберген в экспериментах по нагреву ионосферы	115
Асминг В. Э., Федоров А. В., Аленичева А. О., Евтюгина З. А. Применение системы автоматической локации NSDL для детального изучения сейсмичности архипелага Шпицберген	120
Баранов С. В., Асминг В. Э., Виноградов А. Н., Федоров А. В. Сейсмичность района архипелага Шпицберген в 2016, 2017 гг	132
Епифанов В. П. Тектоническая структура и распределение скоростей в придонных слоях ледников	141
<i>Друщиц В. А., Садчикова Т. А.</i> Эволюция криогенных скоплений гидратов природного газа в арктических регионах в квартере	147

Мавлюдов Б. Р., Кудиков А. В.	
Изменение ледника Альдегонда с начала XX века	152
Третьяков М. В., Бирюкова В. А.	
Многолетние изменения элементов водного баланса реки Альдегонда (остров	
Западный Шпицберген)	163
Епифанов В. П.	
Влияние естественных факторов на морфологию снежного покрова	170
Сосновский А. В., Осокин Н. И.	
Влияние мохового и снежного покровов на устойчивость многолетней мерзлоты	
на Западном Шпицбергене при климатических изменениях	178
Сосновский А. В., Осокин Н. И.	
К оценке термического сопротивления снежного покрова на Западном Шпицбергене	185
Литвинова Т. И., Кашулина Г. М., Коробейникова Н. М.	
Морфолого-генетическая характеристика торфяно-глеезема в пойме реки Грёндален	
острова Западный Шпицберген	192
Кашулина Г. М., Литвинова Т. И., Сидорова О. Р.	
Влияние ландшафтного положения на эмиссию СО2 почвой в окрестностях	
пос. Баренцбург, Шпицберген	198
Новиков М. А.	
Применение цифровой модели донных отложений Баренцева моря	
для анализа загрязнения	204
Шумилов О. И., Касаткина Е. А., Крапиек М., Хохоровски Я., Жиховска-Крапиек Э., Канатьев А. Г.	
Дендрохронологическая датировка русских поселений на юге Шпицбергена: сравнение	
с результатами радиоуглеродного анализа и палеоклиматической обстановкой	209
ЖИЗНЬ НАУКИ. КОНФЕРЕНЦИИ, СЕМИНАРЫ	222
КНИГОИЗДАНИЕ	224
ЮБИЛЯРЫ	226

# 3/2018 (10)

Published since December 2009 DOI: 10.25702/KSC.2307-5228.2018.10.3 ISSN 2307-5228



Publisher — Federal State Budgetary Science Institution Federal Research Centre "Kola Science Centre of RAS"

#### Mass Media Registration Certificate

ΠИ № ΦC77-58458 issued by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media on June, 25 2014.

Editor-in-Chief and Chairman of the Editorial Council S. V. KRIVOVICHEV, Corr. Member of RAS, Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Prof.

Vice Editor-in-Chief G. Yu. IVANUK, Dr. Sci. (Geol. & Mineral.)

Responsible Secretary A. N. VINOGRADOV, PhD (Geol. & Mineral.)

#### EDITORIAL BOARD

- V. A. MASLOBOEV, Dr. Sci. (Eng.), Head of the Editorial Board;
- N. K. BELISHEVA, Dr. Sci. (Bio);
- E. A. BOROVICHEV, PhD (Bio);
- O. B. GONTAR', PhD (Bio), PABGI KSC RAS;
- P. B. GROMOV, PhD (Eng.);
- V. E. IVANOV, Dr. Sci. (Phys. & Math.);
- A. A. KOZYREV, Dr. Sci. (Eng.), Honoured Scientist of the RF, Prof.;
- V. V. MEGORSKY, PhD (Medicine);
- D. V. MOISEEV, PhD (Geography), MMBI KSC RAS;
- A. G. OLEJNIK, Dr. Sci. (Eng.);
- T. V. RUNDKVIST, PhD (Geol. & Mineral.);
- S. V. FEDOSEEV, Dr. Sci. (Econ.)

#### EDITORIAL COUNCIL

B. V. EFIMOV, Dr. Sci. (Eng.), Honoured Power Engineer of the RF. Prof.: V. K. ZHIROV, Corr. Member of RAS, Dr. Sci. (Bio), Prof.; B. V. KOZELOV, Dr. Sci. (Phys. & Math.), PGI; N. E. KOZLOV, Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Prof.; S. A. KUZNETZOV, Dr. Sci. (Chem.); F. D. LARICHKIN, Dr. Sci. (Econ.), Honoured Economist of the RF, Prof.; S. V. LUKICHEV, Dr. Sci. (Eng.); D. V. MAKAROV, Dr. Sci. (Eng.); G. G. MATISHOV, Academician of RAS, Dr. Sci. (Geography), Prof., MMBI KSC RAS; A. I. NIKOLAEV, Corr. Member of RAS, Dr. Sci. (Chem.), Honoured Scientist of the RF, Prof.; V. A. PUTILOV, Dr. Sci. (Eng.), Prof.; I. A. RAZUMOVA, Dr. Sci. (History), Prof.

Scientific Publication

Executive Editor — A. S. Mendeleva Editors: S. A. Sharam, Ye. N. Yeremeyeva (English) Technical Editor — V. Yu. Zhiganov

# The journal has been included in the Russian Science Citation Index (RISC) since 2009.

Subscription index: П3898 (Russian Post catalog).

Statements and opinions expressed in the articles are those of the author(s) and not necessarily those of the Publisher. The Publisher disclaims any responsibility or liability for the published materials.

184209, Fersman str., 14, Apatity, Murmansk Oblast. Tel. 8-81555-79-754. E-mail. vestnik2@admksc.apatity.ru. Information for authors, our policy and archive: http://www.naukaprint.ru/zhurnaly/vestnik/.

© Federal State Budgetary Institution of Science Federal Research Centre "Kola Science Centre of RAS", 2018

# CONTENTS

# **BIOLOGICAL SCIENCE**

Pavel R. Makarevich, Denis V. Moiseev Integrated Ecosystem Research in the Area of Svalbard in 2017–2018	8
Dmitri S. Moseev, Lyudmila A. Sergienko The Composition and Structure of Plant Communities of Islands in the Southern Part of the Franz Joseph Archipelago	14
Olga A. Belkina, Aleksey Yu. Likhachev The Influence of Some Ecologocal Factors on Local Bryofloras in Svalbard	25
Liudmila A. Konoreva, Sergey V. Chesnokov Lichens of Vicinity of the Former Township Kolsbey (West Spitsbergen)	31
Natalia Y. Schmakova, Evgenia F. Markovskaya Structural and Functional Features and the Content of Plastid Pigments in Plants of Cushion-Like Forms in the Arctic Tundra of West Spitsbergen	43
Vladimir G. Dvoretsky, Alexander G. Dvoretsky Winter Zooplankton of Spitsbergen Coastal Waters	50
Dinara R. Dikaeva, Elena A. Frolova Polychaeta Fauna in the Area of the Spitsbergen Archipelago in July 2017	61
Elena A. Frolova, Dinara R. Dikaeva, Kristina S. Khacheturova Polychaete Complexes Southward and South-East of the Spitsbergen Archipelago Based on the Results of the Expedition in 2015	68
Andrey Y. Zhilin, Natalya F. Plotitsyna, Anna M. Lapteva Monitoring of Persistent Organic Pollutants (Pop's) and Heavy Metals in Commercial Fish from the Medvezhinsky-Spitsbergen Area	78
Anna V. Samodova, Liliya K. Dobrodeeva, Vyacheslav A. Shtaborov, Ksenia O. Pashinskaya Influence of Brain Natriuretic Peptide, Irisin and Endothelin-1 Reactions on the Immune System in Persons Working in the Svalbard Archipelago Depending on Duration of Stay	87
EARTH SCIENCES	
Igor V. Mingalev, Konstantin G. Orlov, Victor S. Mingalev Numerical Modeling of the Circulation of the Arctic Lower and Middle Atmosphere and Its Dependence on the Svalbard's Mountains	93
Natalia Yu. Romanova	
Investigation of Small-Scale Irregularities in F-Region of Ionosphere over Spitsbergen Archipelago (Barentsburg)	102
Sergei A. Chernous, Mikhail V. Filatov, Irk I. Shagimuratov, Ivan I. Efishov Discrete Aurra as Indicator of Polar Ionosphere Impact on GNSS Signals at Spitsbergen	106
Alexey V. Larchenko, Sergey V. Pil'gaev, Olga M. Lebed', Yury V. Fedorenko Peculiarities of the VLF Electromagnetic Field Structure in Spitsbergen Exciting by Ionosphere Heating Experiments	115
Vladimir E. Asming, Andrey V. Fedorov, Alena O. Alenicheva, Zinaida A. Jevtjugina Usage of the NSDL Location System for the Detailed Study of the Spitsbergen Archipelago Seismicity	120
Sergey V. Baranov, Vladimir E. Asming, Anatoliy N. Vinogradov, Andrey V. Fedorov Seismicity of Spitsbergen Area in 2016, 2017	132
Viktor P. Epifanov Tectonic Structure and Velocity Distribution in the Bottom Layers of Glaciers	141
Valentina A. Drouchits, Tamara A. Sadchikova Permafrost Natural Gas Hydrate Development in the Arctic Regions for Quaternary	147
Bulat R. Mavlyudov, Arsenij V. Kudikov Changing of the Aldegonda Glacier since the Beginning of the 20th Century	152
Mikhail V. Tretiakov, Valentina A. Biryukova	

Viktor P. Epifanov	
Effect of Natural Factors on the Morphology of the Snow Cover	170
Alexander V. Sosnovsky, Nikolai I. Osokin Impact of Moss and Snow Cover on the Sustainability of Permafrost in West Spitsbergen due to Climate Change	178
Alexander V. Sosnovsky, Nikolai I. Osokin To the Assessment of Thermal Resistance of Snow Cover in West Spitzbergen	185
<ul> <li>Tatyana I. Litvinova, Galina M. Kashulina, Natalia M. Korobeynikova</li> <li>Histic Gleysol of the Hilly Bog at the Coastal Area of the Grenfjord, Svalbard:</li> <li>Morphology and Chemistry.</li> </ul>	192
Galina M. Kashulina, Tatjana I. Litvinova, Ol'ga R. Sidorova Summer CO <sub>2</sub> Emission by Soil at Five Localities near Barentsburg, Svalbard	198
Mikhail A. Novikov Application of the Digital Model of the Barents Sea Bottom Deposits for Analysis of the Contamination	204
Oleg I. Shumilov, Elena A. Kasatkina, Marek Krapiec, Jan Chochorowski, Elzbieta Szychowska-Krapiec, Alexander G. Kanatjev	
Tree-Ring Dating of Russian Settlements at Southern Spitsbergen: Comrarison with the Results of Radiocarbon Analysis and Palaeoclimatic Situation.	209
CONFERENCES	222
NEW BOOKS	224
ANNIVERSARIES	226

# DOI: 10.25702/KSC.2307-5228.2018.10.3.8-13 УДК 551.46.07

# КОМПЛЕКСНЫЕ ЭКОСИСТЕМНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В РАЙОНЕ АРХИПЕЛАГА ШПИЦБЕРГЕН В 2017–2018 гг.\*

## П. Р. Макаревич, Д. В. Моисеев

ФГБУН Мурманский морской биологический институт КНЦ РАН

#### Аннотация

Представлен обзор комплексных экосистемных исследований в районе арх. Шпицберген, проведенных ММБИ в 2017–2018 гг. Особое внимание уделено морским исследованиям на НИС «Дальние Зеленцы». Перечислены основные направления исследований, представлены сроки и географический охват научных работ. Дана информация о межведомственном и международном сотрудничестве.

#### Ключевые слова:

комплексные экосистемные исследования, архипелаг Шпицберген, ММБИ.

## INTEGRATED ECOSYSTEM RESEARCH IN THE AREA OF SVALBARD IN 2017-2018

#### Pavel R. Makarevich, Denis V. Moiseev

Murmansk Marine Biological Institute of KSC RAS

#### Abstract

The paper presents the review of integrated ecosystem research conducted by MMBI in the area of Svalbard in 2017–2018. Special attention is devoted to marine research on board R/V "Dalnie Zelentsy". Main directions of investigations are listed. Terms and geographic areas of scientific work are presented. Information about interdepartmental and international cooperation is given.

#### **Keywords:**

integrated ecosystem research, Svalbard, MMBI.



#### Введение

Мурманский морской биологический институт (ММБИ) проводит научные исследования в районе арх. Шпицберген начиная с 1960-х гг. В 1990-е гг. исследования ММБИ приобрели комплексный экосистемный характер. В ходе этих экспедиций был собран обширный материал, анализ которого позволил получить новые современном структуре сведения 0 состоянии, И функционировании абиотических биотических И

составляющих экосистем Гренландского и Баренцева морей в районе Шпицбергена. Были получены уникальные сведения о функционировании пелагических и бентических сообществ в разные сезоны и годы. Собраны и проанализированы данные о структуре популяций морских птиц, почвенных микроартропод и паразитов. Сделана оценка современных процессов осадконакопления в районе Грён-фьорда.

В 2010 г. в районе Баренцбурга (севернее 78° с. ш.) для обеспечения комплексных экосистемных исследований на арх. Шпицберген, в особенности в районе Грён-фьорда, была построена биогеостанция ММБИ, которая является одной из самых северных биостанций

<sup>\*</sup> Работа выполнена в рамках темы государственного задания ММБИ КНЦ РАН «Комплексные исследования экосистем фьордов и морей, омывающих архипелаг Шпицберген».

Российской Федерации в Арктике. Состоит из двух зданий — лабораторного корпуса и контейнера-гаража. Полевой стационар укомплектован лабораторным оборудованием для первичного анализа биологических проб и обработки данных. Имеется зал для совещаний, мини-кухня. Отдельно расположен контейнер для хранения лодки, мотора и экспедиционного снаряжения.

До 2016 г. целевое государственное финансирование научно-исследовательских работ (НИР) ММБИ и других научных организаций на арх. Шпицберген осуществлялось через ФГУП «Трест "Арктикуголь"». С 2017 г. целевые НИР на Шпицберген финансируются через федеральные органы исполнительной власти, которые направляют средства подведомственным организациям. Таким образом, к августу 2017 г. была согласована тематика и подтверждено бюджетное финансирование новой темы государственного задания ММБИ «Комплексные исследования экосистем фьордов и морей, омывающих архипелаг Шпицберген». Тема носит межлабораторный характер и продолжает ранее проводимые ММБИ исследования на Шпицбергене [1–3].

В рамках комплексных экосистемных исследований в 2017 и 2018 гг. ученые ММБИ проводили исследования по следующим направлениям:

1) анализ данных о состоянии водных масс на акваториях архипелага;

2) закономерности пространственного распределения вирио-, бактерио-, фито- и зоопланктона в прибрежных водах Шпицбергена;

3) получение новых данных об экологии донных организмов, разнообразии, динамике и функциональных особенностях зообентоса в прибрежных экосистемах архипелага;

4) оценка распространения и запасов макрофитов в прибрежной зоне Шпицбергена;

5) выявление основных экологических факторов, влияющих на состав, структуру и динамику разнообразия птиц и морских млекопитающих;

6) оценка роли модельных видов мигрирующих птиц в формировании разнообразия почвенных микроартропод на Шпицбергене;

7) анализ уровней химического и радиоактивного загрязнения в среде и биоте архипелага;

8) подготовка баз данных компонентов морских экосистем как основы оптимального планирования мероприятий по охране окружающей среды на арх. Шпицберген.

В ходе реализации темы научно-исследовательская деятельность осуществлялась по трем блокам:

1) сбор научного материала в морских и береговых экспедициях в районе арх. Шпицберген;

2) аналитическая обработка полевого материала в лабораториях в Баренцбурге (Шпицбергенская биогеостанция ММБИ и РНЦШ) и Мурманске;

3) публикация научных статей в российских и зарубежных изданиях, а также популяризация проводимых на архипелаге исследований.

Обзор научных работ, проведенных ММБИ в 2017–2018 гг. в рамках каждого блока представлен в настоящем материале.

## Сбор научного материала в морских и береговых экспедициях в районе арх. Шпицберген

Одним из важнейших направлений в исследованиях окружающей среды является экспедиционный сбор научного материала. Полевые работы ММБИ в районе арх. Шпицберген в 2017 и 2018 гг. выполнялись на море, с борта НИС «Дальние Зеленцы», и на суше, в районе пос. Баренцбург.

## Морские исследования

Экспедиции на НИС «Дальние Зеленцы» состоялись в июле, ноябре 2017 г., в апреле-мае 2018 г. (рис. 1) В июле 2017 г. объем морских научных работ в территориальных водах Шпицбергена составил 85 чел/сут, в ноябре 2017 г. — 135 чел/сут, в апреле-мае 2018 г. — 60 чел/сут. В экспедициях принимали участие сотрудники ММБИ, ААНИИ, МГТУ, МАГУ, ЧГУ,

UNIS, UiT. По специальному разрешению, полученному от норвежских властей, судно работало в территориальных водах архипелага и осуществляло заходы в порты Баренцбурга и Лонгиербюена. Экспедиционные исследования носили комплексный экосистемный характер и охватили бо́льшую часть акватории системы залива Ис-фьорд на нескольких разрезах. В мае 2018 г. география работ расширилась за счет проведения отбора проб в малоизученном заливе Колсбей рядом с законсервированным российским пос. Грумант.



Рис. 1. Станции и маршруты экспедиционных исследований ММБИ на НИС «Дальние Зеленцы» в районе арх. Шпицберген (*a*) и системы залива Ис-фьорд (*б*) в 2017–2018 гг.

Fig. 1. Stations and routes of MMBI expeditionary research on board R/V "Dalnie Zelentsy" in the area of Spitsbergen archipelago (a) and in the Isfjorden ( $\delta$ )

Комплекс работ включал СТД-зондирование для измерения температуры и солености морской воды от поверхности до дна, отбор проб на содержание биогенных элементов и растворенного кислорода, вирио-, бактерио-, фитопланктона, макрозообентоса, а также на радиоактивное загрязнение. Производился сетной лов зоопланктона, наблюдения за морскими птицами и млекопитающими.

В настоящее время «Дальние Зеленцы» является единственным российским научноисследовательским судном, которое в кооперации с российскими и зарубежными учеными осуществляет морские работы в районе арх. Шпицбергена и заходы в порты Баренцбурга и Лонгиербюена. Для этого перед каждым рейсом ММБИ через запрос во 2-й Европейский департамент МИД РФ оформляет разрешение на научные исследования и заходы в порты у норвежских властей [4].

В 2016–2018 гг. ММБИ принимал участие в международном проекте IMOS (Isfjorden Marine Observatory Svalbard — Морская обсерватория в заливе Ис-фьорд на Шпицбергене). Основным партнером являлся UNIS.

Основная цель проекта — проследить кратко- и долгосрочные тенденции в размерной структуре и в составе сообществ планктона в Ис-фьорде. Для ее достижения решались задачи по объединению имеющихся в России и Норвегии планктонных данных, созданию единого протокола отбора проб, проведению совместных полевых исследований в Ис-фьорде [5]. В рамках

IMOS было выполнено две совместных с UNIS съемки в Ис-фьорде — в июле и ноябре 2017 г. В этих экспедициях на базе согласованного протокола отбора проб использовалось разнообразное научное оборудование, отвечающее самым высоким международным стандартам.

## Береговые и прибрежные наблюдения

Местом базового размещения участников береговых экспедиций и предварительной обработки первичного полевого материала является Шпицбергенская биогеостанция ММБИ в Баренцбурге (рис. 2). В береговых экспедициях проведены альгологические, бентологические и орнитологические исследования в районе залива Грён-фьорд. Продолжалось изучение процессов осадконакопления и уровней радиоактивного загрязнения в системе «ледниковое озеро — ледник — фьорд».

Выезды сотрудников ММБИ в Баренцбург для проведения полевых и камеральных работ состоялись в августе-сентябре 2017 г. (72 чел/сут), марте-мае (102 чел/сут) и июле-августе (142 чел/сут) 2018 г. Кроме того, во время заходов НИС «Дальние Зеленцы» в Баренцбург в июле, ноябре 2017 г. и мае 2018 г. несколько научных сотрудников высаживались на берег для работы на биогеостанции в тот период, когда судно выполняло исследования в Ис-фьорде.



Рис. 2. Шпицбергенская биогеостанция ММБИ в Баренцбурге (фото из архивов ММБИ) Fig. 2. MMBI biogeostation in Barentsburg, Svalbard (photo from archives of MMBI)

## Аналитическая обработка полевого материала в лабораториях в Баренцбурге (Шпицбергенская биогеостанция ММБИ и РНЦШ) и Мурманске

Доставка проб и материалов, собранных в ходе полевых работ, со Шпицбергена на «большую землю» является достаточно непростым мероприятием, связанным с передвижением авиатранспортом и пересечением государственных границ, поэтому максимально возможная обработка собранного материала на месте представляет большой интерес для всех научных организаций, работающих на Шпицбергене.

Шпицбергенская биогеостанция ММБИ оборудована всем необходимым для первичной обработки биологических и геохимических проб, но если дело касается более сложных анализов, тогда сотрудники ММБИ обращаются в химико-аналитическую лабораторию Российского научного центра на арх. Шпицберген (РНЦШ), которая обслуживается и поддерживается

сотрудниками Российской научной арктической экспедиции ААНИИ на арх. Шпицберген (http://www.aari.ru/rscs\_new/index.php?id=3#arc\_hlab). Она представляет лабораторный комплекс для решения разнообразных научных задач, решаемых организациями Консорциума РНЦШ.

# Публикация научных статей в российских и зарубежных изданиях, популяризация проводимых на архипелаге исследований

Результаты научных исследований ММБИ в районе арх. Шпицберген, проведенных в 2017 и 2018 гг. в рамках темы госзадания «Комплексные исследования экосистем фьордов и морей, омывающих архипелаг Шпицберген», представлены в форме тезисов 22 докладов XIV Всероссийской научной конференции с международным участием «Комплексные исследования природы Шпицбергена и прилегающего шельфа», опубликованы в российских [6–8] и зарубежных [9] научных журналах, обнародованы на разнообразных конференциях [10–12]. Следует отметить успешный опыт сотрудничества ученых ММБИ и ААНИИ в проведении совместных исследований и подготовке научных публикаций [6, 8, 10, 12]. Сотрудники Института регулярно публикуют научно-популярные материалы в «Российском вестнике Шпицбергена» [13–19].

## Заключение

Непосредственно в морских и береговых полевых работах на арх. Шпицберген в 2017 г. принимали участие 30 научных сотрудников ММБИ, в 2018 г. — 16. Общее время присутствия специалистов Института на архипелаге в 2017 г. составило 319 чел/дней. В 2018 г. научные и технические сотрудники ММБИ отработали в районе Шпицбергена в общей сложности 364 чел/дней, из них 120 чел/дн. — в морской экспедиции на НИС «Дальние Зеленцы» в территориальных водах Шпицбергена, 244 чел/дн. — на базе биогеостанции ММБИ в Баренцбурге. По итогам исследований опубликовано свыше 10 научных работ, 7 научнопопулярных статей, защищена кандидатская диссертация. Результаты НИР были представлены на российских и международных конференциях. Сформированы цели и задачи исследований ММБИ на Шпицбергене на 2019 г.

## Благодарности

Авторы выражают признательность Г. Н. Духно за помощь в подготовке карт-схем районов экспедиционных исследований НИС «Дальние Зеленцы», а также коллегам из организаций Консорциума РНЦШ за помощь и поддержку в решении разнообразных вопросов, возникавших в период проведения полевых и аналитических исследований на Шпицбергене.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Макаревич П. Р., Моисеев Д. В. Комплексные экосистемные исследования Мурманского морского биологического института на НИС «Дальние Зеленцы» в летний и осенне-зимний периоды 2017 года // Труды Кольского научного центра. Океанология. 2018. № 4 (10), вып. 5. С. 5–14. 2. Исследования Мурманского морского биологического института в районе архипелага Шпицберген в 2017 г. / П. Р. Макаревич [и др.] // Экспедиционные исследования на научно-исследовательских судах ФАНО России и архипелаге Шпицберген в 2017 г.: тез конф. «Итоги экспедиционных исследований на научных судах ФАНО России» (г. Москва, 21–22 февраля 2018 г.) / ФАНО России. Севастополь: ФГБУН МГИ, 2018. С. 43-48. URL: http://mhi-ras.ru/ assets/files/Sbornik\_FANO\_2018.pdf. 3. Экспедиционные исследования ММБИ КНЦ РАН в 2017 г. / П. Р. Макаревич [и др.] // Экспедиционные исследования на научноисследовательских судах ФАНО России и архипелаге Шпицберген в 2017 г.: тез. конф. «Итоги экспедиционных исследований на научных судах ФАНО России» (г. Москва, 21–22 февраля 2018 г.) / ФАНО России. Севастополь: ФГБУН МГИ, 2018. С. 66–77. URL: http://mhi-ras.ru/ assets/files/Sbornik\_FANO\_2018.pdf. 4. Макаревич П. Р., Моисеев Д. В. 40 лет научно-исследовательскому судну «Дальние Зеленцы» // Исследования арктических экосистем: материалы ХХХVI конф. молодых ученых ММБИ КНЦ РАН, посвященной 40-летию НИС «Дальние Зеленцы» / отв. ред. Д. В. Моисеев; Мурман. мор. биол. ин-т КНЦ РАН. Мурманск, 2018. С. 5–12. 5. Isfjorden Marine Observatory Svalbard / J. E. Søreide [et al.] // Комплексные исследования природы Шпицбергена и прилегающего шельфа: материалы Всерос. науч. конф. с междунар. участием / Мурман. мор. биол. ин-т КНЦ РАН. 2016. С. 339. 6. Ртуть в гидробионтах и среде обитания Грён-фьорда (Западный Шпицберген) ранней весной / Н. В. Лебедева [и др.] // Геохимия. 2018. № 4. С. 351–362.

DOI: 10.7868/S0016752518040052. 7. Результаты морских радиоэкологических исследований фьордов Западного Шпицбергена / Г. Г. Матишов [и др.] // ДАН. 2018. Т. 480, № 3. С. 353–358. 8. Ртуть в компонентах экосистемы заливов Западного Шпицбергена в летний период 2017 года / Н. В. Лебедева [и др.] // Проблемы Арктики и Антарктики. 2018. Т. 64, № 3. С. 311–325. 9. What role does human activity play in microbial biogeography? The revealing case of testate amoebae in the soils of Pyramiden, Svalbard / Y. A. Mazei [et al.] // Pedobiologia - Journal of Soil Ecology. 2018. Vol. 67. Р. 10–15. 10. Особенности энергомассообмена в водах фьордов архипелага Шпицберген в зимний период / Б. В. Иванов [и др.] // Турбулентность, динамика атмосферы и климата: тез. докл. междунар. конф., посвященной столетию со дня рождения акад. Александра Михайловича Обухова (Москва, 16–18 мая 2018 г.). М.: Физматкнига, 2018. С. 186. 11. Годовой цикл развития и продукционный потенциал пелагических альгоценозов прибрежных вод и фьордов Западного Шпицбергена / П. Р. Макаревич [и др.] // Материалы научных мероприятий, приуроченных к 15-летию Южного научного центра Российской академии наук: междунар. науч. форум «Достижения академической науки на Юге России»; междунар. молодеж. науч. конф. «Океанология в XXI веке: современные факты, модели, методы и средства» памяти чл.-корр. РАН Д. Г. Матишова; всерос. науч. конф. «Аквакультура: мировой опыт и российские разработки» (г. Ростов-на-Дону, 13–16 декабря 2017 г.) / гл. ред. акад. Г. Г. Матишов. Ростов н/Д: Изд-во ЮНЦ РАН, 2017. С. 66–67. 12. Mercury in benthic organisms and their habitat in Grønfjorden, West Spitsbergen, in early springtime / A. Nikulina [et al.] // NETS2018: Towards a solution for pollution in a warming Arctic. March 14-16, 2018 in Longyearbyen, Svalbard: Abstract book: 7th Norwegian Environmental Toxicology Symposium (March 14-16, 2018 in Longyearbyen, Svalbard) / V. L. B. Jaspers [et al.]. 2018. P. 18. 13. Лебедева Н. Прекрасная гребенушка // Русский вестник Шпицбергена. 2017. № 4 (30). С. 20–21. 14. Лебедева Н. Пернатые гастролеры // Русский вестник Шпицбергена. 2017. № 4 (30). С. 21. 15. Воскобойников Г. М., Макаров М. В. Как зимует морская капуста // Русский вестник Шпицбергена. 2017. № 5 (31). С. 20–21. 16. В объективе фотокамеры: а собаки лучше! [фоторепортаж] / Д. Тюрюмин [и др.] // Русский вестник Шпицбергена. 2018. № 2 (34). С. 16–17. 17. Воскобойников Г. Фукусы: гиганты и карлики // Русский вестник Шпицбергена: [Человек и природа]. 2018. № 3 (35). С. 20–21. 18. Федонин М., Лебедева Н. Чем питается песец на Шпицбергене: [Н. Лебедева отвечает на вопросы читателей] // Русский вестник Шпицбергена. 2018. № 3 (35). С. 21. 19. Чернакова И., Лебедева Н. Где проводят полярную ночь птицы?: [Н. Лебедева отвечает на вопросы читателей] // Русский вестник Шпицбергена. 2018. № 4 (36). C. 21.

# Сведения об авторах

*Макаревич Павел Робертович* — доктор биологических наук, профессор, директор ММБИ КНЦ РАН E-mail: makarevich@mmbi.info

*Моисеев Денис Витальевич* — кандидат географических наук, заместитель директора по науке ММБИ КНЦ РАН

E-mail: denis\_moiseev@mmbi.info

## **Author Affiliation**

Pavel R. Makarevich — Dr. Sci. (Bio); Professor, Director of MMBI KSC RAS E-mail: makarevich@mmbi.info Denis V. Moiseev — PhD (Geography), Deputy Research Director of MMBI KSC RAS E-mail: denis\_moiseev@mmbi.info

## Библиографическое описание статьи

*Макаревич, П. Р.* Комплексные экосистемные исследования в районе архипелага Шпицберген в 2017–2018 гг. / *П. Р. Макаревич, Д. В. Моисеев* // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2018. — № 3 (10). — С. 8–13.

## Reference

Makarevich Pavel R., Moiseev Denis V. Integrated Ecosystem Research in the Area of Svalbard in 2017–2018. Herald of the Kola Science Centre of the RAS, 2018, vol. 3 (10), pp. 8–13 (In Russ.).

# СОСТАВ И СТРУКТУРА РАСТИТЕЛЬНЫХ СООБЩЕСТВ ОСТРОВОВ ЮЖНОЙ ЧАСТИ АРХИПЕЛАГА ЗЕМЛЯ ФРАНЦА-ИОСИФА\*

# Д. С. Мосеев<sup>1</sup>, Л. А. Сергиенко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГБУН Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, г. Москва <sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», Институт биологии, экологии и агротехнологий

## Аннотация

Архипелаг Земля Франца-Иосифа является одной из самых труднодоступных для посещения территорий Российской Арктики, в связи с чем большинство его островов остаются довольно слабо изученными геоботанически либо не исследовались совсем. В статье приводится геоботаническая характеристика островов южной части архипелага: Сальма, Ли-Смита, большой остров из группы островов Этериджа, где ботанические исследования нами проводились впервые в ходе экспедиции «Открытый океан: архипелаги Арктики — 2016». Выделено 8 типов местообитаний, различающихся по составу и структуре растительного покрова. В ходе экспедиции выявлены новые ботанические открытия для западного сектора Российской Арктики. Так, на острове Сальма отмечен новый для архипелага вид сосудистых растений — *Saxifraga svalbardensis*, на острове Ли-Смита отмечен новый вид мхов — *Syntrichia norvegica*. На островах отмечено три вида лишайников рода *Umbillicaria*, ранее не известных для архипелага: *Umbillicaria proboscidea* (L.) Schrad., *U. decussate* (Vill.) Zahlbr., *U. cylindrica* (L.) Delise ex Duby. Исследование имеет важное практическое значение для организации природоохранных мероприятий на территории национального парка «Русская Арктика», в состав которого входит архипелаг.

#### Ключевые слова:

растительность, экотоп, Российская Арктика, Земля Франца-Иосифа, классификация.

# THE COMPOSITION AND STRUCTURE OF PLANT COMMUNITIES OF ISLANDS IN THE SOUTHERN PART OF THE FRANZ JOSEPH ARCHIPELAGO

## Dmitriy S. Moseev<sup>1</sup>, Lyudmila A. Sergienko<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Shirshov Institute of Oceanology of RAS, Moskow <sup>2</sup>Department of Botany and Plant Physiology of the Institute of Biology, Ecology and Agrotechnology of Petrozavodsk State University

<sup>\*</sup> Исследовательские работы экспедиции «Открытый Океан: архипелаги Арктики — 2016» (O2A2-2016) выполнены по гранту проекта Программы развития ООН в России, Глобального экологического фонда и Минприроды России (ПРООН/ГЭФ-МПР) «Задачи сохранения биоразнообразия в политике и программах развития энергетического развития России» в рамках поддержки комплекса мер, направленных на сохранение биологического разнообразия, в том числе на предотвращение гибели объектов животного мира в случае разливов нефти и нефтепродуктов в Арктической зоне Российской Федерации. Участие в работе автора Д. С. Мосеева также осуществлялось при поддержке темы № 0149-2018-0016 государственного задания «Современные и древние донные осадки и взвесь Мирового океана — геологическая летопись изменений среды и климата: рассеянное осадочное вещество и донные осадки морей России, Атлантического, Тихого и Северного Ледовитого океанов — литологические, геохимические и микропалеонтологические исследования; изучение загрязнений, палеообстановок и процессов в маргинальных фильтрах рек».

#### Abstract

The Franz Josef Land archipelago is one of the most difficult to visit territory of the Russian Arctic, and therefore most of the Islands of the Franz Josef Land remain rather poorly geobotanically studied, or have not been studied at all. The article presents a geobotanical characteristic of Islands in the southern part of the archipelago: Salma, Lee Smith, the big island of the Eteridge group of the islands, where botanical research was first conducted by us in the course of the expedition "The Open Ocean: The Archipelagos of the Arctic - 2016." The classification of vegetation cover according to the principles of classification of habitats is given, on the basis of which 8 types of ecotopes with communities different in species composition and structure, are identified. 27 geobotanical descriptions of phytocenoses including three groups of plant organisms are given: mosses, lichens and vascular plants. One new species of vascular plants was discovered on the island of Salma previously known as the end of the neighboring land of Franz Josef Land and the Svalbard archipelago - Saxifraga svalbardensis. A new species of moss — Syntrichia norvegica — was found on the island of Lee Smith. The Islands are noted for three species of lichens of the genus Umbillicaria, previously unknown for the archipelago: Umbillicaria proboscidea (L.) Schrad., U. decussate (Vill.) Zahlbr., U. cylindrica (L.) Delise ex Duby. The study can help to organize the nature protection activities on the territory of the National Park "Russian Arctic" and the archipelago is a part of it.

#### Keywords:

vegetation, ecotope, Russian Arctic, Franz Josef Land, classification.





#### Введение

Архипелаг Земля Франца-Иосифа — самая северная островная суша в Российской Арктике. Площадь территории архипелага составляет более 16 тыс. км<sup>2</sup>. В его состав входят 192 острова, большинство из которых небольшие по площади. Согласно классификации П. А. Каплина, на архипелаге наибольшую протяженность по отношению к береговой линии моря имеют фьордовые геоморфологии преобладают ледяные и денудационные

берега с осыпными склонами базальтовых плато [1].

Несмотря на развитие современной транспортной системы, этот архипелаг до сих пор остается труднодоступной для посещения территорией. Ботанические исследования на его территории представляют собой большие перспективы в отношении довольно слабой изученности растительных сообществ высокой Арктики, обнаружения новых видов растительных организмов, разработки программ ведения мониторинга окружающей среды.

Основная цель работы<sup>\*</sup> заключается в изучении состава и структуры растительных сообществ ранее ботанически не исследованных островов Земли Франца-Иосифа: Ли-Смита, Сальма и Этериджа — и разработке их классификации по типам местообитаний (рис.). Следует отметить, что растительный покров на архипелаге в основном приурочен к небольшим мысам морского побережья, свободным от ледников, что характерно и для островов, рассматриваемых в данной работе.

В летний период 2016 г. проводилась комплексная экспедиция «Открытый океан: архипелаги Арктики — 2016 (O2A2)», в ходе которой исследовались следующие о-ва ЗФИ: Гукера, Джексона, Ева-Лив, Кейна, Хейса, Алджера, Сальма, Ли-Смита, большой остров из группы островов Этериджа, Мейбел, Земля Георга, Белл. Из них впервые обследованы острова: Сальма (южное побережье), Ли-Смита (мыс Виттенбурга), Большой Этериджа. Все три острова небольшие по площади, из них самый крупный — Сальма имеет площадь 273,03 км<sup>2</sup>.

<sup>\*</sup> В работе приведены сокращения: п. п. — проективное покрытие, ЗФИ — Земля Франца-Иосифа.

В настоящее время архипелаг входит в состав территории одного из крупнейших в России национальных парков — «Русская Арктика», что имеет большое значение для охраны уязвимых к негативному антропогенному воздействию растительных сообществ высокой Арктики.



Карта-схема экспедиционных исследований на арх. Земля Франца-Иосифа (острова, где геоботанические исследования проводились впервые выделены цифрами: 1 — Сальма; 2 — Ли-Смита; 3 — большой остров из группы островов Этериджа)

The schematic map of forwarding researches on Franz Josef Land (islands where geobotanical researches were conducted for the first time are allocated with figures: *1* — Salma; *2* — Lee Smith; *3* — Eteridge Big)

#### Обзор литературы

Ботанические исследования на архипелаге начались еще в конце IX — начале XX вв., но носили лишь отрывочные флористические сведения о видовом составе мхов, сосудистых растений и лишайников, эти данные приведены в работах [2–6]. Более подробные данные о видовом составе мхов и их экологии приводятся в работах Л. И. Савич [3, 4]. После долгого периода исследования были продолжены в 1970-х и 1980-х гг. и возобновлены учеными Ботанического института им. В. Л. Комарова. Из них В. Д. Александровой [7, 8] были проведены геоботанические работы на севере острова Земля Александры, а И. Н. Сафроновой исследованы острова Гукера и Мейбел [9–11]. В этих работах впервые отражены сведения о составе и структуре растительных сообществ ЗФИ, приведены их первые классификации. Наиболее изученными в ботаническом отношении являются относительно доступные для посещения острова Гукера и Хейса, результаты исследований которых приведены в работах [9, 10, 12–15]. Обобщающие результаты по растительным сообществам архипелага приведены в монографии «Растения и грибы полярных пустынь Северного полушария» [16]. Аннотированные списки сосудистых растений и мхов, составленные на основании обследования большей части территории ЗФИ, приводятся в работах [9, 15, 17, 18].

#### Методика исследований

На островах Сальма, Ли-Смита и Этериджа геоботанические исследования проводились на 27 пробных площадках размером 1×2 и 3×3 м, заложенных в пределах фитоценозов с однородными условиями произрастания.

На каждой пробной площадке проводилось полное геоботаническое описание растительных сообществ с детальным учетом флористического состава фитоценозов с фиксацией координат с помощью спутникового навигатора (GPS) Garmin 62s. Для каждого вида определялись: проективное покрытие (%), средняя высота, фенофаза и жизненность. Оценка принадлежности

видов к той или иной эколого-ценотической группе и других признаков видов дана на основании наблюдений за поведением видов в природе [19, 20]. При экологической оценке местообитаний учитывались: типы макро- мезо- и микрорельефа, включая экспозицию склонов; механический состав грунтов, наличие водотоков и водоемов, снежников и ледников. Обследование растительного покрова островов также визуально велось на маршрутах, где оценивались видовой состав и экологические характеристики местообитаний (особенности рельефа, тип грунта, обилие).

Растительные сообщества высокоарктических островов часто сильно разрежены. Кроме того, на островах явно выражено преобладание мхов и лишайников над сосудистыми растениями, что зачастую затрудняет не только выделение формаций, но и растительных ассоциаций. В нашей работе мы следуем принципам классифицирования местообитаний, высказанным в работе [21], согласно которым местообитания распределяются по двум основным признакам — экотопа и растительности. Основной единицей классификации сообществ является тип местообитания, который, как правило, именуется по характерным видам, произрастающим на данном участке растительного сообщества.

Для островов Ли-Смита, Сальма и Этериджа нами предложены следующие 8 типов экотопов, выделенных на основании форм берегового мезорельефа, механического состава грунтов и степени влияния моря:

1) берега ледниковых озер и ручьев на моренных террасах;

2) микродепрессии берегов ледниковых озер с торфянисто-гравийными грунтами;

3) ложбины за скатами старых приморских береговых валов;

4) береговые валы в зоне импульверизации морских брызг супралиторали;

5) полигональные моренные равнины с эрозионным расчленением;

6) полярнопустынные пустоши сухих местообитаний;

7) прибрежья акваторий ледниковых озер;

8) расщелины глыб морского берега с илисто-песчаными грунтами в зоне импульверизации морских брызг.

# Результаты и обсуждение

Растительный покров разных экотопов островов Ли-Смита, Сальма и Большой Этериджа, отличается, несмотря на определенное сходство в механическом составе грунтов. Доминирующее положение занимают мхи и лишайники, заметно меньшее участие в образовании растительных сообществ принимают сосудистые растения, что характерно для всей территории Земли Франца-Иосифа. Ниже мы приводим описания растительного покрова для 8 экотопов обследованных территорий островов. Краткие геоботанические описания приводятся в таблице.

# 1. Берега ледниковых озер и ручьев на моренных террасах

Экология. Этот тип экотопов выделен для островов Сальма (южная оконечность) и Ли-Смита (мыс Виттенбурга), с развитой сетью ледниковых водоемов и водотоков. Ручьи с каменистыми грунтами вытекают из озер. На острове Ли-Смита представлена группа ледниковых озер, расположенных в микродепрессиях низких моренных террас разного уровня, озера соединены ручьем, который, вытекая по низким склонам, образует каскад водотоков.

Растительные сообщества распространяются узкими полосами шириной 1–2 м, по влажным галечно-щебнистым берегам ледниковых ручьев и озер. Развитию сообществ способствует накопление мелкозема с примесью торфа. Торф образуется в результате деструкции мохового опада.

Видовой состав и структура сообществ. Для местообитаний характерны моховые и травяно-моховые сообщества, которые отличаются самым богатых видовым составом мхов и сосудистых растений на обследованных нами островах. Основной фон растительности образуют мхи, проективное покрытие которых составляет 30–40 %. Мхи образуют комплексы сообществ, в которых может доминировать несколько видов, реже встречаются группировки из 1–2 видов мхов.

Геоботанические описания растительных сообществ островов Ли-Смита, Сальма и Этериджа большой Geobotanical descriptions of vegetable communities of the islands of Lee Smith, Salma and Eteridzha big

Б. Этеридж* Island of Eteridge big	22 23		55 56	21 22	60 20	6 13		•		35 .	. 2					•	. 10	. 3	. 2	. 2			•	
	21		54	20	50	10				30	7	ŝ	•	•	•	•	•		•	•	•		•	
	20		53	19	10	∞		5		•			•		1	б		•		•		•		
	19		52	18	20	6				1	•	-	•	•	-		-	•	•	•		•	-	
ита nith	18		51	17	35	Π		с			-	•	•	-	ю	-		20-03	•	•		•	•	
Iи-См Lee Si	17		50	16	50	14		10		·	•	·	•	-	•	•	1	•	•	•	•	•		
Tpob J	16		49	15	50	11				•	-	•	0	ω	•	•	-	0		2	•	•	e	
Oc <sup>.</sup> Isla	15		48	14	25	13		10		•		-	7		3	-		3			•	•	•	
	14		47	13	60	13				•	•			-		7	1				7			
	13		46	12	30	13		-		1	S	e	7		æ			-		-		•	•	
	12		45	11	25	6		с С		•	ω		•			7		•	•	•	•	•	•	
	11		38	10	30	4				·	•		•	•		•	1		•	•	•	•		
	10		37	6	10	~				·	•	-	•	•	•	•	•	•		e	•	•	•	
	6		36	~	10	6		-	_	•	•	ŝ	•	0	•	S	•	•	ω		S	•	•	
	8		35	7	15	~		•	_	·	•	•	•	2	3	•	•	3 <b>9</b> 3	•	•	10	•	2	
ма	7		34	9	10	10		•	_	•	1	•	•	•	•	4	•	•		•	•	•	•	
в Салн of Sal	9		33	5	30	11		•	-	•	ŝ	•	S	•		4	•	1	-	ŝ	•	•	•	
Ocrpo	5		32	4	30	18			+			~		6					~			4	~	-
0 -	4		31	e	30	16			+		1				1				-					
	3		30	2	20	6			+															
	2		29	1	3	5				·	-		•		•				.		•	•		
Показатель Indicator	1	Номер площадки** Number of the platform	author's	tabular	0ПП, %	Число видов Number of types	Tpabbi Herbs	Cochlearia	groenianaica	Alopecurus magellanicus	Phippsia algida	Saxifraga oppositifolia	Saxifraga cernua	Saxifraga cespitosa	Cerastium regelii	Saxifraga rivularis	Papaver polare	Cerastium arctica	Draba micropetala	Saxifraga hyperborea	Poa abbreviata	Lusula confusa	Stellaria longipes	Ctallania anaccinac

http://www.naukaprint.ru/zhurnaly/vestnik/

- ·
· –
-
•
-
1

## Состав и структура растительных сообществ островов южной части архипелага Земля Франца-Иосифа

. . . . . . . . .

5 5 10 ·

ие таблицы (Continued)

23

.

.

•

ВЕСТНИК Кольского научного центра РАН 3/2018 (10)

-	c	"	4	5	9	L	×	0	10	=	12	13	14	15	16	17	18	10	00	10	Table (	(Continued)
-	7	0	t	0	0	-	0	2	IU	-	17	1	±	5	10	-	10	13	70	17	77	C7
Лишайники																						
Lichens				2					8		1999	8		8	8	8	8	10	1000	8	2	
Umbillicaria		Ч		Н		Э						H		4		H	4					
proboscidea		F	·	F	•	F	·		•			ŀ		+		F	+					•
Umbillicaria	-	Н			+	Н																
decussate	-	-			-	F	·	•				•										
Umbillicaria				-		2-																
cylindrica	•	·	+	ł		ł	·	·				•			•							•
Gowardia arctica		•	•	•				•														+
Flavocetraria							3	-					-									-
nivalis	5 <b>.</b>	•	•	·	•	•	ł	ł	•	•	•	•	+		•		•	•		•	•	ł
Cetraria islandica		•	+	+	•	•	•	•						+		+	+		+	+		
Rhizocarpon		_											-				-					
subgeminatus	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		•	F	•	•	•	F					•
Sphaerophorus																						4
globosus	•	•	•	•	•	•	·	•	•		•	•	•	•		•	•					÷
Bryoria nitidula		•		•	•		•	•		•	•	•			•							+
Примечания. Цифј	ры в столб	бцах с	бозна	Чают	проект	ГИВНО	з покр	ытие	видов	; знак	(+) WO	» OTME	счены	виды	, oбpa	зующ	ие сло	жные	KOMILJ	тексы	с другь	іми видами,
проективное покрытие ко	эторых не (	эпреде	лено.	Точки	I B Tpat	фах та	блиць	10 — I	сутсти	зие ви,	ца.											
b. Этеридж — 00. ** Исмера описани	ињшои остј й соответст	DOB N3	rpynn	bi oct	DOBOB	лам.	джа.	Territory	1 1 11111	M yr m	IONOGO	on fond	0 0 D T C	OTOLIT	опоен	TIME III	- IIIIIIIII	2 1000	0 53	Yong	штеп сч	HECO VI IGONI
и ручьев на моренных тег	phacax. 54.	55 —	MINKDO	лепре	CCNN C	Topdo	янисто	-LDABI	ийным	IN UDAL	птами.	56 —	ложби	THE 33	CKATA		AMODCI	с ,имк ких бе	DeroBE	- ucpu	а а леди DB.	לאכה עופפהעוע
Notes Figures in co	limns desic	mate a	nroiec	tive of	wering	roftv	nes. the	sion	,+" hav	s noted	the tvi	nes for	mino	lifficu	t com	lexes	with o	ther tvi	nes wh	ich nrc	iective	covering isn't
defined. Points in columns	of the table	— lac	k of a	specie	S.	6.00		0			6		n					6			2	0
* Island of Eteridge	big — the b	vig isla	nd fro	n grot	ip of th	te isla	fo spr	Eteridg														
** Numbers of descr	riptions corr	respon	d to the	e follo	wing e	cotop	5: 29 -	- crevi	ces of	blocks	s of the	sea co	ast wi	th ooz	y and	sand s	oil, 30-	-53 —	coast	of glac	ial lake	s and streams
on thin terraces, 54, 55 — 1	microdepre.	ssions	with p	eaty an	nd grav	vel soi	l, 56 –	- hollo	ws bel	hind slo	opes of	f seasic	le coas	stal sha	uft.							

В видовом составе мхов на о. Сальма представлены гигрофильные виды: Campylium stellatum, Bryum cyclophillum, Pohlia cruda, Philonotis tomentella, Pseudocalliergon turgescens, Brachythecium cirrosum. На о. Ли-Смита в моховых сообществах отмечены: Bryum cryophillum, B. pseudotriquetrum, Brachythecium cirrosum, Hydrohypnella polare, Scorpidium revolvens, Ceratodon heterophyllus, Syntrichia norvegica. Сосудистые растения образуют нанокомплексы со мхами и их участие в образовании сообществ намного скромнее, их проективное покрытие не превышает 1–10 %.

В видовом составе цветковых на о. Сальма отмечены: Phippsia algida, Dupontia fisheri, Lusula confusa, Saxifraga cernua, S. hyperborea, Stellaria longipes, S. crassipes. На о. Ли-Смита в таких местообитаниях с обилием до 10 % часто, помимо указанных видов, встречается Cochlearia groenlandica. На моренных валунах и подножиях клифов, развиваются лишайниковые группировки из видов рода Umbillicaria, впервые отмеченных на ЗФИ, из которых на о. Сальма встречаются Umbillicaria proboscidea (L.) Schrad., U. decussate (Vill.) Zahlbr., на о. Ли-Смита — Umbillicaria cylindrica.

## 2. Микродепрессии берегов ледниковых озер с торфянисто-гравийными грунтами

Экология. Экотопы выделены для о. Ли-Смита, где приурочены к пониженным участка берегов ледниковых озер с гравийно-торфянистыми грунтами. Торф образуется при деструкции растительного опада.

Видовой состав и структура сообществ. Это настоящие выраженные тундроподобные сообщества злаково-мохового типа. В верхнем ярусе доминирует гигрофильный злак Alopecurus magellanicus (п. п. до 60 %), который создает основной аспект растительности таких местообитаний. В составе сосудистых растений с небольшим обилием (до 1–3 %) встречаются Cochlearia groenlandica, Phippsia algida. В нижнем ярусе доминирует мох Brachythecium cirrosum. В составе других мхов в местообитании отмечены Bryum cyclophillum, Scorpidium revolvens.

## 3. Ложбины за скатами старых приморских береговых валов

Экология. Этот тип экотопов выделен для островов Этериджа. Здесь, за скатами удаленных от береговой линии моря старых галечных береговых валов, формируются ложбины с грунтами, представленными мелкоземом с примесью гумуса и песка.

Видовой состав и структура сообществ. Сообщества травяно-мохово-лишайникового типа. Флористический состав как мхов, так и сосудистых растений беден. Доминирует Papaver polare (п. п. 10 %). С небольшим обилием (1–3 %) в состав сообществ входят Saxifraga oppositifolia, S. hyperborea, Draba micropetala. Мхи произрастают обособленно от сосудистых растений, их состав представлен: Hymenoloma crispulum, Syntrichia norvegica, Sanionia uncinata. В составе лишайников отмечены Bryoria nutidula, Gowardia arctica, Flavocetraria nivalis, Sphaerophorus globosus. Согласно классификации В. Д. Александровой, сообщества такого типа следует относить к «семиагрегациям» [8].

## 4. Береговые валы в зоне импульверизации морских брызг супралиторали

Экология. Этот тип экотопов выделен на всех обследованных островах. Береговые валы формируются на галечных пляжах с примесью валунов и гравия в результате активного волноприбойного воздействия. На островах обычно представлено несколько серий валов. Серии образуются по мере наступления берегов на прибрежье моря. В результате штормового воздействия валы часто разрушаются, но затем вновь происходит их развитие в процессе слабого волнового воздействия на аккумулятивные берега.

*Растительность*. Настоящих сообществ в этих экотопах не образуется. В составе сосудистых растений лишь изредка встречаются вегетативные побеги *Cochlearia groenlandica*, *Saxifraga oppositifolia*. На крупных валунах встречаются накипные лишайники.

## 5. Полигональные моренные равнины с эрозионным расчленением

Экология. Этот тип экотопов выделен для большого острова группы Этериджа. Галечные моренные равнины занимают большую часть острова и расчленены мерзлотными трещинами шириной до 30 см на крупные полигоны площадью обычно до 10–20 м<sup>2</sup>. В мерзлотных трещинах происходит накопление мелкозема. Такой рельеф формируется на участках островов с выраженной ледниковой аккумуляцией, сравнительно недавно освободившихся от ледникового покрова.

*Растительность*. На полигонах равнин растительный покров представлен лишь накипными лишайниками, покрывающими гальку и валуны. В мерзлотных трещинах, где накапливается мелкозем, часто встречаются группировки из *Saxifraga cernua* (п. п. 1–3 %), который является пионером зарастания рельефа на арктических островах. В составе группировок встречается мхи *Hymenoloma crispulum, Syntrichia* sp.

## 6. Полярнопустынные пустоши сухих местообитаний

Экология. На обследованной территории экотоп выделен для острова Сальма. Сообщества формируются на невысоких буграх со щебнисто-суглинистыми грунтами. Экотопы характеризуются слабым увлажнением, что обусловливает наличие аридизации. Склоны бугров открыты действию сильных ветров. Снеговой покров маломощный, чему способствует активная ветровая деятельность. Влага поступает в основном с атмосферными осадками и лишь местами благодаря подтоку талых вод.

Растительность. Общее проективное покрытие растений не превышает 20-30 %. В местообитаниях формируются сообщества травяно-лишайникового типа. Флористический состав сосудистых растений представлен 1-3 видами. В составе сосудистых растений доминирует *Papaver polare*, причем эти местообитания являются основными для вида на  $3\Phi И$ . С небольшим обилием (1-3 %) встречаются *Saxifraga oppositifolia*, *Phippsia algida*. Ввиду слабого увлажнения мхи встречаются редко. Наиболее обычны лишайники, среди которых нередко доминируют *Cetraria islandica*, *Flavocetraria nivalis*, *Rhizocarpon subgeminatum*.

## 7. Прибрежья акваторий ледниковых озер

Экология. Экотоп выделен для острова Сальма. Небольшие ледниковые озера лежат на низких моренных террасах. Вода озер характеризуется высокой прозрачностью. По трофическому статусу такие озера следует относить к олиготрофным. В прибрежье выражены галечные грунты с примесью гравия.

*Растительность*. В таких местообитаниях на острове Сальма на глубине до 30 см встречаются группировки из гидрофильного мха *Warnstorfia sarmentosa*.

## 8. Расщелины глыб морского берега с илисто-песчаными грунтами

Экология. Экотоп выделен на острове Сальма. Крупные глыбы приурочены к береговой полосе в зоне импульверизации морских брызг. В недалеком прошлом такие участки берегов являлись частью морской сублиторали. В расщелинах глыб в результате волноприбойного воздействия происходит накопление наносов, что приводит к формированию илистых отложений.

*Растительность*. В расщелинах глыб встречаются скудные группировки из *Saxifraga* svalbardensis. Этот вид, эндемичный для флоры арх. Шпицберген, был впервые отмечен нами на Земле Франца-Иосифа.

## Заключение

В ходе экспедиции впервые ботанически исследованы острова Сальма, Ли-Смита, большой остров из группы Этериджа. На островах отмечен 21 вид цветковых растений, что составляет 40 % от известных в настоящее время 52 видов этой группы растений на архипелаге. Среди них 1 вид (*Saxifraga svalbardensis*) встречен на ЗФИ впервые. Описано 14 видов мхов и собрано 9 видов

лишайников, хотя, несомненно, на эти две группы растительных организмов здесь приходится намного больше видов, которые в дальнейшем предстоит обнаружить. При этом в составе мхов на островах Ли-Смита и Большой Этериджа отмечен новый для архипелага вид — Syntrichia norvegica, в составе лишайников впервые отмечены — Umbillicaria proboscidea, U. decussate, Umbillicaria cylindrica.

Растительный покров имеет существенные отличия в разных типах местообитаний, что является следствием влияния различных экологических факторов, в частности, типа грунта, увлажнения, ветрового воздействия.

На островах выделено 8 типов экотопов, отличающихся по механическому составу грунтов и степени увлажнения, из которых самые большие площади на островах Ли-Смита и Сальма занимает экотоп *берегов ледниковых озер и ручьев на моренных террасах*, а на острове Этериджа — *полигональные моренные равнины* с очень скудной растительностью. Большинство видов растительных организмов приурочены к берегам ледниковых озер, расположенных на низких моренных террасах, а наиболее значительное проективное покрытие (50–60 %) зафиксировано для растительных сообществ микродепрессий берегов ледниковых озер с торфянисто-гравийными грунтами, где доминирует гигрофильный злак *Alopecurus magellanicus*.

Следует сказать, что необходимо продолжать флористические и геоботанические исследования на архипелаге, поскольку в ходе большинства крупных долгосрочных экспедиций здесь обнаруживаются ранее не известные для ЗФИ виды растительных организмов. Геоботанические описания растительных сообществ на архипелаге до сих пор довольно скудны, расширение таких описаний даст возможность составить подробные карты растительного покрова архипелага и в дальнейшем позволит решить проблемы с использованием классификаций растительности высокой Арктики, основанных на разных принципах.

#### Благодарности

Авторы благодарны за содействие в работе всем членам экспедиции O2A2–2016, организованной Ассоциацией «Морское наследие: исследуем и сохраним», в особенности научному руководителю проекта «Открытый океан» к. б. н. М. В. Гаврило, а также доценту кафедры зоологии беспозвоночных и водной экологии Пермского государственного национального исследовательского университета к. б. н А. Б. Крашенинникову, старшему государственному инспектору ФГБУ «Государственный природный заповедник "Присурский"» Е. М. Кузьмину за помощь в сборе гербарного материала и содействие в проведении полевых исследований. Благодарны сотрудникам Ботанического института им. В. Л. Комарова РАН, к. б. н. В. В. Петровскому и к. б. н. Т. М. Королевой за определение видов цветковых растений, к. б. н. Е. Ю. Кузьминой за определение видов достого государственного университета д. б. н. А. В. Сониной за определение видов лишайников.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Берега / П. Л. Каплин [и др.]. М., 1991. 479 с. 2. Палибин И. В. (1903–1906): Ботанические результаты плавания ледокола «Ермак» в Северном Ледовитом океане летом 1901 г. // Известия Санкт-Петерб. ботан. сада. СПб., 1906. № 3 (5). 128 с. 3. Савич Л. И. Мхи Земли Франца-Иосифа, собранные И. М. Ивановым во время полярной экспедиции 1929 г. на ледоколе «Седов» // Труды Всесоюз. аркт. ин-та. 1932. № 2. С. 63–79. 4. Савич Л. И. Мхи архипелага Франца-Иосифа, Северной Земли и о. Визе, собранные В. П. Савичем во время полярной экспедиции 1930 г. на ледоколе «Седов» // Тр. Ботан. ин-та АН СССР. Сер. 2. Споровые растения. 1936. 505–578. 5. Fischer H. Some remarks on the flora of Franz Josef Archipelago // Geogr. J. 1896. Vol. VIII. P. 560-563. 6. Hanssen O., Lid J. Flowering plants of Franz Josef Land // Skrifter om Svalbard og Ishavet. 1932. No. 39. 42 p. 7. Александрова В. Д. Структура растительных группировок полярной пустыни о. Земля Александры (Земля Франца-Иосифа) // Проблемы экологии, геоботаники, ботанической географии и флористики. Л., 1977. С. 26–36. 8. Александрова В. Д. Открытые растительные группировки полярной пустыни острова Земля Александры (Земля-Франца-Иосифа) и их классификация // Ботан. журн. Л., 1981. № 66 (5). С. 26–36. 9. Сафронова И. Н. Материалы к флоре о. Мейбел и о. Гукера (архипелаг Земля Франца-Иосифа) // Ботан. журн. 1983. № 68 (4). С. 513–519. 10. Сафронова И. Н. О растительности острова Мейбел и Гукера (архипелаг Земля Франца-Иосифа) // Природные комплексы Арктики и вопросы их охраны. 1986. С. 51-62. 11. Safronova I. N., Glazovsky A. Flora and vegetation // Franz Josef Land Polarhendbok / S. Barr. 1995. No. 8. P. 2–37. 12. Одаз А. М. Растительный покров // Среда обитания и экосистемы

Земли Франца-Иосифа (архипелаг и шлейф). 1993. С. 43–63. **13.** *Толмачев А. И.* Материалы для флоры европейских арктических островов // Журн. Рус. ботан. общества. 1931. № 16 (5–6). С. 459–472. **14.** *Толмачев А. И., Шухтина Г. Г.* Новые данные о флоре Земли Франца-Иосифа // Ботан. журн. 1974. № 59 (2). С. 275–279. **15.** Конспект флоры сосудистых растений архипелага Земля Франца-Иосифа // *Е. Ю. Чуракова [и др.]* // Вестник Северного (Арктического) федер. ун-та. Серия: Естественные науки. 2014. № 2. С. 94–101. **16.** Растения и грибы полярных пустынь Северного полушария / *Н. В. Матвеева [и др.]*. СПб.: Марафон, 2015. 320 с. **17.** *Мосеев Д. С., Сергиенко Л. А.* К флоре островов архипелага Земля Франца-Иосифа и Северного части архипелага Новая Земля (аннотированный список видов) // Ученые зап. ПетрГУ. 2017. № 4 (165). С. 48–64. **18.** *Мосеев Д. С., Сергиенко Л. А.*, *Кузьмина Е. Ю.* Новые виды мхов (*Вгуорћуtа*) для Земли-Франца Иосифа (Российская Арктика) // Новости систематики низших растений. 2018. № 52 (1). С. 195–203. **19.** *Сергиенко Л. А.* Флора и растительность побережий Российской Арктики и сопредельных территорий. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2008. 225 с. **20.** *Спартан V. I.* Соаstal vegetation. МасMillan. М. I, 1964. 245 р. **21.** *Крышень А. М., Полевой А. В.* Классификация местообитаний: принципы и практическое использование // Актуальные проблемы геоботаники. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. С. 264–268.

## Сведения об авторах

*Мосеев Дмитрий Сергеевич* — научный сотрудник Северо-Западного отделения Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН, г. Москва

## E-mail: viking029@yandex.ru

Сергиенко Людмила Александровна — доктор биологических наук, старший преподаватель, профессор кафедры ботаники и физиологии растений Института биологии, экологии и агротехнологий Петрозаводского государственного университета E-mail: saltmarsh@mail.ru

## **Author Affiliation**

*Dmitriy S. Moseev* — Researcher of the North-Western Branch of the Shirshov Institute of Oceanology of RAS E-mail:viking029@yandex.ru

*Lyudmila A. Sergienko* — Dr. Sci. (Bio), Senior Lecturer, Professor of the Department of Botany and Plant Physiology of the Institute of Biology, Ecology and Agrotechnology of Petrozavodsk State University E-mail: saltmarsh@mail.ru

#### Библиографическое описание статьи

*Мосеев, Д. С.* Состав и структура растительных сообществ островов южной части архипелага Земля Франца-Иосифа / Д. С. Мосеев, Л. А. Сергиенко // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2018. — № 4 (10) — С. 14–24.

#### Reference

*Moseev Dmitriy S., Sergienko Lyudmila A.* The Composition and Structure of Plant Communities of Islands in the Southern Part of the Franz Joseph Archipelago. *Herald of the Kola Science Centre of the RAS*, 2018, vol. 3 (10), pp. 14–24 (In Russ.).

# ВЛИЯНИЕ НЕКОТОРЫХ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ЛОКАЛЬНЫЕ ФЛОРЫ МХОВ ШПИЦБЕРГЕНА\*

## О. А. Белкина, А. Ю. Лихачев

ФГБУН Полярно-альпийский ботанический сад-институт им. Н. А. Аврорина КНЦ РАН

#### Аннотация

На основе оригинальных данных составлены списки видов мхов и проведено сравнение 9 локальных бриофлор островов Западный Шпицберген и Северо-Восточная Земля. Показано, что влияние состава геологических пород на их основные показатели (видовой состав, структура, экологические группы и др.) высоко и сопоставимо с воздействием макроклиматических условий. Умеренное действие орнитогенного фактора способствует поселению более южных и специфических видов и повышает общее разнообразие мхов. Существование законсервированного пос. Пирамида не оказывает значительного влияния на видовой состав бриофлоры района.

#### Ключевые слова:

мхи, флора, Шпицберген, экологические факторы, арктические тундры, полярная пустыня.

#### THE INFLUENCE OF SOME ECOLOGOCAL FACTORS ON LOCAL BRYOFLORAS IN SVALBARD

#### Olga A. Belkina, Aleksey Yu. Likhachev

Avrorin Polar-Alpine Botanical Garden and Institute of KSC RAS

#### Abstract

Based on the original results, lists of mosses were compiled for 9 local bryofloras of Vestspitsbergen and Nordaustlandet islands (Svalbard). A comparison of them shows the impact of some environmental factors on richness and structure of the floras. The composition of geological bedrocks is the second most important factor after the climate. Moderate influence of the ornithogenic factor promotes survival of more southern or specific species and increases the total diversity of mosses. The existence of the former Pyramida village does not significantly affect the species composition of the local bryoflora. In the Svalbard polar deserts there are no more or less stable floracoenotic complexes: the same species occur in very different habitats and plant communities.

#### Keywords:

mosses, flora, Svalbard, environmental factors, Arctic tundra, polar desert.



#### Введение

Мохообразные растения играют важную роль в высокоширотных экосистемах. С продвижением на север увеличивается их доля в общем фиторазнообразии, а также участие в сложении растительных сообществ (и вклад в создание биомассы) и газообмене биогеоценозов. В данной работе исследуется влияние некоторых экологических факторов на локальные флоры мхов тундровой зоны и зоны полярных пустынь на арх. Шпицберген, таких как состав горных пород,

воздействие морских (в особенности колониальных) птиц, хозяйственная деятельность человека.

#### Краткая характеристика природных условий

Архипелаг Шпицберген расположен между 79° и 81° с. ш. и 10° и 35° в. д. и состоит из группы островов, крупнейшими из которых являются Зап. Шпицберген и Северо-Восточная Земля. Рельеф островов архипелага гористый, максимальная высота 1713 м (г. Ньютон). Благодаря

<sup>\*</sup> Работа выполнена в рамках госзаданий ПАБСИ КНЦ РАН № 0229-2016-0004 и № 0229-2017-0005.

влиянию теплого течения Гольфстрим климат западного побережья о. Зап. Шпицберген относительно мягкий. По данным метеостанции в Баренцбурге, среднегодовая температура в районе поселка равна –6 °С, годовое количество осадков — 570 мм [1]. При продвижении на северо-восток климат архипелага становится суровее, 56 % территории о. Зап. Шпицберген занято ледниками, Северо-Восточная Земля покрыта ими на 76 % [2], свободными ото льда являются в основном побережья. Согласно зонированию Арктики В. Д. Александровой [3], о. Зап. Шпицберген относится к подзоне арктических тундр тундровой зоны, а о. Северо-Восточная Земля — к зоне полярных пустынь.

## Материалы и методы

Полевые исследования проводились в летнее время в 2005–2013 гг. Изучено 9 локальных флор мхов архипелага (рис.), 4 из них расположены на о. Северо-Восточная Земля — Земля Принца Оскара (далее — ЗПО, собрано около 200 образцов мхов) [4], окрестности Сетербухты в юго-восточной части Дувефьорда (ДУВ, 332 образца), Киннвики (КИН, 400) и Нордвики (НОР, 220) в Мерчисон-фьорде. Четыре находятся на о. Западный Шпицберген — долины Рейндален (РЕЙ, 172) и Линне (ЛИН, 178), окрестности Пирамиды (ПИР, 1035) и Боккфьорда (БОК, 107 образцов). Некоторые сборы были сделаны в районе Гренфьорда (ГРЕ).



• — Районы работ на арх. Шпицберген. Условные обозначения:

1 — Киннвика (КИН); 2 — Нордвика (НОР); 3 — Земля Принца Оскара (ЗПО), 4 — Сетербухта в Дувефьорде (ДУВ) на о. Северо-Восточная Земля; 5 — Боккфьорд (БОК); 6 — Пирамида (ПИР); 7 — Линнедален (ЛИН);
 8 — Гренфьорд (ГРЕ); 9 — Рейндален (РЕЙ) на о. Зап. Шпицберген. Участки с мелкими точками обозначают территории, покрытые ледниками

- — Areas of field works in Svalbard. Legend:
- 1 Kinnvika Bay (KIN); 2 Nordvika Bay (Nor) (both in Murchisonfjorden); 3 Prins Oscars Land (POL);
   4 Sætherbukta Bay in Duvefjorden (DUV) on Nordaustlandet Island; 5 Bockfjorden (BOC); 6 Pyramiden surroundings (PYR); 7 Linnevatnet Valley (LIN); 8 Grønfjorden (GRØ); 9 Reindalen (REI) on Vestspitsbergen Island. Areas with small dots indicate glaciers

После определения образцов были составлены и проанализированы списки видов. Наши данные по бриофлоре БОК и ГРЕ дополнены литературными сведениями [5], распределение видов по экологическим группам (базифиты, субнейтрофиты, ацидофиты) выполнено по работе К. Дирссена (Dierßen [6]).

# Результаты и их обсуждение

Важнейшим фактором, определяющим видовой состав и другие характеристики флор, является климат, обусловливающий зональность растительного покрова Земли. Вместе с тем на структуру локальных бриофлор, особенно расположенных в высоких широтах, большое влияние могут оказывать и другие факторы. Поэтому сравнение проведено между флорами, расположенными в одной природной зоне — в арктических тундрах (о. Зап. Шпицберген) или полярных пустынях (о. Северо-Восточная Земля).

# 1. Влияние химического состава горных пород

В районах БОК, ПИР и ЛИН, а также НОР и КИН представлены карбонатные породы. «Кислые» породы распространены в районах РЕЙ и ГРЕ (песчаник, сланцы, уголь), в ЗПО (граниты), ДУВ — гнейсы, сланцы, амфиболиты и граниты [2].

1. Сравнение показало, что видовое богатство «карбонатных» флор мхов несколько выше, чем «кислых». Соотношение числа видов, найденных в ЗПО, НОР и КИН, составляет 77:85:96 соответственно. В тундровых бриофлорах РЕЙ, ЛИН, БОК оно равно 115:132:146, при этом обследованная площадь ЗПО приблизительно равна КИН и превышает НОР, а обследованная территория БОК меньше РЕЙ и ЛИН.

Во флорах ЗПО и РЕЙ из списка «выпал» сходный набор кальцефилов (базифитов и субнейтрофит-базифитов — согласно К. Дирссену [6]), в том числе широко распространенных: *Bryoerythrophyllum recurvirostrum* (Hedw.) Р. С.Chen, *Catoscopium nigritum* (Hedw.) Brid., *Encalypta alpina* Sm., *E. rhaptocarpa* Schwägr., *Pseudocalliergon turgescens* (T. Jensen) Loeske, *Pseudoleskeella tectorum* (Funck ex Brid.) Kindb., *Tortella fragilis* (Hook. & Wils.) Limpr. и др. Группа ацидофитов и ацидофит-субнейтрофитов менее специфична и представлена во всех локальных флорах архипелага. Большинство их отмечено в РЕЙ, однако они были также найдены хотя бы в одной из других тундровых флор. Исключение составляют сфагновые мхи, хотя по одному виду было собрано в БОК и ЛИН. На ЗПО специфичных ацидофитов мало, в основном это редкие виды; более распространенные мхи найдены и в других флорах.

2. Геологические породы существенно влияют на таксономические спектры локальных флор. В арктических тундрах на «кислых» породах преобладающим родом является *Sphagnum*, сем. Sphagnaceae занимает вторую позицию, тогда как в карбонатных тундровых флорах эти род и семейство выпадают практически полностью. Большую роль играет род *Warnstorfia*, а род *Encalypta* представлен всего одним видом, хотя на других территориях он более многочисленный (3–6 видов) и чрезвычайно распространен.

В полярных пустынях, где сфагны отсутствуют, в ЗПО первое место по числу видов занимает род *Pohlia*, второе — *Polytrichum*, тогда как в остальных флорах превалирует род *Bryum*, а *Polytrichum* малочислен. В ЗПО не найдены представители родов *Ditrichum*, *Distichium*, *Catoscopium*, *Dichodontium*, *Encalypta*, а также почти все роды из кальцефильного сем. Pottiaceae, которые встречены на других территориях. ДУВ занимает промежуточное положение, проявляя сходство и с ЗПО, и с флорами Мерчисон-фьорда. Вероятная причина этого — представленность на его территории как гранитов, так и гнейсов с амфиболитами.

3. Состав доминантов растительных сообществ и группы активных видов [7] значительно разнятся. Для примера можно рассмотреть близкие по числу видов флоры полярных пустынь — ЗПО и НОР. Доминантами моховых сообществ на территории ЗПО являются *Warnstorfia sarmentosa* (Wahlenb.) Hedenäs, *Sanionia uncinata* (Hedw.) Loeske, *Conostomum tetragonum* (Hedw.)

Lindb., *Polytrichastrum alpinum* (Hedw.) G. L. Smith, *Andreaea rupestris* Hedw. B HOP это — *Ditrichum flexicaule* (Schwägr.) Hampe, *Orthothecium chryseon* (Schwägr.) Bruch et al., *Syntrichia ruralis* (Hedw.) F.Weber & D.Mohr.

Многие доминанты сообществ арктических тундр Зап. Шпицбергена (например, Aulacomnium palustre (Hedw.) F.Weber & D.Mohr, A. turgidum (Wahlenb.) Schwägr., Tomentypnum nitens (Hedw.) Loeske, Dicranum spadiceum J. E. Zetterst., Cinclidium arcticum (Bruch et al.) Schimp., Sphagnum spp.) на Северо-Восточной Земле, независимо от подстилающих горных пород, играют заметно меньшую роль или отсутствуют.

Группа активных видов в ЛИН включает 8 видов мхов: Dicranum spadiceum, Distichium capillaceum (Hedw.) Bruch et al., Ditrichum flexicaule, Oncophorus wahlenbergii Brid., Pohlia cruda (Hedw.) Lindb., Polytrichastrum alpinum, Sanionia uncinata, Racomitrium lanuginosum (Hedw.) Brid. В ПИР, где породы также карбонатные, к числу очень распространенных следует отнести, помимо Ditrichum flexicaule и Sanionia uncinata, также Orthothecium chryseon, Scorpidium cossonii (Schimp.) Hedenäs, Stereodon bambergeri (Schimp.) Lindb., Campylium stellatum (Schimp.) Lindb., Pseudocalliergon turgescens. В БОК, кроме Distichium capillaceum, Ditrichum flexicaule, Orthothecium chryseon, Campylium stellatum, Pohlia cruda, Sanionia uncinata, — еще Timmia austriaca Hedw. и Philonotis tomentella Molendo.

В РЕЙ набор активных видов сильно отличается: Aulacomnium turgidum, Polytrichastrum alpinum, Sanionia uncinata, Straminergon stramineum (Dicks. ex Brid.) Hedenäs; к распространенным также относятся еще 12 видов, среди последних — 4 вида, общих с флорой ЛИН, они являются ацидофит-субнейтрофитами и, как уже упоминалось, по-видимому, менее стенотопны. Вместе с тем из перечней видно, что набор активных видов отличается не только в «кальцефильных» и «некальцефильных» флорах, но и между «кальцефильными» локальными флорами, хотя и в меньшей степени.

#### 2. Влияние орнитогенного фактора

Гнездования колониальных морских птиц обычно располагаются в верхних скалистых частях гор вблизи моря. В поселках Баренцбург и Пирамида чайки-моевки используют оконные карнизы зданий и горизонтальные поверхности промышленных конструкций. Были исследованы участки, расположенные под птичьими базарами на склонах г. Вардеборг в долине оз. Линне, г. Флора в Мерчисон-фьорде и в пос. Пирамида.

Наиболее мощным фактором влияния на биоценозы является помет птиц, но сами птицы также воздействуют на моховой покров, вытаптывая его на часто посещаемых «кормовочных столиках» и выщипывая пучки мхов.

Территория, непосредственно прилегающая к птичьим колониям, неблагоприятна для растений. Вблизи гнезд напочвенные мхи отсутствуют, распространена лишь нитрофильная зеленая водоросль *Prasiola crispa* (Lightfoot) Kuntzink. Выше других мхов по склону поднимаются *Sanionia uncinata* и далее — *Bryum* spp. На удалении 10–20 м и более от гнезд количество видов мхов резко возрастает. В жестких климатических условиях архипелага умеренная эвтрофикация несколько «сглаживает» негативное влияние климата. Так, на Северо-Восточной Земле под птичьими колониями на г. Флора длительное время произрастает *Climacium dendroides* (Hedw.) F. Weber & D. Mohr, который в других флорах полярных пустынь (в том числе в российской Арктике) неизвестен. В арктических тундрах Шпицбергена этот вид обычно приурочен к птичьим базарам, где может формировать общирные ковры. Несмотря на то, что сфагны избегают карбонатные породы, *Sphagnum squarrosum* (Hedw.) F. Weber & D. Mohr был найден на г. Вардеборг в ЛИН под птичьими колониями благодаря изменению химических свойств почв в результате жизнедеятельности птиц. Аналогично, в ПИР только вблизи конструкций с гнездами моевок в пос. Пирамида был найден *Plagiomnium ellipticum* (Brid.) T. J. Kop.

Места гнездований живущих парами поморников короткохвостных, расположенных на горизонтальных сырых участках у подножий горных склонов, обогащают бриофлору специфическими видами сем. Splachnaceae, которые поселяются на помете, погадках и животных останках.

Таким образом, умеренное и слабое влияние орнитогенного фактора на бриофлору, особенно в жестких климатических условиях, ведет к повышению биоразнообразия. Изменяя среду, он добавляет новые местообитания, позволяя существовать видам, которые не могли бы расти в естественных местообитаниях данной территории.

## 3. Влияние антропогенного фактора

Предметом изучения стал поселок горняков Пирамида, возникший в 1910–1911 гг., но закрытый в 1998 г. и посещаемый в настоящее время туристами. Обследовались территории с жилыми и промышленными зданиями и сооружениями, прилегающие нарушенные тундровые и скальные местообитания, замусоренные участки дельты р. Мимер, ныне не действующее кладбище. Из 160 видов, встреченных в ПИР, 20 найдено только в пределах поселка и на прилегающих нарушенных участках. Частично это связано с тем, что в территорию поселка входит подтапливаемая морской водой дельта реки со специфическими, нигде в исследованном районе не повторяющимися условиями и, следовательно, с приуроченными к ним видами (*Tortula cernua* (Huebener) Lindb, *Bryobrittonia longipes* (Mitt.) D. G. Horton). Кроме того, присутствие ряда мхов связано с воздействием орнитогенного фактора.

Но часть видов произрастает в поселке именно вследствие деятельности человека, изменившего, например, эдафические условия. Так, на искусственно созданном почвенном слое на газоне центральной улицы найден ацидофильный мох *Aulacomnium palustre*, на лужайке с шампиньонами (возможно, в прошлом здесь было место складирования конского навоза) собран новый для Шпицбергена вид *Helodium blandowii* (F. Weber & D. Mohr) Warnst., вероятно занесенный человеком, на россыпях угля встречены *Polytrichum hyperboreum* R. Br. и *Psilopilum laevigatum* (Wahlenb.) Lindb. Вместе с тем 38 % видов, отмеченных в окрестностях Пирамиды, не найдены в поселке.

Таким образом, умеренная хозяйственная деятельность, изменяя среду в разных направлениях, способствует поселению нехарактерных для данной местности мхов и в то же время оставляет возможность сохранения многих аборигенных видов.

## Выводы

1. На арх. Шпицберген химический состав горных пород оказывает влияние, сопоставимое с воздействием макроклиматических условий, на видовой состав и структуру локальных флор мхов, группы доминантов и активных видов. Умеренное орнитогенное воздействие повышает видовое разнообразие мхов данной территории. Существование законсервированного пос. Пирамида не оказывает существенного негативного влияния на видовой состав локальной бриофлоры.

2. Особенностью полярных пустынь является отсутствие более или менее устойчивых флоро-ценотических комплексов, которые прослеживаются в арктических и тем более в субарктических тундрах.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Анциферова А. Р., Мокротоварова О. И., Сиеккинен Е. Д. Изменение климата на архипелаге Шпицберген. Климатические особенности 2013–2014 гг. // Комплексные исследования природы Шпицбергена и прилегающего шельфа. М.: ГЕОС, 2014. Вып. 12. С.16–21. 2. Dallmann W. K. Geoscience Atlas of Svalbard / Norwigian Polar Institute, Frame Centre. Report #148. Tromsø, Norway. 2015. 292 р. 3. Александрова В. Д. Геоботаническое районирование Арктики и Антарктики. Л.: Hayka, 1977. 189 с. 4. Belkina O. A., Likhachev A. Yu. Mosses of the Prince Oscar Land (Nordaustlandet, Svalbard) // Arctoa. 2013. Vol. 22. P. 27–34. 5. Frisvoll A. A., Elvebakk A. Bryophytes: part 2 // A catalogue of Svalbard plants, fungi, algae and cyanobacteria. Norsk Polarinstitutt Skifter. 1996. No. 198. P. 57–172. 6. Dierßen K. Distribution, ecological amplitude and phytosociological characterization of European bryophytes // Bryophytorum Bibliotheca / S. R. Gradstein. Band 56. Berlin, Stutgart: Gebrüder Borntraeger. 2001. 289 pp. **7.** Юрцев Б. А. Флора Сунтар-Хаята. Проблемы истории высокогорных ландшафтов северо-востока Сибири. Л.: Наука, 1968. 235 с.

## Сведения об авторах

*Белкина Ольга Александровна* — кандидат биологических наук, доцент, старший научный сотрудник лаборатории флоры и растительных ресурсов Полярно-альпийского ботанического сада-института им. Н. А. Аврорина КНЦ РАН

E-mail: olgabelk@yahoo.com

*Лихачев Алексей Юрьевич* — научный сотрудник лаборатории флоры и растительных ресурсов Полярно-альпийского ботанического сада-института им. Н. А. Аврорина КНЦ РАН E-mail: likhachev12@mail.ru

## Author Affiliation

Olga A. Belkina — PhD (Biology), Associate Professor, Senior Researcher of Laboratory of Flora and Vegetation, Avrorin Polar-Alpine Botanical Garden and Institute of KSC RAS E-mail: olgabelk@yahoo.com Aleksey Yu. Likhachev — Researcher of Laboratory of Flora and Vegetation, Avrorin Polar-Alpine Botanical Garden and Institute of KSC RAS E-mail: likhachev12@mail.ru

## Библиографическое описание статьи

*Белкина, О. А.* Влияние некоторых экологических факторов на локальные флоры мхов Шпицбергена / *О. А. Белкина, А. Ю. Лихачев* // Вестник Кольского научного центра РАН. 2018. № 3 (10). С. 25–30.

#### Reference

Belkina Olga A., Likhachev Aleksey Yu. The Influence of Some Ecologocal Factors on Local Bryofloras in Svalbard. Herald of the Kola Science Centre of the RAS, 2018, vol. 3 (10), pp. 25–30 (In Russ.).

# ЛИШАЙНИКИ ОКРЕСТНОСТЕЙ БЫВШЕГО ПОС. КОЛСБЕЙ (О. ЗАПАДНЫЙ ШПИЦБЕРГЕН)\*

# Л. А. Конорева<sup>1, 2</sup>, С. В. Чесноков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГБУН Полярно-альпийский ботанический сад-институт им. Н. А. Аврорина КНЦ РАН <sup>2</sup>ФГБУН Ботанический институт им. В. Л. Комарова РАН

## Аннотация

Подготовлен предварительный список лишайников окрестностей бывших российских шахтерских поселков Колсбей и Грумант (о. Западный Шпицберген, Nordenskiöld Land) с аннотациями, который включает 121 вид. Подтверждены гербарным материалом сведения о 76 видах, в том числе 47 из них приведены для указанного района впервые. Выявлены редкие и охраняемые виды.

#### Ключевые слова:

лишайники, Арктика, арх. Шпицберген, Колсбей, Грумант, распространение, экология.

## LICHENS OF VICINITY OF THE FORMER TOWNSHIP KOLSBEY (WEST SPITSBERGEN)

## Liudmila A. Konoreva<sup>1, 2</sup>, Sergey V. Chesnokov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Avrorin Polar-Alpine Botanical Garden and Institute of KSC RAS <sup>2</sup>Komarov Botanical Institute of RAS, Saint Petersburg

#### Abstract

Colesdalen (West Spitsbergen, Nordenskiöld Land) is known on the archipelago for natural conditions that differ significantly from the all of Svalbard's territory. South Arctic tundra is absent on Svalbard, but it can locate the small areas where heat-loving species live (for example, *Betula nana* L., *Campanula gieseckiana* Vest, *Calamagrostis purpurascens* R. Br.). Investigated area is one of these "hot spots". A preliminary list of lichens of the surroundings of the former Russian mining townships of Kolsbey and Grumant with annotations has been made, which includes 121 species. The information on 76 species was confirmed by herbarium material, including 47 species that are given for the first time. *Lecanora bicincta, Miriquidica deusta, Thelenella sordidula* were found by different authors only in Colesdalen. *Baeomyces rufus, Diploschistes muscorum, Leptogium saturninum, Peltigera didactyla, P. leucophlebia, Phaeorrhiza nimbosa* are rare on the archipelago. Species included in the latest edition of the Red Data Book of Svalbard are: *Cladonia mitis* (NT), *Flavocetraria nivalis* (NT), *Nephroma arcticum* (VU), *Pilophorus cereolus* (NT).

#### **Keywords:**

lichens, Arctic, Svalbard, Kolsbey, Grumant, distribution, ecology.



#### Введение

Остатки бывших российских шахтерских поселков Колсбей и Грумант, законсервированных в 1961 г., находятся на о. Западный Шпицберген, в заливе Исфьорден (Isfjorden), на Земле Норденшёльда (Nordenskiöld Land) (рис. 1, *a*). Поселок Колсбей расположен на берегу залива Колсбей (Colesbay), куда впадает река Колсэлва (Coleselva) (рис. 1,  $\delta$ ).



Рис. 1. Местоположение поселков Колсбей и Грумант на арх. Шпицберген (a) и долина реки Колесэлва ( $\delta$ ) Fig. 1. Location of Kolsbey and Grumant on the Svalbard archipelago (a) and Colesdalen ( $\delta$ )

Согласно принятой системе зонального деления архипелага [1], его территория подразделяется на две зоны — зону полярных пустынь и зону арктических тундр. В свою очередь, зона арктических тундр представлена северными арктическими тундрами и средними арктическими тундрами. Считается, что зона полярных пустынь включает районы со средней температурой самого теплого месяца ниже +3 °C, тогда как северные арктические тундры расположены в пределах +3...+5 °C, средние арктические тундры — +5...+7 °C. Южно-арктические тундры, представляющие районы в пределах +7...+9 °C, на Свальбарде отсутствуют, но могут быть представлены небольшими участками, где обитают теплолюбивые виды (например, *Betula nana* L., *Campanula gieseckiana* Vest, *Calamagrostis purpurascens* R. Br.) (рис. 2).



Рис. 2. Сообщество с *Betula nana* Fig. 2. *Betula nana* plant community

А. Елвебакк (Elvebakk) [2] предложил ряд «горячих точек» на Свальбарде, одной из таких точек является исследуемая нами территория. Долина Колсдален (Colesdalen) известна природными условиями, существенно отличающимися от остальной территории архипелага [1–3]. Это влажный и защищенный горным хребтом от сильных ветров район, что сказывается на видовом составе высших растений (среди которых, к примеру, нами неоднократно обнаружена *Betula nana*) и, разумеется, лишайников.

# Материал и методика

Изучение лишайников было начато первым автором в 2009 г. в июле-августе маршрутным методом в окрестностях бывшего российского пос. Колсбей и продолжено в 2015 г. в окрестностях Колсбея и Груманта. Сборы лишайников сделаны со всех возможных субстратов: почвы, камней, растительных остатков, мхов, плавника, обработанной древесины, оставшейся от заброшенных построек. При сборе материала учитывались, по возможности, все варианты экологических условий: разная степень освещенности, увлажненности и т. д. Для идентификации лишайников в лабораторных условиях использован микроскоп бинокулярный стереоскопический МБС-10, а также микроскоп проходящего света CARL ZEISS JENA NU 2 и стандартный набор реактивов [4].

Кроме того, проанализированы литературные источники, посвященные лишайникам этого района. Несмотря на более чем 200-летнюю историю изучения лишайников архипелага, территория остается изученной крайне неравномерно [1, 5–11 и др.]. Для района Колсдален упоминается 45 видов лишайников, включенных в базу данных гербария Университета Осло (О) и обобщающую сводку по лишайникам Шпицбергена [1]. Это сборы, сделанные в 2002 г. (автор Р. Хауган (Haugan)) и определенные в основном Д. О. Ёвстедалом (Øvstedal) — одним из авторов последней крупной сводки по лишайникам арх. Шпицберген. Кроме того, есть образцы, хранящиеся в гербарии Университета Тромсё (TROM), которые собирали в 1986 и 1988 гг. Т. Енгелсхьон (Engelskjøn) и С. Спьелкавик (Spjelkavik). Несколько редких видов лишайников из окрестностей пос. Колсбей, а также данные об изученности лишайников архипелага российскими исследователями упоминались в наших работах ранее [12–14]. Наши коллекции хранятся в гербарии ПАБСИ КНЦ РАН (КРАВG).

# Результаты и обсуждение

В настоящее время подготовлен предварительный список лишайников окрестностей пос. Колсбей и Грумант с аннотациями, который включает 121 вид. В списке к каждому виду даны сведения о местонахождении с координатами (в системе WGS84) и высотой над уровнем моря. Кроме этого приведены сведения о ценозах, субстратах, датах сбора, коллекторах и определявших (для образцов из гербариев). Для образцов, вложенных в гербарий, приведены гербарные номера.

Принятые в списке сокращения и обозначения:

- N северная широта;
- Е восточная долгота;
- alt. высота над уровнем моря;
- окр. окрестности;
- leg. коллектор;
- det. определивший.

*Acarospora molybdina* (Wahlenb.) Trevis. — Грумант, 78°10'36.0"N, 15°06'45.2"E, alt. 142 м, скалы со мхами и выходами камней, на камне, 02.08.2015.

*Alectoria nigricans* (Ach.) Nyl. — Colesbukta, 1933, leg. N. Polunin (O-L135555) [1]; окр. пос. Колсбей, 78°06'39.1"N, 15°04'57.2"E, alt. 190 м, на камне у вершины, 29.07.2009; дорога на Грумант, 78°08'30.3"N, 14°59'37.4"E, alt. 40 м, мохово-злаково-ивовая тундра на склоне, на вершине глыбы, 31.07.2009.

*Allantoparmelia alpicola* (Th. Fr.) Essl. — Colesbukta, окр. пос. Колсбей, долина р. Coleselva, каменистая россыпь среди тундры ивово-моховой, на противоположном от пос. берегу реки, бок валуна, 29.07.2009 (KPABG-5377) [12].

*Amundsenia approximata* (Lynge) Søchting et al. (*=Caloplaca approximata* (Lynge.) H. Magn.) — Colesbukta, склон долины р. Coleselva, долина Colesdalen, каменистая россыпь в тундре, верх глыбы, на камне, 30.07.2009 [12].

*Arthrorhaphis citrinella* (Ach.) Poelt — Colesbukta, Vestalfjellet, NE, 02.08.1986, leg. T. Engelskjøn & S. Spjelkavik (TROM) [1]; окр. пос. Колсбей, у дома Русанова, ручей, 78°07'52.3"N, 15°00'18.7"E, alt. 144 м, каменная россыпь у гребня, почва, 06.08.2015; склон к р. Coleselva, 78°06'27.6"N, 15°05'22.8"E, alt. 130 м, каменная россыпь, почва, 07.08.2015.

*Aspicilia aliena* (Zahlbr.) Oxner — Colesdalen, 78°06'N, 15°03'E, alt. 25–50 м, 20.08.2002, leg. R. Haugan, det. D. O. Øvstedal 2005 (O-L116735) [1].

*A. arctica* (Lynge) Oxner — Colesdalen, 78°06′N, 15°03′E, alt. 25–50 м, 20.08.2002, leg. R. Haugan, det. D.O. Øvstedal 2003 (O-L116830) [1].

A. supertegens Arnold — Colesbukta, 01.10.1999, leg. S. Spjelkavik, det. D. O. Øvstedal 2000 (BG-L80972) [1].

*Baeomyces rufus* (Huds.) Rebent. — Colesbukta, дорога на Грумант, 1-я приморская терраса, тундра, верх валуна, на почве (на камне), 31.07.2009 (KPABG-5442); там же, тундра, щель между валунов, на почве (на камне), 31.07.2009 (KPABG-5443) [12].

*Biatora cuprea* (Sommerf.) Fr. — Colesbukta, Vestalfjellet, alt. 150 м, in *Cassiope tetragona* heath, 03.08.1986, leg. T. Engelskjøn & S. Spjelkavik (TROM) [1].

*B. ementiens* (Nyl.) Printzen — Colesdalen, 78°06′N, 15°03′E, alt. 25-50 м, 20.08.2002, leg. R. Haugan, det. D. O. Øvstedal 2005 (O-L116701) [1].

*Brodoa oroarctica* (Krog) Goward — окр. пос. Колсбей, у дома Русанова, ручей, 78°07′52.3″N, 15°00′18.7″E, alt. 144 м, каменная россыпь у гребня, почва между камнями, 06.08.2015.

*Bryocaulon divergens* (Ach.) Kärnefelt — дорога на Грумант, 78°08'30.3"N, 14°59'37.4"E, alt. 40 м, мохово-злаково-ивовая тундра на склоне, в углублениях камня, 31.07.2009.

Bryonora septentrionalis Holt.-Hartw. — Colesbukta, Vestalfjellet, NE, 03.08.1986, leg. T. Engelskjøn & S. Spjelkavik (TROM) [1].

*Bryoplaca jungermanniae* (Vahl) Søchting et al. — Colesdalen, 78°06'N, 15°03'E, alt. 25–50 м, 20.08.2002, leg. R. Haugan (O-L116779) [1].

*B. tetraspora* (Nyl.) Søchting et al. — Colesdalen, 78°06'N, 15°03'E, alt. 25–50 м, 20.08.2002, leg. R. Haugan (O-L116778) [1].

*Buellia aethalea* (Ach.) Th. Fr. — Colesdalen, 78°06'N, 15°03'E, alt. 25–50 м, 20.08.2002, leg. R. Haugan, det. D. O. Øvstedal (O-L116762) [1].

*B. insularis* Øvstedal — Colesdalen, 78°06'N, 15°03'E, alt. 25–50 м, 20.08.2002, leg. R. Haugan, det. D. O. Øvstedal 2010 (O-L116836) [1].

*B. leptocline* (Flot.) Körb. — Colesdalen, 78°06′N, 15°03′E, alt. 25–50 м, 20.08.2002, leg. R. Haugan, det. D.O. Øvstedal (O-L116641) [1].

*Candelariella vitellina* (Hoffm.) Müll. Arg. — окр. пос. Колсбей, 78°06'33.4"N, 15°04'43.3"E, alt. 165 м, каменная россыпь среди ивово-моховой тундры, на камне, 29.07.2009; там же, болото в тундре пушициево-моховое, куртина, на камне, 29.07.2009 [12].

*Cetraria islandica* (L.) Ach. — дорога на Грумант, каньон реки, 78°08′22.6″N, 15°00′18.0″E, alt. 147 м, сырые скалы, на камнях со мхами и почвой, камень, 31.07.2009; там же, 1-я приморская терраса, тундра ивово-злаковая, со мхами, у каньона, галька, 31.07.2009 (КРАВG-5382) [12].

*Cetrariella delisei* (Bory ex Schaer.) Kärnefelt & A.Thell — Colesdalen,  $78^{\circ}04'47.1''$ N,  $15^{\circ}04'48.6''$ E, alt. 65 м, задернованная каменная россыпь, на камне, 30.07.2009; дорога на Грумант, 1-я терраса,  $78^{\circ}08'16.6''$ N,  $14^{\circ}58'58.3''$ E, alt. 6 м, мохово-ивовая тундра, верх камней с мхами по пути на 2-ю террасу, 31.07.2009; там же,  $78^{\circ}08'37.5''$ N,  $15^{\circ}03'11.7''$ E, alt. 342 м, заболоченная низина на террасе, почва, 08.08.2015.

*Cladonia amaurocraea* (Flörke) Schaer. — берег оз. Tenndammen, 78°06′09.7″N, 15°02′07.2″E, alt. 10 м, пятна с мхами и ивой, почва, 05.08.2015; окр. пос. Колсбей, у дома Русанова, ручей, 78°07′52.3″N, 15°00′18.7″E, alt. 144 м, каменная россыпь у гребня, почва, 06.08.2015.

*C. coccifera* (L.) Willd. — Colesdalen, 78°06'38.7"N, 15°07'49.7"E, alt. 212 м, склон моховоивовый, на почве и мхах, 01.08.2009; там же, 78°06'46.2"N, 15°08'33.6"E, alt. 271 м, каньон ручья, мохово-лишайниковый склон, на почве, 01.08.2009; окр. пос. Колсбей, 78°06'33.4"N, 15°04'43.3"E, alt. 165 м, каменная россыпь среди ивово-моховой тундры, почва на склоне между камней, 29.07.2009.

*C. gracilis* (L.) Willd. — дорога на Грумант, каньон реки,  $78^{\circ}08'22.6''$ N,  $15^{\circ}00'18.0''$ E, alt. 147 м, сырые скалы, камни со мхами, 31.07.2009; окр. пос. Колсбей,  $78^{\circ}06'33.4''$ N,  $15^{\circ}04'43.3''$ E, alt. 165 м, каменная россыпь среди ивово-моховой тундры, почва на склоне между камней, 29.07.2009; там же,  $78^{\circ}06'33.4''$ N,  $15^{\circ}04'43.3''$ E, alt. 165 м, каменная россыпь среди ивово-моховой тундры, почва на склоне между камней, 29.07.2009; там же,  $78^{\circ}06'33.4''$ N,  $15^{\circ}04'43.3''$ E, alt. 165 м, каменная россыпь среди ивово-моховой тундры, почва между камней, 29.07.2009; Colesdalen,  $78^{\circ}05'32.3''$ N,  $15^{\circ}06'34.9''$ E, alt. 6 м, мохово-осоковое болото на другой стороне реки, кочка на болоте, 30.07.2009.

*C. mitis* Sandst. — Colesdalen,  $78^{\circ}04'47.1''$ N,  $15^{\circ}04'48.6''$ E, alt. 65 м, задернованная каменная россыпь, бок камня, 30.07.2009; окр. пос. Колсбей, у дома Русанова, ручей,  $78^{\circ}07'54.4''$ N,  $14^{\circ}59'47.9''$ E, alt. 114 м, каменные россыпи вдоль ручья, почва, 06.08.2015; там же,  $78^{\circ}06'44.8''$ N,  $15^{\circ}01'59.8''$ E, alt. 11 м, остатки деревянных и бетонных сооружений на побережье, почва со мхами, 29.07.2009; дорога на Грумант,  $78^{\circ}08'37.5''$ N,  $15^{\circ}03'11.7''$ E, alt. 342 м, заболоченная низина на террасе, почва, 08.08.2015.

*C. pyxidata* (L.) Hoffm. — Colesdalen, 78°06′38.7″N, 15°07′49.7″E, alt. 212 м, склон моховоивовый, почва, мхи, 01.08.2009; окр. пос. Колсбей, 78°06′33.4″N, 15°04′43.3″E, alt. 165 м, каменная россыпь среди ивово-моховой тундры, почва на склоне между камней, 29.07.2009.

*Diploschistes muscorum* (Scop.) R. Sant. — Грумант, побережье, 78°10′36.0″N, 15°06′45.2″E, alt. 142 м, скалы с мхами и выходами камней, почва, 02.08.2015.

*Flavocetraria nivalis* (L.) Kärnefelt & A. Thell — дорога на Грумант, 78°09'13.3"N, 15°00'34.6"E, alt. 19 м, остатки деревянных сооружений, склон, среди мхов на почве, 31.07.2009 [12].

*Lambiella impavida* (Th. Fr.) M. Westb. & Resl (*=Rimularia impavida* (Th. Fr.) Hertel & Rambold) — Colesdalen, 78°06'N, 15°03'E, alt. 25–50 м, 20.08.2002, leg. R. Haugan (O-L116750) [1].

*L. insularis* (Nyl.) T. Sprib. (*=Rimularia insularis* (Nyl.) Rambold & Hertel) — Colesdalen, 78°06'N, 15°03'E, alt. 25-50 м, 20.08.2002, leg. R. Haugan (O-L116848) [1].

*Lecanora atrosulphurea* (Wahlenb.) Ach. — Colesdalen, 78°06'N, 15°03'E, alt. 25–50 м, 20.08.2002, leg. R. Haugan (O-L116718) [1].

L. bicincta Ramond — Colesdalen, 2002, leg. R. Haugan (O) [1].

*L. cenisia* Ach. — Colesdalen, 78°06'N, 15°03'E, alt. 25-50 m, 20.08.2002, leg. R. Haugan, det. D. O. Øvstedal 2005 (O-L116712) [1].

*L. formosa* (Bagl. & Carestia) Knoph & Leuckert (*=Lecidea tuberculifera* H. Magn.) — Colesbukta, 10.10.1999, leg. S. Spjelkavik, det. D. O. Øvstedal 2000 (BG-L80971); Colesdalen, 78°06'N, 15°03'E, alt. 25–50 м, 20.08.2002, leg & det. R. Haugan 2013 (O-L116770) [1].

*L. intricata* (Ach.) Ach. — дорога на Грумант, 78°08'30.3"N, 14°59'37.4"E, alt. 40 м, моховозлаково-ивовая тундра на склоне, в углублениях камня на склоне, 31.07.2009.

*L. polytropa* (Ehrh. ex Hoffm.) Rabenh. — дорога на Грумант, 78°08'30.3"N, 14°59'37.4"E, alt. 40 м, 2-я терраса, мохово-злаково-ивовая тундра на склоне, бок глыбы, 31.07.2009.

*L. rupicola* (L.) Zahlbr. — Colesdalen, 78°06′N, 15°03′E, alt. 25–50 м, 20.08.2002, leg. R. Haugan (O-L116722) [1].

*L. swartzii* (Ach.) Ach. — Colesdalen, 78°06′N, 15°03′E, alt. 25–50 м, 20.08.2002, leg. R. Haugan, det. D. O. Øvstedal 2003 (O-L116803) [1].

*Lecidea confluens* (Weber) Ach. — Colesdalen, 78°06'N, 15°03'E, alt. 25–50 м, 20.08.2002, leg. R. Haugan, det. D. O. Øvstedal 2010 (O-L116843) [1].
L. silacea (Hoffm.) Ach. - Colesdalen, 2002, leg. R. Haugan (O) [1].

*Leciophysma finmarkicum* Th. Fr. — Colesdalen, 78°06'N, 15°03'E, alt. 25–50 м, 20.08.2002, leg. R. Haugan (O-L116795) [1].

*Lepraria gelida* Tønsberg & Zhurb. — дорога на Грумант, каньон реки, 78°08′22.6″N, 15°00′18.0″E, alt. 147 м, сырые скалы, склон, камни с мхами, 31.07.2009.

L. lobificans Nyl. — Colesdalen, 2002, leg. R. Haugan (O) [1].

*L. neglecta* (Nyl.) Lettau — дорога на Грумант, каньон реки, 78°08′22.6″N, 15°00′18.0″E, alt. 147 м, сырые скалы, склон, камни с почвой и мхами, 31.07.2009.

*Leptogium saturninum* (Dicks.) Nyl. — Грумант, побережье, 78°10'36.0"N, 15°06'45.2"E, alt. 142 м, скалы с мхами и выходами камней, стена скалы, по которой стекает вода, на мхах, 02.08.2015.

*Lichenomphalia alpina* (Britzelm.) Redhead et al. — Colesbukta, дорога на Груманд, 1-я терраса, тундра, щель между валунов, на почве (на камне), 31.07.2009 (КРАВС-5443) [12].

*L. umbellifera* (L.:Fr.) Redhead et al. — окр. пос. Колсбей, 78°06′45″N, 15°02′00″E, alt. 12 м, болото в тундре пушициево-моховое, куртина, на почве среди мхов, 29.07.2009 (KPABG-5361) [12]; дорога на Грумант, 78°08′10.1″N, 14°59′22.5″E, 2-я терраса, почва и мхи, 08.08.2015.

*Lobaria linita* (Ach.) Rabenh. — окр. пос. Колсбей, у домика Русанова, ручей, 78°07'54.4"N, 14°59'47.9"E, alt. 114 м, каменные россыпи вдоль ручья, почва, 06.08.2015; там же, 78°06'44.8"N, 15°01'59.8"E, alt. 11 м, остатки деревянных и бетонных сооружений на побережье, почва в защищенном от ветра месте, 29.07.2009; берег оз. Tenndammen, 78°06'09.7"N, 15°02'07.2"E, alt. 10 м, пятна с мхами и ивой, почва, 05.08.2015; склон к р. Coleselva, плато рядом с горой Russekollen, 78°06'56.5"N, 15°07'52.6"E, alt. 320 м, тундра мохово-ивово-осоковая, почва среди мхов, 07.08.2015; Colesdalen, 78°06'38.7"N, 15°07'49.7"E, alt. 212 м, склон мохово-ивовый, почва, мхи, 01.08.2009; дорога на Грумант, 78°09'13.3"N, 15°00'34.6"E, alt. 19 м, остатки деревянных сооружений, склон, среди мхов на почве, 31.07.2009; там же, дорога на Грумант, 1-я терраса, тундра, верх валуна, на почве (на камне), 31.07.2009 (КРАВG-5436) [12].

*Megalaria jemtlandica* (Th. Fr. & Almq.) Fryday — Colesdalen, 78°06'N, 15°03'E, alt. 25–50 м, 20.08.2002, leg. R. Haugan, det. D. O. Øvstedal 2005 (O-L116744) [1].

*Melanelia hepatizon* (Ach.) А. Thell — окр. пос. Колсбей, 78°06'33.4"N, 15°04'43.3"E, alt. 165 м, каменная россыпь среди ивово-моховой тундры, бок камня, 29.07.2009.

Miriquidica deusta (Stenh.) Hertel & Rambold - Colesdalen, 2002, leg. C. Printzen (TROM) [1].

M. picea Øvstedal — Colesbukta, 01.10.1999, leg. S. Spjelkavik, det. M. Andreev 2002 (BG-L83013) [1].

*Montanelia disjuncta* (Erichsen) Divakar et al. — Colesdalen, 78°06'N, 15°03'E, alt. 25–50 м, 20.08.2002, leg. R. Haugan, det. D. O. Øvstedal 2005 (O-L116805) [1].

*Myriolecis dispersa* (Pers.) Śliwa et al. — Грумант, побережье, 78°10′36.0″N, 15°06′45.2″E, alt. 142 м, скалы с мхами и выходами камней, камень, 02.08.2015.

*M. thuleana* (Poelt) Śliwa, Zhao Xin & Lumbsch (=*Arctopeltis thuleana* Poelt) — пос. Колсбей, 78°07′07.7″N, 15°00′54.8″E, alt. 5 м, плавник на берегу, на древесине моста, 02.08.2009.

*Nephroma arcticum* (L.) Torss. — окр. пос. Колсбей, дорога на Грумант, у домика Русанова, 78°07′45.8″N, 14°59′40.9″E, alt. 66 м, 2-я приморская терраса, сообщество с *Betula nana*, дриадой, ивой полярной, злаками, камень и почва, 06.08.2015.

Ochrolechia androgyna (Hoffm.) Arnold — Colesdalen, 2002, leg. R. Haugan (O) [1].

*O. frigida* (Sw.) Lynge — Colesdalen, 78°05'32.3"N, 15°06'34.9"E, alt. 6 м, мохово-осоковое болото на другой стороне реки, кочка на болоте, 30.07.2009; там же, 78°06'38.7"N, 15°07'49.7"E, alt. 212 м, склон мохово-ивовый, почва, мхи, 01.08.2009; дорога на Грумант, 1-я терраса, 78°08'16.6"N, 14°58'58.3"E, alt. 6 м, мохово-ивовая тундра, верх камней с мхами по пути на 2-ю террасу, 31.07.2009.

*O. grimmiae* Lynge — окр. пос. Колсбей, у домика Русанова, ручей, 78°07′52.3″N, 15°00′18.7″E, alt. 144 м, каменная россыпь у гребня, почва и мхи, 06.08.2015; склон реки Coleselva, 78°06′27.6″N, 15°05′22.8″E, alt. 130 м, каменная россыпь, мхи и мелкие камни, 07.08.2015.

*Parmelia omphalodes* (L.) Ach. — склон к р. Coleselva, 78°06′27.6″N, 15°05′22.8″E, alt. 130 м, каменная россыпь, камень, 07.08.2015; дорога на Грумант, 78°08′30.3″N, 14°59′37.4″E, alt. 40 м, мохово-злаково-ивовая тундра на склоне, древесина, 31.07.2009.

*P. saxatilis* (L.) Ach. — окр. пос. Колсбей, дорога на Грумант, у домика Русанова, 78°07'45.8"N, 14°59'40.9"E, alt. 66 м, 2-я приморская терраса, сообщество с *Betula nana*, дриадой, ивой полярной, злаками, камень и почва, 06.08.2015; Colesbukta, 1-я приморская терраса, дорога на Грумант, тундра ивово-злаковая, со мхами, у каньона, галька, 31.07.2009 (КРАВG-5382, 5383) [12].

*P. skultii* Hale — склон к р. Coleselva, 78°06′27.6″N, 15°05′22.8″E, alt. 130 м, каменная россыпь, почва и мхи на камне, 07.08.2015; дорога на Грумант, 78°08′30.3″N, 14°59′37.4″E, alt. 40 м, мохово-злаково-ивовая тундра на склоне, верх глыбы, 31.07.2009.

*Peltigera aphthosa* (L.) Willd. — Colesdalen, 78°06'N, 15°03'E, alt. 25–50 м, 20.08.2002, leg. R. Haugan (O-L116700) [1]; Colesbukta, окр. пос. Колсбей, 78°06'45"N, 15°02'00"E, alt. 11 м, тундра злаково-моховая, на почве, 29.07.2009 (КРАВС-5358) [12]; Грумант, побережье, 78°10'36.0"N, 15°06'45.2"E, alt. 142 м, скалы со мхами и выходами камней, почва среди мхов, 02.08.2015.

*P. canina* (L.) Willd. — окр. пос. Колсбей, 78°06′44.8″N, 15°01′59.8″E, alt. 11 м, остатки деревянных и бетонных сооружений на побережье, почва среди мхов и злаков, 29.07.2009.

*P. didactyla* (With.) J. R. Laundon — Colesdalen, 78°05′32.3″N, 15°06′34.9″E, alt. 6 м, моховоосоковое болото на другой стороне реки, кочка на болоте, 30.07.2009.

*P. lepidophora* (Nyl. ex Vain.) Bitter — Colesdalen, 78°06'N, 15°03'E, alt. 25–50 м, 20.08.2002, leg. R. Haugan (O-L116716) [1].

*P. leucophlebia* (Nyl.) Gyeln. — Грумант, побережье, 78°10'36.0"N, 15°06'45.2"E, alt. 142 м, скалы с мхами и выходами камней, почва среди мхов, 02.08.2015; Colesdalen, 78°06'38.7"N, 15°07'49.7"E, alt. 212 м, склон мохово-ивовый, почва, мхи, 01.08.2009; окр. пос. Колсбей, 78°06'44.8"N, 15°01'59.8"E, alt. 11 м, остатки деревянных и бетонных сооружений на побережье, почва со мхами, 29.07.2009.

*P. malacea* (Ach.) Funck — окр. пос. Колсбей, у дома Русанова, ручей,  $78^{\circ}07'54.4''$ N, 14°59'47.9"E, alt. 114 м, каменные россыпи вдоль ручья, почва, 06.08.2015; Colesdalen,  $78^{\circ}05'32.3''$ N, 15°06'34.9"E, alt. 6 м, мохово-осоковое болото на другой стороне реки, кочка на болоте, 30.07.2009; там же,  $78^{\circ}06'38.7''$ N,  $15^{\circ}07'49.7''$ E, alt. 212 м, склон мохово-ивовый, почва, мхи, 01.08.2009; там же,  $78^{\circ}06'44.8''$ N,  $15^{\circ}01'59.8''$ E, alt. 11 м, остатки деревянных и бетонных сооружений на побережье, почва среди мхов и злаков, 29.07.2009; там же,  $78^{\circ}06'33.4''$ N,  $15^{\circ}04'43.3''$ E, alt. 165 м, каменная россыпь среди ивово-моховой тундры, почва между камней, 29.07.2009.

*P. rufescens* (Weiss) Humb. — окр. пос. Колсбей, вершина, 78°06'39.1"N, 15°04'57.2"E, alt. 190 м, тундра мохово-злаковая, почва на склоне, 29.07.2009.

*P. scabrosa* Th. Fr. — Colesdalen, 78°05′32.3″N, 15°06′34.9″E, alt. 6 м, мохово-осоковое болото на другой стороне реки, кочка на болоте, 30.07.2009; Colesdalen, 78°06′N, 15°03′E, alt. 25–50 м, 20.08.2002, leg. R. Haugan (O-L116746) [1].

*P. scabrosella* Holt.-Hartw. — Colesdalen, 78°06′N, 15°03′E, alt. 25–50 м, 20.08.2002, leg. R. Haugan (O-L116751) [1].

*P. venosa* (L.) Hoffm. — дорога на Грумант, 78°09′13.3″N, 15°00′34.6″E, alt. 19 м, остатки деревянных сооружений, почва у скал, на камнях, 31.07.2009.

*Pertusaria oculata* (Dicks.) Th. Fr. — окр. пос. Колсбей, у дома Русанова, ручей, 78°07′54.4″N, 14°59′47.9″E, alt. 114 м, каменные россыпи вдоль ручья, почва, 06.08.2015.

P. sommerfeltii (Flörke ex Sommerf.) Fr. — Colesbukta, 2001, leg. R. Haugan (O) [1].

*Phaeophyscia sciastra* (Ach.) Moberg — дорога на Грумант, 78°09'13.3"N, 15°00'34.6"E, alt. 19 м, остатки деревянных сооружений, камень, верх на подходе к скалам, 31.07.2009.

*Phaeorrhiza nimbosa* (Fr.) Н. Mayrhofer & Poelt — окр. пос. Колсбей, у дома Русанова, ручей, 78°07′52.3″N, 15°00′18.7″E, alt. 144 м, каменная россыпь у гребня, почва и мхи, 06.08.2015.

*Physcia dubia* (Hoffm.) Lettau — окр. пос. Колсбей, 78°06′44.8″N, 15°01′59.8″E, alt. 11 м, остатки деревянных и бетонных сооружений на побережье, древесина, 29.07.2009; Colesbukta, бывший пос. Колсбей, территория поселка, доски причала, на обработанной древесине, 02.08.2009.

*Physconia muscigena* (Ach.) Poelt — Colesdalen, 78°06′N, 15°03′E, alt. 25-50 м, 20.08.2002, leg. R. Haugan (O-L116777) [1]; дорога на Грумант, 78°08′30.3″N, 14°59′37.4″E, alt. 40 м, моховозлаково-ивовая тундра на склоне, бок глыбы, 2-я терраса, 31.07.2009; окр. пос. Колсбей, вершина, 78°06′39.1″N, 15°04′57.2″E, alt. 190 м, тундра мохово-злаковая, почва с мхами на середине склона, 29.07.2009.

*Pilophorus cereolus* (Ach.) Hellb. — окр. пос. Колсбей, дорога на Грумант, 78°08'37.5"N, 15°03'11.7"E, alt. 342 м, заболоченная низина на террасе, камень, 08.08.2015.

*P. dovrensis* (Nyl.) Timdal et al. — Colesdalen, 78°06'N, 15°03'E, alt. 25–50 м, 20.08.2002, leg. R. Haugan (O-L116802) [1].

*Placopsis gelida* (L.) Linds. — окр. пос. Колсбей, дорога на Грумант, 78°08'37.5"N, 15°03'11.7"E, alt. 342 м, заболоченная низина на террасе, камень, 08.08.2015.

*Polycauliona candelaria* (L.) Frödén et al. (*=Xanthoria candelaria* (L.) Th. Fr.) — Colesbukta, окр. пос. Колсбей, территория поселка, доски причала, на обработанной древесине, 02.08.2009.

*Porpidia flavicunda* (Ach.) Gowan — Colesdalen, 78°04′47.1″N, 15°04′48.6″E, alt. 65 м, задернованная каменная россыпь, камень, 30.07.2009.

*P. melinodes* (Körb.) Gowan & Ahti — Colesdalen, 78°06'N, 15°03'E, alt. 25–50 м, 20.08.2002, leg. R. Haugan (O-L116794) [1].

*P. superba* (Körb.) Hertel & Knoph — Colesdalen, 78°06'N, 15°03'E, alt. 25–50 м, 20.08.2002, leg. R. Haugan, det. D. O. Øvstedal (O-L116826) [1].

*Protopannaria pezizoides* (Weber) Р. М. Jørg. & S. Ekman — окр. пос. Колсбей, 78°06'33.4"N, 15°04'43.3"E, alt. 165 м, каменная россыпь среди ивово-моховой тундры, почва на склоне между камней, 29.07.2009.

*Pseudephebe minuscula* (Nyl. ex Arnold) Brodo & D. Hawksw. — 78°06′00″N, 15°07′00″E, alt. 212 м, Colesbukta, окр. пос. Колсбей, долина Colesdalen, тундра мохово-ивовая, в долине ручья, верх глыбы, на камне, 01.08.2009 (КРАВС-5384) [12].

*P. pubescens* (L.) M. Choisy — Colesdalen, 78°06′46.2″N, 15°08′33.6″E, alt. 271 м, каньон ручья, верх каньона, камни наверху, 01.08.2009; Colesbukta, окр. пос. Колсбей, долина Colesdalen, верх каньона ручья, тундра на склонах, на камне, 01.08.2009 [12].

*Psoroma hypnorum* (Vahl) Gray — берег оз. Tenndammen, 78°06′09.7″N, 15°02′07.2″E, alt. 10 м, пятна с мхами и ивой, почва, 05.08.2015.

Pyrenopsis furfurea (Nyl.) Leight. — Colesbukta, 1988, leg. T. Engelskjøn & S. Spjelkavik (TROM) [1].

*Rhizocarpon atroflavescens* Lynge — Colesdalen, 78°06'N, 15°03'E, alt. 25–50 м, 20.08.2002, leg. R. Haugan, det. D. O. Øvstedal 2003 (O-L116844) [1].

*R. bolanderi* (Tuck.) Herre — Colesbukta, 10.10.1999, leg. S. Spjelkavik, det. D. O. Øvstedal (BG-L80969) [1].

*R. copelandii* (Körb.) Th. Fr. — Colesdalen, 78°06′N, 15°03′E, alt. 25–50 м, 20.08.2002, leg. R. Haugan, det. E. Timdal, 2013 (O-L116630) [1].

*R. geminatum* Körb. — Colesdalen, 78°06′N, 15°03′E, alt. 25-50 м, 20.08.2002, leg. R. Haugan (O-L116793) [1].

*R. geographicum* (L.) DC. — дорога на Грумант, 78°08′30.3″N, 14°59′37.4″E, alt. 40 м, моховозлаково-ивовая тундра на склоне, бок глыбы, 2-я терраса, 31.07.2009; окр. пос. Колсбей, вершина, 78°06′39.1″N, 15°04′57.2″E, alt. 190 м, тундра мохово-злаковая, бок камня, 29.07.2009; там же, болото в тундре пушициево-моховое, куртина, на камне, 29.07.2009 [12]. R. intermediellum Räsänen — Colesbukta, 1999, leg. S. Spjelkavik (BG) [1].

R. saanaense Räsänen – Colesbukta, 1999, leg. S. Spjelkavik (BG) [1].

*R. viridiatrum* (Wulfen) Körb. — Colesbukta, 10.10.1999, leg. S. Spjelkavik, det. D. O. Øvstedal 2000 [1].

*Rhizoplaca melanophthalma* (DC.) Leuckert & Poelt — берег оз. Tenndammen,  $78^{\circ}06'06.7''$ N,  $15^{\circ}01'51.4''$ E, alt. 11 м, ивово-моховое сообщество, древесина, 05.08.2015; Colesbukta, пос. Колсбей,  $78^{\circ}07'07.7''$ N,  $15^{\circ}00'54.8''$ E, alt. 5 м, плавник на берегу, доски причала, на обработанной древесине, 02.08.2009.

*Rinodina archaea* (Ach.) Arnold — Colesdalen, 78°06'N, 15°03'E, alt. 25-50 м, 20.08.2002, leg. R. Haugan, det. D. O. Øvstedal (O-L116703, O-L116847) [1].

*Rusavskia elegans* (Link) S. Y. Kondr. & Kärnefelt — дорога на Грумант, 78°08'30.3"N, 14°59'37.4"E, alt. 40 м, мохово-злаково-ивовая тундра на склоне, в углублениях камня на склоне, 31.07.2009; там же, 78°09'13.3"N, 15°00'34.6"E, alt. 19 м, остатки деревянных сооружений, камень, верх, на подходе к скалам, 31.07.2009; окр. пос. Колсбей, 78°06'44.8"N, 15°01'59.8"E, alt. 11 м, остатки деревянных и бетонных сооружений на побережье, древесина, 29.07.2009; пос. Колсбей, 78°07'07.7"N, 15°00'54.8"E, alt. 5 м, плавник на берегу, на древесине моста, 02.08.2009; Colesdalen, долина реки Coleselva, каменистая россыпь среди тундры ивово-моховой, на противоположном от поселка берегу реки, бок глыбы, на камне, 29.07.2009 (KPABG-5376) [12]; там же, территория поселка, доски причала, обработанная древесина, 02.08.2009.

*R. sorediata* (Vain.) S. Y. Kondr. & Kärnefelt — Colesdalen, 78°06'N, 15°03'E, alt. 25–50 м, 20.08.2002, leg. R. Haugan (O-L116833) [1]; берег оз. Теппdammen, 78°06'06.7"N, 15°01'51.4"E, alt. 11 м, ивово-моховое сообщество, камень, 05.08.2015.

*Solorina bispora* Nyl. — склон реки Coleselva, 78°06′28.9″N, 15°06′24.8″E, alt. 183 м, ложбинка, закрытая каменными россыпями, почва на камне, 07.08.2015.

S. crocea (L.) Ach. — берег оз. Tenndammen,  $78^{\circ}06'09.7''$ N,  $15^{\circ}02'07.2''$ E, alt. 10 м, пятна со мхами и ивой, почва, 05.08.2015; склон к р. Coleselva, плато рядом с г. Russekollen,  $78^{\circ}06'56.5''$ N,  $15^{\circ}07'52.6''$ E, alt. 320 м, тундра мохово-ивово-осоковая, почва среди мхов, 07.08.2015; Colesdalen,  $78^{\circ}06'46.2''$ N,  $15^{\circ}08'33.6''$ E, alt. 271 м, каньон ручья, мокрые скалы у основания, почва у скал, 01.08.2009; там же, долина ручья, склон мохово-лишайниковый, на почве, 01.08.2009; окр. пос. Колсбей,  $78^{\circ}06'33.4''$ N,  $15^{\circ}04'43.3''$ E, alt. 165 м, каменная россыпь среди ивово-моховой тундры, почва между мхами, 29.07.2009.

*Sphaerophorus fragilis* (L.) Pers. — дорога на Грумант, 78°08'30.3"N, 14°59'37.4"E, alt. 40 м, мохово-злаково-ивовая тундра на склоне, верх глыбы, 31.07.2009 [12].

*S. globosus* (Huds.) Vain. — окр. пос. Колсбей, у дома Русанова, ручей, 78°07′52.3″N, 15°00′18.7″E, alt. 144 м, каменная россыпь у гребня, почва, 06.08.2015; дорога на Грумант, 78°08′30.3″N, 14°59′37.4″E, alt. 40 м, мохово-злаково-ивовая тундра на склоне, верх глыбы, 31.07.2009.

*Sporastatia testudinea* (Ach.) A. Massal. — Colesdalen, 78°06'N, 15°03'E, alt. 25–50 м, 20.08.2002, leg. R. Haugan (O-L116834) [1]; окр. пос. Колсбей, дорога на Грумант, 78°08'08.0"N, 15°00'21.8"E, alt. 229 м, 3-я терраса, каменная россыпь, камень, бок глыбы, 08.08.2015; Colesbukta, болото в тундре пушициево-моховое, куртина, на камне, 29.07.2009 [12].

Stereocaulon alpinum Laurer — Colesdalen,  $78^{\circ}05'32.3''$ N,  $15^{\circ}06'34.9''$ E, alt. 6 м, моховоосоковое болото на другой стороне реки, кочка на болоте, 30.07.2009; Colesdalen,  $78^{\circ}06'38.7''$ N,  $15^{\circ}07'49.7''$ E, alt. 212 м, склон мохово-ивовый, почва, мхи, 01.08.2009; там же,  $78^{\circ}06'46.2''$ N,  $15^{\circ}08'33.6''$ E, alt. 271 м, каньон ручья, скалы в каньоне, камень, 01.08.2009; там же, мокрые скалы у основания, почва у скал, 01.08.2009; дорога на Грумант,  $78^{\circ}09'13.3''$ N,  $15^{\circ}00'34.6''$ E, alt. 19 м, остатки деревянных сооружений, склон, среди мхов на почве, 31.07.2009.

*Tephromela atra* (Huds.) Hafellner — Colesdalen, 78°06'N, 15°03'E, alt. 25–50 м, 20.08.2002, leg. R. Haugan (O-L116792) [1].

*Tetramelas insignis* (Nägeli ex Hepp) Kalb — Colesdalen, 78°06'N, 15°03'E, alt. 25–50 м, 20.08.2002, leg. R. Haugan (O-L116698, O-L116705) [1].

*Thamnolia vermicularis* (Sw.) Schaer. — окр. пос. Колсбей, у дома Русанова, ручей,  $78^{\circ}07'54.4''$ N,  $14^{\circ}59'47.9''$ E, alt. 114 м, каменные россыпи вдоль ручья, почва, 06.08.2015; там же,  $78^{\circ}07'52.3''$ N,  $15^{\circ}00'18.7''$ E, alt. 144 м, каменная россыпь у гребня, почва, 06.08.2015; склон к р. Coleselva,  $78^{\circ}06'27.6''$ N,  $15^{\circ}05'22.8''$ E, alt. 130 м, каменная россыпь, почва и мхи на камне, 07.08.2015; окр. пос. Колсбей,  $78^{\circ}06'33.4''$ N,  $15^{\circ}04'43.3''$ E, alt. 165 м, каменная россыпь среди ивовомоховой тундры, почва между камней, 29.07.2009 [12].

*Thelenella sordidula* (Th. Fr.) H. Mayrhofer — Colesdalen, 2002, leg. R. Haugan, det. A. Fryday 2004 (O) [1].

*Tremolecia atrata* (Ach.) Hertel — Colesdalen,  $78^{\circ}04'47.1''$ N,  $15^{\circ}04'48.6''$ E, alt. 65 м, задернованная каменная россыпь, камень у подножия, 30.07.2009; дорога на Грумант,  $78^{\circ}08'30.3''$ N,  $14^{\circ}59'37.4''$ E, alt. 40 м, мохово-злаково-ивовая тундра на склоне, камень среди мхов и ивы, 31.07.2009; окр. пос. Колсбей,  $78^{\circ}06'33.4''$ N,  $15^{\circ}04'43.3''$ E, alt. 165 м, каменная россыпь среди ивово-моховой тундры, бок камня, на подъеме, 29.07.2009.

*Umbilicaria cylindrica* (L.) Delise ex Duby — Colesbukta, склон долины р. Coleselva, долина Colesdalen, каменистая россыпь в тундре, бок валуна, на камне, 30.07.2009 (KPABG-5381) [12]; дорога на Грумант, 78°09′13.3″N, 15°00′34.6″E, alt. 19 м, остатки деревянных сооружений, склон каньона, камни с мхами, 31.07.2009.

*U. hyperborea* (Ach.) Hoffm. — берег оз. Теппdammen, 78°06′09.7″N, 15°02′07.2″E, alt. 10 м, пятна со мхами и ивой, почва, 05.08.2015; окр. пос. Колсбей, дорога на Грумант, 78°08′37.5″N, 15°03′11.7″E, alt. 342 м, заболоченная низина на террасе, камень, 08.08.2015; Colesdalen, 78°04′47.1″N, 15°04′48.6″E, alt. 65 м, задернованная каменная россыпь, камень у подножия, 30.07.2009 [12].

*U. proboscidea* (L.) Schrad. — окр. пос. Колсбей, у домика Русанова, ручей, 78°07′52.3″N, 15°00′18.7″E, alt. 144 м, каменная россыпь у гребня, почва, 06.08.2015; склон к р. Coleselva, 78°06′27.6″N, 15°05′22.8″E, alt. 130, каменная россыпь, камень, 07.08.2015.

*U. torrefacta* (Lightf.) Schrad. — дорога на Грумант, 1-я терраса, 78°08'16.6"N, 14°58'58.3"E, alt. 6 м, мохово-ивовая тундра, верх камней со мхами по пути на 2-ю террасу, 31.07.2009; Colesbukta, окр. пос. Колсбей, Colesdalen, склон долины р. Coleselva, каменистая россыпь среди тундры ивово-моховой, на противоположном берегу реки от пос., бок валуна, на камне, 29.07.2009 (KPABG-5375) [12].

Usnea sphacelata R. Br. (=Neuropogon sphacelatus (R. Br.) D. J. Galloway) — окр. пос. Колсбей, у дома Русанова, ручей,  $78^{\circ}07'54.4''$ N,  $14^{\circ}59'47.9''$ E, alt. 114 м, каменные россыпи вдоль ручья, почва и камень, 06.08.2015; там же,  $78^{\circ}07'52.3''$ N,  $15^{\circ}00'18.7''$ E, alt. 144 м, каменная россыпь у гребня, почва, 06.08.2015; склон к р. Coleselva,  $78^{\circ}06'27.6''$ N,  $15^{\circ}05'22.8''$ E, alt. 130 м, каменная россыпь, мхи и мелкие камни, 07.08.2015; Colesdalen,  $78^{\circ}06'46.2''$ N,  $15^{\circ}08'33.6''$ E, alt. 271 м, каньон ручья, верх каньона, камни наверху, 01.08.2009; там же, тундра на склонах с *Betula nana*, галька, 01.08.2009 (KPABG-5373) [12]; там же, каменистая россыпь среди тундры ивово-моховой, на противоположном берегу реки от поселка, галька, 29.07.2009 (KPABG-5374); Colesbukta, дорога на Грумант, склон 1-й террасы, тундра ивово-злаковая, верх глыбы, в углублении, на камне, 31.07.2009 (KPABG-5357) [12].

*Xanthomendoza borealis* (R. Sant. & Poelt) Søchting et al. — Грумант, побережье, 78°10'36.0"N, 15°06'45.2"E, alt. 142 м, скалы с мхами и выходами камней, камень, 02.08.2015.

*Xylographa parallela* (Ach.:Fr.) Fr. — дорога на Грумант, 78°09'13.3"N, 15°00'34.6"E, alt. 19 м, остатки деревянных сооружений, древесина, 31.07.2009.

#### Заключение

Нами подтверждены гербарным материалом сведения о 76 видах, в том числе 47 из них приведены для указанного района впервые (рис. 3). С учетом того, что наши данные пока предварительны, список лишайников этой интересной территории будет значительно дополнен.

Среди выявленных видов — ряд редких для архипелага, а также находящихся под охраной. Три вида из приведенных обнаружены разными авторами только в Colesdalen (*Lecanora bicincta*, *Miriquidica deusta*, *Thelenella sordidula*).



Рис. 3. Сообщество с *Lichenomphalia umbellifera* Fig. 3. *Lichenomphalia umbellifera* plant community

Приведены редкие и рассеянно распространенные виды на архипелаге, в том числе *Baeomyces rufus, Leptogium saturninum, Peltigera didactyla, P. leucophlebia, Phaeorrhiza nimbosa.* Выявлены новые места обитания для ранее приведенного нами впервые для архипелага вида *Diploschistes muscorum* [13].

Виды, включенные в Красную книгу Шпицбергена [15]: *Cladonia mitis* (NT), *Flavocetraria nivalis* (NT), *Nephroma arcticum* (VU), *Pilophorus cereolus* (NT).

Учитывая значительное своеобразие лихенофлоры изучаемого района, а также и других ботанических объектов, наличие редких и охраняемых видов, можно рекомендовать к охране эту уникальную территорию. В настоящее время долина Колсдален расположена к северу от Национального парка Земля Норденшёльда, но из-за интересов горнодобывающей промышленности в сам парк не входит.

## Благодарности

Л. А. Конорева выражает признательность сотрудникам лаборатории флоры и растительных ресурсов, совместно с которыми осуществлялись полевые исследования на архипелаге.

## ЛИТЕРАТУРА

1. The lichen flora of Svalbard / Øvstedal D. [et al.] // Sommerfeltia. 2009. Vol. 33. P. 1–393. 2. Elvebakk A. A vegetation map of Svalbard on the scale 1: 3.5 mill. // Phytocoenologia. 2005. Vol. 35. P. 951–967. 3. Floraen i Colesdalen, Svalbard / I. G. Alsos [et al.] // Blyttia. 2004. Vol. 62. P. 142–150. 4. The Lichen Flora of Great Britain and Ireland / Smith C. W. [et al.] // British Lichen Society, London, 2009. 1046 p. 5. Lynge B. Lichens from Bear Island (Bjornoya) collected by Norwegian and Swedish expeditions, chiefly by Th. M. Fries during the Swedish polar expedition of 1868 // Result. Norske Statsunderst. Spitsbergenexped. 1926. Vol. 1. No. 9. P. 1–78. 6. Lynge B. Lichens from the west and north coasts of Spitsbergen and North-East Land collected by numerous expeditions. I. The macrolichens // Skr. Norske Vidensk. Acad Oslo. I. Mat.-Nat.

Vitensk. Kl. 1938. Vol. 6. P. 1–136. **7.** *Lynge B.* Et bidrag til Spitsbergens lavflora. Laver samlet av Emil Hadac, fortrinsvis I Sassenområdet, sommeren 1939 // Skr. Svalbard Ishavet. 1940. Vol. 79. P. 1–22. **8.** *Elvebakk A., Hertel H.* Lichens / *A. Elvebakk, P. Prestrud (eds)* // A catologue of Svalbard plants, fungi, algae and cyanobacteria. Part 6. Oslo, 1996. Norsk Polarinsitutt Skrifter. P. 271–359. **9.** *Elvebakk A., Tønsberg T.* Additions to the lichen flora of Svalbard // Graphis scripta. 1992. No. 3. P. 140–147. **10.** *Hertel H., Ullrich H.* Flechten von Amsterdamøya (Svalbard) // Mitt. Bot. Staatssamml. München. 1976. Vol. 12. P. 417–512. **11.** *Søchting U., Olech M.* The lichen genus Caloplaca in polar regions // Lichenologist. 1995. Vol. 27. P. 463–471. **12.** *Kohopesa Л. А.* Лишайники в локальных флорах архипелага Шпицберген // Материалы X Междунар. науч. конф. «Природа шельфа и архипелагов Европейской Арктики» (г. Мурманск, 27-30 октября 2010 г.). Мурманск, 2010. С. 402–407. **13.** *Konoreva L.* Five lichen species new to Svalbard // Graphis Scripta. 2011. Vol. 23. P. 24–26. **14.** Современный этап и задачи изучения разнообразия печеночников, мхов, лишайников и цианопрокариот архипелага Шпицберген / *H. A. Константинова [и др.]* // Теоретическая и прикладная экология. 2014. № 1. С. 26–31. **15.** Norsk rødliste for arter. Artsdatabanken, Norge. 2015.

## Сведения об авторах

*Конорева Людмила Александровна* — кандидат биологических наук, научный сотрудник Полярноальпийского ботанического сада-института им. Н. А. Аврорина КНЦ РАН; научный сотрудник Ботанического института им. В. Л. Комарова РАН

E-mail: ajdarzapov@yandex.ru

*Чесноков Сергей Владимирович* — кандидат биологических наук, младший научный сотрудник Ботанического института им. В. Л. Комарова РАН

E-mail: lukinbrat@mail.ru

## Author Affiliation

*Liudmila A. Konoreva* — PhD (Biology), Researcher of Avrorin Polar-Alpine Botanical Garden and Institute of KSC RAS; Researcher of the Komarov Botanical Institute of RAS E-mail: ajdarzapov@yandex.ru *Sergey V. Chesnokov* — PhD (Biology), Junior Researcher of the Komarov Botanical Institute of RAS

E-mail: lukinbrat@mail.ru

## Библиографическое описание статьи

*Конорева, Л. А.* Лишайники окрестностей бывшего пос. Колсбей (о. Западный Шпицберген) / *Л. А. Конорева, С. В. Чесноков* // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2018. — № 3 (10). — С. 31–42.

## Reference

Konoreva Liudmila A., Chesnokov Sergey V. Lichens of Vicinity of the Former Township Kolsbey (West Spitsbergen). Herald of the Kola Science Centre of the RAS, 2018, vol. 3 (10), pp. 31–42 (In Russ.).

## СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ И СОДЕРЖАНИЕ ПИГМЕНТОВ ПЛАСТИД У РАСТЕНИЙ ПОДУШКОВИДНЫХ ФОРМ В АРКТИЧЕСКИХ ТУНДРАХ ЗАПАДНОГО ШПИЦБЕРГЕНА

## Н. Ю. Шмакова<sup>1</sup>, Е. Ф. Марковская<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГБУН Полярно-альпийский ботанический сад-институт им. Н. А. Аврорина КНЦ РАН <sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет»

#### Аннотация

Исследованы эколого-биологические параметры, содержание фотосинтетических пигментов пластид, флавоноидов у видов растений подушковидной жизненной формы на восточном побережье залива Грён-фьорд острова Западный Шпицберген. Эти виды представлены в семействах Caryophyllaceae (Sagina nivalis, S. cespitosa, Minuartia rubella, M. biflora, Arenaria pseudofrigida, Silene acaulis) и Saxifragaceae (Saxifraga aizoides, S. oppositifolia, S. cespitosa), имеют низкие значения содержания пигментов и высокие — суммы флавоноидов. Исследовано разнообразие растений Silene acaulis на склоне горы Улаф, дана оценка возраста крупной подушки радиоактивным методом, рассмотрен эффект «няньки» подушковидных растений и их роль в поддержании локального биоразнообразия в растительных сообществах.

#### Ключевые слова:

подушковидная форма роста, фотосинтетические пигменты пластид, флавоноиды, Западный Шпицберген.

## STRUCTURAL AND FUNCTIONAL FEATURES AND THE CONTENT OF PLASTID PIGMENTS IN PLANTS OF CUSHION-LIKE FORMS IN THE ARCTIC TUNDRA OF WEST SPITSBERGEN

#### Natalia Y. Schmakova<sup>1</sup>, Evgenia F. Markovskaya<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Avronin Polar-Alpine Botanical Garden and Institute of KSC RAS <sup>2</sup>Petrozavodsk State University

#### Abstract

The ecological and biological parameters, the content of photosynthetic pigments of plastids, flavonoids in plant species of cushion-shaped life form on the east coast of the Gulf of Grøn-Fjord of West Spitsbergen were studied. These species are represented in the families of *Caryophyllaceae* (*Sagina nivalis, S. cespitosa, Minuartia rubella, M. biflora, Arenaria pseudofrigida, Silene acaulis*) and *Saxifragaceae* (*Saxifraga aizoides, S. oppositifolia, S. cespitosa*), have low values of pigments and high values of the content of the sum of flavonoids. We investigated the dimensional diversity of plants — *Silene acaulis* — on the slope of the mountain of Olav, estimated the age of large cushion plant by radioactive method and considered the role of cushion plants in the maintenance of local biodiversity in plant communities.

#### **Keywords:**

Cushion-shaped growth, photosynthetic pigments of plastid, flavonoids, West Spitsbergen.



#### Введение

Подушковидные растения — успешная форма роста растений высоких широт, длительно живущих на различных ландшафтах Арктики [1]. Эта форма роста обеспечивает условия для более активного поглощения световой энергии, улучшает физические условия (повышение произрастания растений температуры, изменение кислотности, структуры почвы). Отмерший органический материал накапливается внутри подушки

длительное время и заметно увеличивает запас азота в форме, способствующей его активному

использованию автотрофами. Это обеспечивает локальное увеличение плодородия почвы, активное разложение органического вещества [2, 3], увеличение биоразнообразия в бедных, низкопродуктивных экосистемах Арктики [1].

Цель работы — исследование эколого-физиологических особенностей и пигментного аппарата видов растений подушковидных жизненных форм, произрастающих на восточном побережье залива Грён-фьорд острова Западный Шпицберген.

## Материалы и методы исследований

Исследования были проведены на острове Зап. Шпицберген в окрестностях пос. Баренцбург (78°02′ с. ш., 14°12′ в. д.). Объекты исследования — растения с подушковидной жизненной формой (виды семейств Caryophylaceae и Saxifragaceae).

Содержание хлорофиллов (Х) и каротиноидов (К) определяли спектрофотометрическим методом (СФ-26, «ЛОМО», Россия; UV–1800, Shimadzu, Япония) в спиртовой вытяжке по оптической плотности в максимумах поглощения хлорофиллов *a* и *b* и каротиноидов [4]. Математическая обработка выполнена с использованием пакета программ Statistica OC Windows.

## Результаты и обсуждение

Анализ содержания фотосинтетических пигментов пластид изученных видов подушковидных растений показал, что для всех характерно низкое суммарное содержание хлорофиллов (табл. 1), в своих семействах они также входят в группу с содержанием хлорофилла ниже 1 мг/г сырой массы. Полученные данные согласуются с аналогичными сведениями для видов растений острова Врангеля [5].

Таблица 1

Table 1

Содержание пигментов пластид у подушковидных видов растений (Западный Шпицберген) The content of photosynthetic pigments in cushion-shaped plant species (West Spitsbergen)

Вид Species	Содержание сух. вещества, % Dry matter content, %	Хлорофиллы $(a+b), $ мг/г $^*$ Chlorophyll, mg/g	a/b	Каротиноиды, мг/г* Carotenoid, mg/g	X/K Ch/C	ССК <sup>**</sup> , % LHC, %
	1	Caryophyllaceae		1	I	1
Sagina nivalis (Lindb.) Fr.	. 27	0,89	4,0	0,28	3,2	44
S. cespitosa (J. Vahl.) Lange	24	0,81	3,4	0,22	3,6	49
<i>Minuartia rubella</i> (Wahlenb.) Hiern	32	0,83	3,5	0,23	3,6	49
<i>M. biflora</i> (L.) Schinz et Thell.	25	0,78	3,1	0,22	3,5	53
Arenaria pseudofrigida (Ostf. & Dahl) Juz.	22	0,74	3,6	0,21	3,5	47
Silene acaulis L.	17	0,44	3,5	0,11	4,0	50
		Saxifragaceae				
Saxifraga aizoides L.	21	0,65	2,6	0,18	3,6	61
S. oppositifolia L.	26	0,65	2,7	0,19	3,5	60
S. cespitosa L.	16	0,39	2,5	0,09	4,3	62

Примечание. Латинские названия видов даны по [6]. *Note*. Latin names of plants are given according to [6].

\* Сырой массы.

\*Wet weight.

\*\* LHC — light-harvesting complex.

<sup>\*\*</sup> ССК — содержание хлорофиллов в светособирающем комплексе.

В целом во флоре покрытосеменных растений Зап. Шпицбергена содержание хлорофилла варьирует в диапазоне от 0,39 до 2,57 мг/г сырой массы, то есть максимальные значения почти в 3 раза выше [7]. Наиболее низкие содержания хлорофиллов отмечены у *Silene acaulis* и *Saxifraga cespitosa* (это минимум в целом и для растений Арктики). Большая часть видов этой группы имеет высокое (выше 3) соотношение хлорофиллов (*a/b*), что свидетельствует о светолюбии и соответствует в целом растениям Арктики. Соотношения хлорофиллов к каротиноидам варьируют незначительно. Содержание каротиноидов у видов этой жизненной формы также низкое — 0,09–0,28 мг/г сырой массы — по сравнению с другими видами во флоре Западного Шпицбергена, у которых максимальные значения могут быть до 0,86 мг/г сырой массы. Низкое содержание пигментов в расчете на единицу веса компенсируется большой массой ассимилирующих органов у одного растения, что превращает его в «ловушку» солнечной энергии.

Определение содержания флавоноидов показало, что виды этой жизненной формы синтезируют высокие значения в диапазоне от 6 до 8 % абс. сух. массы, что занимает положение ближе к наиболее высоким значениям у растений Арктики — до 11 % абс. сух. массы [8]. Среди исследованных видов для Silene acaulis характерны высокие значения содержания флавоноидов (до 8 % абс. сух. массы). Флавоноиды, являющиеся вторичными метаболитами, включены в защитные реакции фотосинтетического аппарата и позволяют подушковидным растениям сохранять высокую функциональную активность. Низкое содержание пигментов пластид компенсируется у этой жизненной формы способностью к увеличению ассимиляционного аппарата за счет роста побеговой системы растения. При расчете на всю ассимилирующую поверхность фотосинтетическая продуктивность этой группы растений становится достаточно высокой. Подушковидные растения отличаются наиболее мелкими и толстыми листьями, крупными клетками и максимальным количеством хлоропластов в единице площади объема листа, имеют наиболее высокие индексы мембранных структур в клетке (мембран клеток и хлоропластов), что свидетельствует о высокой функциональной активности [9].

На юго-западном склоне г. Улаф проведено исследование размеров подушек *Silene acaulis* у 53 экземпляров, произрастающих на участке площадью 1000 м<sup>2</sup>, расположенном на пологовыпуклой террасе высотой около 100 м. Поверхность покрыта рыхлыми современными аллювиально-делювиальными отложениями (суглинки, супеси, щебень). На исследуемой территории произрастали группировки с несомкнутым растительным покровом, которые преобладают на обнаженном субстрате на горных склонах (камни, щебень, мелкозем).

Подушки Silene acaulis были разных размеров — от 0,27 до 110 дм<sup>3</sup>. Большая часть подушек (58 %) имеет поверхностный объем до 5 дм<sup>3</sup>, 17 % — до 10 дм<sup>3</sup>, 15 % — до 20 дм<sup>3</sup>, 6 % — до 30 дм<sup>3</sup>, 4 % — до 110 дм<sup>3</sup>. Крупные экземпляры произрастали у подножья склона, что обусловлено особенностями обитания этой жизненной формы. Склон как подвижная структура не обеспечивает условий для длительного произрастания подушковидных форм роста. На склонах пространственное распространение растений и продолжительность жизни определяются почвенной нестабильностью. По частоте колонизации подушки на относительно открытых пространствах можно оценивать активность процесса солюфикации этого склона.

Корреляционный анализ между поверхностным объемом подушки и их периметром показал высокий уровень связи (r = 0,8), что дает возможность проводить сравнение подушек на основании более простого показателя — периметра. Средний объем подушки *Silene acaulis* на исследуемом склоне оказался 9,8±2,5 дм<sup>3</sup>, средний периметр подушки *Silene acaulis* — 121,9±6,6 см.

Подушковидная жизненная форма широко представлена в разнообразном спектре экотопов на Зап. Шпицбергене, но визуальная оценка показала, что очень крупные подушки, которые описываются в высокогорьях более низких широт [9], в условиях Арктики единичны и составляют менее 4 %, что может быть связано с ограничением в большей степени особенностями субстрата, низкими температурами, суровыми условиями полярной ночи. Однако в условиях Арктики эта жизненная форма, аналогично более низким широтам, имеет различные функциональные преимущества, которые способствуют повышению эффективности фотосинтеза. Для подушковидной формы характерен специфический механизм терморегуляции, связанный с процессом поглощения световой энергии «подушкой» как «линзой» и с дыхательным газообменом как в системе надземных, так и подземных органов, вследствие локального разложения органического вещества. Условия Арктики характеризуются высоким уровнем нестабильности суточного температурного режима. Измерения температуры проводились нами непосредственно над поверхностью подушки, на поверхности и в толще подушки на разной глубине. Исследования выполнены на двух крупных экземплярах подушки *S. acaulis*.

Подушка Silene acaulis № 1 (78°01'41.0" с. ш., 14°20'07.7" в. д.): высота — 12 см, периметр — 210 см. Растение в фазе цветения, в сообществе подушки представлены следующие виды: Bistorta vivipara, Salix polaris, Equisetum arvense, Cerastium alpinum, Dryas octopetala, Trisetum spicatum. Температура воздуха на высоте 2 м от поверхности подушки составляет +6,5 °C, на поверхности подушки — +10,2 °C, на глубине подушки 5 см — +8,9 °C, 10 см — +8,4 °C, 15 см — +8,6 °C, 40 см (уровень почвы) — +7,7 °C.

Подушка Silene acaulis № 2 (координаты — 78°01'43.1" с. ш., 14°19'45.2" в. д.): высота — 25 см, периметр — 257 см. Растение в фазе цветения, в сообществе подушки представлены следующие виды: Oxyria digyna, Bistorta vivipara, Salix polaris, Trisetum spicatum, Poa alpigena. Температура воздуха на высоте 2 м от поверхности подушки составляет +6,9 °C, на поверхности подушки — +12,4 °C, на глубине подушки 5 см — +10,9 °C, 10 см — +9,8 °C, 15 см — + 9,9 °C, 20 см — +10,2 °C, 25 см (уровень почвы) — +10,6 °C.

Видно, что температура на поверхности обеих подушек была на 3-5 °C выше температуры окружающего воздуха. Внутри подушки на глубине температура варьировала в пределах 1,1-1,2 °С, но оставалась выше температуры окружающего воздуха. Эти результаты согласуются с данными других авторов по температурным показателям подушковидных растений в горах Юго-Восточного Алтая [9]. Внутри подушковидных растений создается довольно стабильный температурный режим, способствующий нивелированию резких кратковременных колебаний температуры и играющий роль в быстром восстановлении физиологической активности генеративных и вегетативных органов после заморозков и холодных ночей. Это может иметь решающее значение в активности растений в условиях перепада суточных температур. Одним из источников теплоемкости является процесс разложения органики внутри крупных плотных подушковидных форм, что и приводит к повышению средней температуры внутри этих растений. Разложение можно рассматривать как процесс локального почвообразования, когда отмершие части перегнивают, опадают и содержание гумуса увеличивается от верхних слоев подушки к ее основанию, где находится наиболее старый, в большей степени перегнивший опад. Для подушек наиболее активно процесс разложения происходит на глубине 20–25 см, где отмечается некоторое повышение температуры. Организация ассимиляционного аппарата в подушке позволяет, как в «линзе», рассматривать подушковидные растения как эффективные тепловые ловушки. Стабильный температурный режим — результат высокой теплоемкости растений во время процесса гниения, внутреннее тепло сглаживает перепады температур на поверхности подушки и позволяет восстанавливать после заморозков функционирование поверхностного коркового слоя подушки. Особенности терморегуляции на уровне корневой системы и накопление питательных веществ в сфере жизнедеятельности позволяют говорить о высокой степени автономности подушковидных растений от экстремальных условий среды [9].

Подушки относятся к долгоживущим растениям. Экземпляры *S. acaulis* могут жить до 350 лет и достигать в диаметре до 180 см [9]. Долголетие связано с особенностями произрастания этих растений. Подушковидная форма — локальная экосистема, где тесно связаны процессы синтеза и редукции органического вещества, в которых участвуют множественные компоненты. Так, наблюдается своеобразное почвообразование, опадающая органика является запасом органического вещества, которое участвует в формировании более богатого субстрата по сравнению с незаселенными территориями. На их месте формируются почвы, обогащенные органическим веществом, где продолжают расти *S. acaulis* и другие виды растений.

Такие растительные комплексы оказываются более устойчивыми и могут функционировать более длительное время. Работы по определению возраста подушек в условиях Шпицбергена нам не известны.

С использованием радиоактивного метода был проанализирован возраст исследованной крупной подушки № 1 (табл. 2). Возраст растения в его самой нижней части оказался около 200 лет. Полученные нами результаты согласуются с данными других исследователей, полученных на подушковидной форме *S. acaulis* в более южных широтах, возраст которой также оказался около 200 лет [9]. С возрастом связан и процесс запасания углерода в почве: его содержание выше в верхних слоях почвы, где располагается активно дышащая корневая система и находится еще не разложившаяся органика. Высокие значения нижнего горизонта свидетельствуют о запасании углерода на глубине под растением в условиях локального почвообразования.

Таблица 2 Table 2

## Возраст подушки *Silene acaulis* (радиоуглеродный метод) Age of cushion plants *Silene acaulis* (radiocarbon methods)

Глубина отбора образцов, см Sampling depth, cm	Радиоуглеродный возраст, лет назад (ВР) Radiocarbon age, years ago	Kr, г/кг C в год g/kg C per year	С <sub>орг</sub> , % С <sub>огд</sub> , %
40–35	200±30	1,66	3,35
12–7	130±60	2,01	4,27

*Примечание.* Радиоуглеродное датирование проведено в лаборатории радиоуглеродного датирования и электронной микроскопии Института географии РАН (Э. П. Зазовская).

*Note*. Radiocarbon dating was carried out in the Laboratory of Radiocarbon Dating and Electron Microscopy of the Institute of Geography of RAS (E. P. Zazovskaya).

В экстремальных условиях среды межвидовая конкуренция снижается, что хорошо демонстрирует факт совместного произрастания разных видов внутри растения-подушки. Это может свидетельствовать о том, что и растение-«хозяин», и «поселенцы» заинтересованы в таком взаимодействии, а растения внутри подушки находят более благоприятные условия, чем на открытом пространстве. Нами проведено исследование подобного явления на той же модельной площади в нижней части юго-западного склона г. Улаф. Делали замеры подушек, описывали виды их сообщества. Рядом закладывали экспериментальные площадки без растения-подушки, расстояние между ними не превышало 50 см.

Проведенное исследование показало, что в разных подушках *S. acaulis* (45 подушек) встречается до 16 сопутствующих видов: *Oxyria digyna, Salix polaris, Poa alpigena, Poa arctica, Poa pratensis, Bistorta vivipara, Equisetum arvense, Draba alpina, Cerastium alpinum, Luzula confusa, Minuartia biflora, Ranunculus pygmaeus, Dryas octopetala, Carex bigelowii, Saxifraga cespitosa, <i>Trisetum spicatum*. Из них наиболее часто встречалась *Bistorta vivipara, Salix polaris, Oxyria digyna, Dryas octopetala, Trisetum spicatum, Carex bigelowii, Poa pratensis, octaльные виды — единично.* Виды растений, колонизирующих подушки, всегда встречаются и на открытом пространстве, то есть подушки не влияют на видовое богатство крупных территорий, но могут увеличивать локальное биоразнообразие сообщества. В условиях Шпицбергена нами обнаружено, что в одной подушке *S. acaulis* может произрастать до 5 видов растений. Крупные подушки могут быть «фитоценозами», состоящими из 12 видов.

Исследование содержания пигментов пластид у часто встречающихся видов подушки — *Bistorta vivipara*, *Salix polaris* — показало некоторое увеличение содержания хлорофиллов (на 5–6 %) у экземпляров растений в подушках. Рост растений внутри подушки связан с более высокими и стабильными температурами и меньшей вариабельностью влажности [10]. Внутри

подушек возможно возобновление и произрастание не только других растений, но и функционирование жизнедеятельности грибов и животных. Подушковидные жизненные формы — это медленно и долго растущие растения, поэтому одна подушка может служить субстратом нескольким генерациям колонизирующих растений. В экстремальных условиях высокогорий конкуренция минимальна. Конкурентные взаимоотношения между популяциями разных видов снимаются положительным эффектом совместного произрастания растений разных видов. Защищенные подушками растения могут не только иметь более высокую температуру для роста (на 1–2 °C), что важно для растений, существующих на нижней границе температурного оптимума, но и избегать стрессов, связанных с резким изменением температуры.

Проведенные исследования показали, что низкое содержание пигментов в единице массы подушковидных растений компенсируется большим объемом надземной фотосинтезирующей биомассы, что обеспечивает этой форме роста успешное произрастание в экстремальных условиях и создание оптимально локальных климатических условий для произрастания Арктике.

## Заключение

На Шпицбергене возможны две классические стратегии адаптации: одна связана с «поиском» («избеганием») в новых климатических условиях тех локальных местообитаний, которые могут соответствовать (не соответствовать) потребностям вида, другая включает активный процесс, который содержит спектр разнообразных приспособлений как на уровне структуры, так и функции. Примером второго пути адаптации является образование плотных подушек, что характерно для таких видов, как Saxifraga aizoides, S. cespitosa, S. oppositifolia, Cerastium regelii, Minuartia rubella, Arenaria pseudofrigida, Silene acaulis, Draba alpina. Для этих видов характерны низкие содержания хлорофиллов (менее 1 мг/г сырой массы) и, чаще всего, флавоноидов. Подушковидная увеличивает высокое содержание форма размеры ассимиляционного аппарата, который выполняет не только роль линзы, обеспечивающей концентрацию световой энергии, но и системы, осуществляющей поддержание температурного режима и обеспечивающей процесс локального почвообразования, что способствует улучшению минерального питания и концентрации в области корневой системы микробиоты. Эта форма обеспечивает увеличение биомассы и повышает репродуктивную способность.

#### ЛИТЕРАТУРА

**1.** *Körner Ch.* Alpine Plant Life // Functional Plant Ecology of High Mountain Ecosystems. 2003. Vol. XI. P. 218–244. **2.** *Halloy S.* The use of convergence and divergence in the interpretation of adaptation in high mountain biota. Evolutionary Theory. 1983. P. 232–255. **3.** *Svoboda J.* Ecology and primary production of raised beach communities, Truelove, Lowland // Truelove Lowland, Devon Island, Canada: A High Arctic Ecosystem / ed. L. C. Bliss. Edmonton: Univ. of Alberta Press, 1977. P. 185–216. **4.** *Lichtenthaler H. K., Wellburn A. R.* Determination of total carotenoids and chlorophylls *a* and *b* of leaf extracts in different solvents // Biochem. Soc. Trans. 1983. Vol. 11, No. 5. P. 591–592. **5.** *Герасименко T. B., Попова И. А., Александрова Н. М.* К характеристике фотосинтетического аппарата и фотосинтеза растений арктической тундры (o. Врангеля) // Бот. журн. 1989. Т. 74, № 5. С. 669–679. **6.** *Rénning O. I.* The Flora of Svalbard. Oslo: Norsk Polarinstitutt, 1996. 184 р. **7.** *Марковская Е. Ф., Шмакова Н. Ю.* Растительные ресурсы. 2012. Вып. 4. С. 547–554. **9.** *Волков И. В.* Введение в экологию высокогорных растений. Томск, 2006. 417 с. **10.** Nurse effect of *Bolax gummifera* cushion plants in the alpine vegetation of the Chilean Potagonian Andes / *L. A. Cavieres [et al.]* // Vegetation science. 2002. Vol. 13 (4). P. 547–554.

## Сведения об авторах

Шмакова Наталья Юрьевна — доктор биологических наук, главный научный сотрудник сектора физиологии растений ПАБСИ КНЦ РАН

E-mail: shmanatalya@yandex.ru

*Марковская Евгения Федоровна* — доктор биологических наук, профессор кафедры ботаники и физиологии растений Петрозаводского госуниверситета

E-mail: volev10@mail.ru

## **Author Affiliation**

Natalia Y. Shmakova — Dr. Sci. (Biology), Principal Researcher of the Department of Plant Physiology, Avrorin Polar-Alpine Botanical Garden and Institute of KSC RAS E-mail: shmanatalya@yandex.ru *Evgenia F. Markovskaya* — Dr. Sci. (Biology), Professor of the Department of Botany and Plant Physiology, Petrozavodsk State University E-mail: volev10@mail.ru

## Библиографическое описание статьи

Шмакова, Н. Ю. Структурно-функциональные особенности и содержание пигментов пластид у растений подушковидных форм в арктических тундрах Западного Шпицбергена / Н. Ю. Шмакова, Е. Ф. Марковская // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2018. — № 3 (10). С. 43–49.

#### Reference

Schmakova Natalia Y., Markovskaya Evgenia F. Structural and Functional Features and the Content of Plastid Pigments in Plants of Cushion-Like Forms in the Arctic Tundra of West Spitsbergen. Herald of the Kola Science Centre of the RAS, 2018, vol. 4 (10), pp. 43–49 (In Russ.).

## DOI: 10.25702/KSC.2307-5228. 2018.10.3.50-60 УДК (574.583+591.524.12) (268.45+268.42)

## ЗИМНИЙ ЗООПЛАНКТОН ПРИБРЕЖНЫХ ВОД ШПИЦБЕРГЕНА\*

## В. Г. Дворецкий, А. Г. Дворецкий

ФГБУН Мурманский морской биологический институт КНЦ РАН

#### Аннотация

Исследовано зимнее состояние зоопланктона у берегов арх. Шпицберген во время полярной ночи. Пробы зоопланктона отобраны на 15 станциях при помощи сети Джеди. Средняя температура воды в слое облова варьировала между станциями от -0,8 до 4,9 °С, в среднем составляя 2,5±0,5 °C, соленость изменялась в диапазоне 33,71-34,99 ‰ при средней величине 34,51±0,11 ‰. В пробах было выявлено 39 таксономических единиц мезозоопланктона. Наибольшим разнообразием характеризовались копеподы, на долю которых приходилось более 50 % видового богатства. Наибольшую частоту встречаемости (>87 %) имели: веслоногие ракообразные Calanus finmarchicus, Calanus glacialis, Metridia longa, Microcalanus spp., Oithona atlantica, Oithona similis, Pseudocalanus spp.; птероподы Limacina helicina; щетинкочелюстные Parasagitta elegans и эвфаузииды Thysanoessa inermis. Количество таксонов в пробах варьировало от 11 до 25, при этом наиболее богатый планктон встречен в Ис-фьорде, а наиболее бедный — в Билле-фьорде. Численность мезозоопланктона изменялась от 135 до 988 экз/м<sup>3</sup>, в среднем составляя 553±68 экз/м<sup>3</sup>. Биомасса мезозоопланктона варьировала от 10 до 273 мг сух. массы на 1 м<sup>3</sup> при средней величине 79±20 мг сух. массы на 1 м<sup>3</sup>. Кластерным анализом выделено три группы станций, которые отличались по соотношению обилия массовых таксонов зоопланктона.

#### Ключевые слова:

копеподы, структура сообщества, полярная ночь, фронтальные зоны, арктический шельф.

#### WINTER ZOOPLANKTON OF SPITSBERGEN COASTAL WATERS

#### Vladimir G. Dvoretsky, Alexander G. Dvoretsky Murmansk Marine Biological Institute of KSC RAS

#### Abstract

Winter state of zooplankton was studies near Spitsbergen during the polar night. Zooplankton samples were collected at 15 stations using a Juday net. Mean water temperature in sampling layer varied among the stations from -0,8 to 4,9 °C averaging 2,5±0,5 °C. Salinity varied in a range of 33,71–34,99 ‰ with a mean value of 34,51±0,11 ‰. Overall 39 mesozooplankton taxa were found in the samples. Maximum diversity was revealed for copepods that accounted for more than 50 % of the species richness. Most frequent taxa (> 87 %) were the copepods *Calanus finmarchicus, Calanus glacialis, Metridia longa, Microcalanus* spp., *Oithona atlantica, Oithona similis, Pseudocalanus* spp., the pteropods *Limacina helicina*, the chaetognaths *Parasagitta elegans* and the euphauisiids *Thysanoessa inermis*. Number of taxa per sample varied from 11 to 25. Most rich plankton fauna occurred in Isfjorden while the most poor fauna was in Billefjorden. Mesozooplankton abundance ranged from 135 to 988 individuals/m<sup>3</sup> averaging 553±68 individuals/m<sup>3</sup>. Mesozooplankton biomass varied from 10 to 273 mg dry mass/m<sup>3</sup> with a mean value of 79±20 mg dry mass/m<sup>3</sup>. Cluster analysis revealed three groups of stations differed by the relative abundance of common zooplankton taxa.

#### Keywords:

copepods, community structure, Arctic night, Polar Front, Arctic shelf.

<sup>\*</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 17-14-01268 «Биология арктического планктона в зоне полярного фронта»).



#### Введение

Район арх. Шпицберген и сопредельных вод включает акваторию, расположенную в 200-мильной зоне от архипелага, включая остров Медвежий между 74–81° с. ш. и 10–35° в. д., в том числе лежащие в так называемом договорном районе острова и территориальные воды шириной 12 миль [1]. Крупнейшим островом архипелага является Западный Шпицберген. Особенностью указанной акватории является

взаимодействие теплых и соленых атлантических вод с холодными и распресненными арктическими водами. Как и в Баренцевом море, температурные условия в районе Шпицбергена определяются интенсивностью притока атлантических вод [1]. Теплые воды распространены вдоль западного края шельфа архипелага (Западно-Шпицбергенское течение), в юго-восточном участке района архипелага (Северная ветвь Нордкапского течения), а также западнее Шпицбергенской банки (Южно-Шпицбергенское течение). Арктические воды переносятся течением Баренца и Медвежинским течением в юго-западном направлении навстречу атлантическим водам [2]. Зюйдкапское течение по направлению его движения совпадает с Западно-Шпицбергенским, вследствие чего вдоль всей западной части шельфа архипелага воды различного происхождения разделены фронтальной зоной [3].

Природная уникальность вод архипелага заключается в их значительной биопродуктивности, которая сопоставима с показателями, характерными для более южных районов Баренцева моря [2, 4]. В районе формируется богатая ихтиофауна, значительного обилия достигают птицы и морские млекопитающие. Акватория играет важную роль в экономике России и Норвегии, поскольку в водах Шпицбергена ведется активный рыбный промысел. Основными объектами отечественного промысла в районе арх. Шпицберген являются треска, морские окуни, черный палтус, северная креветка. В отдельные годы здесь также в значительных количествах вылавливались сельдь, мойва и путассу [1].

Планктон представляет собой один из ключевых компонентов морских экосистем. В трофических сетях пелагиали фитопланктон (продуценты) выполняет функцию синтеза органических соединений, зоопланктон утилизирует первичную продукцию и передает энергию на последующие трофические уровни [5, 6]. Именно от степени развития зоопланктона во многом зависят условия питания рыб и в конечном итоге суммарная величина их промыслового запаса.

Наиболее высокая биомасса зоопланктона обычно формируется в западных и северных водах Западного Шпицбергена, где наиболее сильно проявляется воздействие теплых атлантических вод [7–15]. В этих районах создаются благоприятные кормовые условия для мойвы и сайки. Последний вид особенно важен в экосистеме вод Западного Шпицбергена, поскольку служит основным источником пищи для тюленей и морских птиц [16].

Исследования зоопланктона вод архипелага Шпицберген имеют длительную историю. К настоящему времени накоплен обширный объем информации о составе, особенностях распределения, сезонной динамике, а также биологии массовых видов [10–15]. Вместе с тем следует отметить, что подавляющая часть материалов получена для летнего периода, тогда как для зимнего сезона данных немного [17–19]. Лишь в последние годы проведены работы по изучению специфики распределения зоопланктона в условиях полярной ночи [20–22].

Цель работы — исследование состава, распределения и структуры сообществ зоопланктона у берегов арх. Шпицберген во время зимних условий.

## Материал и методы

Пробы мезозоопланктона были отобраны в ходе рейса НИС «Дальние Зеленцы» в ноябредекабре 2015 г. на 15 станциях (табл. 1, рис. 1).

## Таблица 1

## Table 1

Список станций отбора проб зоопланктона в районе apx. Шпицберген в ноябре-декабре 2015 г. List of zooplankton sampling stations in Spitsbergen coastal waters in November-December 2015

Станция	нция Дата Время Глубина, м Слой		Слой отбора, м	Координаты Coordinates		
Station	Date	Time	Depth, m	Sample layer, m	с. ш.	в. д.
					N. L.	E. L.
26	17.11.15	9:10	179	170–0	77°30′	26°59′
27	17.11.15	18:50	76	70–0	77°00′	23°50′
28	18.11.15	0:20	143	130–0	76°37′	22°50′
29	18.11.15	8:10	223	210-0	76°22′	21°31′
30	18.11.15	13:20	192	180–0	76°10′	19°59′
31	25.11.15	1:30	197	190–0	76°05′	18°40′
32	25.11.15	8:20	275	270–0	76°11′	16°54′
38	25.11.15	21:30	147	140–0	77°39′	11°44′
41	27.11.15	1:30	287	280-0	78°09′	13°11′
42	01.12.15	14:20	274	260-0	78°19′	15°09′
39	26.12.15	1:00	80	60–0	77°55′	17°21′
43	03.12.15	18:10	72	70–0	78°15′	15°32′
36	07.12.15	10:10	65	60–0	76°39′	15°29′
37	07.12.15	4:50	47	40–0	77°03′	14°26′
40	08.12.15	0:20	45	40–0	77°20′	13°38′



Рис. 1. Расположение станций отбора проб зоопланктона в районе арх. Шпицберген в ноябре-декабре 2015 г. Синие линии показывают холодные течения, красные — теплые

Fig. 1. Location of zooplankton sampling stations in Spitsbergen coastal waters in November-December 2015. Blue lines indicate cold currents, red lines indicates warm currents

На каждой станции при помощи сети Джеди (диаметр входного отверстия — 37 см, размер ячеи фильтрующего полотна — 0,168 мм) облавливали слой 5–10 м от дна до поверхности. Пробы фиксировали 40 %-м раствором формалина, конечная концентрация в пробе составляла 4 %.

На берегу в лабораторных условиях осуществляли обработку проб. Камеральная обработка проб проводилась по стандартным методикам [23]. Особое внимание уделялось определению возрастных стадий массовых представителей копепод (Calanus glacialis, C. finmarchicus, C. hyperboreus, Pseudocalanus spp., Oithona similis), которых разделяли по морфологическим критериям и репродуктивным показателям [24–27]. Результаты количественного анализа 3 подпроб осредняли и пересчитывали численность (в экз/м<sup>3</sup> или экз/м<sup>2</sup>) с учетом объема профильтрованной воды. Остаток пробы просматривали целиком для определения редких видов. Биомассу организмов вычисляли с использованием таблиц стандартных весов зоопланктеров, номограмм и размерно-весовых зависимостей. Полученные величины были выражены в миллиграммах сухой массы, Подробное описание методики приведено в опубликованном источнике [28]. Математическая обработка данных была проведена методами описательной статистики. Для оценки сходства отдельных станций по численности массовых видов использовали кластерный анализ, мерой сходства служили индексы Брея — Куртиса, объединение станций в группы проведено по методу групповых средних. Различия между кластерами проверяли при помощи однофакторного дисперсионного анализа или по критерию Крускала — Уоллиса (когда распределение данных отличалось от нормального). Для выявления наличия связей между гидрологическими факторами (средняя температура и соленость воды в слое облова) и количественными показателями мезозоопланктона (численность и биомасса) использовали регрессионный анализ. Для оценки биоразнообразия рассчитывали индекс Шеннона, выравненность Пиелу, меру доминирования Симпсона и индекс Маргалефа. Все средние значения в работе представлены со стандартной ошибкой (±SE).

#### Результаты

Средняя температура воды в слое облова варьировала между станциями от -0.8 до +4.9 °C, в среднем по всем станциям составляя 2,5±0,5 °C, соленость изменялась в диапазоне 33,71–34,99 ‰ при средней величине 34,51±0,11 ‰. В поверхностном слое температура воды колебалась в диапазоне от -1,0 до +4.9 °C (2,5±0,5 °C), соленость составляла 33,65–34,90 ‰ (34,26±0,10 ‰). В придонном слое температура воды изменялась между -0,3 и +4.9 °C (2,8±0,4 °C). Соленость варьировала от 33,87 до 35,07 ‰ (34,69±0,11 ‰). В районе исследований гидрологические условия существенно варьировали, отражая влияние вод разного происхождения. Так на ст. 26, 36, 37 отчетливо прослеживалось влияние холодных арктических вод, здесь температура во всей водной толще была менее 0 °C, на ст. 27–32, 38, 42, напротив, температура и соленость были довольно высокими, отражая воздействие теплых атлантических вод. На оставшихся станциях верхний слой был занят преимущественно холодными водами, ниже которых располагались более прогретые слои.

Всего за период исследований в пробах была выявлено 39 таксономических единиц мезозоопланктона. Наибольшим разнообразием характеризовались копеподы, на долю которых приходилось более 50 % видового богатства. Максимальную частоту встречаемости (> 87 %) имели веслоногие ракообразные *Calanus finmarchicus*, *Calanus glacialis*, *Metridia longa*, *Microcalanus* spp., *Oithona atlantica*, *Oithona similis*, *Pseudocalanus minutus*, *Pseudocalanus acuspes*, птероподы *Limacina helicina*, щетинкочелюстные *Parasagitta elegans* и эвфаузииды *Thysanoessa inermis*. Количество таксонов в пробах варьировало от 11 до 25, при этом наиболее богатый планктон встречен в Ис-фьорде, а наиболее бедный — на шельфе. Численность мезозоопланктона изменялась от 135 до 988 экз/м<sup>3</sup>, в среднем составляя 553±68 экз/м<sup>3</sup> (рис. 2, *a*).

Максимальное обилие отмечено на самой юго-восточной станции, минимальное — на ст. 36, у южной оконечности архипелага. Доминирующей по численности группой были веслоногие ракообразные, среди которых преобладали *Calanus finmarchicus* ( $30\pm4$  %), *Oithona similis* ( $30\pm3$  %), представители рода *Pseudocalanus* ( $16\pm4$  %), *Microcalanus* spp. ( $11\pm2$  %) и *Calanus glacialis* ( $9\pm2$  %). Вклад остальных таксономических групп в общую численность был незначительным (в среднем менее 2 %). В составе популяций массовых копепод *Calanus* spp., *Pseudocalanus* spp. и



Metridia longa основную часть составляли копеподиты V стадии. Лишь в популяциях Oithona similis и Metridia longa в незначительном количестве была отмечена молодь — копеподиты II–III стадий.

Рис. 2. Распределение численности (*a*) и биомассы (*б*) зоопланктона в районе арх. Шпицберген в ноябре-декабре 2015 г.: численность (экз/м<sup>3</sup>): *1* — 100–200, *2* — 200–400, *3* — 400–600, *4* — 600–800, *5* — >800; биомасса (мг сух. мас/м<sup>3</sup>): *1* — 10–30, *2* — 30–60, *3* — 60–90, *4* — 90–120, *5* — >120

Fig. 2. Distribution of zooplankton abundance (*a*) and biomass (δ) in Spitsbergen coastal waters in November-December 2015: abundance (ind/m<sup>3</sup>): *1* — 100–200, *2* — 200–400, *3* — 400–600, *4* — 600–800, *5* —> 800; biomass (mg dry mass/m<sup>3</sup>): *1* — 10–30, *2* — 30–60, *3* — 60–90, *4* — 90–120, *5* — > 120

Биомасса мезозоопланктона варьировала от 10 до 273 мг сух. мас/м<sup>3</sup> (рис. 2,  $\delta$ ) при средней величине 79±20 мг сух. мас/м<sup>3</sup>. Наибольших значений биомасса достигала на ст. 26, наименьшие показатели были зарегистрированы на ст. 37. Лидирующее положение по биомассе занимали копеподы (86–97 %), при этом представители рода *Calanus* обеспечивали 90±10 % от общих показателей, эвфаузииды *Thysanoessa* spp. составляли 3±1 %, а на долю щетинкочелюстных *Parasagitta elegans* приходилось 2±1 %.

Показатели биоразнообразия сообщества мезозоопланктона суммированы в табл. 2. Наиболее адекватно разнообразие отражают индексы Шеннона и мера доминирования Симпсона. Наименьшее разнообразие, исходя из численности отдельных видов, было отмечено на ст. 28 в южной части района исследований, максимальное — у юго-западной оконечности архипелага и Адвент-фьорде (ст. 43). Выравненность фауны мезозоопланктона по численности для всего района была невысокой (в среднем 0,57), максимум отмечен на ст. 36, минимум — на ст. 28 и 30 (табл. 2).

В ходе кластерного анализа было выделено три группы станций (рис. 3). Первая группа включала в себя 10 станций, которые были расположены по всей исследуемой акватории. Они характеризовались высокой средней температурой воды в слое облова  $(3,5\pm0,4$  °C) и повышенной соленостью  $(34,73\pm0,34 \%)$ . Отличительной особенностью данной группы станций была высокая доля *Calanus finmarchicus* (38 %) в общей численности мезозоопланктона. По численности в пределах данного кластера преобладали веслоногие ракообразные (99±1 %). По биомассе также доминировали копеподы (94±2 %), вклад эвфаузиид достигал 3 %, а щетинкочелюстных — 2 % (табл. 3). Здесь была зарегистрирована довольно высокая средняя численность и максимальная биомасса мезозоопланктона среди всех трех кластеров.

## Таблица 2

## Table 2

## Показатели биологического разнообразия зоопланктона в районе арх. Шпицберген в ноябре-декабре 2015 г.

Distribution of zooplankton abundance and biomass in Spitsbergen coastal waters in November-December 2015

Crowner	Uurana Manzaraha		Индекс Ш	Іеннона	Мера доминирования
Станция	Margalafinday d	Dislow eveness I	Shanno	on index	Симпсона
Station	Margaler mdex, a	Pielou eveness, J	$H'(\ln)$	$H'(\log 2)$	Simpson dominance index
36	3,26	0,69	1,96	2,83	0,16
26	2,90	0,60	1,81	2,62	0,20
27	1,93	0,53	1,39	2,01	0,32
28	1,97	0,44	1,15	1,66	0,50
29	3,23	0,50	1,51	2,18	0,29
30	3,01	0,43	1,31	1,88	0,36
31	2,95	0,59	1,74	2,51	0,22
32	3,21	0,51	1,51	2,18	0,30
37	2,39	0,68	1,75	2,52	0,21
38	2,32	0,54	1,47	2,12	0,32
39	1,64	0,58	1,40	2,02	0,32
40	2,03	0,62	1,65	2,37	0,25
41	2,28	0,60	1,63	2,35	0,27
42	3,51	0,51	1,64	2,36	0,29
43	2,50	0,66	1,88	2,71	0,19



Рис. 3. Дендрограмма сходства станций по численности зоопланктона в районе арх. Шпицберген в ноябре-декабре 2015 г.

Fig. 3. Dendrogram of station similarity based on zooplankton abundance in Spitsbergen coastal waters in November-December 2015

Вторая группа объединяла три станции, которые располагались в Адвент-фьорде, в юговосточной и западной частях акватории. Средняя температура воды в слое облова характеризовалась более низким значением по сравнению со станциями кластера 1 (1,6±0,3 °C), соленость также была ниже, чем на станциях второй группы (34,24±0,04 ‰). Общая численность мезозоопланктона была самой высокой среди выделенных кластеров. Среди остальных групп кластер 2 также отличался значительной долей *Oithona similis*, составлявшей 36 % суммарной численности мезозоопланктона. По биомассе в пределах данного кластера преобладал *Calanus finmarchicus* (49±2 %), на долю *Calanus glacialis* приходился 31 % суммарной биомассы (табл. 3).

Таблица 3 Table 3

Состав, численность и биомасса зоопланктона в районе арх. Шпицберген в ноябре-декабре 2015 г. в пределах групп, выделенных кластерным анализом Zooplankton composition, abundance and biomass in Spitsbergen coastal waters in November-December 2015 within the groups delineated with cluster analysis

	Чи	сленность. эк	$3/M^3$	Биомасса, мг сух. мас/м <sup>3</sup>			
Таксон	Al	oundance, ind/	m <sup>3</sup>	Biomass, mg dry mass/m <sup>3</sup>			
Taxon	Кластер 1	Кластер 2	Кластер 3	Кластер 1	Кластер 2	Кластер 3	
	Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3	Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3	
1	2	3	4	5	6	7	
Acartialongiremis	-	0,1	0,2	_	<0,01	<0,01	
Calanusfinmarchicus	232,6	86,4	24,1	49,16	10,25	5,92	
Calanusglacialis	73,0	12,3	12,1	50,70	7,27	7,63	
Calanushyperboreus	3,4	—	0,2	1,40	-	0,12	
Copepodanauplii	<0,1	—	_	<0,01		_	
Gaetanustenuispinus	<0,1	0,2	_	<0,01	0,01	_	
Ectinosomaspp.	-	_	0,1	—	—	<0,01	
Harpacticusuniremis	<0,1	—	-	0,00	-	—	
Metridialonga	10,0	3,8	0,7	1,06	0,38	0,02	
Metridialucens	0,1	0,1	_	<0,01	<0,01	_	
Microcalanusspp.	32,1	142,3	30,2	0,03	0,11	0,02	
Oithonaatlantica	7,7	21,3	_	0,02	0,05	_	
Oithonasimilis	167,4	260,7	22,1	0,17	0,26	0,02	
Triconiaborealis	0,5	1,3	0,6	<0,01	<0,01	<0,01	
Paraeuchaetaspp. I–IV	0,1	0,1	_	0,01	<0,01	_	
ParaeuhaetaglacialisV–VI	<0,1	_	_	0,07	_	_	
ParaeuhaetanorvegicaV-VI	<0,1	_	_	0,03	_	_	
Pseudocalanusspp. I–IV	46,7	100,3	38,0	0,19	0,33	0,09	
PseudocalanusminutusV-VI	15,2	47,1	9,8	0,12	0,36	0,08	
PseudocalanusacuspesV–VI	2,2	3,4	2,4	0,01	0,02	0,02	
Tisbefurcata	-	_	0,1	—	—	<0,01	
Aglanthadigitale	<0,1	—	_	0,06		—	
Gastropodalarvae	0,1	0,9	_	<0,01	<0,01	—	
Boroeciaborealis	-	—	0,2	—		<0,01	
<i>Clionelimacina</i> larvae	0,3	—	_	0,02		—	
Limacinahelicinalarvae	1,4	3,4	0,3	0,08	0,18	0,02	
Parasagittaelegans	2,0	0,8	0,7	1,63	0,22	0,21	
Meganychtiphanesnorvegica	<0,1	_	_	0,36	_	_	
Thysanoessainermis	0,6	0,9	0,1	2,55	1,17	0,03	
Thyssanoessaraschii	0,1	—	_	0,13		—	
Thysanoessalongicaudata	<0,1	—	_	0,01		—	
Thyssanoessaspp. furcilii	0,1	<0,1	-	0,03	0,02	-	
Themistoabyssorum	<0,1	—	-	0,06	-	_	
Themistolibellula	<0,1	0,1	-	0,17	1,16	_	
Onisimus spp.	<0,1	—	-	<0,01	-	_	
Oikopleura juv.	0,1	0,8	0,8	<0,01	<0,01	<0,01	

1	2	3	4	5	6	7
Oikopleuravanhoeffeni	—	—	0,2	—	—	0,01
Beroecucumis	<0,1	0,1	0,1	0,63	<0,01	0,33
Mertensiaovum	<0,1	—	—	0,02	—	—
Общая	595.6	686 /	142.8	108 73	21.80	14.52
Total	595,0	000,4	142,0	100,75	21,00	14,52

## Окончание таблицы 3 Table 3 (Continued)

Третий кластер объединял две мелководные станции, расположенные у западного побережья архипелага. Здесь была зарегистрирована самая низкая средняя температура и соленость в слое облова ( $-0,6\pm0,1$  °C и 33,79±0,05 ‰). По количественным показателям здесь доминировали копеподы, которые составляли 98±1 % и 96±1 % общей численности и биомассы мезозоопланктона соответственно. Наибольший вклад в общее обилие зоопланктона имели представители рода *Pseudocalanus* (35±3 %). Суммарная численность здесь была в 4,2–4,8 раза ниже по сравнению с группами 1 и 2, а общая биомасса была меньше в 1,5–7,5 раза (табл. 3).

Однофакторный дисперсионный анализ показал, что средняя температура воды в придонном слое статистически достоверно различалась между кластерами (p < 0,001), значимые отличия по температуре в слое облова выявлены для кластера 1 и 2 (тест множественных сравнений Данна, p < 0,05). Для температуры в поверхностном слое отличия были статистически недостоверными (p > 0,05). Значимые отличия по солености обнаружены для средних показателей слоя облова и придонного горизонта (p < 0,05). Выделенные кластеры отличались по количественным показателям массовых веслоногих ракообразных *Calanus glacialis*, *Microcalanus* spp., *Pseudocalanus minutus* V–VI, а также щетинкочелюстных *Parasagitta elegans*.

Регрессионный анализ показал, что суммарная биомасса зоопланктона (B, мг сух. мас/м<sup>3</sup>) была прямо скоррелирована с протяженностью слоя облова (L, м): LgB = 0,03L + 1,24 (r = 0,665, F = 10,282, p = 0,007). Этот фактор объяснял более 44 % вариации биомассы. Температура воды и соленость в слое облова были слабо скоррелированы с общей численностью и биомассой мезозоопланктона (p > 0,05).

## Обсуждение

В представленной работе проведено исследование состояния мезозоопланктона в зимний период во время полярной ночи. В высокоширотных районах Мирового океана отмечается выраженная сезонность развития пелагических сообществ, которая во многом связана с временными колебаниями абиотических факторов, среди которых важную роль играют режим освещенности и температурный режим [2, 5, 7]. Мы выявили, что распределение температуры у берегов Шпицбергена было тесно связано с системой циркуляции водных масс: минимальные температуры отмечены на станциях, где были представлены арктические воды, максимальные — зарегистрированы в зоне влияния атлантических вод. Кроме того, в некоторых точках отмечена двухслойная структура вод с холодным поверхностным горизонтом и более теплым и соленым промежуточным горизонтом. Подобная картина типична для указанной акватории, она отмечалась ранее для фьордов Западного Шпицбергена и северных зон архипелага [8–12, 20–22].

Отличительной чертой зоопланктонных сообществ было высокое видовое разнообразие веслоногих ракообразных, которые лидировали как по численности, так и по биомассе. Фауна планктона имела смешанный характер, в сообществе присутствовали космополиты, бореальные и арктические виды, что типично для акваторий, подверженных влиянию вод разного происхождения. Примечательно, что в составе популяций массовых видов копепод преобладали старшие возрастные группы. Выявленные особенности отражают черты сезонной сукцессии планктона арктических морей [2, 5–7, 15, 28]. Наибольшее таксономическое разнообразие характерно для весеннего периода, когда появляются представители меропланктона [4, 5, 19]. По имеющимся данным, биологическое разнообразие зоопланктона в прибрежных водах арх. Шпицберген в летний период составляет 2,06 [28, 29], что выше, чем отмечено нами в зимний период. Выравненность зоопланктона в нашей работе также была существенно ниже, чем летом, т. е. структура сообщества во время полярной ночи была довольно простой — доминировали 2–3 вида копепод. Сходная картина отмечалась и ранее для прибрежных вод Шпицбергена: так, в зимний период в залив Хорнсунн преобладали *Pseudocalanus* spp., *Oithona similis, Metridia longa* и *Oithona atlantica* [17].

К концу осени разнообразие и обилие зоопланктона снижается, доминирующей группой становятся копеподы, многие представители которых переживают неблагоприятные условия в покоящемся состоянии [18, 25]. Для массовых растительноядных веслоногих рачков (*Calanus* и *Pseudocalanus*) основными зимующими стадиями являются копеподиты IV–V [5, 6, 24, 28]. Именно эти возрастные группы были наиболее широко представлены в нашем исследовании. Только в популяциях всеядных видов (*Metridia* и *Oithona*) были единично обнаружены младшие копеподиты, что свидетельствует о размножении этих копепод даже в экстремальных условиях полярной ночи. Для генеративной продукции в зимний период планктонные организмы могут использовать гетеротрофный микропланктон, взвешенное органическое вещество (особенно в прибрежных районах), накопленные запасы липидов и ледовые микроводоросли [4, 5, 7].

Распределение зоопланктона было неоднородным: в ходе кластерного анализа выделено три группы станций, причем зачастую в состав одного и того же кластера входили станции из разных участков исследованной акватории. Тем не менее отметим, что первую группу станций можно условно отнести к тепловодной, поскольку здесь была зарегистрирована наиболее высокая средняя температура воды и наибольшего относительного обилия достигал бореальный вид *Calanus finmarchicus*, который, как известно, тесно ассоциирован с водами атлантического происхождения [6, 24, 28]. Численность и биомасса зоопланктона существенно варьировали между станциями; выраженных трендов в распределении указанных показателей не прослеживалось, однако максимальные значения были выявлены во фронтальной зоне, разделяющей арктические и атлантические воды. Другой чертой было увеличение биомассы зоопланктона на более глубоководных станциях, подобная закономерность вполне объяснима, крупные растительноядные копеподы рода *Calanus* в зимний период мигрируют на глубину, в мелководной прибрежной зоне их численность, как правило, меньше [6, 21, 28].

Особенности количественного распределения биомассы зоопланктона у берегов арх. Шпицберген в зимний период суммированы в табл. 4.

Анализ имеющихся и наших данных позволяет заключить, что в зимний период численность зоопланктона существенно варьирует, при этом в среднем показатели ниже, чем летом [8–14, 19]. Что касается биомассы зоопланктона, то в нашем исследовании на некоторых станциях были выявлены высокие величины биомассы, которые не уступали летним значениям [9, 10, 13–15], хотя предыдущие исследования показали, что зимний период в Арктике отличается низкой продуктивностью планктона, в частности, зимняя биомасса в несколько раз ниже средних значений, характерных для весеннего и летнего сезонов [17]. В то же время стоит подчеркнуть, что с начала 2000-х гг. в арктических морях отмечаются процессы потепления, которые существенно влияют на распределение и величину биомассы планктона в летний сезон [20–22]. Для зимнего сезона также регистрируются положительные эффекты общего увеличения температуры воды в Арктике и снижения ледового покрова на планктонное сообщество.

## Таблица 4 Table 4

# Количественные показатели зоопланктона в районе арх. Шпицберген в течение зимнего периода Quantitative values of zooplankton in Spitsbergen waters during winter season

Район	Период	Орудие лова	Биомасса	Источник	
Area	Period	Sampling device	Biomass	Source	
	Ноябрь-декабрь November-December		10–273 (79)*		
Прибрежные воды Coastal waters	Ноябрь-декабрь November-December	Сеть Джеди, 168 мкм Juday net	0,4–60 (14,4)**	Haши данные Our data	
	Ноябрь-декабрь November-December		51–1472 (409)***		
	Ноябрь November		12-318***		
	Декабрь December		15-320***		
ЗаливХорсунн Hornsund fjord	Январь January	WP-2, 200 мкм	20-121***	[17]	
	Февраль February		12-40***		
	Март March		4-10***		
Рип-фьорд Rijpfjorden	Январь January	MPS, 200 мкм	(12)**		
Северные прибрежные воды Northern coastal waters	Январь January	MPS-2, 200 мкм	(16)**	[21]	
Стур-фьорд и прилегающие воды Stor-fjord	Март March	Multinet, 55 мкм	3,3–14,3**	[18]	

<sup>\*</sup>В миллиграммах сухой массы на 1 м<sup>3</sup> (в скобках приведено среднее значение).

<sup>\*\*</sup>В граммах сухой массы на 1 м<sup>2</sup> (в скобках приведено среднее значение).

\*\*\*\*В миллиграммах сырой массы на 1 м<sup>3</sup> (в скобках приведено среднее значение).

\*mg dry mass per 1 m<sup>3</sup> (average value in parentheses).

\*\*mg dry mass per 1 m<sup>2</sup> (average value in parentheses).

\*\*\*\*mg wet mass per 1 m<sup>3</sup> (average value in parentheses).

Таким образом, в ходе работы выявлено, что даже в период полярной ночи количественные показатели и разнообразие зоопланктона являются высокими, что можно связать с общим трендом потепления в Арктическом регионе.

## ЛИТЕРАТУРА

**1.** Шевелев М. С. Введение // Исследования ПИНРО в районе архипелага Шпицберген. Мурманск: Изд-во ПИНРО, 2004. С. 3–6. **2.** Physical and biological characteristics of the pelagic system across Fram Strait to Kongsfjorden / *H. Hop [et al.]*// Prog. Oceanogr. 2006. Vol. 71. P. 182–231. **3.** Океанографические условия / *B. Д. Бойцов [u др.]*// Исследования ПИНРО в районе архипелага Шпицберген. Мурманск: Изд-во ПИНРО, 2004. С. 42–67. **4.** Food webs and carbon flux in the Barents Sea / *P. Wassmann [et al.]*// Prog. Oceanogr. 2006. Vol. 71. P. 232–287. **5.** *Raymont J. E. G.* Plankton and productivity of the Oceans. Vol. 2. Zooplankton. Oxford: Pergamon Press, 1983. 824 p. **6.** *Тимофеев С. Ф.* Экология морского зоопланктона. Мурманск: Изд-во МГПИ, 2000. 216 с. **7.** Zooplankton / *E. L. Orlova [et al.]*// The Barents Sea ecosystem: Russian-Norwegian cooperation in science and management. Trondheim: Tapir Academic Press, 2011. P. 91–119. **8.** *Daase M., Eiane K.* Mesozooplankton distribution in northern Svalbard waters in relation to hydrography // Polar Biol. 2007. Vol. 30. P. 969–98. **9.** Hydrodynamic control of mesozooplankton abundance and biomass in northern Svalbard waters (79–81°N) / *K. Blachowiak-Samolyk [et al.]*// Deep-Sea Res. II. 2008. Vol. 55. P. 2210–2224. **10.** Zooplankton in Svalbard

fjords on the Atlantic — Arctic boundary / M. Gluchowska [et al.] // Polar Biol. 2016. Vol. 39. P. 1785-1802. 11. Seasonal and spatial changes in zooplankton composition in the glacially influenced Kongsfjorden, Svalbard / W. Walkusz [et al.] // Polar Res. 2009. Vol. 28. P. 254-281. 12. Interannual changes in zooplankton on the West Spitsbergen Shelf in relation to hydrography and their consequences for the diet of planktivorous seabirds / S. Kwasniewski [et al.] // ICES J. Mar. Sci. 2012. Vol. 69. Р. 890-901. 13. Летний бактерио- и зоопланктон прибрежных вод архипелага Шпицберген / В. Г. Дворецкий [*u др.*] // Биол. моря. 2012. Т. 38, № 1. С. 82–85. **14.** *Dvoretsky V. G., Dvoretsky A. G.* Structure of mesozooplankton community in the Barents Sea and adjacent waters in August 2009 // J. Natural History. 2013. Vol. 47:31-32. P. 2095-2114. 15. Орлова Э. Л., Бойцов В. Д., Нестерова В. Н. Мезозоопланктон // Исследования ПИНРО в районе архипелага Шпицберген. Мурманск: Изд-во ПИНРО, 2004. С. 76-82. 16. The importance of tidewater glaciers for marine mammals and seabirds in Svalbard, Norway / C. Lydersen [et al.] // J. Mar. Syst. 2014. Vol. 129. P. 452-471. 17. Weslawski J. M., Kwasniewski S., Wiktor J. Winter in a Svalbard Fiord Ecosystem // Arctic. 1991. Vol. 44. P. 115-123. 18. Hirche H. J., Kosobokova K. N. Winter studies on zooplankton in Arctic seas: the Storfjord (Svalbard) and adjacent ice-covered Barents Sea // Mar. Biol. 2011. Vol. 158. P. 2359–2376. 19. Ice-related seasonality in zooplankton community composition in a high Arctic fjord / A. Weydmann [et al.] // J. Plankton Res. 2013. Vol. 35. P. 831-842. 20. At the rainbow's end: high productivity fueled by winter upwelling along an Arctic shelf / S. Falk-Petersen [et al.] // Polar Biol. 2015. Vol. 38. P. 5–11. 21. Winter Tales: the dark side of planktonic life / K. Blachowiak-Samolyk [et al.] // Polar Biol. 2015. Vol. 38. P. 23-36. 22. Characterisation of large zooplankton sampled with two different gears during midwinter in Rijpfjorden, Svalbard / K. Blachowiak-Samolyk [et al.] // Polish Polar Res. 2017. Vol. 38. Р. 459–484. 23. Богоров В. Г. Инструкция для проведения гидробиологических работ в море (планктон и бентос). М.-Л.: Главсевморпуть, 1947. 127 с. 24. Distribution of Calanus species in Kongsfjorden, a glacial fjord in Svalbard / S. Kwasniewski [et al.] // J. Plankton Res. 2003. Vol. 25. P. 1-20. 25. Arnkvaern G., Daase M., Eiane K. Dynamics of coexisting Calanus finmarchicus, Calanus glacialis and Calanus hyperboreus populations in a high-Arctic fiord // Polar Biol. 2005. Vol. 28. P. 528-538. 26. Frost B. W. A taxonomy of the marine calanoid copepod genus Pseudocalanus // Can. J. Zool. 1989. Vol. 67. P. 525–551. 27. Деорецкий В. Г., Деорецкий А. Г. Биология и роль Oithona similis в зоопланктоне морей Арктики. Апатиты: КНЦ РАН, 2011. 349 с. 28. Дворецкий В. Г., Дворецкий А. Г. Экология зоопланктонных сообществ Баренцева моря и сопредельных вод. СПб.: Реноме, 2015. 736 с. 29. Дворецкий В. Г., Дворецкий А. Г. Видовое разнообразие зоопланктонных сообществ западноарктических морей // Биол. моря. 2014. T. 40, № 2. C. 108–112.

## Сведения об авторах

*Дворецкий Владимир Геннадьевич* — кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории планктона Мурманского морского биологического института КНЦ РАН Е mail: udvoratekiy@mmbi info

E-mail: vdvoretskiy@mmbi.info

*Дворецкий Александр Геннадьевич* — кандидат биологических наук, заведующий лабораторией зообентоса Мурманского морского биологического института КНЦ РАН E-mail: dvoretskiya@mmbi.info

## Author Affiliation

Vladimir G. Dvoretsky — PhD (Biology), Leading Researcher of Plankton Laboratory of MMBI KSC RAS E-mail: vdvoretskiy@mmbi.info Alexander G. Dvoretsky — PhD (Biology), Head of Zoobenthos Laboratory of MMBI KSC RAS E-mail: dvoretskiya@mmbi.info

## Библиографическое описание статьи

*Дворецкий, В. Г.* Зимний зоопланктон прибрежных вод Шпицбергена / *В. Г. Дворецкий, А. Г. Дворецкий* // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2018. — № 3 (10). — С. 50–60.

## Reference

Dvoretsky Vladimir G., Dvoretsky Alexander G. Winter Zooplankton of Spitsbergen Coastal Waters. Herald of the Kola Science Centre of the RAS, 2018, vol. 3 (10), pp. 50–60 (In Russ.).

## ФАУНА ПОЛИХЕТ В РАЙОНЕ АРХИПЕЛАГА ШПИЦБЕРГЕН В ИЮЛЕ 2017 г.

## Д. Р. Дикаева, Е. А. Фролова

ФГБУН Мурманский морской биологический институт КНЦ РАН

#### Аннотация

На основе материала, собранного в экспедиции ММБИ на НИС «Дальние Зеленцы» в июле 2017 г., проанализировано распределение видового состава, количественных характеристик и биогеографического состава полихет в районе арх. Шпицберген. Установлена зависимость распределения сообществ полихет от состава донных осадков, глубины и особенностей гидрологического режима. В исследованном материале обнаружен вид *Sphaerodoridium kolchaki* sp. n., недавно описанный в Баренцевом море [1].

#### Ключевые слова:

полихеты, сообщества, Шпицберген.

#### POLYCHAETA FAUNA IN THE AREA OF THE SPITSBERGEN ARCHIPELAGO IN JULY 2017

#### Dinara R. Dikaeva, Elena A. Frolova

Murmansk Marine Biological Institute of KSC RAS

#### Abstract

The distribution of species composition, quantitative characteristics and biogeographic composition of polychaete in the Spitsbergen archipelago was analyzed on the basis of the material collected during the expedition of MMBI on the R/V "Dalnie Zelentsy" in July 2017. The dependence of the distribution of polychaete communities on composition of bottom sediments, depth and hydrological regime features is established. The species of *Sphaerodoridium kolchaki* sp. n. was found in the studied material which had been recently described in the Barents Sea [1].

#### **Keywords:**

Polychaeta (Annelida), communities, Spitsbergen.



## Введение

Шпицберген — арктический архипелаг, который омывается с запада водами Гренландского, с востока — Баренцева, с юга — Норвежского морей, а севера — водами Северного Ледовитого океана. На формирование гидрологического режима вод архипелага влияет ряд факторов, основными из которых являются адвекция теплых атлантических вод Норвежского и Западно-Шпицбергенского течений, холодных вод Медвежинского и

Восточно-Шпицбергенского течений [2]. Пролив Стур-фьорд пролегает между юго-восточным берегом острова Западный Шпицберген с одной стороны и западными берегами островов Эдж и Баренца — с другой. Широкая южная часть пролива глубоководна, к северу пролив постепенно суживается, а глубины в нем уменьшаются. У южного входа в пролив едва заметно влияние теплого Западно-Шпицбергенского течения. В проливе Стур-фьорд в основном наблюдается холодное течение, проникающее в него через проливы Хели и Фриман и идущее на юг [3].

В районе исследования, где происходит интенсивный обмен и взаимодействие вод различного происхождения, наблюдается довольно сложная картина циркуляции [2], что отражается на видовом составе, распределении и структуре донных сообществ.

В настоящее время достаточно полно изучено распределение бентосных сообществ, в том числе и полихет во фьордах и заливах Западного Шпицбергена [2–9], однако работы, посвященные изучению сообществ полихет, в районе пролива Стур-фьорд и вблизи архипелага отсутствуют.

Поэтому представляет интерес изучить современное распределение полихет в данном районе. Настоящая работа продолжает исследования по изучению сообществ полихет с целью выявления закономерностей, определяющих структуру сообществ в зависимости от параметров среды.

Наши исследования охватывали район пр. Стур-фьорд и станцию, расположенную вблизи арх. Шпицберген (77° с. ш., 25° в. д.) (рис. 1).



Puc. 1. Карта расположения бентосных станций в июле 2017 г. в районе арх. Шпицберген Fig. 1. Map of the benthic stations in the Spitsbergen archipelago in July 2017

#### Материалы и методы

Материалом послужили 15 количественных проб с 5 станций, собранных в ходе комплексной экспедиции Мурманского морского биологического института в июле 2017 г. Отбор проб с глубины от 79 до 218 м производили дночерпателем Ван-Вина (площадь захвата 0,1 м<sup>2</sup>) в 3-кратной повторности. Собранный грунт промывали через капроновое сито с размером ячеи 0,75 мм, фиксировали 4 %-м формалином с последующим переводом беспозвоночных в 70 %-й спирт. Идентификацию червей осуществляли авторы.

Выделение групп станций по сходству видового состава выполняли с помощью кластерного анализа методом средневзвешенного на основе коэффициента сходства Брэя — Кёртиса [10]. В качестве меры обилия при выявлении доминантной группы видов использовали показатель относительной интенсивности метаболизма (М), позволяющий оценить значимость отдельных видов как по биомассе, так и по численности особей:

$$\mathbf{M} = K \cdot N^{0,25} \cdot B^{0,75},$$

где *N* — численность организмов, *B* — биомасса, *K* — таксоноспецифический коэффициент удельной интенсивности метаболизма [11].

При оценке биогеографического состава многощетинковых червей мы пользовались классификацией ареалов полихет, предложенной И. А. Жирковым [12].

## Результаты

В районе исследования идентифицировано 80 таксонов многощетинковых червей, из них 66 определены до вида (табл. 1). Видовое богатство (количество видов на станции) на станциях варьирует от 28 до 50, максимальное количество видов отмечено на песчаных, илисто-глинистых грунтах с камнями и ракушей (ст. 39, 81). Минимальное количество отмечено на коричневых илах с мягкой глиной и ракушей (ст. 80).

Таблица 1 Table 1

Список видов полихет в районе арх. Шпицберген в июле 2017 г.
List of polychaete species in the Spitsbergen archipelago in July 2017

T	Номер станции				
Таксон	Station no.				
laxon	39 78 79			80	81
1	2	3	4	5	6
Сем. Phyllodocidae					
Eteone agg. flava (Fabricius, 1780)	+	+	+	+	+
Phyllodoce groenlandica Oersted, 1842	+		+	+	+
Сем. Polynoidae					
Bylgides groenlandicus (Malmgren, 1867)	-	_	-	-	+
<i>Bylgides</i> sp.	+	-	+	_	+
Enipo torelli (Malmgren, 1866)	+	+	-	+	_
Gattyana cirrosa (Pallas, 1766)	+	-	-	_	_
Harmothoe imbricata (Linnaeus, 1767)	+	_	-	_	_
Polynoidae g. sp.	+	+	-	_	_
Сем. Pholoidae					
Pholoe longa (O. F. Müller, 1776)	+	+	+	+	+
Сем. Nephtyidae					
Aglaophamus malmgreni (Théel, 1879)	-	+	+	-	+
Nephtys ciliate (Müller, 1779)		+	+	+	+
Nephtys paradoxa Malmgren, 1874	-	_	_	+	_
Сем. Hesionidae					
Hesionidae g. sp.	+	_	_	_	_
Сем. Syllidae					
Syllidae g. sp.	-	+	-	-	+
Typosyllis (Syllis) fasciata (Malmgren, 1867)	+	_	-	-	-
Сем. Sphaerodoridae					
Sphaerodoridium kolchaki sp.n.	+	+	-	-	-
Сем. Опирһідае					
Nothria hyperborea (Hansen, 1878)	+	+	+	-	+
Сем. Lumbrineridae					
Lumbrineridae g. sp.	+	+	+	+	+
Lumbrineris fragilis (O.F. Müller, 1776)	-	-	+	_	_
Сем. Spionidae					
Laonice cirrata (M. Sars, 1851)	-	+	_	_	_
Minuspio cirrifera (Wirén, 1883)	+	-	-	_	+
Polydora sp.	+	+	+	-	+
Scolelepis korsuni Sikorski, 1994	+	-	-	_	_
Spio arctica (Soderstrom, 1920)	+	+	+	_	+
Spio armata (Thulin, 1957)	+	-	-	_	_
Spiophanes kroeyeri Grube, 1860	-	-	+	+	+
Сем. Trochochaetidae					
Trichobranchus glacialis Malmgren, 1866	+		-	_	_
Сем. <u>Chaetopteridae</u>					
Spiochaetopterus typicus M Sars, 1856	-	+	+	+	+
Сем. Cossuridae					
Cossura longocirrata Webster & Benedict, 1887	+	_	-	-	+

ВЕСТНИК Кольского научного центра РАН 3/2018 (10)

## Продолжение таблицы 1 Table 1 (Continued)

				, 	,
1	2	3	4	5	6
Сем. Cirratulidae					
Cirratulidae g. sp.	+	+	+	+	+
<i>Cirratulus cirratus</i> (O. F. Müller, 1776)	-	-	+	-	-
Сем. Flabelligeridae					
Brada villosa (Rathke, 1843)		+	_	-	-
Brada strelzovi Jirkov & Filippova in Jirkov, 2001	-	-	+	-	-
Diplocirrus hirsutus (Hansen, 1878)	-	_	_	_	+
Diplocirrus longisetosus (Marenzeller, 1890)	_	_	+	_	_
Сем. Scalibregmidae					
Pseudoscalibregma parvum (Hansen, 1879)	-	-	-	—	+
Scalibregma inflatum Rathke, 1843	+	+	-	-	-
Сем. Opheliidae					
Ophelina cylindricaudata (Hansen, 1879)	+	-	-	—	+
Сем. Orbiniidae					
Scoloplos acutus (Verrill, 1873)	+	+	+	+	+
Сем. Paraonidae					
Aricidea hartmanae (Strelzov, 1968)	+	+	+	-	+
Aricidea quadrilobata Webster & Benedict, 1887	-	_	_	+	+
Cirrophorus branchiatus Ehlers, 1908	+	_	_	_	+
Levinsenia gracilis (Tauber, 1879)	+	+	+	+	+
Сем. Maldanidae					
Asychis biceps (M. Sars, 1861)	_	_	_	_	+
Lumbriclymene minor Arwidsson, 1906	+	+	_	+	+
Maldane arctica Detinova, 1985	-	-	-	-	+
Maldane sarsi Malmgren, 1865	+	+	+	+	+
Maldanidae g. sp.	+	-	_	_	+
Praxillella gracilis (M. Sars, 1861)	+	+	+	+	+
Praxillella praetermissa (Malmgren, 1865)	+	+	+	-	+
Rhodine gracilior Tauber, 1879	+	_	+	+	+
Сем. Capitellidae					
<i>Capitella capitate</i> (Fabricius, 1780)	_	_	+	_	_
Capetelidae g. sp.	+	_	_	_	_
Heteromastus filiformis (Claparède, 1864)	+	+	+	+	+
Сем. Oweniidae					
Galathowenia oculata (Zachs, 1923)	+	+	+	+	+
Myriochele heeri Malmgren, 1867	+	_	_	_	+
Owenia fusiformis Chiaie, 1844	+	_	_	_	_
Oweniidae g. sp.	_	_	+	_	+
Сем. Pectinariidae					
Pectinaria hyperborea (Malmgren, 1866)	_	+	+	_	_
Сем Атратетідае					
Ampharete finmarchica (M. Sars, 1865)	+	+	+	+	+
Ampharetidae g sp	+	_	+	+	+
Amphicteis gunneri (M. Sars 1835)		+	_	+	_
Anobothrus gracilis (Malmoren 1866)		_	+	· _	_
Glyphanostomum pallescens (Théel 1879)		_	_	_	+
Lysinne lahiata Malmoren 1866		+	+	_	+
Melinna elisabethae McIntosh 1914	+	_	+	_	+
Socane wireni (Hessle 1917)		_			
505000 WICH (1105510, 1717)	_	-	_		Г

					,,
1	2	3	4	5	6
Сем. Terebellidae					
Lanassa venusta venusta (Malm, 1874)	-	+	—	-	-
Laphania boecki Malmgren, 1866	+	-	—	-	-
Leaena abranchiata Malmgren, 1866	+	+	+	-	+
Polycirrus arcticus Sars, 1865	-	+	+	+	-
Terebellidae g. sp.	+	+	—	-	-
Terebellides stroemi <u>Sars, 1835</u>	+	+	+	+	+
Terebellides williamsae Jirkov, 1989	—	_			+
Сем. Sabellidae					
Chone duneri Malmgren, 1867	_	_	+	+	+
Chone murmanica Lukasch, 1910	+	—	+	+	+
Chone sp.	+	+	_		—
Euchone analis (Kröyer, 1856)	—	—		+	+
Сем. Spirorbidae					
Bushiella sp.	+	_	_	_	_
Paradexiospira (Spirorbides) vitrea (Fabricius, 1780)	+	_	_	_	_

Окончание таблицы 1 Table 1 (Continued)

В биогеографическом составе преобладают бореально-арктические виды (79 %), количество бореальных видов (17 %) превышает количество арктических (4 %). Арктические виды были встречены только на ст. 78 и 79, наибольшее количество бореальных видов отмечено на ст. 81.

Биомасса полихет в районе исследования варьировала от 11 до 96,6 г/м<sup>2</sup>, плотность поселения — от 1770 до 4340 экз/м<sup>2</sup> (табл. 2).

Сравнение станций по видовому составу методом кластерного анализа на основе интенсивности метаболизма позволило выделить в исследованных районах ряд фаунистических комплексов (рис. 2).

Таблица 2

Table 2

Количественные характеристики сообществ полихет в районе apx. Шпицберген Quantitative parameters of the polychaete communities in the Spitsbergen archipelago

Howen		Температира	Количество	Биомасса,	Численность,	Доминирующий вид
помер	Глубина, м	Temperatura	видов	$\Gamma/M^2$	экз/м <sup>2</sup>	(по метаболизму)
Clanuu Station no	Depth, m	°C	The number	Biomass,	Abundance,	Dominant species
Station no.		C	of species	g/m <sup>2</sup>	ind./m <sup>2</sup>	(in terms of metabolism)
39	79	0,44	50	11±3	1770±580	Terebellides stroemi
78	151	-1,87	37	63,4±21	4203±143	Maldane sarsi
79	130	-1,83	40	41,4±9,3	3110±79	Maldane sarsi
80	157	-1,25	28	96,6±10,7	4237±20	Spiochaetopterus typicus
81	217	0,77	50	87,7±12,7	4340±225	Spiochaetopterus typicus

Во внутренней части пролива Стур-фьорд (ст. 78, 79) на илисто-глинистых, илисто-песчаных грунтах с камнями и ракушей, на глубинах от 130 до 151 м, при отрицательной температуре придонных вод (-1,83...-1,87 °C), отмечен комплекс с доминированием по биомассе и доле интенсивности метаболизма грунтоеда *Maldane sarsi*. По численности доминируют Cirratulidae g. sp. Здесь отмечены средние значения биомассы (52,4±15 г/м<sup>2</sup>) и плотности поселения (3660±115 экз/м<sup>2</sup>).

Во внешней части пролива Стур-фьорд на илисто-глинистых, илисто-песчанистых грунтах с ракушей и небольшим количеством камней, на глубинах от 158 до 218 м, при температуре воды от –1,25 до +0,77 °C, отмечен комплекс с доминированием по биомассе и доле интенсивности

метаболизма собирающего детритофага *Spiochaetopterus typicus*. По численности доминируют Cirratulidae g. sp. Здесь отмечены высокие значения биомассы (92,2±12 г/м<sup>2</sup>) и плотности поселения (4290±123 экз/м<sup>2</sup>).



Рис. 2. Дендрограмма сходства видового состава полихет в районе арх. Шпицберген в июле 2017 г. Fig. 2. Dendrogram of the polychaete species similarity in the Spitsbergen archipelago in July 2017

Отдельно выделилась станция (ст. 39), которая не вошла ни в один из кластеров, расположена в юго-восточной части (77° N, 25° E), вблизи арх. Шпицберген на глубине 79 м, на каменистом илистопесчаном, глинистом грунте. Здесь отмечены низкие значения биомассы (10 г/м<sup>2</sup>) и невысокие значения плотности поселения (1767 экз/м<sup>2</sup>), где по доле интенсивности метаболизма доминирует *Terebellides stroemi*. В данном районе отмечено достаточно высокое видовое разнообразие (50 видов). Также в районе исследования был отмечен вид *Sphaerodoridium kolchaki* sp. n., недавно встреченный в районе Баренцева моря [1], ранее был отмечен в районе 72° с. ш., 38° в. д., 76°30′ с. ш., 47° в. д. [1]. В нашем материале вид встречен на станциях с координатами 77° с. ш., 25° в. д. (ст. 39) и 77° с. ш., 19° в. д. (ст. 78) на глубинах от 79 до 151 м, на илистых, глинистых грунтах с камнями и ракушей (рис. 3).



Рис. 3. Карта-схема распределения вида *Sphaerodoridium kolchaki* sp. n. [1] в Баренцевом море. Цифрами обозначена встречаемость вида в 2003, 2004 (1) [1] и в июле 2017 г. (2)

Fig. 3. Layout scheme of distribution of the *Sphaerodoridium kolchaki* sp. n. [1] in the Barents Sea. The numbers indicate the occurrence of the species in 2003, 2004 (*I*) [1] and in July 2017 Γ. (2)

## Заключение

При продвижении от внутренних к внешним участкам пролива Стур-фьорд, с увеличением глубины, ослаблением гидродинамики и преобладанием мягкого илисто-глинистого, илистопесчаного грунта, отмечено увеличение биомассы и плотности поселения полихет за счет крупных полихет, живущих в трубках. В мелководном районе вблизи арх. Шпицберген (77° с. ш., 25° в. д.), подверженному сильному влиянию холодных вод Восточно-Шпицбергенского течения и течения Баренца, на каменистых грунтах отмечено высокое видовое разнообразие при низких значениях биомассы и плотности поселения полихет. Биогеографический состав полихет отражает особенности гидрологического режима в исследованном районе, увеличение количества бореальных видов во внешней части Стур-фьорда, вероятно, связано с затоком глубинных атлантических вод. Появление нового недавно описанного вида *Sphaerodoridium kolchaki* sp. n. [1], ранее не встреченного в районе исследования, вероятно, связано с недостаточной изученностью фауны в данном районе.

Таким образом, полученные современные данные дополнят имеющиеся сведения о количественном составе и структуре сообществ полихет в районе арх. Шпицберген и позволят в дальнейшем проследить за изменениями, происходящими в данной таксономической группе.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Gagaev S. Yu. Three New Species of Sphaerodoridium (Polychaeta: Sphaerodoridae) from the Arctic Ocean // Russian J. Marine Biology. 2015. Vol. 41, No. 4. P. 244–249. 2. Погодина И. А. Бентосные фораминиферы системы Ис-фьорда (Западный Шпицберген) // Комплексные исследования природы Шпицбергена. Апатиты: КНЦ РАН. 2007. Вып. 7. С. 306–318. 3. Лоция Баренцева моря. Ч. I (№ 1111) / ГУНиО МО. СПб., 2001. С.188–189. 4. Дикаева Д. Р., Фролова Е. А. Распределение полихет в заливе Белльсунн (Западный Шпицберген) // Природа шельфа и архипелагов европейской Арктики. М.: ГЕОС, 2008. Вып. 8. С. 116–119. 5. Дикаева Д. Р., Фролова Е. А. Современное распределение сообществ полихет во фьордах Западного Шпицбергена // Вестник МГТУ. 2014. Т. 17, № 1. С. 119–127. 6. Особенности распределения бентосных сообществ во фьордах Западного Шпицбергена / О. С. Любина [и др.] // Проблемы Арктики и Антарктики, 2011. № 1 (87). С. 28–40. 7. Фролова Е. А. Полихеты залива Грён-фьорд (Западный Шпицберген) // Комплексные исследования природы Шпицбергена. Апатиты: КНЦ РАН, 2006. Вып. 6. С. 379-386. 8. Фролова Е. А., Дикаева Д. Р. Сообщества полихет залива Хорнсунн (Западный Шпицберген) // Комплексные исследования природы Шпицбергена. Апатиты: КНЦ РАН, 2007. Вып. 7. С. 318-329. 9. Состав и распределение бентоса залива Хорнсунн (Западный Шпицберген) / Е. А. Фролова [и др.] // Природа шельфа и архипелагов европейской Арктики. М.: ГЕОС, 2008. Вып. 8. С. 363–366. 10. Bray J. R., Curtis J. T. An ordination of the upland forest communities of Southern Wisconsin // Ecol. Monogr. 1957. Vol. 27. P. 325–349. 11. Денисенко Н. В., Денисенко С. Г., Фролов А. А. Зообентос горла воронки Белого моря: структура и особенности распределения в прибрежье Кольского полуострова // Морские беспозвоночные Арктики, Антарктики и Субантарктики // Исследования фауны морей. СПб., 2006. Вып. 56 (64). С. 15–34. 12. Жирков И. А. Полихеты Северного Ледовитого океана. М.: Янус-К, 2001. 632 c.

## Сведения об авторах

*Дикаева Динара Раилевна* — кандидат биологических наук, научный сотрудник Мурманского морского биологического института КНЦ РАН

E-mail: dinara.dikaeva@yandex.ru

Фролова Елена Александровна — кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Мурманского морского биологического института КНЦ РАН E mail: frolova@mmbi info

E-mail: frolova@mmbi.info

## **Author Affiliation**

*Dinara R. Dikaeva* — PhD (Biology), Researcher of the Murmansk Marine Biological Institute of KSC RAS E-mail: dinara.dikaeva@yandex.ru

*Elena A. Frolova* — PhD (Biology), Senior Researcher of the Murmansk Marine Biological Institute of KSC RAS E-mail: frolova@mmbi.info

#### Библиографическое описание статьи

Дикаева, Д. Р. Фауна полихет в районе архипелага Шпицберген в июле 2017 г. / Д. Р. Дикаева, Е. А. Фролова // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2018. — № 3 (10). — С. 61–67.

#### Reference

Dikaeva Dinara R., Frolova Elena A. Polychaeta Fauna in the Area of the Spitsbergen Archipelago in July 2017. Herald of the Kola Science Centre of the RAS, 2018, vol. 3 (10), pp. 61–67 (In Russ.).

## КОМПЛЕКСЫ ПОЛИХЕТ К ЮГУ И ЮГО-ВОСТОКУ ОТ АРХИПЕЛАГА ШПИЦБЕРГЕН ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЭКСПЕДИЦИИ 2015 г.

## Е. А. Фролова<sup>1</sup>, Д. Р. Дикаева<sup>1</sup>, К. С. Хачетурова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГБУН Мурманский морской биологический институт КНЦ РАН <sup>2</sup>ФГБНУ «Полярный научно-исследовательский институт морского рыбного хозяйства и океанографии им. Н. М. Книповича» (ПИНРО), г. Мурманск

#### Аннотация

На основе материала, собранного в экспедиции ММБИ на НИС «Дальние Зеленцы» в ноябре 2015 г., установлены видовой состав и количественные характеристики полихет к югу и юго-востоку от арх. Шпицберген. При помощи кластерного анализа выделено три комплекса многощетинковых червей, распределение которых в основном зависит от донного рельефа и особенностей гидрологического режима. При помощи индекса SMI оценено соотношение биомассы *Spiochaetopterus typicus* и *Maldane sarsi* на станциях.

#### Ключевые слова:

полихеты, комплексы, индекс SMI, Шпицберген.

# POLYCHAETE COMPLEXES SOUTHWARD AND SOUTH-EAST OF THE SPITSBERGEN ARCHIPELAGO BASED ON THE RESULTS OF THE EXPEDITION IN 2015

## Elena A. Frolova<sup>1</sup>, Dinara R. Dikaeva<sup>1</sup>, Kristina S. Khacheturova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Murmansk Marine Biological Institute of KSC RAS <sup>2</sup>Knipovich Polar Research Institute of Fisheries and Oceanography, Murmansk

#### Abstract

The species composition and quantitative characteristics of polychaetes southward and southeast of the Svalbard archipelago were determined on the basis of the material collected in the expedition of MMBI on the R/V "Dalnie Zelentsy" in November 2015. With the help of cluster analysis, 3 complexes of polychaete worms were identified, the distribution of which mainly depends on the bottom relief and the peculiarities of the hydrological regime. The ratio of biomass *Spiochaetopterus typicus* and *Maldane sarsi* at stations was estimated using the SMI index.

#### Keywords:

polychaeta (Annelida), complex, index SMI, Svalbard.



## Материал и методы

В ноябре 2015 г. Мурманским морским биологическим институтом с борта НИС «Дальние Зеленцы» были собраны пробы бентоса на 6 станциях, окаймляющих с юга и юго-востока арх. Шпицберген (рис. 1). Станции располагались на глубинах от 65 до 226 м

в виде разреза, начинающегося со стороны Баренцева моря (ст. 26), пересекающего Медвежинско-Надеждинское мелководье (ст. 27) и уходящего на запад по Зюйдкапскому желобу (станции 28– 31) (табл. 1). Пробы были взяты дночерпателем Ван-Вина (0,1 м<sup>2</sup>) в трехкратной повторности, обрабатывались по стандартной гидробиологической методике [1]. Придонная температура воды на станциях изменялась от 1,42 до 4,82 °C, соленость — от 34,4 до 35,07 ‰.



Рис. 1. Карта-схема бентосных станций, выполненных в ноябре 2015 г. НИС «Дальние Зеленцы» Fig. 1. Map-scheme of benthic stations performed in November 2015 R/V "Dalniye Zelentsy"

Таблица 1 Table 1

Станция Station	Дата Date	Коорд Соого с. ш. N. L.	инаты linates в. д. E. L.	Глубина, м Depth, m	Температура, °C Temperature, °C	Соленость, ‰ Salinity, ‰	Грунт Sediment
1	2	3	4	5	6	7	8
26	17.11.2015	77°31.1′	27°01.1′	165	1,42	34,95	Коричневый слабопесчанистый ил, серая и коричневая «сухая» глина, немного камней Brown slightly sandy mud, grey and brown 'dry" clay, a few stones
27	17.11.2015	77°00.9′	23°54.4′	65	2,5	34,4	Коричневый ил, серая с черными примазками глина, большое количество донно-каменного материала, ракуша, мертвая органика Brown mud, grey with black clay lures, a large amount of bottom stone material, shell, dead organic matter

Характеристики станций отбора проб зообентоса в ноябре 2015 г. Characteristics of zoobenthos sampling stations in November 2015

ВЕСТНИК Кольского научного центра РАН 3/2018 (10)

1	2	3	4	5	6	7	8
28	18.11.2015	76°36.95′	22°51.21′	141	4,4	35,03	Слабопесчанистый коричневый ил, серая глина с черными прожилками, донно- каменный материал, запах сероводорода, мертвая органика Slightly sandy brown mud, grey clay with black streaks, botton stone material, smell of hydrogen sulfide, dead organics
29	18.11.2015	76°21.6′	21°32.4′	226	3,08	34,97	Коричневый ил, серая с черными прожилками глина, немного камней Brown mud, grey clay with black streaks, a few stones
30	18.11.2015	76°09.62′	19°56.28′	192	4,22	35,04	Коричневый ил, серая и черная глина, немного камней и ракуши Brown mud, grey and black clay, a few stones and shells
31	25.11.2015	76°05.31′	18°35.38′	192	4,82	35,07	Средний и крупный песок, камни, галька, ракуша, серая глина с песком Medium and large sand, stones, pebble, shell, grey clay with sand

Окончание таблицы 1 Table 1 (Continued)

Для выделения таксоценов использовали показатель относительной интенсивности метаболизма, позволяющий оценить значимость отдельных видов по биомассе и численности особей:

 $M = K \cdot N^{0,25} \cdot B^{0,75},$ 

где *N* — плотность поселения организмов, *B* — биомасса, *K* — коэффициент удельной интенсивности метаболизма [2].

Выделение групп станций по сходству видового состава выполняли с помощью кластерного анализа методом средневзвешенного на основе коэффициента сходства Брэя — Куртиса [3].

Для оценки соотношения биомасс *Spiochaetopterus typicus* и Maldanidae был использован индекс SMI, предложенный В. С. Вязниковой, И. Е. Манушиным, Е. А. Фроловой [4]:

 $\mathbf{SMI} = (B\mathbf{s} - B\mathbf{m})/(B\mathbf{s} + B\mathbf{m}),$ 

где Bs — биомасса S. *typicus*,  $\Gamma/M^2$ , Bm — биомасса Maldanidae,  $\Gamma/M^2$ .

## Результаты и обсуждение

В результате идентификации группы многощетинковых червей на станциях разреза были определены 118 таксонов, из которых 101 имеют видовой статус (табл. 2). Наиболее разнообразна фауна полихет Медвежинско-Надеждинского мелководья (станция 27 — 64 таксона) (табл. 3), в основном за счет большого разнообразия видов семейств полиноид, спирорбид и теребеллид, которые находят здесь благоприятные условия существования (небольшая глубина, активная

гидродинамика, каменистые фракции). Не уступают в видовом разнообразии и самые западные станции (30, 31), расположенные в Зюйдкапском желобе, за счет видов семейств мальданид, амфаретид, параонид, приспособленных к жизни в мягких илистых грунтах. Видовое разнообразие многощетинковых червей уменьшается по мере продвижения по Зюйдкапскому желобу с запада на восток вместе с понижением температуры придонной воды. Вместе с тем уменьшается число бореальных видов полихет. На самой западной станции 31 отмечено 8 бореальных видов (*Asychis biceps, Cirrophorus lyra, Glycera lapidum, Polycirrus arcticus, Petaloproctus borealis, Rhodine gracilior, Sosane wireni, Spiophanes kroeyeri*), в то время как на самой холодной восточной станции 26 найдено всего 2 бореальных вида (*Lumbriclymene minor, Spiophanes kroeyeri*). Эта станция отличается наименьшим видовым разнообразием (46 таксонов) (табл. 3).

Таблица 2

Table 2

Список таксонов полихет на станциях к югу и юго-востоку от Шпицбергена в ноябре 2015 г. List of taxa of polychaetes at the stations southward and south-east of Svalbard in November 2015

Таксон	Станции Stations						
Taxon	26	27	28	20	30	31	
1	20	3	20 4	5	50	7	
Тип Annelida	2	5			0	,	
Класс Polychaeta							
Семейство Ampharetidae							
Ampharete finmarchica (M. Sars, 1866)	+	+	_	+	+	+	
Ampharetidae g. sp.	_	_	_	+	_	_	
Amphicteis gunneri (M. Sars, 1835)	_	_	_	_	_	+	
Anobothrus gracilis (Malmgren, 1866)	_	+	+	_	+	+	
Glyphanostomum pallescens (Théel, 1873)	+	_	_	+	+	+	
Lysippe labiata Malmgren, 1865	+	+	+	+	_	+	
Melinna cristata (M. Sars, 1851)	_	-	+	+	+	+	
Melinna elisabethae McIntosh, 1922	+	+	+	+	+	+	
Sosane wireni (Hessle, 1917)	_	+	_	+	+	+	
Семейство Apistobranchidae							
Apistobranchus tullbergi (Théel, 1879)	_	+	+	_	—	-	
Семейство Capitellidae							
Heteromastus filiformis (Claparede, 1864)	+	+	+	+	+	+	
Notomastus latericeus M. Sars, 1851	-	+	—	-	—	-	
Семейство Chaetopteridae							
Spiochaetopterus typicus M. Sars, 1856	+	_	+	+	+	+	
Семейство Cirratulidae							
Cirratulidae g. sp.	+	+	+	+	+	_	
Chaetozone setosa Malmgren, 1867			+	+	+	-	
Семейство Cossuridae							
Cossura longocirrata Webster & Benedict, 1887	+	+	+	+	+	+	
Семейство Flabelligeridae							
Brada inhabilis (Rathke, 1843)	-	_	—	-	+	-	
Brada nuda Annenkova, 1922	_	-	+	_	—	-	
Brada villosa (Rathke, 1843)	_	-	+	_	—	-	
Diplocirrus longisetosus (Marenzeller, 1890)	+	_	_	_	-+	+	
Flabelligera affinis M. Sars, 1829	-	+				-	
Pherusa plumosa (O. F. Müller, 1776)	-	_	—	—	+	-	

ВЕСТНИК Кольского научного центра РАН 3/2018 (10)
# Продолжение таблицы 2 Table 2 (Continued)

1	2	3	4	5	6	7
Семейство Glyceridae						
Glycera lapidum Quatrephages, 1865	_		+	+		+
Семейство Lumbrineridae						
Lumbrineris fragilis (Müller, 1776)	_	_	_	_	_	+
Lumbrineridae g. sp.	+	+	+	+	+	+
Семейство Maldanidae						
Asychis biceps (M. Sars, 1861)	_	_	+	_	+	+
Axiothella catenata (Malmgren, 1865)	_	+	_	_	_	_
Lumbriclymene minor Arvidsson, 1906	+	+	+	+	+	_
Lumbriclymene sp.	_	_	_	_	_	+
Lumbriclymeninae g. sp.	_	_	+	_	+	_
Maldane arctica Detinova, 1985	+	+	+	+	+	+
Maldane sarsi Malmgren, 1867	+	_	+	+	+	+
Maldanidae g. sp.	_	_	+	_	_	_
Nicomache lumbricalis (Fabricius, 1780)	_	_	_	_	+	+
Nicomache sp.	_	+	_	_	_	_
Notoproctus oculatus Arwidsson, 1906	+	_	_	_	_	+
Petaloproctus borealis Ardwisson, 1906	_	_	_	_	_	+
Petaloproctus tenius (Théel, 1879)	_	_	_	_	_	+
Praxillella gracilis (M. Sars, 1861)	+	+	+	+	+	+
Praxillella praetermissa (Malmgren, 1865)	_	+	_	+	_	+
Praxillura longissima Arwidsson, 1906	_	_	_	_	+	+
Rhodine gracilior Tauber, 1879	_	+	+	+	+	+
Семейство Nephtyidae						
Aglaophamus malmgreni (Théel, 1879)	_	_	—	+	+	+
Nephtys ciliata (Mueller, 1779)	+	+	+	—	+	+
Nephtys paradoxa Malm, 1874	_	+	—	—		-
Nephtys sp.	+	+	_	_	_	-
Семейство Onuphidae						
Nothria hyperborea (Hansen, 1878)	+	+	+	_	+	+
Семейство Opheliidae						
Ophelina abranchiata Stoep-Bowitz, 1948	+	_	_	_	_	-
Ophelina acuminata Oersted, 1843	+	+	_	+	_	-
Ophelina cylindricaudata (Hansen, 1878)	+	_	+	+	+	+
Семейство Orbiniidae						
Scoloplos acutus (Verrill, 1873)	+	+	+	+	+	+
Семейство Oweniidae						
Galathowenia fragilis (Nilsen, Holthe, 1985)	+		—	—	+	-
Galathowenia oculata Zachs, 1923	+	+	+	+	+	+
Myriochele danielsseni Hansen, 1878	-	_	_	+	_	-
Myriochele heeri Malmgren, 1867	+	+	+	+	+	+
Owenia assimilis (Malmgren, 1867)	_	_	—	+	_	-
Owenia gr. fusiformis Delle Chiaje, 1842	_		+	—	+	+
Oweniidae g. sp.	+		—	—	-	+
Семейство Paraonidae						
Aricidea hartmanae (Strelzov, 1968)	+	+		+	+	+
Aricidea nolani Webster & Benedict, 1887		+		_	_	+
Aricidea quadrilobata (Webster & Benedict, 1887)		_	+	+	+	+
Cirrophorus branchiatus Ehlers, 1908	_	-	-	_	+	+
Cirrophorus lyra (Southern, 1914)	_	+	+	+	+	+

# Продолжение таблицы 2 Table 2 (Continued)

1	2	3	4	5	6	7
Cirrophorus sp.	-	+	_	_	—	—
Levinsenia gracilis (Tauber, 1879)	+	+	+	+	+	+
Paraonella nordica (Strelzov, 1968)	+	+	_	+	—	+
Семейство Pectinariidae						
Pectinaria granulata (L., 1767)	_	-	+	_	_	_
Pectinaria hyperborea (Malmgren, 1865)	+		+	_	+	+
Семейство Pholoidae						
Pholoe longa (Muller, 1776)	+	+	+	+	+	+
Семейство Phyllodocidae						
Eteone agg.flava (Fabricius, 1780)	+	+	+	+	+	_
Eteone spetsbergensis bistriata Ushakov, 1953	_	_	_	_	_	+
Phyllodoce groenlandica Oersted, 1842	_	_	+	+	+	+
Семейство Polynoidae						
Bylgides elegans (Théel, 1879)	_	_	+	_	+	_
Enipo torelli (Malmgren, 1865)	+	+	_	+	_	_
Eunoe depressa Moore. 1905	_	+	_	_	_	_
Gattvana amondseni (Malmgren, 1865)	_	_	_	+	_	_
Gattyana cirrhosa (Pallas, 1766)	_	+	_	_	_	_
Harmothoe imbricata (L. 1767)	_	+	_	_	_	_
Polynoidae g sp	_	+	_	+	+	_
Семейство Sabellidae						
Chone duneri Malmoren 1867	+	+	+	+	+	+
Chone infundibuliformis Krøver 1856	-		_		+	_
Chone murmanica Lucesh 1910						
Chone sp	_					+
Euchone analis (Kroever 1856)			-		-	
Euchone annillosa (M. Sars, 1851)						
Sabellidae g sn						
Ceneŭerro Scalibregnidae	Т					
Pseudoscalibreama narvum (Hansen 1878)						
Scalibreama inflatum Bathka 1843	_		_	_	- T	_
Constanto Samulidae	Т	Т	_	_	Т	<u>т</u>
Chitinonoma sarrula (Stimpson, 1854)		1				
Cauciforma Servica (Sumpson, 1854)	_	+	_			_
Sphaerodorum philippi Fouvol 1011					1	
Coverence Spionidee	_	_			+	_
Laonias singta (M. Sono 1951)						
Luonice cirraia (M. Sais, 1631)	+			_	+	_
Bolydorg ogoog (Oproted 1842)	+		_	+	+	+
Polydora caellomi Mooril 1807	_		+	+	+	_
Polyaora cauteryi Mesnii, 1897	_	+	_	+	+	+
Scolelepis korsuni Sikorski, 1992	-	+	_	-	_	_
Spio arctica (Soderstrom, 1920)	+	+	_	+	+	+
Spio armata (Thulin, 1957)	+	+	_	_	_	-
Spionidae g. sp.	_	+	+	_	_	-
Spiophanes kroeyeri Grube, 1860	+		+	+	+	+
Семеиство Spirorbidae						
Bushiella (Jugaria) similis (Bush, 1905)	_	+	_	—	—	+
Paradexiospira (Paradexiospira) violacea (Levinsen, 1883)	_	+	_	_	—	
Paradexiospira (Spirorbides) cancellata (Fabricius, 1780)	-	+	-	—	—	-
Paradexiospira (Spirorbides) vitrea (Fabricius, 1780)	+	+	—	—	—	-

ВЕСТНИК Кольского научного центра РАН 3/2018 (10)

# Окончание таблицы 2 Table 2 (Continued)

1	2	3	4	5	6	7
Семейство Syllidae						
Autolytus prismaticus (Fabricius, 1780)	-	_	_	+	+	-
Eusyllinae g. sp.	-	+	+	—	—	-
Syllinae g. sp.	+	+	_	+	+	+
Семейство Terebellidae						
Amphitrite cirrata (O. F. Müller, 1771)	-	+		_	—	-
Artacama proboscidea Malmgren, 1865	-	+	+	-	—	-
Lanassa nordenskioldi Malmgren, 1865	-	+		—	—	-
Laphania boecki Malmgren, 1865	-	+	+	—	+	+
Leaena abranchiata Malmgren, 1865	-	+	_	-	+	-
Lysilla loveni Malmgren, 1866	-	+	_	-	—	-
Polycirrus arcticus M. Sars, 1865	-	_	_	+	_	-
Polycirrus medusa Grube, 1850	-	_	_	_	_	+
Proclea graffi (Langerhans, 1880)	-	+	+	_	_	-
Terebellidae g. sp.	+	+	_	-	—	-
Terebellides stroemi Sars, 1835	+	+	+	+	+	+
Terebellides williamsae Jirkov, 1989	—	_	+	—	+	+

Таблица 3

Table 3

Результаты исследования таксоцена полихет к югу и юго-востоку от арх. Шпицберген в ноябре 2015 г. The results of the study of taxocen of polychaetes southward and south-east of Svalbard in November 2015

Станция Station	Количество таксонов Number of taxa	Средняя биомасса, г/м <sup>2</sup> Average biomass, g/m <sup>2</sup>	Средняя плотность поселения, экз/м <sup>2</sup> Average abundance, ind./m <sup>2</sup>	Индекс SMI Index SMI	Таксоцен Taxocen
26	46	26,41±16,39	1310±286	0,82	Spiochaetopterus typicus
27	64	46,55±2,40	3497±451	-1	Nephtys ciliata
28	48	44,25±8,78	3197±476	-0,05	Maldane sarsi
29	48	100,73±46,83	3907±500	0,81	Spiochaetopterus typicus
30	64	61,08±10,84	7217±508	0,37	Spiochaetopterus typicus
31	62	24,33±7,78	2643±748	-0,36	Maldane sarsi

Основным фактором, обусловливающим существование той или иной биомассы бентоса, является распределение по водоему питательных веществ. На втором месте после питания надо поставить газовый режим, господствующий в придонном слое, прежде всего в отношении кислорода. В связи с определяющим значением двух указанных выше факторов исключительное значение приобретает степень вертикальной циркуляции как фактор, регулирующий, с одной стороны распределение и поступление в круговорот органических веществ, с другой — вентилирующий придонные слои [5].

Биомасса полихет на станциях изменяется от 24,3 до 100,7 г/м<sup>2</sup> (табл. 3). Максимум биомассы приурочен к самой глубокой станции 29 (226 м). Доминирующим по биомассе видом среди полихет здесь выступает *Spiochaetopterus typicus*, как и на других станциях Зюйдкапского

желоба. Минимальные значения биомассы многощетинковых червей отмечены на Медвежинско-Надеждинском мелководье (ст. 27) и на самой западной станции 31 (табл. 3). На Медвежинско-Надеждинском мелководье и на северной станции 26 доминирует по биомассе *Nephtys ciliata*.

Наибольший вклад в биомассу полихет вносят Spiochaetopterus typicus и Maldane sarsi, при этом S. typicus размножается посредством планктотрофной личинки, что при благоприятных условиях дает ему больше возможностей для расселения. Большинство представителей семейства Maldanidae имеют личинки с прямым развитием или лецитотрофные [6]. Кроме того, у M. sarsi существует бесполое размножение [7, 8]. Вследствие различия в стратегии размножения S. typicus больше подвержен влиянию климатических изменений [4]. Индекс SMI отражает температурные условия в придонном слое воды, а в случае одинаковой климатической ситуации, позволяет выявить влияние отличного от климатического фактора. На станциях Зюйдкапского желоба (29–31) с идентичными условиями окружающей среды можно было ожидать примерно равные значения индекса SMI, а их различие наводит на мысль о влиянии тралового промысла в районе Зюйдкапского желоба, нарушающего природные сообщества.

Трофическая структура биомассы полихет меняется в зависимости от изменения факторов среды (рис. 2). На северных станциях 26 и 27 теплые атлантические воды Южно-Шпицбергенского течения, поступающие по Зюйдкапскому желобу с запада, встречаются с холодным течением Баренца, огибающим арх. Шпицберген с востока. Здесь в условиях фронтальной зоны доминируют плотоядные, среди которых преобладают *N. ciliata*. На самой северной станции 26 доля собирающих детритофагов почти равна доле плотоядных — 47 и 46 % соответственно, на Медвежинско-Надеждинском мелководье (ст. 27) доля плотоядных достигает 64 %, на втором месте собирающие детритофаги (24 %). Сильные течения и каменистые грунты благоприятствуют развитию неподвижных сестонофагов (7 %). Начиная со станции 28 с увеличением глубины доля плотоядных резко уменьшается. На мягких грунтах Зюйдкапского желоба преобладают собирающие детритофаги и грунтоеды.





Показатель плотности поселения полихет изменялся от 1310 до 7217 экз/м<sup>2</sup>, минимальное значение наблюдалось на самой восточной баренцевоморской станции, а максимум — в Зюйдкапском желобе. Доминировали по плотности поселения: на баренцевоморской станции — *Galathowenia oculata*, на Медвежинско-Надеждинском мелководье — полихеты семейства Cirratulidae, в Зюйдкапском желобе — *Maldane sarsi*.

Таксоцены полихет выделялись по интенсивности метаболизма. В Зюйдкапском желобе и на баренцевоморской станции преобладает таксоцен *S. typicus*. На двух станциях его сменяет *M. Sarsi*, лишь на Медвежинско-Надеждинском мелководье развивается таксоцен *N. ciliata*.

В результате кластерного анализа выделились три комплекса полихет: холодноводный баренцевоморский, комплекс Медвежинско-Надеждинского мелководья и тепловодный комплекс Зюйдкапского желоба.

Баренцевоморский комплекс развивается на глубине 165 м при температуре 1,42 °C на коричневом слабопесчанистом иле, серой и коричневой «сухой» глине с небольшим количеством камней. Он характеризуется небольшой биомассой (26,4 г/м<sup>2</sup>) с почти равной долей собирающих детритофагов и плотоядных (47 и 46 %), малой плотностью поселения (1310 экз/м<sup>2</sup>) и небольшим видовым разнообразием (47 таксонов на станцию). Доминирует *S. typicus*.

Комплекс Медвежинско-Надеждинского мелководья развивается при средних температурах (2,5 °C) на небольших глубинах (65 м), на коричневых илах, серой с черными примазками глине с большим количеством донно-каменного материала, ракуши, мертвой органики. Он характеризуется средней биомассой (46,5 г/м<sup>2</sup>) с преобладанием плотоядных (64 %), средней плотностью поселения (3497 экз/м<sup>2</sup>), большим видовым разнообразием (67 таксонов на станцию). Доминирует *N. ciliata*.

Комплекс Зюйдкапского желоба развивается при температурах 3,08–4,82 °C на глубинах 141–226 м, на коричневом иле, серой с черными прожилками глине с небольшим количеством камней. Для него характерны: биомасса от 24,3 до 100,7 г/м<sup>2</sup> (в среднем 57,6 г/м<sup>2</sup>) с преобладанием собирающих детритофагов и грунтоедов, плотность поселения от 2843 до 7217 экз/м<sup>2</sup> (в среднем 4291 экз/м<sup>2</sup>), видовое разнообразие от 51 до 65 таксонов на станцию (в среднем 58). Доминируют *S. typicus* и *M. sarsi.* 

#### Заключение

Описаны комплексы полихет, развивающиеся к югу и юго-востоку от арх. Шпицберген: баренцевоморский, комплекс Медвежинско-Надеждинского мелководья и комплекс полихет Зюйдкапского желоба. Наименьшим видовым разнообразием, биомассой и плотностью поселения характеризуется баренцевоморский комплекс с доминированием *S. typicus*. Комплекс Медвежинско-Надеждинского мелководья с доминированием *N. ciliata* характеризуется наибольшим видовым разнообразием и преобладанием плотоядных в трофической структуре. Комплекс полихет Зюйдкапского желоба при доминировании *S. typicus* и *M. sarsi* обогащен бореальными атлантическими видами. Для него характерны наибольшая биомасса и плотность поселения полихет.

Приведенные значения соотношения биомасс *S. typicus* и *M. sarsi* (индекс SMI) позволят впоследствии проследить его динамику в зависимости от климатических флуктуаций. Изменение индекса SMI на отдельных станциях Зюйдкапского желоба дает возможность предположить антропогенное нарушение состояния сообществ посредством тралового промысла.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Руководство по методам биологического анализа морской воды и донных отложений. Л.: Гидрометеоиздат, 1980. 192 с. 2. Денисенко Н. В., Денисенко С. Г., Фролов А. А. Морские беспозвоночные Арктики, Антарктики и Субантарктики // Исследования фауны морей. СПб., 2006. Вып. 56 (64). С. 15–34. 3. Bray J. R., Curtis J. T. An ordination of the upland forest communities of Southern Wisconsin // Ecol. Monogr. 1957. Vol. 27. Р. 325–349. 4. Вязникова В. С., Манушин И. Е., Фролова Е. А. Две стратегии существования полихет в Баренцевом море на примере Spiochaetopterus typicus и видов семейства Maldanidae // Материалы XVII науч. семинара «Чтения памяти К. М. Дерюгина» (5 декабря 2014 г.) / СПбГУ, кафедра ихтиологии и гидробиологии. СПб., 2015. С. 52–68. **5.** *Броцкая В. А., Зенкевич Л. А. Количественный* учет донной фауны Баренцева моря // Труды ВНИИ морского рыбного хозяйства и океанографии. 1939. Т. 4. С. 5–126. **6.** *Милейковский* С. А. Типы личиночного развития морских донных беспозвоночных, их распространенность и экологическая обусловленность: критическая переоценка существующих схем // Экология и биогеография планктона. М.: Наука, 1976. Т. 105. С. 214–248. (Труды Института океанологии им. П. П. Ширшова). **7.** *Цетлин А. Б., Маркелова Н. П.* Бесполое размножение у Maldanidae Maldane sarsi (Annelida, Polychaeta) // ДАН СССР. 1986. Т. 288, № 3. С. 763–765. **8.** *Фролова Е. А., Вологжанникова А. А.* Бесполое размножение Maldane sarsi (Annelida. Polychaeta) в заливах Западного Шпицбергена // Проблемы репродукции и раннего онтогенеза морских гидробионтов: тез. докл. (г. Мурманск, ноябрь 2004 г.). Мурманск: ММБИ КНЦ РАН. 2004. С. 135–136.

# Сведения об авторах

Фролова Елена Александровна — кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Мурманского морского биологического института КНЦ РАН

E-mail: frolova@mmbi.info

*Дикаева Динара Раилевна* — кандидат биологических наук, научный сотрудник Мурманского морского биологического института КНЦ РАН

E-mail: dinara.dikaeva@yandex.ru

*Хачетурова Кристина Сергеевна* — аспирант, лаборант-исследователь Полярного научноисследовательского института морского рыбного хозяйства и океанографии им. Н. М. Книповича E-mail: alicemcgree14@gmail.com

#### Autor Affiliation

*Elena A. Frolova* — PhD (Biology), Senior Researcher of the Murmansk Marine Biological Institute of KSC RAS E-mail: frolova@mmbi.info

*Dinara R. Dikaeva* — PhD (Biology), Researcher of the Murmansk Marine Biological Institute of KSC RAS E-mail: dinara.dikaeva@yandex.ru

*Kristina S. Khacheturova* — Post-Graduate Student, Laboratory Researcher of Knipovich Polar Research Institute of Fisheries and Oceanography

E-mail: alicemcgree14@gmail.com

# Библиографическое описание статьи

Фролова, Е. А. Комплексы полихет к югу и юго-востоку от архипелага Шпицберген по результатам экспедиции 2015 года / Е. А. Фролова, Д. Р. Дикаева, К. С. Хачетурова // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2018. — № 3 (10). — С. 68–77.

#### Reference

*Frolova Elena A., Dikaeva Dinara R., Khacheturova Kristina S.* Polychaete Complexes Southward and South-East of the Spitsbergen Archipelago Based on the Results of the Expedition in 2015. *Herald of the Kola Science Centre of the RAS*, 2018, vol. 3 (10), pp. 68–77 (In Russ.).

# МОНИТОРИНГ СТОЙКИХ ОРГАНИЧЕСКИХ ЗАГРЯЗНИТЕЛЕЙ И ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ПРОМЫСЛОВЫХ РЫБАХ МЕДВЕЖИНСКО-ШПИЦБЕРГЕНСКОГО РАЙОНА

## А. Ю. Жилин, Н. Ф. Плотицына, А. М. Лаптева

ФГБНУ «Полярный научно-исследовательский институт морского рыбного хозяйства и океанографии им. Н. М. Книповича» (ПИНРО)

#### Аннотация

Определены стойкие органические загрязнители (СОЗ) и микроэлементы группы тяжелых металлов в 50 пробах мышц и печени основных промысловых рыб Баренцева моря. Суммарное содержание изомеров ГХЦГ, изомеров и метаболитов ДДТ, конгенеров ПХБ, нормируемых микроэлементов группы тяжелых металлов в исследованных пробах рыб не превышало допустимые уровни, установленные СанПиН 2.3.2.1078-01 для морских рыб, за исключением общего мышьяка. Полученные результаты подтверждают низкий уровень загрязнения ихтиофауны Медвежинско-Шпицбергенского района СОЗ и микроэлементами группы тяжелых металлов, который не окажет существенного влияния на состояние запасов промысловых рыб.

#### Ключевые слова:

Баренцево море, Медвежинско-Шпицбергенский район, промысловые рыбы, мышцы, печень, хлорорганические пестициды, полихлорбифенилы, токсичность, тяжелые металлы.

# MONITORING OF PERSISTENT ORGANIC POLLUTANTS (POP'S) AND HEAVY METALS IN COMMERCIAL FISH FROM THE MEDVEZHINSKY-SPITSBERGEN AREA

#### Andrey Y. Zhilin, Natalya F. Plotitsyna, Anna M. Lapteva

Knipovich Polar Research Institute of Fisheries and Oceanography

#### Abstract

POPs and trace elements of heavy metals group were determined in 50 samples of muscles and liver of the main commercial fish of the Medvezhinsky-Spitsbergen region of the Barents Sea. Comparing the results with published data for the commercial ichthyofauna of the World Ocean and the Barents Sea, it can be concluded that the content of OCP, PCB, heavy metals and trace elements in the muscles and liver of the studied fish is insignificant. The monitoring data are part of the materials "Characterization of the State of Pollution of Elements of the Barents Sea Ecosystem" for the preparation of the annual forecast of the state of stocks of fishing facilities and their possible catch. The obtained results will contribute to improving the efficiency of management decisions and the quality of expert opinions in protecting the interests of fisheries in the North European basin in connection with the need to protect commercial biological resources and biodiversity. In the short term, the observed level of contamination of fish muscles and liver in the studied areas of the Barents Sea will not have a significant impact on the state of stocks of commercial species of aquatic biological resources.

# Keywords:

the Barents Sea, Medvezhinsky-Spitsbergen area, commercial fish, muscles, liver, organochlorine pesticides, polychlorobiphenyls, toxicity, heavy metals.



#### Введение

Среди загрязняющих веществ, которые попадают в моря в результате хозяйственной деятельности человека, самое большое внимание уделяется хлорированным углеводородам. Эти стойкие химические соединения относятся группе неприродных к

компонентов окружающей среды (ксенобиотиков) и представляют наибольшую опасность для биосферы. Хлорированные углеводороды включают в себя хлорорганические пестициды (ХОП) и полихлорбифенилы (ПХБ) — соединения, сходные с ХОП по своим физико-химическим свойствам. Многолетнее бесконтрольное использование этих стойких органических загрязнителей привело к их повсеместному распространению и накоплению как в биотических, так и абиотических компонентах наземных и морских экосистем [1]. В связи с этим с 1979 по 1982 гг. во многих европейских странах, США и Японии был введен запрет на производство ХОП и ПХБ, но тенденция к расширению их использования во многих развивающихся странах определяет условия, при которых проблема глобального распространения этих СОЗ в окружающей природной среде не теряет актуальности и в настоящее время [2]. Морские организмы могут накапливать СОЗ в значительных количествах, так как в естественных условиях скорость их разложения крайне низка. Для СОЗ определяющими показателями токсичности являются канцеро- и мутагенность, а также влияние на репродуктивность [3]. Остаточные количества СОЗ поступают в Баренцево море главным образом с атлантическими водами и в результате крупномасштабного атмосферного переноса.

Тяжелые металлы по токсикологическим оценкам «стресс-индексов» занимают второе место среди загрязняющих веществ, уступая только хлорированным углеводородам. В морской воде многие металлы присутствуют в виде «следов» и играют жизненно важную роль в биологических системах. Наличие или отсутствие какого-либо металла во многом определяет направленность метаболических процессов. Изменение содержания тяжелых металлов и микроэлементов в различных тканях морских рыб вследствие антропогенного воздействия происходит на фоне их природного содержания, а диапазоны, при которых они выступают как микроэлементы или как токсиканты, чрезвычайно узки [1, 4]. Возрастные (размерные, весовые) различия в содержании микроэлементов группы металлов на протяжении жизненного цикла рыб обусловлены главным образом физиолого-биохимическими особенностями разных этапов онтогенеза и, в принципе, не могут быть простой функцией возраста (размера, массы) как характеристики времени накопления микроэлементов из среды обитания. В организме гидробионтов существуют специфические системы гомеостаза, нейтрализующие токсическое действие тяжелых металлов. Особого внимания заслуживают металлотионеины — низкомолекулярные белки с высоким содержанием цистеина. Микроэлементы группы тяжелых металлов образуют прочные связи с сульфгидрильными группами остатков цистеина в белке, и таким образом металлотионеины выполняют защитную функцию детоксикации избыточных количеств тяжелых металлов в организме рыб [4].

Целью проводимых исследований является получение современных данных о состоянии и тенденциях загрязнения водных биологических ресурсов Баренцева моря и среды их обитания основными группами загрязняющих веществ, которые позволяют провести экосистемный анализ и оценить возможный ущерб морским биологическим ресурсам в результате антропогенной деятельности. В открытых районах моря гидробионты и экосистема в целом начинают испытывать воздействие факторов малой интенсивности — низких концентраций стойких химических соединений, опасность которых заключается в хроническом характере воздействия, представляющем угрозу для экологического благополучия Баренцева моря.

# Материал и методы

Выполнено определение загрязняющих веществ в пробах морских рыб, выловленных в 7 промысловых районах Медвежинско-Шпицбергенского региона Баренцева моря на 14 станциях (рис. 1). Исследования охватывали следующие рыбопромысловые районы: Западный желоб, Район Надежды, Восточный, Южный и Западный склоны Медвежинской банки, Шпицбергенская банка, Зюйдкапский желоб. Всего проанализировано 50 проб (25 проб мышц и 25 проб печени) атлантической трески (*Gadus morhua morhua*), пикши (*Melanogrammus aeglefinus*), сайды

(Pollachius virens), камбалы-ерша (Hippoglossoides platessoides limandoides), черного палтуса (Reinhardtius hippoglossoides) и окуня-клювача (Sebastes mentella). Отбор, подготовка и химический анализ проб морской ихтиофауны выполнены в соответствии с методическими руководствами [5–7].

Хлорорганические пестициды (α-, β-, γ-гексахлорциклогексан [ГХЦГ], гексахлорбензол [ГХБ], *цис-*, *транс-*хлордан, *цис-*, *транс-*нонахлор, оксихлордан, изомеры и метаболиты дихлордифенилтрихлорэтана [ДДТ]) и ПХБ (конгенеры с номерами по номенклатуре IUPAC 28, 31, 52, 99, 101, 105, 118, 138, 153, 156, 180) определялись методом газовой хроматографии на хромато-масс-спектрометре GCMS-QP 2010 Plus фирмы Shimadzu (Япония) с капиллярной кварцевой колонкой HP-5MS длиной 30 м. Идентификация индивидуальных соединений проводилась в режиме SIM (селективный мониторинг ионов). Количественное определение выполнялось с использованием многоуровневой калибровки тестовыми смесями, приготовленными из сертифицированных кристаллических пестицидов и полихлорбифенилов фирмы Sigma-Aldrich (США). Для автоматической обработки результатов анализа использовалась программа GCMS solution 2,5 фирмы Shimadzu (Япония).



Рис. 1. Схема станций отбора проб промысловых рыб Баренцева моря (НИС «Вильнюс», рейс 104, декабрь 2017 г.) Fig. 1. Scheme of sampling stations for commercial fish of the Barents Sea (RV "Vilnius", cruise 104, December 2017)

Тяжелые металлы и микроэлементы (Cu, Zn, Ni, Cr, Mn, Co, Fe, Pb, Cd, As, Hg) определялись на спектрофотометре с ртутно-гидридной приставкой фирмы Shimadzu, модель AA-6800 (Япония), методами пламенной и непламенной атомно-абсорбционной спектрофотометрии с использованием многоуровневой калибровки тестовыми смесями, приготовленными из сертифицированных стандартных растворов микроэлементов фирмы Sigma-Aldrich (США).

## Результаты и обсуждение

*Хлорорганические пестициды*. ХОП в пробах рыб исследованных промысловых районов были представлены α-, β-, γ-изомерами ГХЦГ, остаточными количествами ГХБ, изомерами хлордана, изомерами и метаболитами ДДТ. Среднее суммарное содержание изомеров ГХЦГ

в мышцах трески составляло 0,71±0,16 нг/г сырой массы, пикши — 0,70±0,09, сайды — 1,24±0,30, камбалы-ерша — 1,68±0,36, черного палтуса — 1,67±0,41, окуня-клювача — 1,30±0,22 нг/г сырой массы, а в печени промысловых рыб было выше, чем в мышцах, так как печень является депонирующим органом, где в первую очередь происходит накопление загрязняющих веществ. Кроме того, печень рыб отличается более высоким содержанием жира (40,2±24,5 %) по сравнению с мышцами (2,62±2,09 %) (рис. 2). Увеличение в мышцах и печени исследованных рыб относительного содержания  $\alpha$ -ГХЦГ по сравнению с  $\gamma$ -ГХЦГ ( $\alpha$ -ГХЦГ /  $\gamma$ -ГХЦГ > 1) свидетельствовало о давнем поступлении этого пестицида в морскую среду. По классификации Государственного агентства по охране окружающей среды Норвегии (SFT) среднее значение суммарного содержания ГХЦГ в мышцах трески соответствовало категории «умеренное загрязнение» (0,5–2,0 нг/г сырой массы), а в печени — «незначительное загрязнение» (<50 нг/г сырой массы) [8].



Рис. 2. Среднее суммарное содержание изомеров ГХЦГ в мышцах (А) и печени (Б) промысловых рыб Баренцева моря

Fig. 2. Average total isomer content of HCH in muscles (A) and liver (B) of commercial Barents Sea fish

Минимальное среднее содержание ГХБ определено в мышцах трески  $(0,07\pm0,02)$ , пикши  $(0,053\pm0,005)$ , сайды  $(0,10\pm0,02$  нг/г сырой массы) и печени камбалы-ерша  $(0,72\pm0,23$  нг/г сырой массы), а максимальное — в мышцах черного палтуса  $(0,67\pm0,21)$  и печени трески  $(3,60\pm1,05$  нг/г сырой массы). Минимальное среднее суммарное содержание изомеров хлордана определено в мышцах пикши  $(0,03\pm0,01)$  и печени камбалы-ерша  $(5,19\pm1,65$  нг/г сырой массы), а максимальное — в мышцах черного палтуса  $(2,87\pm0,70)$  и печени трески  $(49,3\pm31,2$  нг/г сырой массы). Из четырех определяемых изомеров хлордана в мышцах и печени рыб доминировал *trans*нонахлор. В настоящее время содержание изомеров хлордана в мышцах и печени морских промысловых рыб не нормируется, так как в качестве пестицидов они ранее в СССР, а затем и в России не применялись.

Среднее суммарное содержание изомеров и метаболитов ДДТ в мышцах трески составляло 1,02±0,23 нг/г сырой массы, пикши — 0,76±0,11, сайды — 2,14±0,12, камбалы-ерша — 3,73±1,38, черного палтуса — 7,56±4,74 и окуня-клювача — 3,68±1,12 нг/г сырой массы. В печени указанных видов рыб оно было значительно выше, так как все хлорорганические соединения обладают липофильными свойствами и хорошо растворяются в жирах (рис. 3).

Содержание метаболита p,p'-ДДЕ в мышцах и печени исследованных рыб значительно превышало содержание изомера p,p'-ДДТ, что указывает на длительный процесс трансформации ДДТ в более стойкие метаболиты, т. е. на давнее загрязнение среды обитания рыб этим

пестицидом. По норвежской классификации среднее значение суммарного содержания изомеров и метаболитов ДДТ в мышцах трески соответствовало категории «умеренное загрязнение» (1,0–3,0 нг/г сырой массы), а в печени — «незначительное загрязнение» (<200 нг/г сырой массы) [8]. Величины суммарного содержания изомеров ГХЦГ и изомеров и метаболитов ДДТ в мышцах и печени исследованных рыб не превышали допустимые уровни, установленные СанПиН 2.3.2.1078-01 [9].



Рис. 3. Среднее суммарное содержание изомеров и метаболитов ДДТ в мышцах (А) и печени (Б) промысловых рыб Баренцева моря

Fig. 3. Average total content of DDT isomers and metabolites in muscles (A) and liver (B) of commercial Barents Sea fish

Полихлорбифенилы. Среди хлорированных углеводородов наибольший интерес представляют исследования ПХБ в связи с их интенсивным использованием в промышленности и судоходстве. Данные о среднем суммарном содержании ПХБ в мышцах и печени промысловых рыб Медвежинско-Шпицбергенского района Баренцева моря представлены на рис. 4.



Рис. 4. Среднее суммарное содержание конгенеров ПХБ в мышцах (А) и печени (Б) промысловых рыб Баренцева моря

Fig. 4. Average total content of PCB congeners in muscles (A) and liver (B) of commercial Barents Sea fish

Среднее суммарное содержание ПХБ в мышцах атлантической трески составляло 0,78±0,11 нг/г сырой массы, пикши — 0,59±0,04 нг/г, сайды — 1,8±0,53 нг/г, камбалы-ерша — 3,71±1,07 нг/г, нг/г черного палтуса — 7,09±4,10 нг/г, окуня-клювача — 4,13±1,21 нг/г сырой массы. Вследствие более значительного количества жира величины суммарного содержания конгенеров ПХБ в печени рыб на порядок превышали их содержание в мышцах. Из индивидуальных конгенеров

ПХБ в мышцах и печени рыб преобладали соединения с номерами по номенклатуре IUPAC 118, 138, 153 (более 60 % от ∑ПХБ), что указывало на техногенное загрязнение среды их обитания коммерческими смесями типа Aroclor (российские аналоги Совол — конденсаторное масло и Совтол-10 — трансформаторное масло) (рис. 5).



Рис. 5. Содержание основных ПХБ Совтола-10 в мышцах (А) и печени (Б) черного палтуса, выловленного в Баренцевом море (ст. 47)

Fig. 5. The main PCB content of Sovtol-10 in muscles (A) and liver (B) of black halibut caught in the Barents Sea (station 47)

По норвежской классификации суммарное содержание 7 конгенеров ПХБ с номерами 28, 52, 101, 118, 138, 153 и 180 («голландская семерка») в мышцах и печени атлантической трески соответствовало критериям «незначительное загрязнение» (<5,0 и <500 нг/г сырой массы соответственно) [8]. Величины суммарного содержания 11 определяемых конгенеров ПХБ в мышцах и печени промысловых рыб Медвежинско-Шпицбергенского района Баренцева моря были во много раз ниже допустимых уровней (2000 и 5000 нг/г сырой массы соответственно), установленных СанПиН 2.3.2.1078-01 для морских рыб [9].

Диоксиноподобные хлорированные углеводороды, к которым относятся некоторые определяемые ПХБ и пестициды, обладают теми же токсическими свойствами, что и диоксины, а механизмы их действия на живые организмы идентичны [3]. Средняя токсичность определяемых хлорорганических соединений в мышцах рыб, выраженная в единицах токсического эквивалента (ТЭ), варьировала от 0,066 (треска, пикша) до 1,14 пг ТЭ/г сырой массы (черный палтус), в печени — от 0,85 (камбала-ерш) до 12,0 пг ТЭ/г сырой массы (треска). Токсичность диоксиноподобных хлорированных углеводородов, обнаруженных в мышцах рыб, была во всех случаях меньше 1,0 пг ТЭ/г сырой массы, за исключением черного палтуса (1,14 пг ТЭ/г сырой массы), выловленного на восточном склоне Медвежинской банки (ст. 74). Наибольшая величина этого показателя найдена в печени трески (12,0 пг ТЭ/г сырой массы), выловленной в том же промысловом районе (ст. 79). По норвежской классификации наибольшая величина токсичности диоксиноподобных хлорированных углеводородов в печени трески (12,0 пг ТЭ/г сырой массы) соответствовала «незначительному загрязнению» (<15,0 пг ТЭ/г сырой массы) [8].

*Тяжелые металлы и микроэлементы.* Из микроэлементов в мышцах и печени исследованных рыб преобладали железо, цинк, мышьяк и медь. Минимальное содержание характерно для кобальта, кадмия и ртути.

В мышцах исследованных рыб среднее содержание меди (0,31–0,40), цинка (2,59–3,57), никеля (0,14–0,22), хрома (0,09–0,17), марганца (0,13–0,40), кобальта (0,02–0,13) и железа (3,55–11,1 мкг/г сырой массы) соответствовало природным фоновым уровням. В печени промысловых рыб среднее содержание металлов было значительно больше, так как в белковой фракции печени содержание микроэлементов в 3–20 раз выше, чем в липидной. Относительно высокое содержание металлов в белковой фракции

печени можно объяснить большим содержанием в этом органе специфических низкомолекулярных белков-металлотионеинов, которые являются специфическими концентраторами микроэлементов группы тяжелых металлов [4].

В печени рыб среднее содержание меди (1,90–4,88), цинка (8,40–51,9), никеля (0,30–0,63), хрома (0,20–0,75), марганца (0,63–1,90), кобальта (0,23–1,20) и железа (20,4–92,7 мкг/г сырой массы) также в большой степени соответствовало природным уровням. Относительно большое абсолютное количество микроэлементов группы тяжелых металлов находится в белковой фракции печени, несмотря на ее большую жирность. Это служит еще одним косвенным доказательством в пользу локализации микроэлементов группы металлов в печени в металлотионеиновой фракции белкового пула, которая относительно выше в этом органе по сравнению с другими органами и тканями рыб [4]. К числу весьма токсичных микроэлементов относят свинец, кадмий, мышьяк и ртуть. Согласно СанПиН 2.3.2.1078-01, в мышцах морских промысловых рыб нормируется только содержание свинца (1,0), кадмия (0,2), ртути (0,5) и мышьяка (5,0 мкг/г сырой массы) [9]. Данные о среднем содержании свинца, кадмия, ртути и общего мышьяка в мышцах и печени промысловых рыб Медвежинско-Шпицбергенского района представлены на рис. 6–9.



Рис. 6. Среднее содержание свинца в мышцах (А) и печени (Б) промысловых рыб Баренцева моря Fig. 6. Average lead content in muscles (А) and liver (В) of commercial Barents Sea fish



Рис. 7. Среднее содержание кадмия в мышцах (А) и печени (Б) промысловых рыб Баренцева моря Fig. 7. Average cadmium content in muscles (A) and liver (B) of commercial Barents Sea fish



Рис. 8. Среднее содержание ртути в мышцах (А) и печени (Б) промысловых рыб Баренцева моря Fig. 8. Average mercury content in muscles (А) and liver (В) of commercial Barents Sea fish



Рис. 9. Среднее содержание общего мышьяка в мышцах (А) и печени (Б) промысловых рыб Баренцева моря Fig. 9. Average content of total arsenic in muscles (А) and liver (В) of commercial Barents Sea fish

Среднее содержание нормируемых токсичных микроэлементов в мышцах и печени исследованных рыб не превышало допустимых уровней, утвержденных СанПиН 2.3.2.1078-01, за исключением общего мышьяка. В мышцах атлантической трески и камбалы-ерша норматив содержания общего мышьяка 5,0 мкг/г сырой массы был незначительно превышен [9]. Накопление в органах и тканях рыб многих микроэлементов обусловлено их способностью замещать другие, близкие по свойствам микроэлементы. Так, например, арсениты, являясь аналогами фосфатов, определяют в известной степени накопление мышьяка в организме гидробионтов. Следует отметить, что мышьяк поглощается водными организмами в основном с пищей, его токсичные неорганические соединения способны быстро образовывать прочные комплексы с низкомолекулярными органическими соединениями, которые не представляют опасности для человека и к тому же быстро выводятся из организма [10].

## Заключение

Сравнивая полученные результаты с опубликованными данными для промысловой ихтиофауны Мирового океана и Баренцева моря [4, 11], можем сделать вывод о незначительном содержании ХОП, ПХБ, тяжелых металлов и микроэлементов в мышцах и печени исследованных рыб. Данные мониторинга являются частью материалов «Характеристика состояния загрязнения элементов экосистемы Баренцева моря» для подготовки годового прогноза состояния запасов промысловых объектов и их возможного вылова. Полученные результаты будут способствовать

повышению эффективности принимаемых управленческих решений и качества экспертных заключений при защите интересов рыбного хозяйства Северо-Европейского бассейна в связи с необходимостью охраны промысловых биологических ресурсов и сохранения биологического разнообразия. В краткосрочной перспективе на состояние запасов промысловых видов водных биологических ресурсов наблюдаемый уровень загрязнения мышц и печени рыб в исследованных районах Баренцева моря существенного влияния не окажет.

## ЛИТЕРАТУРА

**1.** Израэль Ю. А., Цыбань А. В. Антропогенная экология океана. М.: Флинта: Наука, 2009. 532 с. **2.** Мониторинг фонового загрязнения природных сред / под ред. Ю. А. Израэля и Ф. Я. Ровинского. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. Вып. 3. 256 с. **3.** Майстренко В. Н., Клюее Н. А. Эколого-аналитический мониторинг стойких органических загрязнителей. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. 323 с. **4.** Морозов Н. П., Петухов С. А. Микроэлементы в промысловой ихтиофауне Мирового океана. М.: Агропромиздат, 1986. 160 с. **5.** ICES Guidelines for Monitoring Contaminants in Fish and Shelfish and Sediments: Six Year review of ICES Coordinated Monitoring Programmes. Appendix 1 // Coop. Res. Report. 1984. No. 126. P. 96–100. **6.** Manual of Methods in Aquatic Environment Research. Part 2. Guidelines for Use of Biological Accumulators in Marine Pollution Monitoring // FAO Fisheries Technical Paper. 1976. No. 150. 76 p. **7.** Manual of Methods in Aquatic Environment Research. Part 3. Sampling and Analyses of Biological Material // FAO Fisheries Technical Paper. 1976. No. 158. 124 p. **8.** Klassifisering av miljøkvalität i fjorder og kystfarvann. Veiledning / *J. Molvær [et al.]* // SFT Veiledning. 1997. Vol. 97, No. 3. 36 p. (In Norwegian). **9.** Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов (СанПиН 2.3.2.1078-01). М.: Минздрав РФ, 2002. 164 с. **10.** *Мур Дж., Рамамурти С.* Тяжелые металлы в природных водах: контроль и оценка влияния. М.: Мир, 1987. 288 с. **11.** Лаптева А. М. Микроэлементы в промысловых рыбах Баренцева моря (район Шпицбергена) // Комплексные исследования природы Шпицбергена: материалы XI Междунар. науч. конф. (Мурманск, 1–3 ноября 2012 г.). М.: ГЕОС, 2012. Вып. 11. С. 141–146.

# Сведения об авторах

*Жилин Андрей Юрьевич* — кандидат химических наук, заведующий лабораторией прикладной экологии и токсикологии ПИНРО

E-mail: zhilin@pinro.ru

Плотицына Наталья Федоровна — инженер I категории лаборатории прикладной экологии и токсикологии ПИНРО

E-mail: nplotits@pinro.ru

*Лаптева Анна Михайловна* — научный сотрудник лаборатории прикладной экологии и токсикологии ПИНРО

E-mail: lapteva@pinro.ru

# Author Affiliation

Andrey Y. Zhilin — PhD (Chemistry), Head of Laboratory of Applied Ecology and Toxicology, Knipovich Polar Research Institute of Fisheries and Oceanography
E-mail: zhilin@pinro.ru
Natalya F. Plotitsyna — First Category Engineer of Laboratory of Applied Ecology and Toxicology, Knipovich Polar Research Institute of Fisheries and Oceanography
E-mail: nplotits@pinro.ru
Anna M. Lapteva — Researcher of Laboratory of Applied Ecology and Toxicology, Knipovich Polar Research Institute of Fisheries and Oceanography
E-mail: nplotits@pinro.ru
Anna M. Lapteva — Researcher of Laboratory of Applied Ecology and Toxicology, Knipovich Polar Research Institute of Fisheries and Oceanography
E-mail: lapteva@pinro.ru

# Библиографическое описание статьи

Жилин, А. Ю. Мониторинг стойких органических загрязнителей и тяжелых металлов в промысловых рыбах Медвежинско-Шпицбергенского района / А. Ю. Жилин, Н. Ф. Плотицына, А. М. Лаптева // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2018. — № 3 (10). — С. 78–86.

#### Reference

*Zhilin Andrey Y., Plotitsyna Natalya F., Lapteva Anna M.* Monitoring of Persistent Organic Pollutants (Pop's) and Heavy Metals in Commercial Fish from the Medvezhinsky-Spitsbergen Area. *Herald of the Kola Science Centre of the RAS*, 2018, vol. 3 (10), pp. 78–86 (In Russ.).

# ВЛИЯНИЕ РЕАКЦИЙ МОЗГОВОГО НАТРИЙУРЕТИЧЕСКОГО ПЕПТИДА, ИРИСИНА, ЭНДОТЕЛИНА-1 НА СОСТОЯНИЕ ИММУННОЙ СИСТЕМЫ У ЛИЦ, РАБОТАЮЩИХ НА АРХИПЕЛАГЕ ШПИЦБЕРГЕН, В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СРОКА ПРОЖИВАНИЯ\*

# А. В. Самодова, Л. К. Добродеева, В. А. Штаборов, К. О. Пашинская

ФГБУН Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. акад. Н. П. Лаверова РАН, Институт физиологии природных адаптаций

#### Аннотация

Приводятся данные по изучению влияния реакций мозгового натрийуретического пептида. ирисина, эндотелина-1 на состояние иммунной системы у лиц, работающих на арх. Шпицберген, в зависимости от длительности проживания. Обследовано 74 человека — 45 женщин и 29 мужчин в возрасте от 20 до 60 лет — в период полярного дня (июль-август 2017 г.). Установлено, что в ранние периоды проживания на арх. Шпицберген у всех обследуемых лиц данной группы высок риск формирования Т-хелперного некомпенсированного иммунодефицита с резким увеличением содержания в крови мозгового натрийуретического пептида (Nt-pro-BNP) и ирисина, при этом реакции со стороны содержания эндотелина-1 не выявлено. Кроме того, в этот период регистрировали снижение содержания лейкоцитов с нейтро- и лимфопенией, дефицит фагоцитарной защиты, зрелых Т-лимфоцитов, активированных Т-клеток и Т-хелперов. В период 6–12 месяцев риск формирования вторичного экологически зависимого иммунодефицита сохраняется, при этом концентрация Nt-pro-BNP резко снижается, содержание ирисина не изменяется, но повышается концентрация эндотелина-1 в сочетании с нейтро- и лимфопенией. Пребывание на архипелаге более 6 лет ассоциировано с постепенным снижением концентрации в крови ирисина и эндотелина-1. Риск формирования вторичного иммунодефицита снижается до уровня, характерного для северян. Но у 30 % обследованных лиц регистрировали повторный подъем содержания в крови Nt-pro-BNP, свидетельствующий о недостаточности регуляции ренин-ангиотензиновой системы и проявляющийся лейкопенией, дефицитом фагоцитоза и Т-хелперов.

#### Ключевые слова:

мозговой натрийуретический пептид (Nt-pro-BNP), ирисин, эндотелин-1, лимфоциты, нейтрофилы, зрелые Т-лимфоциты, Т-хелперы, активированные Т-лимфоциты, фагоцитоз нейтрофилов.

## INFLUENCE OF BRAIN NATRIURETIC PEPTIDE, IRISIN AND ENDOTHELIN-1 REACTIONS ON THE IMMUNE SYSTEM IN PERSONS WORKING IN THE SVALBARD ARCHIPELAGO DEPENDING ON DURATION OF STAY

Anna V. Samodova, Liliya K. Dobrodeeva, Vyacheslav A. Shtaborov, Ksenia O. Pashinskaya Laverov Federal Research Center for Comprehensive Arctic Studies of RAS, Institute of Physiology of Natural Adaptations

#### Abstract

The article presents data on the effect of brain natriuretic peptide reactions irisin, endothelin-1 on the state of the immune system in people working in the archipelago of Svalbard, depending on duration of stay. 74 people, 45 women and 29 men, aged from 20 to 60 years, during the polar day (July-August 2017) were examined. It was found that in the early period of residence

<sup>\*</sup> Работа выполнена в рамках программы фундаментальных научных исследований по теме лаборатории регуляторных механизмов иммунитета Института физиологии природных адаптаций «Роль внеклеточного пула молекул адгезии и коротких пептидов в формировании и исходе адаптивных реакций человека на изменение светового режима» (0409-2016-0013).

in Svalbard causes the high risk of T-helper non-compensated immune deficiency formation with sharp increase of brain natriuretic peptide (Nt-pro-BNP) and irisin in the blood of all examined persons of the group. The response from the content of endothelin-1 was not detected. In addition, during this period we recorded the decrease of leukocyte content with neutropenia and lymphopenia, deficit of phagocyte protection, mature T lymphocytes, activated T-cells and T-helper cells. After 6-12 months, the risk of forming secondary environmentally dependent immune deficiency retained, the concentration of Nt-pro-BNP decreased sharply, content of irisin stayed the same, but the endothelin-1 concentration increased in conjunction with lymphopenia and neutropenia. The 6-year stay in the archipelago is associated with a gradual decrease of irisin and endothelin-1 in the blood. The risk of forming a secondary immune deficiency decreases to the level of northerners. But 30 % of the persons showed the second rise of Nt-pro-BNP in blood, that indicates a lack of regulation of the renin-angiotensin system and is manifested by leukopenia, lack of phagocytosis and T-helper cells.

# Keywords:

brain natriuretic peptide (Nt-pro-BNP), irisin, endothelin-1, lymphocytes, neutrophils, mature T lymphocytes, T-helper cells, activated T lymphocytes, neutrophil phagocytosis.

# Введение

Защитные иммунные реакции являются частью общей нейроиммунно-эндокринной регуляторной системы, обеспечивающей адаптивный жизнеобеспечивающий ответ в конкретных условиях влияния неблагоприятных факторов.

Изменение соотношения депо клеток крови и циркулирующего пула является основным сигналом для гемодинамической реакции, а снижение содержания лейкоцитов — главным сигналом для поступления в циркуляцию соответствующих клеток из депо [1, 2]. Известно, что основным депо нейтрофилов является капиллярная сеть легких; легкие обладают почти неограниченной депонирующей способностью. Есть предположение, что моноциты способны к рециркуляции. Тканевой пул моноцитов в 3,5 раза превышает содержание тканевых нейтрофилов [3], поэтому миграционные процессы моноцитов из крови могут казаться менее интенсивными и проявляться менее выражено. Существует гипотеза, что моноциты способны к рециркуляции, а также доказано, что лимфоциты не только интенсивно циркулируют, но и способны к рециркуляции [1, 2].

Наиболее ранние адаптивные реакции обеспечиваются катехоламинами, пептидами и пролонгируются глюкокортикоидами. Представляло интерес выяснить взаимосвязь реакций коротких пептидов мозгового натрийуретического пептида, ирисина, эндотелина-1 и иммунной системы у лиц, работающих в условиях арх. Шпицберген.

Короткие пептиды, открытые в 1980-е гг., эффективны в очень малых дозах, не имеют многообразия эффектов, инициируют, как правило, одно действие, что обеспечивает в дальнейшем распространенные реактивные проявления со стороны различных органов и систем. Короткий пептид ирисин индуцирует экспрессию термогенина в клетках жировой ткани, преобразует белую жировую ткань в бурую, в которой жир быстро расщепляется и используется на нужды терморегуляции [4]. Мозговой натрийуретический пептид (Nt-pro-BNP) обеспечивает сохранение внутриклеточного давления путем удержания натрия против градиента плотности [5, 6]. В многочисленных исследованиях доказана взаимосвязь содержания в крови мозгового натрийуретического пептида и тяжести сердечной недостаточности [7]. Выброс Nt-pro-BNP в кровоток стимулируется повышением напряжения мембран, увеличением конечного диастолического давления левого желудочка и нарушением процессов его расслабления [8]. Эндотелин-1 обладает мощным сосудосуживающим действием [9].

Целью работы, исходя из вышесказанного, является изучение влияния срочной реакции мозгового натрийуретического пептида, ирисина, эндотелина-1 на состояние иммунной системы у лиц, работающих на арх. Шпицберген, в зависимости от срока проживания.

# Материал и методы исследования

Обследовали жителей пос. Баренцбург арх. Шпицберген — 45 женщин и 29 мужчин в возрасте от 20 до 60 лет — в период полярного дня (июль-август 2017 г.). Все исследования проводили с согласия волонтеров и в соответствии с требованиями Хельсинкской декларации Всемирной медицинской ассоциации об этических принципах проведения медицинских исследований (2000).

Анализ результатов обследования проводили в зависимости от длительности проживания на архипелаге: до 2 месяцев (n = 21), с 6 месяцев до 1 года (n = 18), с 1,5 до 5,5 лет (n = 23), более 6 лет (n = 12). Возраст лиц в каждой группе составил соответственно: 35,5±2,69; 37,65±2,74; 40,43±2,73 и 55,25±3,01 лет.

Комплекс иммунологического исследования включал изучение гемограммы, фагоцитарной активности нейтрофильных лейкоцитов периферической крови. Количество и соотношение клеток гемограммы подсчитывали в мазках крови, окрашенных по методу Романовского — Гимзы, выделение мононуклеаров из периферической крови проводили по методу А. Боум (1968) [10]. Фагоцитарную активность нейтрофилов изучали после инкубации 100 мкл цитратной крови и равного количества реактива с латексом производства «Реакомплекс» при температуре 37 °C в течение 30 мин. Изучены фенотипы лимфоцитов периферической крови (CD3+, CD4+, CD8+, CD10+, CD19+, CD23+, CD71+, CD95+) методом непрямой иммунопероксидазной реакции (реактивы ООО «Сорбент», г. Москва). Содержание цитокинов IL-1 $\beta$ , TNF- $\alpha$ , IL-6 (Bender Medsystems, Австрия), ирисина, эндотелина-1 и мозгового натрийуретического пептида (Nt-pro-BNP) определяли методом иммуноферментного анализа в сыворотке крови на автоматическом иммуноферментном анализаторе Evolis фирмы Bio-RAD (Германия). Концентрацию циркулирующих иммунных комплексов определяли стандартным методом преципитации с использованием 3,5, 4, 7,5 % ПЭГ-6000.

Математический и статистический анализы результатов исследования проводили на компьютере IBM/AT-Pentium 4 с использованием пакета прикладных программ Microsoft Excel 2010 (США) и Statistica 7.0 (StatSoft, США). По каждому из перечисленных показателей для различных групп соотношения содержания свободных и мембранных форм рецепторов были рассчитаны параметры описательной статистики (M — среднее арифметическое значение,  $\sigma$  — стандартное отклонение, m — стандартная ошибка среднего, Md — медиана, R — размах, W — коэффициент вариации, границы 95 %-го доверительного интервала). Проверка законов распределения значений иммунологических показателей выполнялась с использованием статистического критерия Пирсона. Проверка нулевой гипотезы о равенстве всех средних в исследуемых группах осуществлялась с использованием однофакторного дисперсионного анализа. В условиях неподчинения данных закону нормального распределения сравнение двух разных групп по количественным признакам проводилось с использованием непараметрического критерия Манна — Уитни. Критический уровень значимости (p) в данной работе принимался равным 0,05.

# Результаты исследований и их обсуждение

В ранние сроки (до 2 месяцев) проживания на Шпицбергене даже в летний период резко увеличивается в крови содержание Nt-pro-BNP (до 81,94±20,54 фмоль/мл) по сравнению с таковым в среднем (26,97±10,81 фмоль/мл). Повышенные концентрации (100 фмоль/мл и более) установлены в 9 случаях из 21. Подобные результаты были получены нами при обследовании молодых лиц, спортсменов-лыжников, рабочих целлюлозного производства, проживающих в г. Архангельске и заполярном пос. Ревда Мурманской обл. Так, среднее содержание Nt-pro-BNP в крови у спортсменов составило 91,30±18,61 фмоль/мл, у жителей Заполярья и рабочих целлюлозно-бумажного комбината средние концентрации пептида были выше и практически не отличались в зависимости от принадлежности к группе обследования — 156,11±30,94 и

146,30±40,63 фмоль/мл соответственно. Повышенные концентрации Nt-pro-BNP в крови (более 200 фмоль/мл) выявлены в 11,11 % у молодых лиц в возрасте 22–25 лет спортсменов лыжников. Среди взрослых жителей заполярного поселка (35–45 лет) частота выявления аномально высоких уровней Nt-pro-BNP в крови была в 2 раза выше (22,36 %), практически такой же уровень повышенных концентраций натрийуретического пептида (23,81 %) установлен при обследовании рабочих варочного цеха целлюлозного производства (30–55 лет) в г. Архангельске [11]. Параллельно регистрировали повышение содержания ирисина у всех обследуемых данной группы. Реакции со стороны содержания эндотелина-1 не установлено.

Итак, наиболее ранние пептидные реакции сохранения гомеостаза у прибывших на Шпицберген ассоциированы с необходимостью обеспечения стабильности осмотического давления и увеличения теплопродукции. В этот период регистрировали снижение содержания лейкоцитов за счет всех типов ядросодержащих клеток с нейтропенией у 7 человек, в том числе с лимфопенией у 5 обследуемых. В этот период заметно снижается уровень реактивности иммунной системы с формированием дефицита фагоцитарной защиты (6 чел.), зрелых Т-лимфоцитов (20 чел.), активированных Т-клеток (17 чел.) и Т-хелперов (11 чел.). Другими словами, этот период адаптации чрезвычайно рискован в отношении формирования Т-хелперного некомпенсированного иммунодефицита.

В период проживания на Шпицбергене в течение 6–12 месяцев содержание Nt-pro-BNP резко снижается, концентрации ирисина фактически не изменяются, но регистрируется повышение содержания эндотелина-1. Это означает, что исчезает необходимость регуляции сохранения натрия против градиента плотности для стабильности осмотического давления, но сохраняется потребность в дополнительной теплопродукции и появляется способность вазодилятации эндотелином. Частота выявления нейтро- и лимфопении в этот период остается такой же, как в ранние сроки пребывания в Арктике. Изменений со стороны содержания и уровня активированности иммунокомпетентных клеток по сравнению с малым сроком проживания в Арктике фактически не происходит, и риск формирования вторичного иммунодефицитного состояния сохраняется (у 8 из 12 обследуемых лиц). Повышение содержания эндотелина-1 отражает увеличенную потребность тканевой миграции иммунокомпетентных клеток и пополнения циркулирующего пула клеток из депо.

Пребывание на архипелаге более 6 лет ассоциировано с постепенным снижением содержания в крови ирисина и эндотелина-1, что свидетельствует о формировании стабильной адаптации теплорегуляционных механизмов без участия бурой жировой ткани и регуляции увеличения клеточной миграции в ткани активностью белков системы комплемента, хемокинов и молекул адгезии [12]. Эффективность иммунной защиты к этому моменту несколько повышается, риск формирования вторичного иммунодефицита снижается до уровня, характерного для северян.

У большей части обследуемых людей этой группы концентрация Nt-pro-BNP существенно не возрастает, но у 4 человек из 12 в этот период снова регистрировали повышение его содержания в крови. Мы склонны рассматривать эту реакцию в качестве риска нарушения гемодинамики с возможными признаками перегрузки миокарда, гипертрофии левого желудочка и недостаточности ренин-ангиотензиновой системы, обеспечивающей уровень оксигенации тканей [8, 13]. У лиц данной группы с содержанием Nt-pro-BNP более 50 фмоль/мл частота регистрации нейтропении и дефицита фагоцитарной защиты выше в 1,5 раза.

# Заключение

Адаптация человека в неблагоприятных климатических условиях на арх. Шпицберген ассоциирована с реакциями со стороны мозгового натрийуретического пептида, ирисина и эндотелина-1. Обеспечение стабильности осмотического давления сохранением содержания натрия против градиента плотности и дополнительная теплопродукция, необходимые в ранние сроки пребывания в Арктике, ассоциированы с резким увеличением миграции клеток крови в ткани, что проявляется нейтро-, лимфопенией и иммунодефицитными состояниями. К концу первого года пребывания в Арктике еще сохраняется потребность к активизации теплопродукции и присоединяется реакция эндотелина-1 для пополнения циркулирующего пула клеток крови из депо. После 6 лет проживания на Шпицбергене все изучаемые реакции стабилизируются. Но в ряде случаев регистрировали повторный подъем содержания в крови натрийуретического пептида, что свидетельствует о недостаточности регуляции ренин-ангиотензиновой системы, при этом появляются и лейкопении, и дефицит иммунной защиты с дефицитом фагоцитоза и T-хелперов.

# ЛИТЕРАТУРА

1. Buckton K. E., Brown W. M., Smith P. G. Lymphocyte survival in nen treated with X-rays for ankylosing spondylitis // Nature. 1967. Vol. 214. P. 470-473. 2. Heller P. The blood and blood forming organs // The Year Book of Medicine. 1972. P. 69-86. 3. Meuret G., Hoffman G. Monocyte kinetic studies in normal and disease states // Brit. J. Hematol. 1973. Vol. 24. P. 275-279. 4. Exercise Induces Hippocampal BDNF through a PGC-12/FNDC5 Pathway / C. D. Wrann [et al.] // Cell Metabolism. 2013. Vol. 18, No. 5. P. 649–659. 5. Мозговой натрийдиуретический пептид-генетический код сердечной недостаточности / О. В. Щербатюк [и др.] // Вестник Рос. Воен.-мед. акад. 2006. № 2. С. 100. 6. Динамика и прогностическое значение мозгового натрийуретического пептида и С-реактивного белка при остром инфаркте миокарда в зависимости от тактики лечения / М. Х. Макоева [и др.] // Клиническая лабораторная диагностика. 2014. № 2. С. 23. 7. Национальные рекомендации ВНОК и ОССН по диагностике и лечению ХСН // Сердечная недостаточность: материалы конф. 2010. Т. 1. С. 3. 8. Yao Y., Scheng Z., Li Y. Tissue kallikrein promotes cardiac neovascularization by enhancing endothelial progenitor cell functional capacity // Hum. Gen. Ther. 2012. Vol. 23, No. 8. P. 859. 9. Шурыгин М. Г. Экспрессия эндотелина при экспериментальном инфаркте миокарда в условиях измененной концентрации фибробластического и вазоэндотелиального факторов роста // Бюлл. ВСНЦ СО РАМН. 2013. № 1 (89). С. 125–129. 10. Boyum A. Separation of leukocytes from blood and bone marrow // S. Cand. And Clin. Lab. Invest. 1968. Vol. 21. P. 97. 11. Добродеева Л. К., Самодова А. В., Карякина О. Е. Взаимосвязь уровней содержания мозгового натрийуретического пептида в крови и активности иммунных реакций у людей // Физиология человека. 2016. Т. 42, № 6. С. 106–115. 12. Interactions between neutrophils and endothelial cells / C. Godin, A. Caprani, J. Dufaux, P. Flaud // J. Cell Science. 1993. Vol. 106. P. 441. 13. Минушкина Л. О., Затейщикова А. А., Хотченкова Н. В. Активность ренин-альдостероновой системы и особенности структуры и функции миокарда левого желудочка у больных артериальной гипертензией // Кардиология. 2000. № 9. С. 23.

# Сведения об авторах

*Самодова Анна Васильевна* — кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, зав. лабораторией регуляторных механизмов иммунитета Института физиологии природных адаптаций Федерального центра комплексного изучения Арктики РАН им. акад. Н. П. Лаверова E-mail: annapoletaeva2008@yandex.ru

Добродеева Лилия Константиновна — доктор медицинских наук, профессор, заслуженный деятель науки, главный научный сотрудник лаборатории регуляторных механизмов иммунитета, директор Института физиологии природных адаптаций Федерального центра комплексного изучения Арктики РАН им. акад. Н. П. Лаверова

E-mail: dobrodeevalk@mail.ru

Штаборов Вячеслав Анатольевич — кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории экологической иммунологии Института физиологии природных адаптаций Федерального центра комплексного изучения Арктики РАН им. акад. Н. П. Лаверова

E-mail: schtaborov@mail.ru

Пашинская Ксения Олеговна — старший лаборант лаборатории регуляторных механизмов иммунитета Института физиологии природных адаптаций Федерального центра комплексного изучения Арктики РАН им. акад. Н. П. Лаверова

E-mail: nefksu@mail.ru

# Author Affiliation

Anna V. Samodova — PhD (Biology), Leading Researcher, Head of Laboratory of Regulatory Mechanisms of Immunity, Institute of Physiology of Natural Adaptations of Laverov Federal Research Center for Comprehensive Arctic Studies of RAS

E-mail: annapoletaeva2008@yandex.ru

*Liliya K. Dobrodeeva* — Dr. Sci. (Medicine), Professor, Honored Worker of Science, Chief Researcher of Laboratory of Regulatory Mechanisms of Immunity, Director of the Institute of Physiology of Natural Adaptations of Laverov Federal Research Center for Comprehensive Arctic Studies of RAS

E-mail: dobrodeevalk@mail.ru

*Vyacheslav A. Shtaborov* — PhD (Biology), Senior Researcher of Laboratory of Environmental Immunology of the Institute of Physiology of Natural Adaptations of Laverov Federal Research Center for Comprehensive Arctic Studies of RAS

E-mail: schtaborov@mail.ru

Ksenia O. Pashinskaya — Senior Laboratory Assistant of Laboratory of Regulatory Mechanisms of Immunity of the Institute of Physiology of Natural Adaptations of Laverov Federal Research Center for Comprehensive Arctic Studies of RAS

E-mail: nefksu@mail.ru

# Библиографическое описание статьи

Влияние реакций мозгового натрийуретического пептида, ирисина, эндотелина-1 на состояние иммунной системы у лиц, работающих на архипелаге Шпицберген, в зависимости от срока проживания / А. В. Самодова [и др.] // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2018. — № 3 (10). — С. 87–92.

# Reference

Samodova Anna V., Dobrodeeva Liliya K., Shtaborov Vyacheslav A., Pashinskaya Ksenia O. Influence of Brain Natriuretic Peptide, Irisin and Endothelin-1 Reactions on the Immune System in Persons Working in the Svalbard Archipelago, Depending on Duration of Stay. *Herald of the Kola Science Centre of the RAS*, 2018, vol. 3 (10), pp. 87–92 (In Russ.).

# DOI: 10.25702/KSC.2307-5228.2018.10.3.93-101 УДК 551.513:551.515.2

# ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИРКУЛЯЦИИ НИЖНЕЙ И СРЕДНЕЙ АРКТИЧЕСКОЙ АТМОСФЕРЫ И ВЛИЯНИЯ НА НЕЕ ГОРНЫХ МАССИВОВ ШПИЦБЕРГЕНА\*

#### И. В. Мингалев, К. Г. Орлов, В. С. Мингалев

ФГБНУ «Полярный геофизический институт», г. Апатиты

#### Аннотация

Циркуляция арктической нижней и средней атмосферы исследуется при помощи негидростатической математической модели, разработанной ранее в Полярном геофизическом институте. Используемая математическая модель основывается на численном решении системы уравнений газовой динамики в слое, окружающем Землю глобально и простирающемся от ее поверхности до высоты 75 км. Математическая модель позволяет рассчитывать зависящие от времени трехмерные распределения газодинамических параметров атмосферы. Результаты расчетов показали, что рельеф планеты, в частности горные массивы Шпицбергена, должен оказывать заметное влияние на циркуляцию арктической нижней и средней атмосферы.

#### Ключевые слова:

арктическая атмосфера, циркуляция атмосферы, математическое моделирование.

# NUMERICAL MODELING OF THE CIRCULATION OF THE ARCTIC LOWER AND MIDDLE ATMOSPHERE AND ITS DEPENDENCE ON THE SVALBARD'S MOUNTAINS

#### Igor V. Mingalev, Konstantin G. Orlov, Victor S. Mingalev

Polar Geophysical Institute, Apatity

#### Abstract

The circulation of the arctic lower and middle atmosphere is studied with the help of the non-hydrostatic mathematical model, developed earlier in the Polar Geophysical Institute. The utilized mathematical model is based on the numerical solution of the system of gas dynamic equations in the layer surrounding the Earth globally and stretching from its surface up to the altitude of 75 km. The relief of a planet is taken into account by the applied mathematical model. The mathematical model produces three-dimensional time-dependent distributions of the gas dynamic parameters of the atmosphere. To investigate the influence of the relief of a planet on the circulation of the arctic lower and middle atmosphere, calculations were made for two distinct cases. The relief of the planet was taken into account for the first case. Unlike, the Earth's surface was assumed to be smooth for the second case. Simulations were performed for the winter period in the northern hemisphere (January). Simulation results indicated that the relief of the planet, in particular the Svalbard's mountains, have to influence conspicuously on the circulation of the arctic lower and middle atmosphere.

#### Keywords:

arctic atmosphere, atmospheric circulation, mathematical modeling.



#### Введение

Для исследования динамики атмосферы в последние годы, наряду с теорией и экспериментом, стал успешно применяться метод математического моделирования. Несколько математических моделей общей циркуляции земной атмосферы было разработано в разных

\* Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 18-29-03022.

странах в течение последних четырех десятилетий (см., например, работы [1–8]). В Полярном геофизическом институте также была разработана математическая модель общей циркуляции земной атмосферы, которая неоднократно усовершенствовалась и использовалась для исследования системы горизонтального и вертикального ветра в нижней и средней атмосфере Земли. В первоначально разработанном варианте модели, который был впервые описан в работе [9], считалось, что земная поверхность является сферической. Позже модель была усовершенствована таким образом, что в ней земная поверхность стала являться поверхностью сплюснутого с полюсов эллипсоида вращения [10], что лучше соответствует реальности. Затем модель была усовершенствована за счет учета самосогласованного теплового режима, и разные варианты модели использовались для исследования глобальной циркуляции земной атмосферы [11–17], однако в них земная поверхность считалась гладкой. Совсем недавно модель была усовершенствована за счет учета в ней рельефа поверхности Земли [18]. Именно этот вариант модели, учитывающий рельеф планеты, используется в настоящей работе.

# Математическая модель

Математическая модель общей циркуляции земной атмосферы, используемая в настоящей работе, основывается на решении системы нестационарных трехмерных уравнений переноса, которая включает в себя уравнения Навье — Стокса для сжимаемого вязкого газа, а также уравнения неразрывности и теплопроводности для него. Модель позволяет рассчитывать трехмерные глобальные распределения зональной, меридиональной и вертикальной компонент скорости ветра атмосферного газа, его температуры и плотности на уровнях нижней и средней атмосферы Земли. Рассчитываемая в модели вертикальная скорость газа находится не из условия гидростатического равновесия, как это делается в большинстве моделей атмосферной циркуляции, а путем численного решения полного уравнения движения для вертикальной составляющей скорости без пренебрежения какими-либо членами. Поэтому применяемая численная модель является негидростатической, что позволяет получать с ее помощью более точные результаты, чем с использованием аналогичных гидростатических моделей.

В применяемом варианте математической модели температура воздуха определяется путем решения уравнения теплопроводности для него. При вычислении входящей в это уравнение удельной мощности нагрева-охлаждения атмосферного газа за счет поглощения-испускания электромагнитного излучения использовано релаксационное приближение, в котором эта удельная мощность считается пропорциональной разности между рассчитываемой температурой и так называемой релаксационной температурой, которая задается. В качестве последней берется глобальное распределение температуры, определяемое по эмпирической модели NRLMSISE-00 [19].

Метод конечных разностей применяется для численного решения моделирующих уравнений, и при этом используется нерегулярная треугольная сетка в пространстве географических координат широта-долгота. Шаги сетки по долготе и широте задаются одинаковыми и равными 0,47°, по высоте шаг сетки равен 200 м. Математическая модель позволяет рассчитывать зависящие от времени трехмерные распределения газодинамических параметров атмосферы в слое, окружающем Землю глобально и простирающемся от ее поверхности до сферы, проходящей через уровень 75 км над поверхностью океана на экваторе. Считается, что Земля имеет форму сплюснутого с полюсов эллипсоида вращения. Граничные условия задаются таким образом, чтобы выполнялся закон сохранения массы в области расчетов. Подробное описание применяемой математической модели можно найти в работах [17, 18].

#### Результаты расчетов и их обсуждение

В настоящей работе представляются и обсуждаются результаты расчетов системы ветров в земной арктической атмосфере, полученные при помощи двух вариантов описанной выше математической модели, в первом из которых поверхность Земли считается гладкой, а во втором, недавно усовершенствованном, варианте модели учитывается рельеф земной поверхности. Используемый в модели рельеф земной поверхности Северного полушария показан на карте, приведенной на рис. 1. Архипелаг Шпицберген лежит к северу от Скандинавии между 76°26' и 80°50' с. ш. и между 10° и 32° в. д.



Рис. 1. Используемый в модели рельеф Северного полушария Земли. Цвет показывает отклонение от уровня поверхности океана, м

Fig. 1. The utilized relief of the North Hemisphere of the Earth. The colouration of the figure indicates the distance from the sea level in meters

Расчеты по двум используемым вариантам математической модели были выполнены при одинаковых входных параметрах модели, а также начальных и граничных условиях, и было проведено сравнение полученных результатов. Расчеты проводились для январских условий, когда в Северном полушарии зима.

Оказалось, что полученные по двум используемым вариантам математической модели результаты обладают рядом общих свойств. Так, в обоих случаях после начала расчетов пространственные распределения вычисляемых параметров начинают резко отходить от своих первоначальных значений, которые были заданы начальными условиями. В ходе дальнейших расчетов их изменения постепенно принимают квазипериодический характер, отражающий их суточные колебания. По истечении примерно 1000 часов физического времени результаты расчетов начинают хорошо воспроизводить суточную вариацию атмосферных параметров, которая обусловлена вращением Земли вокруг своей оси.

После того как расчеты вышли на квазипериодический режим, для момента 20.00 UT мы рассчитали и построили на разных высотных уровнях пространственные распределения скорости горизонтального и вертикального ветра, полученные по двум вариантам математической модели. Такие пространственные распределения скоростей ветра для высоты 20 км приведены на рис. 2 и 3, а для высоты 60 км они приведены на рис. 4 и 5, причем результаты расчетов представлены в той же системе координат, которая использовалась на рис. 1.

Расчеты показали, что полученные по двум используемым вариантам математической модели скорости горизонтального ветра являются сильно изменяющимися функциями широты, долготы и высоты. Существуют ограниченные по размерам горизонтальные области, в которых значения горизонтальной скорости имеет резкие градиенты. Горизонтальная скорость ветра может иметь сильно отличающиеся направления в точках, отстоящих друг от друга на не очень большие расстояния. Вертикальная скорость атмосферного газа может включать противоположные направления в имеющих различную форму горизонтальных областях.

В высоких широтах на уровне стратосферы горизонтальная скорость атмосферного газа имеет преимущественное направление на восток (рис. 2), причем такое движение воздушных масс получилось в модельных расчетах, выполненных как с учетом рельефа, так и в приближении гладкой земной поверхности. Это движение воздушных масс формирует так называемый зимний циркумполярный циклон, о существовании которого в арктической атмосфере в зимний период

известно из многолетних наблюдений [20–22]. Тот факт, что в модельных расчетах воспроизводится зимний циркумполярный циклон, является одним из свидетельств адекватности применяемой математической модели.





Fig. 2. The simulated distributions of the vector of the horizontal component of the atmospheric gas velocity at the North Hemisphere at the altitude of 20 km. The relief of the planet is taken into account (top panel) and the Earth's surface is assumed to be smooth (bottom panel). The colouration of the figures indicates the module of the velocity in m/s





Fig. 3. The simulated distributions of the vertical component of the atmospheric gas velocity at the North Hemisphere at the altitude of 20 km. The relief of the planet is taken into account (top panel) and the Earth's surface is assumed to be smooth (bottom panel). The colouration of the figures indicates the quantity of the velocity in m/s, with the positive direction of the vertical velocity being upward



Рис. 4. Рассчитанные распределения вектора горизонтальной составляющей скорости атмосферного газа в Северном полушарии на высоте 60 км, полученные с учетом рельефа (вверху) и в приближении гладкой земной поверхности (внизу). Цвет показывает абсолютную величину скорости, м/с

Fig. 4. The simulated distributions of the vector of the horizontal component of the atmospheric gas velocity at the North Hemisphere at the altitude of 60 km. The relief of the planet is taken into account (top panel) and the Earth's surface is assumed to be smooth (bottom panel). The colouration of the figures indicates the module of the velocity in m/s



Рис. 5. Рассчитанные распределения вертикальной составляющей скорости атмосферного газа в Северном полушарии на высоте 60 км, полученные с учетом рельефа (вверху) и в приближении гладкой земной поверхности (внизу). Цвет указывает значение скорости (м/с), причем положительной считается направленная вверх скорость

Fig. 5. The simulated distributions of the vertical component of the atmospheric gas velocity at the North Hemisphere at the altitude of 20 km. The relief of the planet is taken into account (top panel) and the Earth's surface is assumed to be smooth (bottom panel). The colouration of the figures indicates the quantity of the velocity in m/s, with the positive direction of the vertical velocity being upward

В целом результаты расчетов горизонтальной циркуляции арктической атмосферы, полученные как с учетом рельефа, так и в приближении гладкой земной поверхности, на разных высотных уровнях нижней и средней атмосферы Земли оказались качественно похожими друг на друга, однако между ними обнаруживаются и определенные различия.

Так, на высотах нижней и средней атмосферы Северного полушария существуют горизонтальные области, в которых величины горизонтальной компоненты скорости воздушных масс, рассчитанные с учетом рельефа земной поверхности, имеют более высокие значения, чем величины этой компоненты скорости воздуха, рассчитанные в приближении гладкой земной поверхности. Наличие таких горизонтальных областей можно обнаружить, в частности, на рис. 2 и 4, где они присутствуют на широтах, больших 40°. Различие в величинах горизонтальных скоростей в этих областях может достигать нескольких десятков и даже 100 м/с (рис. 4). Оказывается, что некоторые из этих областей находятся непосредственно над располагающимися на земле горными массивами, в частности, над покрытой горами Гренландией, наивысшая вершина которой имеет высоту 3694 м.

Можно заметить, что различия в величинах горизонтальных скоростей в этих областях возрастают с повышением их высоты. Например, над некоторыми районами Гренландии на высоте 20 км эти они составляют порядка 10 м/с, а на высоте 60 км — превышают 100 м/с. Оказывается, что и горные массивы Шпицбергена, максимальная вершина которых достигает 1712 м, могут повлиять на величины горизонтальных скоростей над ними. Как видно из рис. 4, над южными районами Шпицбергена величины горизонтальной компоненты скорости воздушных масс, рассчитанные с учетом рельефа земной поверхности, могут превышать 200 м/с, в то время как величины этой компоненты скорости воздуха, рассчитанные в приближении гладкой земной поверхности, имеют в этих районах меньшие на несколько десятков метров в секунду значения.

Обратимся теперь к рассмотрению различий рассчитанных вертикальных составляющих скорости атмосферного газа. Из рис. З видно, что на высоте 20 км на арктических широтах, превышающих примерно 70°, рассчитанные в приближении гладкой земной поверхности вертикальные составляющие скорости атмосферного газа направлены вниз, а их величины не превышают 10 см/с. Рассчитанные же с учетом рельефа земной поверхности вертикальные скорости воздуха направлены вниз на широтах, превышающих примерно 80°, где отсутствуют горы. На чуть менее северных широтах эти вертикальные скорости воздуха могут быть направлены не только вниз, но и вверх в некоторых зонах, в частности, над южными районами Гренландии, однако величины этих скоростей небольшие, они не превышают 15 см/с.

На более высоких уровнях различия в величинах вертикальных скоростей, рассчитанных с учетом и без учета рельефа земной поверхности, могут достигать заметно больших значений. Из рис. 5, например, видно, что на высоте 60 км на арктических широтах, превышающих примерно 70°, различия в величинах вертикальных скоростей, рассчитанных с учетом и без учета рельефа земной поверхности, могут превышать 1 м/с в некоторых зонах, а их направления могут быть противоположными. Можно заметить, что на высоте 60 км над Шпицбергеном вертикальные скорости, рассчитанные в приближении гладкой земной поверхности, направлены вниз и имеют значения, превышающие 0,5 м/с, в то время как вертикальные скорости, рассчитанные с учетом рельефа земной поверхности, направлены вверх и их величины достигают 0,5 м/с. Таким образом, на высоте 60 км над Шпицбергеном различия вертикальных скоростей, рассчитанных с учетом и без учета и без учета рельефа земной поверхности, направлены вверх и их величины достигают 0,5 м/с. Таким образом, на высоте 60 км над Шпицбергеном различия вертикальных скоростей, рассчитанных с учетом и без учета рельефа земной поверхности, могут превышать 1 м/с, что является весьма большой величиной по сравнению с характерными для этого уровня значениями.

Как показали модельные расчеты, на высотах нижней и средней атмосферы Северного полушария существуют горизонтальные области, в частности располагающиеся над горными массивами, в которых различия в величинах горизонтальной и вертикальной компонент скорости воздушных масс, рассчитанных с учетом и без учета рельефа земной поверхности, возрастают с повышением высоты. Этот факт кажется удивительным, так как при этом увеличивается расстояние от самих гор, являющихся причиной этих различий. Объяснение этого удивительного факта заключается, по-видимому, в следующем. Горизонтальные потоки воздуха, набегающие на горные массивы, порождают возмущения в виде вертикальных потоков над горами. Поскольку плотность атмосферы убывает с высотой, то эти возмущения увеличиваются по амплитуде с возрастанием высоты. Поэтому полученные в модельных расчетах различия в величинах вертикальных скоростей, рассчитанных с учетом и без учета рельефа земной поверхности, оказались возрастающими с повышением высоты. А поскольку вертикальные скорости существенно влияют на пространственные распределения горизонтальных скоростей, то и последние из упомянутых распределения претерпевают изменения, увеличивающиеся с высотой. Благодаря именно вертикальным движениям атмосферного газа осуществляется влияние рельефа земной поверхности на глобальную циркуляцию средней атмосферы.

# Заключение

То, что рельеф земной поверхности оказывает влияние на систему ветров в самых нижних слоях атмосферы, является очевидным фактом, поскольку существуют горные массивы, достигающие высот в несколько километров. Более сложным является вопрос о том, как влияет рельеф земной поверхности на циркуляцию тех слоев атмосферы, которые располагаются выше самых высоких гор. Изучению именно этого вопроса для арктической атмосферы посвящена настоящая работа, в которой для этого исследования применяется метод математического моделирования. Использована негидростатическая математическая модель горизонтального и вертикального ветра в нижней и средней атмосфере Земли, которая была ранее разработана в Полярном геофизическом институте. Данная модель основывается на решении системы нестационарных трехмерных уравнений переноса для атмосферного газа и позволяет рассчитывать пространственно трехмерные распределения газодинамических параметров атмосферы на высотах до 75 км. Для исследования влияния рельефа планеты на циркуляцию арктической атмосферы были проведены расчеты для двух различных вариантов. В первом варианте рельеф планеты учитывался, во втором, напротив, земная поверхность считалась гладкой. Расчеты проводились для зимнего периода в Северном полушарии (для условий января).

Результаты численного моделирования показали, что главный фактор, который влияет на формирование горизонтальной циркуляции арктической атмосферы, — это пространственная неоднородность распределения температуры атмосферного газа, благодаря которой, в частности, возникает циркумполярный циклон в зимний период в Северном полушарии.

Результаты расчетов также показали, что рельеф планеты должен оказывать заметное влияние на пространственные распределения скорости горизонтального ветра в атмосфере Земли не только в прилегающем к земной поверхности слое атмосферы, но и на вышележащих уровнях средней атмосферы. Это воздействие осуществляется благодаря возмущениям вертикальных движений атмосферного газа, которые возникают в приземном слое в результате взаимодействия набегающих горизонтальных ветров с горными массивами. Возникшие возмущения вертикальных движений передаются вверх, причем их амплитуды возрастают с высотой вследствие происходящего при этом уменьшения плотности атмосферы. Возмущенные вертикальные движения атмосферного газа приводят к изменениям горизонтальной циркуляции атмосферы в имеющих ощутимые размеры областях, причем эти изменения увеличиваются с возрастанием высоты.

Расчеты показали, что горные массивы Гренландии и Шпицбергена способны изменить значения величин горизонтальной скорости ветра над ними на высотах средней атмосферы на десятки и даже сотню метров в секунду по сравнению с теми значениями, которые были бы, если бы этих горных массивов не было.

Можно отметить, что установление факта заметного влияния рельефа планеты на систему ветров в земной арктической атмосфере и физическое объяснение механизма, посредством которого это влияние осуществляется, оказалось возможным благодаря тому, что примененная математическая модель циркуляции атмосферы является негидростатической, что позволяет получать с ее помощью результаты, недостижимые для аналогичных гидростатических моделей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Manabe S., Hahn D. G. Simulation of Atmospheric Variability // Monthly Weather Review. 1981. Vol. 109, No. 11. P. 2260-2286. 2. Марчук Г. И., Дымников В. П., Залесный В. Б. Математические модели в геофизической гидродинамике и численные методы их реализации. Л.: Гидрометеоиздат. 1987. 296 с. 3. A General Circulation Model Simulation of the Springtime Antarctic Ozone Decrease and Its Impact on Mid-Latitudes / D. Cariolle [et al.] // J. Geophys. Res. 1990. Vol. 95, No. 2. P. 1883–1898. 4. The Impact of Upper-Tropospheric Aerosol on Global Atmospheric Circulation / H. F.Graf [et al.] // Annales Geophys. 1992. Vol. 10, No. 9. P. 698–707. 5. On the Response of a Three-Dimensional General Circulation Model to Imposed Changes in the Ozone Distribution / B.Christiansen [et al.] // J. Geophys. Res. 1997. Vol. 102, No. D11. P. 13051-13078. 6. Harris M. J., Arnold N. F., Aylward A. D. A Study into the Effect of the Diurnal Tide on the Structure of the Background Mesosphere and Thermosphere Using the New Coupled Middle Atmosphere and Thermosphere (CMAT) General Circulation Model // Annales Geophys. 2002. Vol. 20, No. 2. P. 225–235. 7. The Climate during Maunder Minimum: A Simulation with Freie Universitat Berlin Climate Middle Atmosphere Model (FUB-CMAT) / U. Langematz [et al.] // J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2005. Vol. 67, No. 1–2. P. 55–69. 8. WACCM Simulations of the Mean Circulation and Trace Species Transport in the Winter Mesosphere / A. K.Smith fet al.] // J. Geophys. Res. 2011. Vol. 116D, No. 20, Article IDD20115. 17 p. 9. Mingalev I. V., Mingalev V. S. A numerical global model of the horizontal and vertical wind in the lower and middle atmosphere // Proc. of the 24th Annual Seminar on Physics of Auroral Phenomena (Apatity, 27 February - 2 March, 2001). Apatity, 2001. P.140-143. 10. Мингалев И. В., Мингалев В. С. Модель общей циркуляции нижней и средней атмосферы Земли при заданном распределении температуры // Математическое моделирование. 2005. Т. 17, №5. С. 24-40. 11. Mingalev I. V., Mingalev V. S., Mingaleva G. I. Numerical simulation of the global distributions of the horizontal and vertical wind in the middle atmosphere using a given neutral gas temperature field // J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Phys. 2007. Vol. 69, No. 4/5. P. 552-568. 12. Mingalev I. V., Mingalev O. V., Mingalev V. S. Model simulation of the global circulation in the middle atmosphere for January conditions // Advances in Geosciences. 2008. Vol. 15, No. 4. P. 11–16. 13. Mingalev I. V., Mingalev V. S., Mingaleva G. I. Numerical simulation of the global neutral wind system of the Earth's middle atmosphere for different seasons // Atmosphere. 2012. Vol. 3. P. 213-228. 14. Mingalev I., Mingalev V. Numerical modeling of the influence of solar activity on the global circulation in the Earth's mesosphere and lower thermosphere // Intern. J. Geophys. 2012. Article ID106035. 15 p. 15. Mingalev I., Mingaleva G., Mingalev V. A simulation study of the effect of geomagnetic activity on the global circulation in the Earth's middle atmosphere // Atmospheric and Climate Sciences. 2013. Vol. 3, No. 3A. P. 8–19. URL: http://www.scirp.org/journal/acs. 16. Mingalev I., Orlov K., Mingalev V. A computational study of the transformation of global gas flows in the Earth's atmosphere over the course of a year // Open J. Fluid Dynamics. 2014. Vol. 4. P. 379-402. URL: http://dx.doi.org/10.4236/ojfd.2014.44029. 17. Mingalev I. V., Orlov K. G., Mingalev V. S. A computational study of the effect of geomagnetic activity on the planetary circulation of the Earth's atmosphere // J. Advances in Physics. 2016. Vol. 12, No. 4. P. 4451–4459. 18. Газодинамическая модель общей циркуляции нижней и средней атмосферы Земли / Б. Н. Четверушкин [и др.] // Математическое моделирование. 2017. Т. 29, № 8. C. 59-73. 19. NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues / J. M. Picone [et al.] // J. Geophys. Res. 2002. Vol. 107А, (SIA15). Р. 1–16. 20. Кац А. Л. Циркуляция в стратосфере и мезосфере. Л.: Гидрометеоиздат, 1968. 203 с. 21. Погосян Х. П. Общая циркуляция атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1972. 55 с. 22. Кантер Ц. А. Вертикальный профиль циркумполярного движения в 60-километровом слое атмосферы // Исследование динамических процессов в верхней атмосфере. М.: Гидрометеоиздат, 1983. С. 215-222.

# Сведения об авторах

*Мингалев Игорь Викторович* — доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Полярного геофизического института

E-mail: mingalev\_i@pgia.ru

*Орлов Константин Геннадьевич* — кандидат физико-математических наук, ученый секретарь Полярного геофизического института

# E-mail: orlov@pgia.ru

*Мингалев Виктор Степанович* — доктор физико-математических наук, профессор, зав. сектором вычислительного эксперимента Полярного геофизического института

E-mail: mingalev@pgia.ru

# Author Affiliation

*Igor V. Mingalev* — Dr. Sci. (Physics & Mathematics), Leading Researcher of the Polar Geophysical Institute E-mail: mingalev\_i@pgia.ru *Konstantin G. Orlov* — PhD (Physics & Mathematics), Scientific Secretary of the Polar Geophysical Institute E-mail: orlov@pgia.ru *Victor S. Mingalev* — Dr. Sci. (Physics & Mathematics), Professor, Head of Sector of Computational Experiment, Polar Geophysical Institute E-mail: mingalev@pgia.ru

# Библиографическое описание статьи

*Мингалев, И. В.* Численное моделирование циркуляции нижней и средней арктической атмосферы и влияния на нее горных массивов Шпицбергена / И. В. Мингалев, К. Г. Орлов, В. С. Мингалев // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2018. — № 3 (9). — С. 93–101.

#### Reference

*Mingalev Igor V., Orlov Konstantin G., Mingalev Victor S.* Numerical Modeling of the Circulation of the Arctic Lower and Middle Atmosphere and Its Dependence on the Svalbard's Mountains. *Herald of the Kola Science Centre of the RAS*, 2018, vol. 3 (10), pp. 93–101 (In Russ.).

# DOI: 10.25702/KSC.2307-5228.2018.10.3.102-105 УДК 550.388.2; 551.510.535

# ИССЛЕДОВАНИЕ МЕЛКОМАСШТАБНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В F-ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ НАД АРХ. ШПИЦБЕРГЕН (ПОС. БАРЕНЦБУРГ)\*

# Н. Ю. Романова

ФГБНУ «Полярный геофизический институт», г. Мурманск

#### Аннотация

На основе анализа большого массива данных (2012–2013 гг.) спутникового радиосигнала, принятого наземным томографическим приемником в пос. Баренцбург (арх. Шпицберген), исследованы параметры мелкомасштабных неоднородностей (с размерами несколько сотен метров поперек магнитного поля) электронной плотности в F-области ионосферы в таких спутниковых сеансах, временной интервал между которыми составлял 16–40 мин. По данным об ориентации поперечной анизотропии мелкомасштабных неоднородностей можно исследовать направление конвекции в полярной шапке.

#### Ключевые слова:

ионосфера, полярная шапка, неоднородности, конвекция.

#### INVESTIGATION OF SMALL-SCALE IRREGULARITIES IN F-REGION OF IONOSPHERE OVER SPITSBERGEN ARCHIPELAGO (BARENTSBURG)

#### Natalia Yu. Romanova

Polar Geophysical Institute, Murmansk

#### Abstract

On the basis of the analysis of big data array (2012–2013) of the satellite radio signal obtained by the tomography receiver in Barentsburg (Spitsbergen archipelago), parameters of small-scale irregularities (with sizes several hundreds of meters across magnetic field) of electronic density in the F-region ionosphere in such satellite sessions among which time interval made 16–40 minutes, are investigated. The data on orientation of cross-field anisotropy of small-scale irregularities can be used to investigate the direction of convection in a polar cap.

#### **Keywords:**

lonosphere, polar cap, irregularities, convection.



#### Введение

Мерцания высокочастотного радиосигнала от низкоорбитальных спутников, принятые наземным приемником, получили название сцинтилляции [1]. Такие флуктуации радиоволн в F-слое возникают вследствие рефракции на ионосферных размерами сотен неоднородностях с несколько метров, называемых мелкомасштабными. В работе [2] показано, что путем анализа амплитуды спутникового сигнала можно определить пространственные параметры статистически усредненных мелкомасштабных неоднородностей, которые оказались анизотропными как вдоль, так и поперек геомагнитного поля в средне- и

высокоширотной ионосфере, а также в полярной шапке [3-5].

Неоднородности вытянуты преимущественно вдоль геомагнитного поля (продольная ось анизотропии α), и несколько меньше они вытянуты перпендикулярно геомагнитному полю (поперечная

<sup>\*</sup> Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-05-01024А и в рамках госзадания ПГИ «Проведение стационарных наблюдений за магнитными и оптическими явлениями на арх. Шпицберген, исследование геофизических процессов в высокоширотной атмосфере Земли».

ось анизотропии  $\beta$ ). Ориентация оси  $\beta$  не постоянна, она получила наименование «ориентация поперечной анизотропии», обозначается символом  $\Psi_A$ , измеряется в градусах и отсчитывается от направления на географический север по часовой стрелке. В работах [3, 4] показано, что в высоких широтах и полярной шапке ориентация поперечной анизотропии  $\Psi_A$  неоднородностей соответствует направлению дрейфа плазмы **E**×**B** (конвекции) и это их свойство может быть использовано для оценки направления дрейфа в высоких широтах.

Цель данной работы — показать, что разработанным в ПГИ радиотомографическим методом на основе приема спутникового сигнала наземным приемником только в одной точке можно мгновенно определить направление дрейфа плазмы в F-слое ионосферы. На основе анализа радиосигнала таких спутниковых сеансов, временной интервал между которыми составлял 16–40 мин (такие спутниковые пролеты назовем «близкими»), можно определить характер конвекции в области наблюдения: стационарный или нестационарный.

#### Методика исследований и результаты

Проанализированы данные, полученные в пос. Баренцбург (78.10°N, 14.21°E) на арх. Шпицберген в период 2012–2013 гг. Исследована амплитуда спутникового сигнала (сигнал принимался наземным приемником от отечественных навигационных спутников с круговой орбитой с высотой ~1000 км).

Разработанный в ПГИ метод определения параметров мелкомасштабных неоднородностей основан на предположении равномерного распределения неоднородностей в ионосферном F-слое. При движении спутника, по мере приближения его к наблюдателю в близкой к зениту зоне наземного приемника, наблюдаются интенсивные сцинтилляции спутникового сигнала, свидетельствующие о присутствии мелкомасштабных неоднородностей в данной области. На рис. 1 в левом столбце приведены графики первичных спутниковых данных, в правом столбце — результаты обработки.



Рис. 1. Графики первичных спутниковых данных (левый столбец), полученные в двух независимых сеансах связи, и графики их индивидуальной математической обработки (правый столбец). Левый столбец — амплитуда спутникового сигнала (в заголовке указано время начала сеанса), правый — экспериментальный (сплошная кривая) и теоретический (черные кружки) максимумы в широтном профиле графика логарифма относительной амплитуды, построенного по этим данным (в заголовке указано время регистрации максимума, пунктиром показан график углов между спутником и наблюдателем при прохождении спутника во время сеанса)

Fig. 1. The diagrams of primary satellite data (the left column) received during two independent communication sessions and diagrams of their personal mathematical processing (the right column). The left column — amplitude of a satellite signal (the title

shows the start time of a session). The right column – the experimental (a continuous curve) and theoretical (black circles) maxima in the width profile of the diagram of the logarithm of the relative amplitude constructed according to these data (the title shows the time of registration of a maximum; the dotted line showed the diagram of angles between the satellite and the observer at passing of the satellite during the session)

На рис. 1 приведен пример двух спутниковых сеансов 8 июня 2012 г., когда спутники прошли над наблюдателем практически один за другим, поскольку при продолжительности каждого сеанса 18 мин начало сеансов было в 12:28 UT и в 12:48 UT. Также спутники имели идентичные параметры траектории, то есть второй спутник пересек ту же область пространства, что и первый. Интенсивные сцинтилляции спутникового сигнала в графиках амплитуды видны как всплески на ~580 с каждого сеанса (левый столбец). Рассчитанные по этим данным графики дисперсии логарифма относительной амплитуды в этих местах имеют максимумы (правый столбец). Поскольку величина максимума существенно превышает уровень фона, то путем аппроксимации его теоретической кривой по методу [2] можно определить параметры мелкомасштабных неоднородностей. Значения этих параметров приведены в левом верхнем углу для каждого сеанса в правом столбце. Сходство параметров анизотропии неоднородностей в двух спутниковых сеансах и особенно сходство значений  $\Psi_A$  как следствия направления дрейфа позволяют сделать вывод о стационарном характере ионосферной конвекции над п. Баренцбург с преимущественно зональным направлением дрейфа.

Очевидно, что предположение о F-слое как о слое с равномерно распределенными неоднородностями — это возможное допущение и постоянство параметров неоднородностей справедливо для небольшой зоны ионосферы. Географическое положение п. Баренцбург таково, что он часто находится либо в фокусе одной из двух крупномасштабных конвекционных ячеек, либо в небольших спорадических конвективных вихрях [4], и вследствие изменения направления дрейфа неоднородности также имеют разные параметры. Пример этому приведен на рис. 2.



Рис. 2. Графики первичных спутниковых данных (левый столбец), полученные в двух независимых сеансах связи, и графики их индивидуальной математической обработки (правый столбец). Левый столбец — амплитуда спутникового сигнала (в заголовке указано время начала сеанса), правый столбец — экспериментальный (сплошная кривая) и теоретический (черные кружки) максимумы в широтном профиле графика логарифма относительной амплитуды, построенного по этим данным (в заголовке указано время регистрации максимума, пунктиром показан график углов между спутником и наблюдателем при прохождении спутника во время сеанса)

Fig. 2. The diagrams of primary satellite data (the left column) received in two independent communication sessions and diagrams of their personal mathematical processing (the right column). The left column — amplitude of a satellite signal (the title shows the start time of a session). The right column – the experimental (a continuous curve) and theoretical (black circles) maxima in the width profile of the diagram of the logarithm of the relative amplitude constructed according to these data (the title shows the time of registration of a maximum; the dotted line showed the diagram of angles between the satellite and the observer at passing of the satellite during the session)

Как и в предыдущем случае, была выбрана пара сеансов, когда спутники пересекали одну и ту же область пространства и временной интервал между сеансами минимален. В первом сеансе из примера на рис. 2 можно придерживаться приближения о постоянстве параметров неоднородностей в исследуемой зоне, поскольку максимум единственный. Присутствие в ионосфере неоднородностей с различными параметрами проявилось как два максимума в экспериментальном графике дисперсии амплитуды второго сеанса. Каждый максимум аппроксимирован индивидуальной теоретической кривой в предположении однородной ионосферы для пространственной области, занимаемой каждым максимумом. В первом сеансе направление дрейфа можно назвать стационарным вследствие присутствия единичного максимума. Второй сеанс интересен тем, что, во-первых, меньший максимум сходен по величине с уровнем фона (но принятый во внимание, поскольку «вырос» на сцинтилляциях, которые очевидны в первичных данных — около 430 с). Между тем в первом сеансе его величина была в несколько раз больше, пространственно это одна и та же область — ~77.8°N. Это показывает, что неоднородности за время движения спутника переориентировались поперек геомагнитного поля. Во-вторых, появилась область с неоднородностями с другими параметрами около ~77.2°N, которой не было во время первого сеанса. Известно, что направление дрейфа может измениться в течение нескольких минут. Можно утверждать, что метод определения параметров мелкомасштабных неоднородностей может отследить этот быстротекущий процесс.

# Выводы

Обработка большого массива данных за 2012–2013 гг. показала, что среди всех спутниковых сеансов нужно уделять внимание так называемым «близким спутниковым пролетам», так как близкие во времени спутниковые сеансы дают больше информации об ионосферной конвекции, чем остальные сеансы. Только по таким сеансам в одной точке пространства можно определить стационарный или нестационарный характер ионосферной конвекции.

# Благодарность

Автор благодарит сотрудников лаборатории радиопросвечивания ПГИ за проведение экспериментальных работ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Aarons J. Global morphology of ionospheric scintillations // Proc. IEEE. 1982. 70. Р. 360–378. 2. Куницын В., Терещенко Е., Андреева Е. Радиотомография ионосферы. 2007. 3. Comparison of the orientation of small scale electron density irregularities and F-region plasma flow direction / E. D. Tereshchenko [et al.] // Ann. Geophysicae. 2000. 18. P. 918–926. 4. Tereshchenko E. D., *Romanova N. Yu., Koustov A. V.* VHF scintillations, orientation of the anisotropy of F-region irregularities and direction of plasma convection in the polar cap // Ann. Geophysicae. 2008. Vol. 26. P. 1725–1730. 5. Романова Н. Ю. Взаимосвязь между направлением горизонтального ветра и ориентацией поперечной анизотропии мелкомасштабных неоднородностей в F-области среднеширотной ионосферы // Геомагнетизм и аэрономия. 2017. Т. 57, № 4. С. 463–471.

# Сведения об авторе

*Романова Наталья Юрьевна* — младший научный сотрудник Полярного геофизического института E-mail: romanova@pgi.ru

# Author Affiliation

*Natalia Yu. Romanova* — Junior Researcher of the Polar Geophysical Institute E-mail: romanova@pgi.ru

# Библиографическое описание статьи

*Романова, Н. Ю.* Исследование мелкомасштабных неоднородностей в F-области ионосферы над арх. Шпицберген (пос. Баренцбург) / *Н. Ю. Романова* // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2018. — № 3 (10). — С. 102–105.

# Reference

*Romanova Natalia Yu.* Investigation of Small-Scale Irregularities in F-Region of Ionosphere over Spitsbergen Archipelago (Barentsburg). *Herald of the Kola Science Centre of the RAS*, 2018, vol. 3 (10), pp. 102–105 (In Russ.).

# ДИСКРЕТНЫЕ ПОЛЯРНЫЕ СИЯНИЯ НА ШПИЦБЕРГЕНЕ КАК ИНДИКАТОР ВЛИЯНИЯ СОСТОЯНИЯ ПОЛЯРНОЙ ИОНОСФЕРЫ НА НАВИГАЦИОННЫЕ СИГНАЛЫ

С. А. Черноус<sup>1</sup>, М. В. Филатов<sup>1</sup>, И. И. Шагимуратов<sup>2</sup>, И. И. Ефишов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГБНУ «Полярный геофизический институт», г. Апатиты, Мурманск <sup>2</sup>Калининградский филиал ИЗМИРАН, г. Калининград

#### Аннотация

Приводятся результаты анализа данных приема навигационных сигналов высокоорбитальных спутников при развитии полярных сияний на станциях Баренцбург и Нью-Алезунд. Показано, что дискретные формы полярных сияний, существующие в полярной ионосфере, могут являться независимым признаком присутствия ионосферных авроральных неоднородностей, которые влияют на распространение трансионосферных радиосигналов. Обсуждается сосуществование двух типов авроральных возмущений в полярной ионосфере, оказывающих это влияние и регистрируемых оптическими методами — дискретные форм (лучистые дуги и полосы) и крупномасштабных светящихся пятен. Анализируются конкретные измерения, включающие наблюдения этих форм сияний оптическими методами совместно с параметрами и характеристиками приема навигационных сигналов, и представлены доказательства нарушений в работе навигационных систем.

#### Ключевые слова:

навигационные сигналы, сцинтилляции, полярные сияния.

## DISCRETE AURRA AS INDICATOR OF POLAR IONOSPHERE IMPACT ON GNSS SIGNALS AT SPITSBERGEN

#### Sergei A. Chernous<sup>1</sup>, Mikhail V. Filatov<sup>1</sup>, Irk I. Shagimuratov<sup>2</sup>, Ivan I. Efishov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Polar Geophysical Institute, Murmansk – Apatity <sup>2</sup>Kaliningrad department of Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of RAS, Kaliningrad, Russia

#### Abstract

Analysis of navigation signals data received by high orbiting satellites during the development of aurora at Barentsburg and New Aalesund stations at Spitsbergen are presented. It is shown that the discrete forms of auroras existing in the polar ionosphere can be an independent sign of the presence of ionospheric auroral inhomogeneities affecting the propagation of transionospheric radio signals. The coexistence of two types of auroral perturbations in the polar ionosphere, which demonstrate impact and recorded by optical methods, is under consideration. There are discrete forms (radiant arcs and bands) and large-scale luminous patches. Specific observations of these auroras by optical methods in conjunction with the parameters and characteristics of receiving navigation signals are analyzed and evidence of violations in the operation of navigation systems is presented.

#### Keywords:

navigation systems, auroral disturbances, aurora.

# Введение

Проблема связи полярных сияний с областями ионосферы, ответственными за нарушения в приеме навигационных сигналов высокоорбитальных спутников, широко обсуждается, например в работах [1–4]. В основном это касается синхронности вариаций полного электронного содержания (ПЭС) в ионосфере и пространственно-временных вариаций интенсивности полярных сияний, которая может быть использована для диагностики и прогноза неоднородностей ПЭС [4–6]. Одним из эффективных средств диагностики полярной ионосферы является измерение задержек сигналов навигационных спутников систем GPS/Глонасс на двух когерентных частотах f1/f2 = 1,6/1,2 ГГц. Дифференциальная задержка является мерой ПЭС ионосферы, а ионосфера, в свою очередь, является основным источником погрешностей позиционирования. Наиболее существенные отклонения от регулярного поведения ионосферы связаны с геомагнитными бурями и полярными сияниями. Во время геомагнитных возмущений в ионосфере развиваются неоднородности различных масштабов, которые вызывают флуктуации амплитуды и фазы трансионосферных сигналов. Интенсивность и частота флуктуаций существенно увеличиваются во время магнитных бурь. Эти флуктуации приводят к срывам приема сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) и затрудняют разрешение фазовой неоднозначности, что в конечном итоге приводит ухудшению точности позиционирования и местоопределения.

Поскольку полярные сияния как по своей форме, пространственной структуре и интенсивности, так и по расположению в пространстве обладают большим разнообразием, то необходимо исследование особенностей изменений навигационного сигнала при прохождении его сквозь области полярной ионосферы, маркером состояния которых являются отдельные формы сияний. В настоящем исследовании предпринята попытка экспериментальных исследований детального соответствия дискретных форм полярных сияний (лучистые дуги и полосы) и состояния трансионосферных сигналов ГНСС, причем на основании измерений, проведенных в самой высокоширотной области планеты (на Шпицбергене), где происходят высыпания заряженных частиц из разных областей магнитосферы.

# Материалы и методы

Для проведения данной работы были использованы данные синхронных измерений параметров приема сигнала во время развития полярных сияний на Шпицбергене — на станциях Баренцбург (78,09N, 14,21E) и Нью-Алезунд (78,92N, 11.92E) [7, 8].

Приемники трансионосферных сигналов и камеры полного обзора неба работали там в непрерывном режиме, для анализа, с учетом погодных условий (в первую очередь облачности) и гелиогеофизических возмущений, были выбраны два дня — 24 ноября 2009 г. и 13 января 2013 г. Часть первичных материалов по этим наблюдениям опубликована в работах [6–8].

Планетарная геофизическая обстановка 24 ноября 2009 г. приводится на рис. 1, *а*. Планетарные индексы Кр (рис. 1) показывают, что выбранные события являют собой типичное развитие магнитной бури средней интенсивности (Кр — 4). Планетарная геофизическая обстановка 13 января 2013 г. приводится на рис. 1, *б*. Планетарные индексы Кр показывают, что выбранные события являют собой типичное развитие магнитной бури средней интенсивности (максимальный Кр — 4).

В работе широко использован метод сравнения полученных оптических изображений высокочувствительными камерами полного неба с положением навигационных спутников [6]. Он основан на том, что поле зрения оптической камеры практически полностью совпадает с диаграммой направленности приемной антенны сигналов навигационных спутников. Это позволяет представлять в едином угловом поле зрения позиции полярных сияний в ионосфере и позицию навигационных спутников на высокой орбите (порядка 20 000 км) в том случае, если приемник и камера размещены в одной точке. Если мы на такой картине проведем луч от космического передатчика до наземного приемника, то сразу увидим, проходит ли радиосигнал сквозь область полярных сияний, то есть сквозь возмущенную полярную ионосферу.

В работе использованы данные камеры NORUSKA [9], установленной на ст. Баренцбург. Она представляет собой гиперспектральную камеру, оснащенную акустико-оптическим светофильтром без движущихся оптико-механических частей. Высокая скорость переключения спектральных полос и их произвольная выборка позволяют производить последовательную съемку избранных рабочих эмиссий с темпом, определяемым только необходимыми временами
экспозиции, то есть с высоким временным разрешением (1 с). Следует отметить, что оптическая камера всего неба на ст. Баренцбург позволяет также снимать различные формы полярных сияний с высоким пространственным разрешением. Камера в Нью-Алезунде использовалась для регистрации красной эмиссии атомарного кислорода с интеграцией по времени, которое соизмеримо со временем жизни эмиссии 630,0 нм (~ 100 с), для повышения чувствительности. В данном исследовании частично использованы первичные материалы из работ [7, 8].





Fig. 1. Planetary geophysical situation characterized by Kp index: a — November 24, 2009; 6 — January 13, 2013

# Результаты измерений

1. Анализ приема ГНСС-сигналов в период авроральных возмущений 24 ноября 2009 г. В этом случае проведен анализ событий в полярной ионосфере, при которых ухудшается точность ГНСС, в частности GPS/ГЛОНАСС, в ситуации практически полного перекрытия диаграммы направленности приемника ионосферными возмущениями, связанными с полярными сияниями. В такой ситуации ошибка позиционирования навигационной системы, по нашему мнению, должна увеличиться даже при применении высокоточных двухчастотных приемников, то есть сигналы каждого спутника из рабочего созвездия будут искажаться или отсутствовать, а сигналы от остальных спутников системы тоже будут подвержены влиянию ионосферных возмущений. Это предположение было проверено в эксперименте, проведенном с помощью двухчастотного приемника, установленного Полярным геофизическим институтом и работающего на ст. Баренцбург на Шпицбергене. Позиция этой станции исключительно удобна для исследования влияния авроральных возмущений на сигналы навигационных спутников GPS/ГЛОНАСС, так как вероятность охвата поля зрения приемника сияниями аврорального овала при средней геомагнитной активности на широте Шпицбергена гораздо выше, чем, например, в Мурманске, где хорошо наблюдается овал полярных сияний в периоды больших возмущений.

Была выбрана достаточно редкая геофизическая ситуация в день 24 ноября 2009 г., когда сигналы с каждого спутника в рабочем созвездии проходили сквозь возмущенную полярную ионосферу, маркером которой являются полярные сияния [7]. Путем одновременной визуализации положения спутников и полярных сияний мы получили прямые доказательства рассматриваемого эффекта. Из рис. 2 можно видеть, что полярные сияния покрывают большую часть небосвода и почти полностью перекрывают поле зрения навигационного приемника в Баренцбурге около 18:20 UT. Из рис. 3, на котором показаны данные, полученные с отдельного спутника рабочего созвездия, можно видеть, что вблизи рассматриваемого интервала времени сигнал спутника G20 вообще полностью пропадает. Сигналы, полученные от других спутников, демонстрируют эффекты, подобные приведенному на рис. 3, около 18:20 UT или же рост вариабельности ПЭС. Сигнал от спутника G20 также исчезает в 19:25 UT, но сигналы других спутников менее подвержены воздействию авроральных ионосферных возмущений, чем в 18:20 UT.





Fig. 2. Frames of the all-sky camera obtained with 10 minute resolution in November 24 from 17.00 to 20.00 UT at Barentsburg station. Scale of time is on the horizontal axis in minutes. North is on the top of all-sky pictures

Такая ситуация имеет место, потому что полярные сияния не полностью перекрывают поле зрения приемника от сигналов других спутников. Карты местоположения навигационных спутников в угловых координатах и полярных сияний в этих же координатах были построены для различных моментов времени с различной авроральной активностью. Из этих иллюстраций можно сделать заключение о том, что погрешности позиционирования возрастают в то время, когда навигационный сигнал распространяется через возмущенную полярную ионосферу, маркером которой являются полярные сияния.

На рис. 4 можно видеть резкие изменения погрешности позиционирования в направлении В–3, происходящие в 18:20 UT, которые выглядят как пульсации или сцинтилляции. По времени они совпадают с тем интервалом на кеограмме, когда полярные сияния почти полностью охватывают диаграмму направленности наземного навигационного приемника. Можно полагать, что это совпадение событий во времени и угловом пространстве и является доказательством воздействия на навигационный сигнал ионосферных авроральных возмущений.





Рис. 3. Истинный вертикальный TEC (VTEC) по фазе и его сглаженное значение (TrendvTEC) с учетом аппаратных задержек спутника и приемника (верхний график), вариации вертикального TEC (dVTEC) (отклонение относительного наклонного TEC от его фонового значения — средний график), скорость изменения вертикального TEC (difTEC) —нижний график. Правая часть рисунка — положение сияний и навигационных спутников на камере всего неба

Fig. 3. Genuine vertical TEC (VTEC) obtained by phase variations and their smoothing values (TrendvTEC) with accounting of the device time delays by satellite transmitter and ground based receiver (Top picture). Variations of vertical TEC (dVTEC) in the middle picture show the deviation of the TEC relative inclination from the background level. Variations of vertical TEC (dVTEC) presented in the low picture. Navigation satellite positions with the GPS and position of the aurora in the all-sky optical camera frames are in the right part of the figure



Рис. 4. Кеограмма (развитие меридионального сечения снимка камеры всего неба по линии С-Ю во времени) верхняя часть рисунка (по оси ординат зенитный угол); вариации погрешности позиционирования по линии В-3 (в градусах долготы) — нижняя часть рисунка Fig. 4. Коодгат (temporal davelopment

Fig. 4. Keogram (temporal development of the all-sky cross-section in the N-S direction) is on the top part of the figure. Positioning deviation variations in the E-W direction are in the low part of figure

http://www.naukaprint.ru/zhurnaly/vestnik/

2. Анализ приема ГНСС-сигналов в период авроральных возмущений 13 января 2013 г. Второй случай связан с публикацией данных синхронных измерений параметров приема сигнала во время развития полярных сияний на Шпицбергене (Нью-Алезунд) 13 января 2013 г. [8]. В этот период дискретные полярные сияния были зарегистрированы камерой всего неба, работающей в Нью-Алезунде, одновременно со свечением красных пятен, приходящих с северо-запада. В работе утверждается, что нарушения приема GPS-сигнала проявляются именно тогда, когда дискретные сияния по данным камеры всего неба соединяются с приходящими красными пятнами. В то же время ранее представлены доказательства того, что на прием навигационных сигналов заметное влияние оказывают области ионосферы, которые содержат дискретные формы сияний.

Проверим оба этих утверждения путем сравнения данных, полученных как на станции Нью-Алезунд, так и на станции Баренцбург, расположенной южнее.

Согласно магнитограммам сети IMAGE (http://space.fmi.fi/image), рассматриваемое событие происходило в период времени, когда максимальная отрицательная бухта в Х-компоненте была отмечена на меридиане Баренцрегиона в районе о. Хоупена (76,51N, 25,01E), а спад интенсивности приходился как на более северные и более южные станции.

Данные ст. Нью-Алезунд включают в себя:

1) картины всего неба в эмиссии атомарного кислорода 630,0 нм и кеограммы развития полярных сияний в этой эмиссии, позволяющие наблюдать крупномасштабные красные пятна свечения;

2) фазовые сцинтилляции GPS-сигнала (в том числе их усредненные значения);

3) местоположение навигационных спутников на снимках камеры всего неба.

Данные ст. Баренцбург включают в себя:

1) картины всего неба, полученные гиперспектральной камерой в основных авроральных эмиссиях  $N_2^+470,9$  нм, OI 557,7 нм, OI 630,0 нм и позволяющие наблюдать цвет и структуру сияний;

2) местоположение навигационных спутников на снимках камеры всего неба;

3) данные изменения ПЭС (difTEC) со спутников G9, G17, G18 и G24 на ст. Баренцбург:

а) кеограмма эмиссии 630,0 нм в Нью-Алезунде;

б) фазовые сцинтилляции GPS-сигнала в Нью-Алезунде (по оси ординат номер спутника, для каждого спутника на графике свой цвет);

в) усредненные фазовые сцинтилляции в Нью-Алезунде;

г-ж) вариации полного электронного содержания (difTEC) для навигационных спутников, сигнал с которых зарегистрирован в Баренцбурге и проходит сквозь полярные сияния;

з-к) вариации ПЭС (difTEC) для навигационных спутников, сигнал с которых зарегистрирован в Баренцбурге, не проходит сквозь дискретные формы сияний и не имеет значимых флуктуаций;

л-н) вариации ПЭС (difTEC) для навигационных спутников, сигнал с которых зарегистрирован в Баренцбурге, не проходит сквозь дискретные формы и имеет значимые флуктуации.

На рис. 5 представлено расположение навигационных спутников на фоне полярных сияний, снятых камерой NORUSKA [3], располагающейся в обс. Баренцбург. Следует отметить, что оптическая камера всего неба на ст. Баренцбург позволяет хорошо дифференцировать различные формы полярных сияний (рис. 5), в отличие от камеры в Нью-Алезунде (рис. 6), интегрирующей их интенсивность по времени, соизмеримом со временем жизни эмиссии 630,0 нм (~ 100 с). В нижней (южной) части снимков хорошо просматриваются лучистые дуги с высокими красными лучами (красные сияния типа A).



Рис. 5. Положение полярных сияний, наблюдаемых гиперспектральной камерой всего неба в Баренцбурге в основных авроральных эмиссиях N<sub>2</sub><sup>+</sup> 470,9 нм, OI 557,7 нм, OI 630,0 нм и позиции навигационных спутников ГЛОНАСС и GPS

(-16.2,304.2)° 6.1% Sun(-31.9,330.7)°

Fig. 5. Positions of aurora observed by the Hyperspectral all-sky camera NORUSKA in general auroral emissions  $N_2^+470,9$  nm, OI 557,7 nm, OI 630,0 nm at Barentsburg station together with positions of navigation satellite by GPS – GLONASS systems

Из рис. 5 и 6 следует, что более предпочтительной является гипотеза, интерпретирующая нарушение приема навигационных сигналов наличием флуктуаций параметров полярной ионосферы, связанных с развитием дискретных полярных сияний.

Появление вариаций полного электронного содержания (difTEC) для навигационных спутников, сигнал с которых зарегистрирован в Баренцбурге и проходит сквозь полярные сияния и интенсивных фазовых сцинтилляций в Нью-Алезунде, в большинстве сюжетов действительно совпадает во времени с появлением и ростом интенсивности дискретных полярных сияний по данным камер всего неба на обеих станциях.

#### Обсуждение результатов

16 1 303 3)° 6 1% Sun(-31 8 329 6)

В работах [3, 6] было обнаружено, что при ограничении поля зрения (диаграммы направленности) навигационного приемника с экваториальной стороны, при появлении в этом поле дискретных полярных сияний ошибки позиционирования увеличиваются или происходит нарушение целостности системы (сигнал полностью исчезает). Этот результат, полученный при измерениях на одночастотном приемнике, авторы предложили распространить на регистраторы навигационных сигналов при работе с полной диаграммой направленности, в том числе и на двухчастотные приемники, при условии, что полярные сияния полностью охватывают поле зрения приемника. Это предположение встретило возражения, так как, во-первых, чувствительность и избирательность двухчастотного приемника уже учитывают текущее состояние ионосферы, а во-вторых, можно выбрать созвездие навигационных сигтиков к экватору от зоны полярных сияний, чтобы обеспечить нормальную работу системы.

-16.4.305.2)° 6.2% Sun(-32.0.331



Рис. 6. Данные, полученные в Нью-Алезунде (Шпицберген) 13 января 2013 г. Fig. 6. The data obtained in January 13, 2013 at New-Alesund (Spitsbergen)

Приведенные возражения снимаются нашей экспериментальной проверкой гипотезы в редкой геофизической ситуации, когда полярные сияния охватывают полностью диаграмму направленности приемника. Действительно, в рассмотренном случае сигналы всех спутников, включая экваториальные, блокируются возмущенной полярной ионосферой.

# Заключение

В представленной работе проведен детальный анализ влияния гелиогеофизических возмущений на качество приема навигационных сигналов в двух экстремальных ситуациях, когда с большой полнотой удалось осуществить необходимые измерения на Шпицбергене. Показаны воздействия возмущений полярной ионосферы, которые визуализируются в виде дискретных полярных сияний на навигационные сигналы отдельных высокоорбитальных спутников ГНСС. Оно осуществляется даже на при приеме сигнала двухчастотным приемником, реализуется в изменчивости фазовых задержек сигнала, определяющих флуктуации ПЭС вплоть до полного исчезновения приема и появления пульсаций (сцинтилляций) погрешности позиционирования.

Сравнение экспериментальных радиофизических и оптических данных, полученных на станциях Баренцбург и Нью-Алезунд, разнесенных по широте, в проанализированном случае показало, что доминирующим источником воздействия на навигационный сигнал на широтах ~ 80° являются флуктуации ПЭС, связанные с дискретными формами сияний, а не с крупномасштабными красными пятнами в F-области ионосферы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. GPS phase fluctuations and ultraviolet images from the Polar satellite / *J. Aarons [et al.]*// J. Geophys. Res. 2000. Vol. 105, No. A3. P. 5201. 2. *Афраймович Э., Перевалова Н. П.* GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: ГУ НЦ PBX BCHЦ CO PAMH, 2006. 3. *Chernouss S. A., Kalitenkov N. V.* The dependence of GPS positioning deviation on auroral activity // Inter. J. Remote Sensing. 2011. Vol. 32, No. 1. P. 3005. 4. Conjugate and inter-hemispheric occurrence of GPS TEC fluctuations in high latitude ionosphere / *I. Shagimuratov [et al.]*// Physics of Auroral Phenomena: Proc. XXXIII Annual Sem.Apatity. 2011. P. 151. 5. GPS scintillation in the high Arctic associated with an auroral arc / *A. M. Smith [et al.]* // Space Weather. 2008. No. 6. S03D01. 6. Способ определения местоположения: пат. № 2484494 Рос. Федерация / *H. B. Калитенкое [и др.]*; ФИПС. 2013. С. 1. 7. Исследования особенностей навигационных сигналов в период авроральных возмущений / *C. А. Черноус [и др.]* // Химическая физика. 2015. Т. 34, № 10. С. 1–7. 8. GPS scintillation effects associated with pilar cap patches and substorm auroral activity: direct comparison / *Y. Jin [et al.]* // J. Space Weather Space Clim. 2014. 4. A23. 9. *Real* time aurora oval forecasting / *F. Sigernes [et al.]* // Optica Pura y Aplicada (OPA). 2011. Vol. 44. P. 599.

# Сведения об авторах

*Черноус Сергей Александрович* — старший научный сотрудник Полярного геофизического института E-mail: chernouss@pgia.ru

Филатов Михаил Валерьевич — младший научный сотрудник Полярного геофизического института E-mail: mijgun@yandex.ru

Шагимуратов Ирк Ибрагимович — директор Калининградского филиала ИЗМИРАН E-mail: shagimuratov@mail.ru

*Ефишов Иван Иванович* — старший научный сотрудник Калининградского филиала ИЗМИРАН E-mail: efishov@mail.ru

## **Author Affiliation**

Sergei A. Chernous — Senior Researcher of the Polar Geophysical Institute
E-mail: chernouss@pgia.ru
Mikhail V. Filatov — Junior Researcher of the Polar Geophysical Institute
E-mail: mijgun@yandex.ru
Irk I. Shagimuratov — Director of Kaliningrad Department of Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of RAS
E-mail: shagimuratov@mail.ru
Ivan I. Efishov — Senior Researcher of Kaliningrad Department of Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of RAS
E-mail: shagimuratov@mail.ru
Ivan I. Efishov — Senior Researcher of Kaliningrad Department of Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of RAS
E-mail: efishov@mail.ru

# Библиографическое описание статьи

Дискретные полярные сияния на Шпицбергене как индикатор влияния состояния полярной ионосферы на навигационные сигналы / *С. А. Черноус [и др.]* // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2018. — № 3 (10). С. 106–114.

## Reference

Chernous Sergei A., Filatov Mikhail V., Shagimuratov Irk I., Efishov Ivan I. Discrete Aurra as Indicator of Polar Ionosphere Impact on GNSS Signals at Spitsbergen. Herald of the Kola Science Centre of the RAS, 2018, vol. 3 (10), pp. 106–114 (In Russ.).

# ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ОНЧ-ДИАПАЗОНА НА АРХ. ШПИЦБЕРГЕН В ЭКСПЕРИМЕНТАХ ПО НАГРЕВУ ИОНОСФЕРЫ

#### А. В. Ларченко, С. В. Пильгаев, О. М. Лебедь, Ю. В. Федоренко

ФГБНУ «Полярный геофизический институт», г. Апатиты

#### Аннотация

Приводятся результаты двух экспериментов по модификации ионосферы мощным КВ-радиоизлучением стенда EISCAT/Heating, которые проводились ААНИИ в 2014 и 2016 гг. На станциях ПГИ, расположенных в Мурманской обл. и на арх. Шпицберген, были получены сведения о структуре электромагнитного поля ионосферного источника. Обнаружены вариации индекса круговой поляризации горизонтального магнитного поля сигналов ионосферного источника на частотах 2017 и 3017 Гц. Особенностью точки наблюдения на арх. Шпицберген является то, что здесь поляризация сигнала частотой 2017 Гц в этих двух экспериментах была полностью круговой левой и испытывала незначительные вариации. Показано, что результаты двух экспериментов качественно согласуются. Данные о поляризациях сигналов ионосферного источника могут быть использованы для получения сведений об электрическом поле электроджета и параметрах ионосферы.

#### Ключевые слова:

нагревный эксперимент, структура электромагнитного поля, поляризация, ионосферный источник.

#### PECULIARITIES OF THE VLF ELECTROMAGNETIC FIELD STRUCTURE IN SPITSBERGEN EXCITING BY IONOSPHERE HEATING EXPERIMENTS

Alexey V. Larchenko, Sergey V. Pil'gaev, Olga M. Lebed', Yury V. Fedorenko Polar geophysical institute, Apatity, Russia

#### Abstract

In this paper, we present results obtained at PGI observatories located in Svalbard and at the Kola Peninsula during two ionosphere heating experiments carried out in 2014 and 2016 by AARI. Ground-based measurements of electromagnetic field initiated by the low-frequency source created by a powerful HF radio wave reveal variations of an index of the horizontal magnetic field circular polarization at the frequencies of 2017 and 3017 Hz. A peculiarity of polarization index behavior in Svalbard was its pure circular left-handed polarization experiencing rather weak variations in contrast with the polarization on the Kola Peninsula that was partly linear. The results obtained in 2014 and 2016 on the behavior of the magnetic field polarization are consistent and may be used for estimations of the ionosphere.

#### Keywords:

heating experiment, electromagnetic field structure, polarization, ionospheric source.

#### Введение

Эксперименты по нагреву высокоширотной ионосферы позволяют исследовать физические процессы, происходящие в ионосферной плазме, и эффекты распространения низкочастотных волн в волноводе Земля — ионосфера. В данных экспериментах мощная модулированная КВ-радиоволна, излучаемая нагревным стендом, создает модуляцию электроджета и образует на высотах D-слоя ионосферы низкочастотный ионосферный источник. Образуемое в ходе модулированного КВ-нагрева ионосферы низкочастотное излучение ионосферных токовых систем носит название эффекта Гетманцева.

Структура электромагнитного поля ионосферного источника имеет непосредственную связь с параметрами волновода Земля — ионосфера и определяется как механизмами возбуждения волновода, так и эффектами распространения [1]. Конфигурация самого ионосферного источника также зависит от состояния анизотропной верхней стенки волновода в области КВ-нагрева. Таким образом, исследования изменений параметров структуры поля ионосферного источника в нагревных экспериментах могут позволить нам получить новые данные о параметрах волновода Земля — ионосфера и механизмах его возбуждения.

В данной работе мы будем рассматривать один из параметров структуры поля ионосферного источника — индекс круговой поляризации горизонтального магнитного поля, который наиболее чувствителен к изменениям условий генерации и параметров волновода Земля — ионосфера. Здесь стоит отметить, что при неизменных параметрах КВ-сигнала, излучаемого нагревным стендом, на процесс генерации больше всего воздействуют электрическое поле аврорального электроджета и высотный профиль электронной концентрации в области нагрева. Основное влияние на распространение сигнала в волноводе Земля — ионосфера оказывает высотный профиль электронной концентрации в области нагрева.

#### Постановка эксперимента

В данной работе рассмотрим результаты нагревных экспериментов, проводившихся Арктическим и антарктическим научно-исследовательским институтом (ААНИИ) на стенде EISCAT/Heating, который расположен вблизи г. Тромсё, Норвегия. Первый эксперимент проводился в октябре 2014 г., второй — в октябре 2016 г. Каждый эксперимент длился несколько дней, но здесь мы ограничимся рассмотрением двух наиболее длительных сеансов нагрева — от 26 октября 2014 г. и 25 октября 2016 г. Режим работы стенда во время проведения данных сеансов был одинаков: излучение стенда проводилось на частоте 4040 кГц в направлении магнитного зенита на Х-моде, эффективная мощность КВ-излучения (ERP) составляла 148 МВт. Нагрев в 2014 г. осуществлялся циклами по 25 мин с частотами модуляции 1017, 2017 и 3017 Гц в режиме: 5 мин нагрева при каждой модуляции, затем 10 мин перерыв. В 2016 г. нагрев осуществлялся непрерывно циклами по 25 мин со ступенчатым изменением частоты по схеме 1017, 1617, 1817, 2017 и 3017 Гц по 5 мин на каждой частоте.

Регистрация генерируемого ионосферным источником излучения производилась с помощью разработанных в Полярном геофизическом институте (ПГИ) стационарных СНЧ/ОНЧ-приемников [2], которые были установлены в трех пространственно разнесенных точках, две из них расположены на материке (Мурманская обл.) в поселках Ловозеро (LOZ) и Верхнетуломский (TUL), третья на территории научной станции Баренцбург (ВАВ), арх. Шпицберген. Расстояния от точек регистрации до нагревного стенда для Ловозеро и Верхнетуломского составляют 660 и 510 км соответственно, для станции Баренцбург — 960 км.

## Результаты экспериментов и их обсуждения

По данным регистрации компонент горизонтального магнитного поля станций LOZ, TUL и ВАВ, для каждого интервала нагрева на частотах 1017, 2017 и 3017 Гц в обоих экспериментах были рассчитаны средние значения степеней линейной, круговой и полной поляризации и вычислены соответствующие им индексы [3]. Проведенный анализ индексов поляризации показал, что наиболее значимые вариации за время проведения экспериментов испытывает индекс круговой поляризации. Этот факт, вероятно, свидетельствует в пользу того, что данный параметр наиболее хорошо отражает изменения в условиях генерации и распространения сигнала ионосферного источника.

На частоте 1017 Гц, значение которой находится ниже частоты поперечного резонанса волновода Земля — ионосфера (~1800 Гц), в рассматриваемых экспериментах индекс круговой поляризации сигнала, зарегистрированного на всех станциях, был близок к нулевому значению и

испытывал незначительные вариации. Для сигналов данной частоты характерно распространение на поперечной электромагнитной моде (TEM), для которой характерна преимущественно линейная поляризация и, соответственно, отсутствие круговой, поэтому в данной работе мы ограничимся рассмотрением частот выше частоты поперечного резонанса волновода Земля — ионосфера. Для рассмотрения были выбраны частоты 2017 и 3017 Гц, так как они присутствовали в обоих экспериментах.

Рассмотрим результаты нагревного эксперимента 2014 г. На рис. 1 приведены индексы круговой поляризации, рассчитанные по данным регистрации на сети станций. Зависимости индекса круговой поляризации от номера интервала генерации для станций TUL, LOZ и BAB приведены на левой, центральной и правой панелях соответственно. Сверху приведены результаты, полученные для частоты 2017 Гц, снизу — для 3017 Гц. Отрицательные значения индекса круговой поляризации соответствуют левой поляризации сигнала, положительные — правой. Численные значения индекса соответствуют степени круговой поляризованности сигнала.



 Рис. 1. Индексы круговой поляризации сигналов ионосферного источника, зарегистрированных на станциях TUL, LOZ и BAB в эксперименте 2014 г.
 Fig. 1. Circular polarization indexes of ionospheric source signals received by TUL, LOZ and BAB stations in 2014 experiment

Как видно из рис. 1, на частоте 2017 Гц на станциях TUL и LOZ, расположенных в материковой зоне на сравнительно небольших расстояниях от нагревного стенда (510 и 660 км соответственно), за время эксперимента индексы круговой поляризации испытывают достаточно сильные колебания. При этом поляризация сигнала в большинстве интервалов генерации преимущественно круговая левая. Иная ситуация наблюдается на арх. Шпицберген (станция ВАВ в 960 км от стенда): индекс круговой поляризации сигнала стабильно близок к –0,8, что соответствует практически полностью круговой левой поляризации.

Такое поведение может быть объяснено многомодовым распространением. Здесь распространяются три моды: TEM, поперечная электрическая (TE) и поперечная магнитная (TM). В близко расположенных от источника точках (TUL и LOZ) вариации индекса круговой поляризации, вероятно, вызваны еще неустановившимися процессами конверсии TE и TM мод и в силу этого сильным влиянием на поляризацию сигнала изменений условий генерации и параметров волновода. В то же время в дальней точке процессы конверсии мод уже установились и влияние изменений условий генерации и параметров волновода оказалось незначительным. Преобладание на всех станциях в основном левой поляризации вызвано влиянием анизотропии верхней стенки волновода Земля — ионосфера [4].

На частоте 3017 Гц поляризация сигнала, наблюдаемая на всех трех станциях, преимущественно линейная, при этом за время проведения эксперимента индекс круговой поляризации испытывает значительные некоррелирующие вариации. На данной частоте распространение сигнала так же, как и в случае 2017 Гц, многомодовое (распространяются TEM, TE01 и TM01 моды), и в силу этого данные вариации могут являться результатом изменений условий генерации и распространения сигнала накладываемых на интерференцию мод. Результаты эксперимента 2016 г. приведены на рис. 2, расположение панелей на нем аналогично рис. 1.



Рис. 2. Индексы круговой поляризации сигналов ионосферного источника зарегистрированных на станциях TUL, LOZ и BAB в эксперименте 2016 г.
Fig. 2. Circular polarization indexes of ionospheric source signals received by TUL, LOZ and BAB stations in 2016 experiment

Рассмотрим частоту 2017 Гц, здесь становится хорошо заметно, что по мере удаления от нагревного стенда вариабельность индекса круговой поляризации снижается. В среднем индекс круговой поляризации с удалением точки наблюдения от положения источника стремится к –1, и в Баренцбурге наблюдаемый сигнал уже полностью левополяризован. Поэтому в данном случае можно сделать вывод о том, что на станции ВАВ индекс круговой поляризации сигнала частотой 2017 Гц слабо отражает изменения в условиях генерации и параметрах среды распространения сигнала. Тем не менее на частоте 3017 Гц поляризация сигнала, как и в эксперименте 2014 г., во всех точках наблюдения за время сеанса генерации сильно варьировалась. Источником данных вариаций, как уже говорилось выше, являются, возможно, совместные изменения параметров волновода и условий генерации. Наблюдаемый эффект, вероятно, свидетельствует о достаточно сильном влиянии изменений условий генерации на поляризацию сигнала вне зависимости от расположения точки наблюдения.

## Выводы

На сети высокоширотных станций, расположенных в материковой зоне и на арх. Шпицберген, в ходе двух нагревных кампаний, проведенных на стенде EISCAT/Heating в 2014 и 2016 гг., были получены экспериментальные сведения о структуре поля низкочастотного ионосферного источника. Результаты наблюдений поляризаций сигналов в этих двух экспериментах в качественном отношении согласуются. Показано, что индекс круговой поляризации сигнала частотой 2017 Гц в точках регистрации, находящихся ближе к нагревному стенду, в обоих экспериментах испытывал сильные вариации, в то время как на арх. Шпицберген, вероятно в силу его удаленности от нагревного стенда, наблюдаемые вариации данного индекса были незначительны. В эксперименте 2016 г. явно прослеживается зависимость амплитуды вариаций индекса круговой поляризации сигнала частотой 2017 Гц от расстояния точки наблюдения от источника. Показано, что чем ближе расположена точка наблюдения к источнику, тем выше в ней амплитуда вариаций индекса поляризации. На частоте 3017 Гц в обоих экспериментах на всех станциях наблюдались сильные вариации индекса круговой поляризации. Зависимости амплитуды этих вариаций от расположения точки наблюдения не обнаружено.

Таким образом, вариации поляризации горизонтального магнитного поля сигналов ионосферного источника в нагревных экспериментах на частотах выше частоты поперечного резонанса волновода Земля — ионосфера могут служить источником новой информации об электрическом поле аврорального электроджета и параметрах ионосферы в области нагрева, а также о параметрах волновода вдоль трасс распространения этих сигналов.

#### ЛИТЕРАТУРА

**1.** Экспериментальный комплекс «Сура» для исследования искусственных возмущений ионосферы: препр. № 167 / *И. Ф. Белов [и др.]*. Горький: НИРФИ, 1983. **2.** Трехкомпонентный СНЧ/ОНЧ-приемник с прецизионной привязкой к мировому времени / *С. В. Пильгаев [и др.]* // Труды Кольского научного центра РАН. 2015. Т. 6 (32), вып. 1. С. 113– 119. **3.** *Рытов С. М.* Введение в статистическую радиофизику. Ч. 1: Случайные процессы. М.: Наука, 1976. С. 351– 359. **4.** Polarization of ELF waves generated during "beat-wave" heating experiment near cutoff frequency of the Earthionosphere waveguide / *Y. Fedorenko [et al.]* // Radio Sci. 2014. 49. 1254–1264.

#### Сведения об авторах

*Ларченко Алексей Викторович* — младший научный сотрудник Полярного геофизического института E-mail: alexey.larchenko@gmail.com

*Пильгаев Сергей Васильевич* — научный сотрудник Полярного геофизического института E-mail: pilgaev@pgia.ru

*Лебедь Ольга Михайловна* — кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Полярного геофизического института

E-mail: olgamihsh@yandex.ru

Федоренко Юрий Валентинович — кандидат физико-математических наук, доцент, зав. сектором оптических методов Полярного геофизического института

E-mail: yury.fedorenko@gmail.com

## Author Affiliation

Alexey V. Larchenko — Junior Researcher, Polar Geophysical Institute
E-mail: alexey.larchenko@gmail.com
Sergey V. Pil'gaev — Researcher, Polar Geophysical Institute
E-mail: pilgaev@pgia.ru
Olga M. Lebed' — PhD (Physics & Mathematics), Researcher, Polar Geophysical Institute
E-mail: olgamihsh@yandex.ru
Fedorenko Yury V. — PhD (Physics & Mathematics), Associate Professor, Head of Sector of Optical Techniques, Polar Geophysical Institute
E-mail: yury.fedorenko@gmail.com

## Библиографическое описание статьи

Особенности структуры электромагнитного поля ОНЧ-диапазона на арх. Шпицберген в экспериментах по нагреву ионосферы / *А. В. Ларченко [и др.]* // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2018. — № 3 (10). — С. 115–119.

#### Reference

Larchenko Alexey V., Pil'gaev Sergey V., Lebed' Olga M., Fedorenko Yury V. Peculiarities of the VLF Electromagnetic Field Structure in Spitsbergen Exciting by Ionosphere Heating Experiments. Herald of the Kola Science Centre of the RAS, 2018, vol. 3 (10), pp. 115–119 (In Russ.).

# ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЛОКАЦИИ NSDL ДЛЯ ДЕТАЛЬНОГО ИЗУЧЕНИЯ СЕЙСМИЧНОСТИ АРХИПЕЛАГА ШПИЦБЕРГЕН

## В. Э. Асминг, А. В. Федоров, А. О. Аленичева, З. А. Евтюгина

Кольский филиал ФГБУН ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», г. Апатиты

#### Аннотация

Динамика сейсмического процесса арх. Шпицберген за январь-октябрь 2017 г. изучалась с помощью системы NSDL. Данные по пяти сейсмическим станциям были обработаны системой: обнаружено и слоцировано 35 199 событий. Для наглядного картографического отображения большого количества сейсмических событий применен новый подход. Обнаружены рои землетрясений как тектонической, так и ледниковой природы. Показано, что система NSDL является эффективным средством изучения региональной сейсмичности.

#### Ключевые слова:

сейсмическая локация, рои землетрясений, льдотрясения, Шпицберген.

# USAGE OF THE NSDL LOCATION SYSTEM FOR THE DETAILED STUDY OF THE SPITSBERGEN ARCHIPELAGO SEISMICITY

#### Vladimir E. Asming, Andrey V. Fedorov, Alena O. Alenicheva, Zinaida A. Jevtjugina

Kola Branch of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences, Apatity

#### Abstract

The dynamics of seismic process of the Spitsbergen archipelago for January-October 2017 was studied using the NSDL system. The data of five seismic stations were processed by the system, 35 199 events were detected and located. A new approach has been applied to visual mapping of the large number of seismic events. The swarms of earthquakes both of tectonic and glacial nature, have been discovered. It is shown that the NSDL system is an effective tool for studying regional seismicity.

#### Keywords:

seismic location, earthquake swarms, icequakes, Spitsbergen.

#### Введение

Шпицберген — арктический архипелаг, расположенный в Северном Ледовитом океане, в 1000 км от Северного полюса. В состав Шпицбергена входит больше тысячи малых и больших островов, среди них основную часть территории занимают крупные острова — Западный Шпицберген, остров Баренца, Земля Принца Карла, остров Эдж и Северо-Восточная Земля. Общая площадь архипелага составляет 62 000 км<sup>2</sup>, почти 60 % всей территории покрыто ледниками.

До 1970-х гг. наблюдения за сейсмичностью архипелага производились преимущественно удаленными станциями. Господствовало представление о том, что наибольшую сейсмическую активность здесь проявляет зона спрединга, расположенная вдоль хребтов Мона и Книповича, а внутриплитовая часть относительно пассивна, землетрясения здесь происходят редко и они не очень сильны [1]. На рис. 1 приведена карта землетрясений, зарегистрированных в районе архипелага за время до 1980 г. (по данным международного сейсмологического центра ISC), которая хорошо иллюстрирует эту точку зрения.

Землетрясение 18 января 1976 г., имевшее магнитуду 5,7 и произошедшее у восточного побережья о. Зап. Шпицберген в проливе Стур-фьорд, разрушило сложившуюся картину и значительно увеличило интерес международного сейсмологического сообщества к изучению архипелага. В 2008 г. практически в том же районе было зарегистрировано землетрясение с моментной магнитудой  $M_w = 6$ , которое на настоящий момент является самым сильным внутриплитовым землетрясением в данном районе Арктики.



Рис. 1. Землетрясения в районе арх. Шпицберген за период 1908–1979 гг. по данным международного сейсмологического центра (ISC). Также показана сеть сейсмостанций Шпицбергена, работающих в настоящее время. Под BRB понимаются BRBA и BRBB — две близко расположенные сейсмостанции КоФ ФИЦ ЕГС РАН

Fig. 1. Earthquakes in the area of the Spitsbergen archipelago for the period of time 1908–1979 according to the data of International Seismological Centre (ISC). The network of seismic stations that are currently in operation, is also shown. The BRB abbreviation denotes two close stations BRBA and BRBB operated by the Kola Branch of Geophysical Survey of RAS

В последующие годы сейсмичность архипелага исследовалась временными сетями [2], устанавливались постоянные станции, вначале аналоговые, к началу 2000-х замененные на цифровые. В настоящее время на острове Западный Шпицберген, действуют четыре цифровых трехкомпонентных станции и одна малоапертурная сейсмическая группа (рис. 1, табл. 1).

Таблица 1 Table 1

Станция	Обозначение	Широта	Долгота	Оператор
Station	Code	Latitude	Longitude	Operator
Баренцбург А		78.0501	14 217	КоФ ФИЦ ЕГС РАН
Barentsburg A	DKDA	78,0391	14,217	KB GS RAS
Баренцбург В	DDDD	78 0025	14 208	КоФ ФИЦ ЕГС РАН
Barentsburg B	DKDD	78,0933	14,208	KB GS RAS
Хорнсунн	LICDD	77.0010	15 5222	Польская академия наук
Hornsund	пэрр	//,0019	15,5552	Polish Academy of Sciences
Кингсбей Kingsbay	KBS	78,92560	11,94170	Консорциум IRIS, Университет Бергена IRIS, University of Bergen
Сейсмическая группа Шпицберген Seismic array Spitsbergen	SPI	78,17771	16,36998	NORSAR, Норвегия NORSAR, Norway

# Сейсмические станции арх. Шпицберген Seismic stations of the Spitsbergen archipelago

ВЕСТНИК Кольского научного центра РАН 3/2018 (10)

#### Объекты и методы

До недавнего времени наиболее полным источником информации о сейсмичности архипелага были бюллетени, выпускаемые норвежской сейсмологической организацией NORSAR: полностью автоматический бюллетень GBF [3] и RRB — бюллетень событий, обработанных человеком-интерпретатором [4]. Бюллетени эти неполны. Создаются они по данным сейсмических групп ARCES и SPI, принадлежащих NORSAR, из которых только SPI находится непосредственно на архипелаге. Автоматический бюллетень GBF содержит большое (больше числа реальных событий) количество ложных срабатываний, а бюллетень, составленный человеком-интерпретатором, — только события, магнитуды которых превышают 2. Бюллетеня же, объединяющего данные всех находящихся на Шпицбергене станций, не существовало.

В 2014 г. в Кольском филиале ФИЦ ЕГС РАН была начата разработка новой системы детектирования и локации NSDL. Мотивацией к созданию такой системы явилась необходимость обрабатывать данные по редким сетям и по одиночным сейсмостанциям. В 2016 г. эта система была в основном создана [5]. Ядром системы являются две большие программы. Первая из них, программа NSS, служит для автоматического детектирования и предварительной локации сейсмических событий по отдельным сейсмическим станциям — как трехкомпонентным, так и сейсмическим группам. NAS, вторая программа, способна получать на вход результаты работы NSS по нескольким станциям, производить их ассоциацию и более точную локацию обнаруженных сейсмических событий. В случае изучения сейсмичности по одиночной станции программа NSS может быть использована автономно [6]. Так, она была использована для мониторинга активности ближайших ледников по данным станции Хорнсунн [7].

В 2016 г. на базе NSDL была запущена автоматическая система сейсмического мониторинга арх. Шпицберген и прилегающих территорий. Она обрабатывает данные всех сейсмостанций, перечисленных в табл. 1, которые поступают через Интернет. По результатам работы система создает полностью автоматический бюллетень сейсмических событий [8].

Частота, с которой на данной территории происходят сейсмические события, велика, поэтому для того, чтобы сделать результаты обозримыми, на работу системы были наложены определенные ограничения. Это приводит к высокой достоверности работы системы (малому числу ложных срабатываний), но при этом теряется информация о слабой сейсмичности, которая может нести важную информацию об активности ледников и прочих природных процессах.

## Результаты и обсуждение

Чтобы сделать эту информацию доступной, все данные по вышеупомянутым сейсмическим станциям за 2017 г. были переобработаны системой NSDL безо всяких ограничений. В результате система обнаружила и слоцировала 42 907 событий. Понятно, что человеку-интерпретатору непосильно проверить все обнаруженные события. Была проведена выборочная проверка, в результате которой число ложных срабатываний системы было оценено сверху в 10 %. Таким образом, можно считать, что для статистического анализа можно использовать полученные данные и без дальнейшей коррекции.

На графике (рис. 2, *a*) показано, какое количество событий зарегистрировано одной, двумя, тремя и четырьмя сейсмостанциями. Легко видеть, что подавляющее большинство событий регистрируются одной-двумя станциями. На втором графике (рис. 2, *б*) представлена повторяемость магнитуд сейсмических событий. Судя по тому, что наклон графика повторяемости линеен с магнитуды 0,3, можно считать, что полученный список событий представителен начиная с этой магнитуды.

Для работы со столь большим количеством сейсмических событий необходимо выработать способ их отображения, который позволил бы человеку воспринять общую картину. В данном случае для каждого небольшого участка территории важными параметрами являются как выделившаяся на нем сейсмическая энергия, так и общее количество сейсмических событий. Ясно, что общепринятые карты, на которых землетрясения обозначаются кружками, размеры которых зависят от магнитуды, для отображения не годятся: вся карта будет закрашена случайно расположенными на карте ложными срабатываниями.



Рис. 2. Зависимость количества зарегистрированных событий от числа сейсмостанций (a) и график повторяемости обнаруженных сейсмических событий (б)



В качестве первого варианта был использован следующий подход. Территория разбивается на элементы площади, в каждом из которых считается количество произошедших событий и общая сейсмическая энергия. Эти элементы рисуются на карте, причем цвет каждого выбирается в зависимости и от числа событий, и от энергии (рис. 3).



Рис. 3. Изображение сейсмического процесса в виде элементов площади, цвета которых зависят от числа сейсмических событий и выделившейся сейсмической энергии Fig. 3. The plot of the seismic process in the form of area elements, colors of which depend on the number of seismic events and released seismic energy

Во втором, окончательном, варианте подход был немного изменен. Сейсмические события на карте обозначаются кружками, размеры которых зависят от магнитуды, но их цвет берется таким, каким был цвет соответствующего элемента площади в предыдущем варианте (рис. 4). Здесь уже просматриваются характерные черты сейсмичности архипелага. Большую активность,

как обычно, проявляет зона спрединга, хребет Книповича (зона 1). Остается активной зона пролива Стур-фьорд (зона 2), активизировалась зона вблизи пос. Хорнсунн (3). Сейсмическая энергия даже большая, чем в зоне спрединга, выделилась в зонах 4 (район пос. Кингсбей) и 5 (северо-запад от пос. Лонгийр). Эти зоны будут рассмотрены далее.



Рис. 4. Общая картина сейсмичности арх. Шпицберген за январь-октябрь 2017 г. по результатам NSDL: *1–5* — зоны повышенной сейсмической активности, A1, A2 — артефакты обработки
Fig. 4. The overall picture of seismicity of the Spitsbergen archipelago for January-October 2017 according to the results of NSDL: *1–5* — areas of increased seismic activity, A1, A2 — processing artifacts

Обратим внимание на дугообразные структуры (на рис. 4 это A1 и A2). Анализ волновых форм показал, что это артефакты работы автоматической системы, вызванные специфической ошибкой. Подавляющее большинство событий, составляющих эти структуры, реальны, причем они хорошо зарегистрированы одной станцией (для зоны A1 это станция SPI, для зоны A2 — станция KBS).



Рис. 5. Карта, аналогичная приведенной на рис. 4, но в ней исключены события, в бюллетенях которых ровно три фазы (такие события лоцируются с большими погрешностями)

Fig. 5. A map similar to that shown in Fig. 4, events are excluded, bulletins of which contain exactly three phases (such events are located with big uncertainties)

В процессе ассоциации программа добавляет к ним одну случайно подошедшую по времени ложную фазу, в результате событие лоцируется неверно, при этом расстояние от точки локации до станции, реально зарегистрировавшей событие, остается неизменным. Чтобы убедиться в правильности этого предположения, достаточно исключить из списка события, в бюллетенях которых ровно три фазы. Результат представлен на рис. 5, артефакты исчезли.

Зоны с наибольшим количеством выделенной сейсмической энергии показаны на рис. 4. Рассмотрим статистические параметры событий, произошедших в этих зонах (табл. 2).

Таблица 2 Table 2

N₂	Зона	Число событий	Магнитуда Magnitude		
п/п	Zone	Number of events	средняя mean	максимальная maximal	
1	Зона спрединга, центр Spreading zone, centre	1401	0,8	3,7	
2	Стурфиорд Storfjorden	841	0,8	4,1	
3	Хорнсунн Hornsund	1701	0,7	4,2	
4A	Кингсбей, север Kingsbay, north	4701	0,3	1,5	
4Б	Кингсбей, юг Kingsbay, south	2700	0,3	2,6	
5	К северу от пос. Лонгийр To the north from Longyearbyen	2794	0	1,6	
6	Ледник Осгор Åsgardfonna glacier	882	0,7	2,5	

The parameters of the seismic zones of the archipelago

Параметры сейсмических зон архипелага

Легко видеть, что сейсмический режим зон 1, 2 и 3 очень близок, сейсмический режим зон 4 и 5 также очень близок, но существенно отличается от зон 1, 2, 3. Можно заключить, что если в зонах 1, 2, 3 большинство сейсмических событий имеют тектоническую природу, то сейсмические события в зонах 4, 5 и 6 в большинстве своем вызваны активностью ледников. Действительно, они существенно слабее как по средней магнитуде, так и по максимальной, а их количество значительно больше.

Любопытно также проследить изменение сейсмической активности во времени. На рис. 6 и 7 показаны карты, на каждой из которых представлены сейсмические события, происходившие в течение каждых двух месяцев с января по декабрь 2017 г.

Заметно, что в некоторых зонах (отмечены овалами на рис. 6, 7) сейсмический процесс существенно менялся со временем. Характеристики процесса (сейсмическая энергия, число событий, магнитуды) различаются от зоны к зоне. Рассмотрим их подробнее.



Рис. 6. Динамика сейсмического процесса арх. Шпицберген за январь-июнь 2017 г. Овалами отмечены зоны, в которых сейсмический режим существенно менялся

Fig. 6. Dynamics of the seismic process of the Spitsbergen archipelago for January-June 2017. Ovals indicate the areas where the seismic regime has been changing significantly



Рис. 7. Динамика сейсмического процесса арх. Шпицберген за июль-декабрь 2017 г. Овалами отмечены зоны, в которых сейсмический режим существенно менялся

Fig. 7. Dynamics of the seismic process of the Spitsbergen archipelago for July-December 2017. Ovals indicate the areas where the seismic regime has been changing significantly

#### Зона 1. Устье залива Ис-фьорд

По графику динамики сейсмического процесса (рис. 8) видно, что в конце мая 2017 г. уровень сейсмической активности здесь скачкообразно увеличился, энерговыделение и частота появления сейсмических событий возросли примерно в 5 раз, появились сильные события с магнитудами выше 2. Сильного первого толчка не зафиксировано, т. е. наблюдается рой землетрясений.



Рис. 8. Динамика сейсмического процесса в зоне 1 (устье залива Ис-фьорд) Fig. 8. Dynamics of seismic process in zone 1 (mouth of the Isfjorden Bay)

События локализованы в компактной области в устье Ис-фьорда, волновые формы очень похожи (рис. 9). Распределение по часам суток и дням недели однородно, что позволяет исключить человеческую деятельность. Природа событий данного роя неясна.



Рис. 9. Записи события в устье Ис-фьорда станциями Шпицбергенской сети и его локация Fig. 9. Records of the event at the mouth of the Isfjorden by the stations of the Spitsbergen network and its location

# Зона 2. Район пос. Хорнсунн

Сейсмическая активность в этой зоне резко возросла к концу мая, почти одновременно с активностью в зоне 1. В конце мая начались сильные сейсмические события с магнитудами выше 2, доходящими до 4 (рис. 10), однако черты классической афтершоковой последовательности

отсутствовали: выраженного первого сильного толчка и следующих за ним афтершоков не наблюдалось (рис. 11). Таким образом, наблюдается рой землетрясений, по всей видимости, тектонической природы. Данный рой не затих и к концу 2017 г.



Рис. 10. Динамика сейсмического процесса в зоне 2 (район пос. Хорнсунн) Fig. 10. Dynamics of the seismic process in zone 2 (area of the Hornsund settlement)



Рис. 11. Начало роя землетрясений в районе пос. Хорнсунн Fig. 11. The beginning of a swarm of earthquakes in the area of the Hornsund settlement

## Зона 3. К северу от пос. Кингсбей

Зона 3 активизировалась к августу 2017 г (рис. 12). Наблюдается типичная картина ледниковой активности — плавная активизация в августе-сентябре, большую часть потока составляют события небольших магнитуд — 1,0–1,2.



Рис. 12. Динамика сейсмического процесса в зоне 3 (к северу от пос. Кингсбей) Fig. 12. Dynamics of the seismic process in zone 3 (to the north of the Kingsbey settlement)

# Зона 4. К северо-востоку от пос. Лонгийр

По динамике сейсмического процесса данная зона полностью аналогична зоне 3 (рис. 13). Наблюдается типичная картина ледниковой сейсмичности.



Рис. 13. Динамика сейсмического процесса в зоне 4 (к северо-востоку от пос. Лонгийр) Fig. 13. Dynamics of the seismic process in zone 4 (to the north-east of the town of Longyearbyen)

# Зона 5. Район Свеагрува

В марте 2017 г. в этой зоне произошел кратковременный скачок сейсмической активности (рис. 14). Скачок выразился в многократном увеличении числа слабых событий с магнитудами меньше 1. Распределение числа событий по часам суток и дням недели близко к равномерному, что позволяет исключить их техногенную природу. Возможно, наблюдалась кратковременная активизация ледника.



Рис. 14. Динамика сейсмического процесса в зоне 5 (район пос. Свеагрув) Fig. 14. Dynamics of the seismic process in zone 5 (area of the Sveagruva settlement)

## Зона 6. Ледник Осгор

К концу 2017 г. (ноябрь-декабрь) активизировалась зона на территории ледника Осгор. Число низкомагнитудных событий в декабре 2017 г. скачкообразно увеличилось (рис. 15).





#### Заключение

По результатам обработки данных 2017 г. можно сделать следующие выводы:

1. Сейсмический режим архипелага является комбинацией потоков событий различной природы — тектонических, ледниковых и, возможно, какой-то другой природы (достоверных объяснений активизации зоны в устье залива Ис-фьорд и района Свеагрув пока не найдено).

2. Сейсмический режим архипелага нестационарен, помимо фоновой сейсмичности выделяются рои землетрясений и афтершоковые последовательности.

Таким образом, использование системы NSDL позволяет по-новому взглянуть на сейсмическую активность архипелага, заметить явления, которые не наблюдались ранее, а также проследить изменение сейсмической активности во времени.

В дальнейшем необходимо обработать с применением данного подхода все имеющиеся данные для анализа динамики сейсмичности Шпицбергена за более длительный период времени.

#### ЛИТЕРАТУРА

**1**. *Austegard A*. Earthquakes in the Svalbard area. Norsk Polarinst. Ärbok, 1974. Р. 83–99. **2**. *Mitchell B. J., Chan W. W.* Characteristics of earthquakes in the Heerland Seismic Zone of Eastern Spitsbergen // Polarforshung. 1978. Vol. 48. P. 31–40. **3**. NORSAR GBF Bulletins — 2012. URL: http://www.norsardata.no/NDC/bulletins/gbf. **4**. NORSAR Reviewed Regional Seismic Bulletin. URL: http://www.norsardata.no/NDC/bulletins/regional. **5**. Система автоматического мониторинга сейсмичности северо-запада России и западного сектора Арктики / *B. Э. Асминг [и др.]* // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: материалы XI Междунар. сейсмол. шк. / отв. ред. А. А. Маловичко. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2016. С. 34–36. **6**. *Асминг В. Э., Федоров А. В.* Возможности применения автоматического детектора-локатора сейсмических событий по одиночной станции для детальных сейсмологических наблюдений // Сейсмические приборы. 2014. Т. 50, № 3. С. 19–23. **7**. Сейсмологические наблюдения за активностью ледников архипелага Шпицберген / *А. В. Федоров [и др.]* // Вестник МГТУ. 2016. Т. 19, № 1. С. 151–159. **8**. Кольский филиал Единой геофизической службы РАН: офиц. сайт. URL: http://www.krsc.ru.

# Сведения об авторах

*Асминг Владимир Эрнестович* — кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Кольского филиала ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН»

E-mail: asmingve@mail.ru

Фёдоров Андрей Викторович — кандидат физико-математических наук, зам. директора по науке Кольского филиала ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН»

E-mail: andrey\_v\_fedorov@inbox.ru

Аленичева Алена Олеговна — младший научный сотрудник Кольского филиала ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН»

E-mail: polushkina-alena@yandex.ru

*Евтюгина Зинаида Анатольевна* — кандидат биологических наук, научный сотрудник Кольского филиала ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН»

E-mail: zina\_evt@mail.ru

## Author Affiliation

Vladimir E. Asming — PhD (Physics & Mathematics), Leading Researcher, Kola Branch of the Geophysical Survey of RAS
E-mail: asmingve@mail.ru
Andrey V. Fedorov — PhD (Physics & Mathematics), Deputy Director for Science, Kola Branch of the Geophysical Survey of RAS
E-mail: andrey\_v\_fedorov@inbox.ru
Alena O. Alenicheva — Junior Researcher, Kola Branch of the Geophysical Survey of RAS
E-mail: polushkina-alena@yandex.ru
Zinaida A. Jevtjugina — PhD (Biology), Researcher, Kola Branch of the Geophysical Survey of RAS
E-mail: zina\_evt@mail.ru

## Библиографическое описание статьи

Применение системы автоматической локации NSDL для детального изучения сейсмичности архипелага Шпицберген / В. Э. Асминг [и др.] // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2018. — № 3 (10). — С. 120–131.

## Reference

Asming Vladimir E., Fedorov Andrey V., Alenicheva Alena O., Jevtjugina Zinaida A. Usage of the NSDL Location System for the Detailed Study of the Spitsbergen Archipelago Seismicity. Herald of the Kola Science of the RAS, 2018, vol. 3 (10), pp. 120–131 (In Russ.).

# DOI: 10.25702/KSC.2307-5228.2018.10.3.132-140 УДК 550.343.4

# СЕЙСМИЧНОСТЬ РАЙОНА АРХИПЕЛАГА ШПИЦБЕРГЕН В 2016, 2017 гг.\*

## С. В. Баранов, В. Э. Асминг, А. Н. Виноградов, А. В. Федоров

Кольский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», г. Апатиты

#### Аннотация

Рассматривается сейсмичность района арх. Шпицберген и прилегающей акватории за 2016, 2017 гг., приводится распределение землетрясений по годам и сейсмогенным зонам океанической и шельфовой частей архипелага. Подробно рассматривается пара землетрясений с магнитудой больше 5, которые произошли 29 марта 2016 г. в проливе Стурфьорд, причем повторный толчок произошел через 27 с после первого в том же самом месте.

#### Ключевые слова:

сейсмичность, арх. Шпицберген, энерговыделение, парные землетрясения.

#### SEISMICITY OF SPITSBERGEN AREA IN 2016, 2017

Sergey V. Baranov, Vladimir E. Asming, Anatoliy N. Vinogradov, Andrey V. Fedorov Kola Branch of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences, Apatity

#### Abstract

The paper considers seismicity of Spitsbergen archipelago and adjacent water areas in 2016 and 2017. The distribution of the earthquakes by years and seismic zones of the oceanic and shelf parts of the archipelago, is provided. A couple of earthquakes with a magnitude greater than 5 that occurred on 29.03.2016 in Storefjorden strait (the second event occurred in 27 seconds after the first one and in the same place) are in detail considered.

#### Keywords:

seismicity, Spitsbergen archipelago, energy release, earthquake pair.

#### Введение

Кольский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» (КоФ ФИЦ ЕГС РАН) осуществляет мониторинг сейсмичности района арх. Шпицберген с помощью региональной сети сейсмических станций: BRBA, BRBB (КоФ ФИЦ ЕГС РАН), KBS (IRIS), SPITS (NORSAR), HSPB (Институт геофизики Польской академии наук), BJO1 (Университет Бергена) (рис. 1).

Данные со всех станций сети Шпицбергена поступают в КоФ ФИЦ ЕГС РАН в г. Апатиты в режиме времени, близком к реальному, где с помощью специально разработанного программного обеспечения [1] выполняется автоматическая обработка, включающая обнаружение, локацию и определение энергетических параметров сейсмических событий. Результаты автоматической обработки просматриваются и, при необходимости, корректируются опытными интерпретаторами.

Статья является обзором сейсмичности района арх. Шпицберген, традиционно представляемым КоФ ФИЦ ЕГС РАН на конференции «Комплексные исследования природы Шпицбергена и прилегающего шельфа» [2]. Настоящий обзор охватывает период 2016–2017 гг. Помимо общей картины сейсмичности, рассматривается пара землетрясений с магнитудой больше 5, произошедших 29 марта 2016 г. в течение 27 с в проливе Стур-фьорд. Они примечательны тем,

<sup>\*</sup> Статья подготовлена в рамках НИР государственного задания ФИЦ ЕГС РАН № № 007-00186-18-00.

что из-за пространственно-временной близости первичные волны второго события скрыты кодой первого события. Это привело к пропуску второго события мировыми агентствами при рутинной обработке.



Рис. 1. Региональная сеть сейсмических станций Шпицбергена: *I* — трехкомпонентная сейсмическая станция; *2* — сейсмическая группа Fig. 1. Regional seismic network of Svalbard: *I* — three-component seismic station; *2* — seismic array

#### Краткая геолого-тектоническая характеристика и сейсмогенез региона

Район арх. Шпицберген в геолого-тектоническом плане представляет собой пассивную окраину Евразийской плиты, граничащую с зонами ультрамедленного спрединга в областях молодого океанообразования в Северной Атлантике (хребты Книповича, Мона, Шпицбергенская зона разломов (ШЗР)) и Северном Ледовитом океане (хр. Гаккеля). Согласно общепринятым представлениям [3–6], ультрамедленный спрединг создает тектонические деформации, приводящие к подвижкам по трансформным разломам. Этот процесс определяет сейсмогенез этих территорий, в которых локализована основная масса ощутимых землетрясений [7]. Вместе с тем, согласно данным о тензорах сейсмического момента сильных землетрясений, значительный вклад в сейсмичность этих хребтов также вносит смещение Евразийской плиты относительно Североамериканской [8]. Это вывод согласуется и с данными GPS-наблюдений [9].

Центральные области Баренцевоморско-Карской шельфовой плиты практически асейсмичны (рис. 2). Исключением является западная окраина Баренцевоморского шельфа, охватывающая также континентальный склон и Свальбардское поднятие, морфологически проявленное в виде архипелага Шпицберген. Здесь зафиксировано поле сейсмичности, приуроченное к закартированным в этом районе дизъюнктивным структурам, на дне моря и на суше островов [10].

Один из самых активных очаговых ареалов внутриплитовых землетрясений приурочен к проливу Стур-фьорд (рис. 2), где 21 февраля 2008 г. произошло сильнейшее за всю историю инструментальных наблюдений на шельфе Баренцева моря землетрясение с Мw 6,1. Землетрясение 2008 г. вызвало сильнейший афтершоковый процесс [7, 11]. К настоящему времени (июнь 2018 г.) сейсмическая активность района пролива Стур-фьорд все еще не вернулась к уровню до 2008 г. В 2016 г. эта зона являлось наиболее активной — зарегистрировано два землетрясения с ML ≥ 5. Эти события примечательны тем, что они имели близкие магнитуды, причем второе событие произошло через 27 с после первого в том же самом месте.



Fig. 2. Main seismic zones of Svalbard and  $ML \ge 2$  earthquakes recorded in 2016, 2017

## Сейсмичность 2016 и 2017 гг.

В 2016, 2017 гг. в районе арх. Шпицберген и прилегающей акватории, область с координатами 72–84° с. ш. и 8° з. ш. — 33,5° в. ш., было зарегистрировано 476 землетрясений с магнитудами ML от 2 до 5,6 (рис. 2). Распределение количества землетрясений и выделившейся сейсмической энергии по годам и сейсмогенным зонам приведено в табл. 1. Наиболее активной зоной (максимум выделившейся энергии) в 2016 г. являлся пролив Стур-фьорд, где 29 марта 2016 г. произошло 2 землетрясения с магнитудами ML 5,3 и 5,1. Эти два события оказались сильнейшими землетрясениями, зарегистрированными в районе Шпицбергена в 2016 г. В 2017 г. наибольшая активность отмечена в ШЗР, 9 июня в 20:49:48 UTC произошло землетрясение с магнитудой ML 5,6. Другое землетрясение с ML 5,1 произошло 29 декабря в 13:15:43 UTC на хребте Мона (рис. 2).

Суммарное выделение сейсмической энергии в зонах, составляющих океаническую часть района Шпицбергена (хребты Мона, Книповича, ШЗР), в 2016 г. было примерно в 7 меньше, чем в зонах шельфовой части (континентальный склон, острова Западный Шпицберген и Северо-Восточная Земля, пролив Стур-фиорд и желоб Зюйдкап). В 2017 г. энерговыделение в океанической части было в 15 раз больше, чем на шельфе. Ситуация, когда энерговыделение океанической части значительно превосходит выделение сейсмической энергии на шельфе, является типичной. Тем не менее время от времени в проливе Стур-фьорд и желобе Зюйдкап происходят сильные землетрясения (1976, 2003, 2008, 2016 гг.), в результате которых шельф является более активным, чем океаническая часть.

# Распределение землетрясений с магнитудой $ML \ge 2$ (количество и энергия *E*), зарегистрированных в районе Шпицбергена в 2016, 2017 гг. по сейсмогенным зонам

Сейсмогенная зона	2016	Г.	2017 г.		
Seismic zone	Количество Number	Е, Дж	Количество Number	Е, Дж	
Континентальный склон Continental margin	5	4,3·10 <sup>10</sup>	7	2,0·10 <sup>10</sup>	
Пролив Стур-фьорд и желоб Зюйдкап The strait of Storefjorden and the trough of Zuidkapp	106	5,1·10 <sup>13</sup>	34	6,6·10 <sup>12</sup>	
Острова Западный Шпицберген и Северо- Восточная Земля West Svalbard and Northeastern Land	28	3·10 <sup>10</sup>	55	4,2·10 <sup>12</sup>	
Шельфовая часть Shelf part	139	5,1·10 <sup>13</sup>	96	1,1·10 <sup>13</sup>	
ШЗР и Моллой SFZ and Molloy	35	6,5·10 <sup>12</sup>	30	1,4·10 <sup>14</sup>	
Хребет Книповича Knipovich Ridge	58	4,1.10 <sup>11</sup>	39	1,6·10 <sup>12</sup>	
Хребет Мона Mohn Ridge	33	7,3·10 <sup>11</sup>	32	1,9·10 <sup>13</sup>	
Океаническая часть Oceanic part	126	7,7·10 <sup>12</sup>	101	1,6·10 <sup>14</sup>	

Distribution of ML  $\geq$  2 earthquakes in seismic zones (number and energy *E* in Joules) recorded in the area of Svalbard in 2016, 2017

Ощутимые землетрясения (ML 3,5 или выше) распределены по сейсмогенным зонам неравномерно. В 2016 г. ощутимые землетрясения происходили на континентальном склоне (1 событие), спрединговый центр Моллой и ШЗР (9 событий), пролив Стур-фьорд и желоб Зюйдкап (7 событий), хребет Книповича (3 события), хребет Мона (10 событий), острова Западный Шпицберген и Северо-Восточная Земля (0 событий). В 2017 г. ощутимые землетрясения происходили в районе спредингового центра Моллой и ШЗР (16 событий), пролива Стур-фьорд и желоба Зюйдкап (6 событий), хр. Книповича (5 события), хр. Мона (7 событий), островов Западный Шпицберген и Северо-Восточная Земля (8 события).

# Пара землетрясений 29 марта 2016 г. в проливе Стур-фьорд

Пара землетрясений 29 марта 2016 г. в проливе Стур-фьорд примечательна тем, что эти события имели близкие магнитуды, причем второе событие произошло через 27 с после первого в том же самом месте. Географическая и временная близость этих землетрясений привела к наложению сейсмограмм этих событий и явилась причиной того, что второе событие отсутствует в каталогах мировых агентств за исключением каталога КоФ ФИЦ ЕГС РАН. Ниже рассматриваются особенности волновых форм и определение координат гипоцентров этих землетрясений, а также деформация в очаге первого толчка.

Определение гипоцентра первого землетрясения 29 марта 2016 г. выполнялось по первым вступлениям Р-волн с использованием данных 10 станций, включая станции сети Шпицбергена (рис. 1), а также станцию ARCES (NORSAR), расположенную в Северной Норвегии, и станции PRYB, TER, APA (КоФ ФИЦ ЕГС РАН), расположенные в Мурманской обл. Время в очаге — 10:32:09

(UTC), координаты гипоцентра — 77,859° с. ш. и 21,026° в. д., глубина — 27 км (рис. 3). Мы считаем, что при нечетких вступлениях S-волн и наличии большого числа зарегистрировавших событие станций такой способ локации более предпочтительным по сравнению с использованием фаз P- и S-волн, поскольку определение времени вступления S-волны менее точно, чем P-волны.



Рис. 3. Определение координат гипоцентра первого землетрясения 29 марта 2016 г. по первым вступлениям Р-волн

Fig. 3. Determination of the hypocenter coordinates of the first earthquake occurred on March 29, 2016 using the P-wave onsets

Выполнив фильтрацию записей на региональных станциях в полосе 2–10 Гц, мы обнаружили, что через 27 с после основного толчка на каждой станции присутствует некая фаза (рис. 4). Временная задержка между этой фазой и вступлением S-волны первого толчка одинакова на всех станциях (рис. 4), следовательно, данная фаза не порождена переотражением сейсмических волн первого события от неоднородностей внутри Земли. Таким образом, данная фаза принадлежит второму толчку, произошедшему через 27 с после первого в том же самом месте. Поляризационный анализ этой фазы показал, что фаза принадлежит S-волне.

Используя времена прихода S-волн от второго события на региональные станции BRBA, HSPB, HOPPEN, KBS и координаты первого события, мы рассчитали времена прихода P-волны от второго события на станции, по которым выполнялась локация (рис. 5). На всех станциях вступление P-волны от второго события скрыто кодой P-волны от первого события. Вступление S-волны от второго события просматривается в диапазоне частот 2–10 Гц только на станциях, удаленных не более чем на 250 км от эпицентра. На остальных же станциях это вступление скрыто кодой S-волны. Таким образом, близость времен в очаге, а также одни и те же координаты эпицентров являются причинами пропуска второго землетрясения при рутинной обработке, несмотря, как показано ниже, на близкие магнитуды этих событий.

Непосредственное определение магнитуды второго толчка невозможно, поскольку фазы сейсмических волн перекрываются кодами волн первого землетрясения (рис. 5). Вместе с тем на ближних станциях BRBA и SPI S-волна от второго события четко просматривается. На ближайшей станции SPI (111 км от эпицентра) присутствует зашкал записи на S-волнах обоих событий. На станции BRBA (160 км от эпицентра) амплитуда S-волны от первого события меньше, чем

от второго, периоды S-волн совпадают. На станции HSPB (165 от эпицентра) амплитуда S-волны второго события меньше, чем от первого, что свидетельствует об ориентации источника; периоды совпадают. Таким образом, исходя из соотношения максимальных амплитуд S-волн и совпадения их периодов, мы можем заключить, что магнитуды первого и второго землетрясений близки, а плоскости разрыва в очагах имеют разную ориентацию. Мы определили магнитуды второго события ML 5,1.

□ 29.03.2016	10.31:09.5	dt=10 sec, h=0.01 sec/sample	10.35:49.5
SPAO : HHZ			-10482963:10329128.3
HSPB: HHZ	· · · ·		-6216850.2:9214370.31
BRBA: HHZ		province of the file large and the second	-868157.84:974780.179
KBS:BZ			-304763.08:309972.337
BJ01:HHZ			-13322.844:14053.224
	tod to c	A Start	

Рис. 4. Сейсмограммы землетрясения 29 марта 2016 г., выравненные по временам вступления S-волн на станции (черные и синие вертикальные прямые — вступления P- и S-волн первого события; зеленая вертикальная прямая — S-фаза второго события)

Fig. 4. Seismograms of the March 29, 2016 earthquake aligned according the S-wave onsets at the station (black vertical lines are P-wave onsets and the blue ones are S-wave onsets of the first event; green vertical line marks S-phase of the second event)

10.39:06.6 10 31.06 dt=60 sec. h=0.01 sec/sample -8615988.3:7920531.81 SPAO: HHZ BRBA: HHZ -174725.73:213163.35 HSPB : HHZ -6216850.2:9214370.31 -595908.37:673614.66 HOPEN : HHZ -1568402.9:1617406.84 KBS:BZ BJO1 : HHZ -6776.552:6308.393 ARAO : HHZ -53455.426:58050.808 PRYB : SHZ 2009.215:1813.45 TER: SZ 3606.786:3660.876 APA0:SHZ 1.77997.877:78553.587

- Рис. 5. Рассчитанные времена прихода сейсмических волн станции региональной сети Шпицбергена от второго события 29 марта 2016 г. в 0:32:36 UTC (черные и синие прямые рассчитанные вступления Р- и S-волн соответственно)
- Fig. 5. Calculated seismic wave onsets at the station of Svalbard regional network from the second event on March 29, 2016 at 0:32:36 UTC (the black and blue straight lines are the calculated P- and S-wave onsets, respectively)

#### Деформации в очаге первого землетрясения 29 марта 2016 г.

Тип деформации в очаге землетрясения (сдвиг, растяжении или сжатие) можно определить с помощью коэффициента Лоде — Надаи:

$$LN = 3V_2/(V_1 - V_3)$$
  $(0 \le LN \le 1),$ 

где  $V_1 \ge V_2 \ge V_3$  — собственные числа тензора.

При LN = 0 имеет место простой сдвиг, двухдипольный источник, при LN = 1 (-1) — одноосное растяжение (сжатие), недвухдипольный источник. Применение коэффициента LN без учета ошибок компонент тензора сейсмического момента часто приводит к ложному определению типа источника [12].

Рассчитав методом Монте-Карло коэффициент LN (1) с учетом стандартных ошибок компонент тензора (табл. 2), получим распределение значений (рис. 6), из которого следует, что источник значимо отклоняется от двойного диполя (LN значимо меньше 0), среднее LN = -0,49, то есть половина сейсмического момента вызвано деформацией сжатия, а другая половина — сдвигом вдоль плоскости разрыва.

Таблица 2 Table 2

Значения компонент тензора сейсмического момента землетрясения 23 марта 2016 г., в 10:32:09 Mw 5,2 (по данным Глобального каталога СМТ)

The values of seismic moment tensor components of the March 23, 2016 earthquake occurred at 10:32:09, Mw 5.2 (according to the Global CMT Catalog)

Компонента Component	M <sub>RR</sub>	$M_{\text{TT}}$	$M_{PP}$	M <sub>RT</sub>	$M_{RP}$	$M_{TP}$
Значение компоненты Component value	-0,232	0,828	-0,596	0,106	0,042	0,023
Стандартная ошибка Standard error	0,019	0,02	0,013	0,03	0,027	0,012





Fig. 6. The histogram of the values of Lode-Nadai coefficient (1) calculated taking into account the errors of the seismic moment tensor components (Table 2) of the first earthquake on March 23, 2016 at 10:32:09 UTC, ML 5.3 (vertical line denotes an average value -0,49)

Очаги с недвухдипольным источником возникают в областях с вулканизмом. Другой причиной недвухдипольного источника является сложное строение очаговой зоны: имеются две или более плоскости разрыва [13]. Примером такого очага является Рачинское землетрясение с магнитудой Ms 6,9, произошедшее в 1991 г. на Кавказе [14].

При определении механизма очага, значимо отклоняющегося от двойного диполя, по знакам первых вступлений Р-волн при определении нодальных плоскостей должна возникать неопределенность, вызванная перемешиванием положительных и отрицательных знаков на стереографической проекции. Вместе с тем при определении механизма очага первого землетрясения 23 марта 2016 г. нодальные плоскости определяются без затруднений (рис. 7).



Puc. 7. Определение механизма очага землетрясения 23 марта 2016 г. в 10:32:09 по знакам первых вступлений Fig. 7. Determination of focal mechanism of the earthquake of March 23, 2016 at 10:32:09 using the signs of the first arrivals

При расчете компонент тензора сейсмического момента в каталоге GCMT с помощью моделирования полного волнового пакета [15] наложение волн от разных событий, имеющих различную ориентацию плоскостей разрыва, искажает значение компонент тензора и увеличивает стандартные ошибки. Таким образом, отклонение очага первого землетрясения вызвано не строением очаговой зоны, а наложением волн от второго события на волны первого события.

Отметим, что рассчитать тензор сейсмического момента или хотя бы механизма очага для второго землетрясения невозможно из-за перемешивания волн первого и второго землетрясений.

## Заключение

Рассмотрена сейсмичность района арх. Шпицберген за 2016 и 2017 гг., приведено распределение землетрясений по сейсмогенным зонам океанической и шельфовой частей района Шпицбергена. Определены координаты гипоцентра, время в очаге и магнитуда землетрясения 29 марта 2016 г. с ML 5,3 по данным 10 станций. Установлено, что через 27 с после первого землетрясения в том же самом месте произошло второе землетрясение с близкой магнитудой, сведения о котором отсутствуют в каталогах мировых агентств, за исключением каталога ФИЦ ЕГС РАН. С помощью решения прямой задачи были определены моменты прихода сейсмических волн от второго землетрясения на станции сети. Показано, что отклонение очага первого землетрясения от двойного диполя вызвано перекрытием волн первого и второго землетрясений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Система автоматического мониторинга сейсмичности Европейской Арктики / А. В. Фёдоров [и др.] // Сейсмические приборы. 2018. Т. 54, № 1. С. 29–39. 2. Баранов С. В., Виноградов А. Н. Сейсмичность района Шпицбергена в 2012–2013 годах // Комплексные исследования природы Шпицбергена и прилегающего шельфа: материалы междунар. науч. конф. (Мурманск, 6–8 ноября 2014 г.). М.: ГЕОС, 2014. Вып. 12. С. 21–27. **3.** Аветисов Г. П. Некоторые параметры землетрясений Срединно-Арктического сейсмического пояса // Геолого-геофизические характеристики литосферы Арктического региона. 2006. Т. 210. С. 176–187. (Труды ВНИИОкеангеология, вып. 6). 4. Bird P., Kagan Y. Y., Jackson D. D. Plate tectonics and earthquake potential of spreading ridges and oceanic transform faults // Plate Boundary Zones, Geodynamics Series / Edt. S. Stein, J. T. Frevmueller, Washington DC; Am, Geophys, U., 2002, Vol. 30, P. 203-218, 5, Seismicity and active tectonic processes in the ultra-slow spreading Lena Trough, Arctic Ocean / C. Läderach [et al.] // Geophysical J. Intern. 2011. Vol. 184, Is. 3. P. 1354–1370. 6. Schlindwein V., Muller C., Jokat W. Microseismicity of the ultraslow-spreading Gakkel ridge, Arctic Ocean: a pilot study // Geophys. J. Intern. 2007. Vol. 169. P. 100-112. 7. Баранов С. В. Афтершоковый процесс землетрясения 21.02.2008 г. в проливе Стур-фьорд (архипелаг Шпицберген) // Вулканология и сейсмология. 2013. № 3. C. 1–15. 8. Vinogradov A. N., Baranov S. V. Recent geodynamic regime of the Eurasia — North American interplate boundary: Evidences from seismology of Arctic / MSTU. 2012. Vol. 15, No. 2. P. 435-438. 9. GPS-Measuring Plate Motion. How fast are the tectonic plates moving? URL: https://www.iris.edu/hq/files/programs/education\_and\_outreach/aotm/14/1.GPS\_Background.pdf. 10. Dallmann W. K. Piepjohn K. Blomeier D. Geological map of Billefjorden, 1:50000, Central Spitsbergen, Svalbard, with geological excursion guide // Norsk Polarinstitutt Temakart 36. 2004. 11. Баранов С. В., Виноградов А. Н. Возможные причины аномальной сейсмической активности в проливе Стур-фьорд (архипелаг Шпицберген) в 2008-2009 годах // Вестник СПбГУ. Сер. 7. 2010. Вып. 4. С. 23-31. 12. Yunga S., Lutikov A., Molchanov O. Non double couple seismic sources, faults interaction and hypothesis of self-organized criticality // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2005. Vol. 5. P. 11-15. 13. Frohlich C. Earthquakes with non-double-couple mechanisms // Science. 1994. Vol. 264. P. 804-809. 14. Строение очаговой зоны Рачинского землетрясения 1991 г. по данным локальной сейсмической томографии с адаптивной параметризацией среды / С. А. Тихоцкий [и др.] // Геофизические исследования. 2011. Т. 12, № 1. С. 5–32. 15. Dziewonski A. M., Chou T.-A., Woodhouse J. H. Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity // J. Geophys. Res. 1981. Vol. 86. P. 2825-2852.

## Сведения об авторах

Баранов Сергей Владимирович — кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Кольского филиала ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН»

E-mail: bars.vl@gmail.com

*Асминг Владимир Эрнестович* — кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Кольского филиала ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН»

E-mail: asmingve@mail.ru

Виноградов Анатолий Николаевич — кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Кольского филиала ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН»

E-mail: vino@admksc.apatity.ru

Фёдоров Андрей Викторович — кандидат физико-математических наук, директор Кольского филиала ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН»

E-mail: andrey\_v\_fedorov@inbox.ru

#### **Author Affiliation**

Sergey V. Baranov — PhD (Physics & Mathematics), Leading Researcher, Kola Branch of the Geophysical Survey of RAS E-mail: bars.vl@gmail.com Vladimir E. Asming — PhD (Physics & Mathematics), Leading Researcher, Kola Branch of the Geophysical Survey of RAS E-mail: asmingve@mail.ru Anatoliy N. Vinogradov — PhD (Geology & Mineralogy), Leading Researcher, Kola Branch of the Geophysical Survey of RAS E-mail: vino@admksc.apatity.ru Andrey V. Fedorov — PhD (Physics & Mathematics), Director of the Kola Branch of the Geophysical Survey of RAS E-mail: andrey\_v\_fedorov@inbox.ru

## Библиографическое описание статьи

Сейсмичность района архипелага Шпицберген в 2016, 2017 гг. / С. В. Баранов [и др.] // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2018. — № 3 (10). — С. 132–140.

#### Reference

Baranov Sergey V., Asming Vladimir E., Vinogradov Anatoliy N., Fedorov Andrey V. Seismicity of Spitsbergen Area in 2016, 2017. Herald of the Kola Science Centre of the RAS, 2018, vol. 3 (10), pp. 132–140 (In Russ.).

# DOI: 10.25702/KSC.2307-5228.2018.10.3.141-146 УДК 559.3/5

# ТЕКТОНИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТЕЙ В ПРИДОННЫХ СЛОЯХ ЛЕДНИКОВ

## В. П. Епифанов

ФГБУН Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН, г. Москва

#### Аннотация

Рассмотрены закономерности деформационных изменений структуры пресноводного льда в условиях гидростатического сжатия при сдвиге под действием сходящихся и расходящихся фронтов импульсов напряжений. Исследовано обтекание льдом препятствия, распределение скоростей в цилиндрическом канале, формирование промежуточного слоя вблизи поверхности шарового индентора при медленном ударе. Рассмотрено усиление пластичности льда при наложении упругих волн конечной амплитуды, включая кумулятивный эффект.

#### Ключевые слова:

контактное разрушение, промежуточный слой, кумулятивный эффект, структура и текстура льда.

#### TECTONIC STRUCTURE AND VELOCITY DISTRIBUTION IN THE BOTTOM LAYERS OF GLACIERS

#### Viktor P. Epifanov

Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences

#### Abstract

The regularities of deformation changes in the structure of freshwater ice under conditions of hydrostatic shear compression under the action of convergent and diverging fronts of stress pulses, are considered. We studied the flow of ice around obstacles, the distribution of velocities in a cylindrical channel and the formation of an intermediate layer near the surface of the spherical indentor with a slow impact. The enhancement of the plasticity of ice under the imposition of elastic waves of finite amplitude, including the cumulative effect, is considered.

#### Keywords:

contact fracture, intermediate layer, structure and texture of ice, cumulative effect.



#### Введение

Проблема движения льда в ледниках включает широкий круг вопросов, связанных с механикой его контактного разрушения. Актуальность изучения процессов, происходящих в придонных слоях ледников и на его бортах, не ограничивается только геосредами, но охватывает широкий круг практически значимых технических приложений, например, взаимодействие ледяных полей с конструкциями (ледостойкими платформами и судами). Общим для этих взаимодействий является формирование промежуточного

слоя разной толщины вблизи фрикционного контакта. Ключевыми вопросами в понимании механики контактного деформирования и разрушения льда является формирование промежуточного слоя, определение структуры, прочностных и реологических характеристик льда в этом слое, а также моделирование предельных режимов обтекания льдом препятствий и визуализация объемного распределения скоростей движения льда со структурой промежуточного слоя в круглом канале.

Базовую основу для осуществления этих исследований составляют известные результаты изучения процессов деформирования тел со сложной реологией [1], модельные эксперименты по определению ледового сопротивления судна [2], а также создание научных основ физики сверхпластичных материалов [3]. Анализ опубликованных данных по исследованиям движения ледников и контактному разрушению льда [4] позволяет сформулировать базовую концепцию дальнейших исследований в виде задачи о влиянии микроструктуры промежуточного слоя льда на режимы движения льда в ледниках. Поиск решения осуществляется в виде зависимости напряжений от деформаций, скоростей деформаций, температуры и микроструктуры льда.

В данной работе рассматриваются три серии экспериментов пластического разрушения льда, имитирующих условия взаимодействия ледников с неровным ложем, в которых решаются следующие задачи:

1. Экспериментальные исследования характеристик вторичной структуры пресноводного льда при интенсивной пластической деформации, формирующейся при ударе и сдвиге в условиях гидростатического сжатия.

2. Разработка теоретической модели, устанавливающей связь между структурой льда и его макроскопическими характеристиками.

3. Влияние импульсов напряжений на структуру и механические характеристики льда в промежуточном слое, включая кинетику формирования вторичных структур льда под влиянием импульсов напряжений.

#### Предмет исследования, методики и аппаратура

Для исследований выбраны прозрачные образцы пресноводного льда со структурой A4 и A9 [5] (по классификации H. B. Черепанова). Чистый прозрачный пресноводный лед позволяет визуально наблюдать деформационные изменения его микроструктуры (кристаллы, трещины, их размеры, количество и ориентация).

Количественное исследование деформационных изменений его микроструктуры выполняли с помощью акустических методов (акустической эмиссии и импульсно-фазового). Полученные результаты того, как микроструктура в чистом виде влияет на тот или иной акустический параметр, дают основания связать микроструктуру льда и акустические методы с макромеханикой. Поскольку акустические параметры отражают изменения структуры льда в интегральном виде, то их связь с микроструктурой может быть представлена в виде простых уравнений без потери достоверности. Описание оригинальной аппаратуры и методик измерений представлено в публикациях [6–9].

#### Результаты и их обсуждение

**Пластический удар** шарового индентора по ледяной плите (рис. 1). В этой серии экспериментов гладкий шар, находящийся в свободном падении, ударяет о массивную ледяную пластину. Удар — нормальный, шар выполнен из твердого материала (HRC 60-62), ледяная пластина большой массы покоится на жестком массивном основании. Это позволяет рассматривать ледяную пластину как упруго-пластичное полупространство.

*Измерительное устройство* состоит из шарового индентора, жестко скрепленного с пьезоэлементом, который подключен к корректирующему предусилителю, и запоминающего осциллографа [7]. Начальная скорость соударения задается высотой поднятия индентора над поверхностью ледяной пластины. Результаты измерений представлены на рис. 2.



Рис. 1. Схема пластического удара (∂), распределение контактного давления для плоского кругового штампа (a), модель упругопластического внедрения шарового индентора (б, 1 — гидростатическое ядро, 2 — пластическая зона, 4 — индентор), в и г — изополя касательных и нормальных напряжений. Обозначения: R — радиус индентора; ζ — глубина осадки; h — толщина промежуточного слоя

Fig. 1. Scheme of plastic shock ( $\partial$ ), the contact pressure distribution for a flat circular die (a), model of elastoplastic insertion of a spherical indenter ( $\delta$ , 1 — hydrostatic core, 2 — plastic zone, 4 — indenter), e and z — isopole tangential stresses and isopole normal stresses. Legend: R — indenter radius;  $\zeta$  — depth of precipitation; h — thickness of the intermediate layer



Рис. 2. Результаты измерений: *а* — осциллограммы ударного взаимодействия шарового индентора с ледяной пластиной в зависимости от энергии удара; *б* — зависимости мгновенной силы (линии 1–7) от глубины осадки при начальных скоростях соударения 0,48 (1), 0,59 (2), 0,83 (3), 0,99 (4), 1,4 (5), 1,87 (6) и 2,23 (7) м/с, теоретическая кривая (8); *в* — зависимости среднего давления от мгновенной скорости для тех же скоростей удара; *г* — обобщенная зависимость напряжения от скорости удара (кривая 2) и зависимость максимальных напряжений от скорости деформаций при одноосном сжатии (кривая 1); *д* — зависимости мгновенного усилия от осадки по Герцу (1), Кильчевскому (2) [10], экспериментальная кривая (3)

Fig. 2. Measurement results: a — oscillograms of the shock interaction of a spherical indenter with an ice plate, depending on the impact energy;  $\delta$  — dependences of the instantaneous force (lines 1–7) on the depth of precipitation at initial impact velocities of 0,48 (1), 0,59 (2), 0,83 (3), 0,99 (4), 1,4 (5), 1,87 (6) and 2,23 (7) m/s, theoretical curve (8); e — dependences of the average pressure on the instantaneous velocity for the same impact velocities; e — generalized dependence of stress on impact velocity (curve 2) and dependence of the maximum stresses on the strain rate under uniaxial compression (curve 1);  $\partial$  — dependences of the instantaneous effort on precipitation according to Hertz (1), Kilchevsky (2) [10], experimental curve (3)
На обобщенной зависимости (рис. 2,  $\epsilon$ ) выделены участки, в пределах которых наблюдается однотипный процесс. Так, на пассивном участке удара  $(\dot{X} / \dot{X}_0 < 1)$  для аппроксимации применяли уравнение

$$\frac{\sigma}{\sigma_{\bullet}} = \exp\left[-\frac{1}{m_e} f\left(\frac{\dot{X}}{\dot{X}_0}\right)\right], \text{ где } f\left(\frac{\dot{X}}{\dot{X}_0}\right) = \frac{\dot{X}}{\dot{X}_0} - \ln\frac{\dot{X}}{\dot{X}_0} - 1, \ m_e - 1,25$$

На активном этапе соударения  $(\dot{X} / \dot{X}_0 > 1)$  для аппроксимации применяли уравнение

$$\frac{\sigma}{\sigma_{\bullet}} = \left(\frac{\dot{X}}{\dot{X}_{0}} - 1\right)^{n_{e}(\dot{X}/\dot{X}_{0})} + 1$$
$$\dot{X}/\dot{X}_{0} = 1...2 \quad n_{e} = 2,$$

причем для

 $\dot{X} / \dot{X}_0 > 2$   $n_e = 0.85.$ 

Полученные уравнения являются следствием общих законов механики и электродинамики и могут быть представлены в форме записи, характерной для модели Глена, но с коэффициентами, изначально имеющими определенный физический смысл.

На основании полученных в настоящем исследовании результатов разработано измерительное устройство «пенетрометр» (рис. 3). Внутри индентора (радиус 40 мм) размещен пьезоакселерометр, сигнал с которого поступает на процессор измерительного блока. Точность измерения среднего контактного давления 5 %, воспроизводимость на однородном материале 1 %. Измеряемые величины отображаются на индикаторе, вмонтированном в корпус пенетрометра.



Моделирование промежуточного слоя. Объемные образцы льда со структурой промежуточного слоя изготовляли в матрице с профилем, аналогичным соплу Лаваля. Разборная матрица состояла из трех секций: загрузочной длиной  $L_1$  и диаметром D 57 мм, конфузора и патрубка с диаметром канала d 10 мм. Такая конструкция позволяет исследовать структуру льда в сходящихся фронтах волн конечной амплитуды.

Эволюция структуры льда. Наблюдается уменьшение диаметра ледяных кристаллов от 3 до 0,3 мм (рис. 4).

Влияние волн конечной амплитуды на пластичность льда. Поступательное движение пресспитемпеля создает волну сжатия со сходящимися фронтами (как у кумулятивного заряда). Поэтому структура льда формируется не только в результате гидростатического сжатия и сдвига, но и под действием высокоскоростной пластической деформации. Высокоскоростная пластическая деформация происходит при схлопывании фронтов импульсов сжатия, создающих локальный градиент давления (кумулятивный эффект) (рис. 5). В результате формируется ледяная струя (1) и конус сжатия (2). Кроме того, в матрице происходит наложение прямой и обратной волны. Результатом является формирование обратного конуса 3 в виде седла. Прямое наблюдение показывает, что лед в струе 1 и конусе 2 находится в аморфном (стеклообразном состоянии), тогда как лед в седле 3 имеет структуру композита: округлые зерна (мелкая кристаллическая структура) разделены аморфной (стеклоподобной) средой.



Рис. 4. Эволюция структуры льда при интенсивной пластической деформации Fig. 4. Evolution of the structure of ice with severe plastic deformation



- Рис. 5. Текстура льда в матрице в результате высокоскоростной пластической деформации:
  - *1* струя; *2* конус; *3* ядро сжатия, масштаб сетки 2 мм
    - Fig. 5. The texture of ice in the matrix as a result of high-speed plastic deformation:
    - 1 stream; 2 cone; 3 compression core; grid scale is 2 mm

По-видимому, формирование текстур под действием импульсов напряжений в механике льда имеет общий характер. Именно волновой характер импульсов напряжений позволяет «передавать» внешние воздействия через промежуточный слой вглубь льда.

**Визуализация текстуры ледяного потока.** Картина распределения скоростей деформаций по сечению струи отражает явно нестационарный процесс (рис. 6) и нелинейную связь между напряжениями и скоростями деформации. Условно в струе льда можно выделить три слоя. В центре струи лед движется подобно твердому телу с максимальной скоростью. Прерывистость течения (stick-slip) тонкого приграничного слоя (отслеживалась по сигналам акустической эмиссии) указывает на прилипание льда к стенкам канала. Частота пульсаций — 0,005 1/с. Вязкопластическое



Рис. 6. Структура ледяного потока в цилиндрическом каналеFig. 6. The structure of the ice flow in the cylindrical channel

течение происходит в промежуточном слое. Толщина слоя, даже в случае гладкой подложки, на порядки превосходит значения, характерные для конструкционных материалов.

Фактически воспроизведены два предельных режима движения льда на фрикционном контакте блоковое скольжение и течение. По акустическим спектрам разрушения определены два характерных времени инкубационного периода для адгезионного и когезионного разрушения льда.

Полученные результаты имеют принципиальное значение в механике контактного разрушения льда, поскольку позволяют объяснить, например, превышение поверхностной скорости активных ледников над значениями, рассчитанными без учета свойств льда в промежуточном слое.

## Заключение

Предложено определяющее реологическое уравнение, которое учитывает деформационные изменения структуры льда в зоне пластического контакта. Экспериментальная зависимость мгновенных напряжений от мгновенной скорости при различных энергиях медленного удара шара о ледяную пластину представлена в виде полукубической параболы. Принципиально новым в работе является количественное определение деформационных изменений структуры льда непосредственно в процессе пластического удара. Определены реологические свойства льда, полученного методом интенсивной пластической деформации. Для получения объемных образцов со структурой промежуточного слоя была применена матрица высокого сжатия с конфузором (аналог сопла Лаваля) и поршнем с эллипсоидной формой рабочей поверхности. Исследовано усиление пластичности пресноводного льда при наложении упругих волн конечной амплитуды, включая кумулятивный эффект, а также обтекание пластическом канале. Полученные результаты могут быть использованы при изучении в цилиндрическом канале. Полученные и структуру промежуточных слоев, кинетику контактного разрушения ледяных полей и процессов в придонных слоях ледников.

Деформационные изменения структуры льда представлены реологическим уравнением, адекватно учитывающим эти изменения, выполнена верификация модели. Спектры сигналов акустической эмиссии, генерируемые при контактном разрушении соединения льда с подложкой при пластическом сдвиге, сопоставлены со спектрами сигналов от удаленных источников на ледниках Альдегонда и Туюк-Су.

#### ЛИТЕРАТУРА

**1.** *Георгиевский Д. В. Шабайкин Р. Р.* Квазистатическое и динамическое сдавливание плоского круглого идеальнопластического слоя жесткими плитами // Математическое моделирование и экспериментальная механика деформируемого твердого тела: межвуз. сб. науч. тр. / Тверской гос. техн. ун-т. Тверь, 2017. С. 56–63. **2.** *Сазонов К. Е.* Определение методов коррекции результатов модельных экспериментов по определению ледового сопротивления судна // Труды ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова. 2016. Вып. 92 (376). С. 93–108. **3.** Использование интенсивных пластических деформаций для получения объемных наноструктурных металлических материалов / *Р. З. Валиев [и др.]//* Изв. РАН. Механика твердого тела. 2012. № 4. 109–122. **4.** Molecular Insight into the Slipperiness of Ice / *B. Weber [et al.]//* J. Phys. Chem. Lett. 2018. 9. Р. 2838–2842. **5.** *Черепанов Н. В.* Классификация льдов природных водоемов // Науч. тр. Института Арктики и Антарктики. 1976. Т. 331. С. 77–99. **6.** *Епифанов В. П.* Влияние импульсов напряжений на структуру льда в промежуточном слое // ДАН. 2018. Т. 479, № 6. С. 629–633. **7.** *Епифанов В. П.* Моделирование процессов рекристаллизации в придонных слоях ледников // Криосфера Земли. 2015. Т. 19, № 3. С. 20–31. **8.** *Епифанов В. П.* Влияние промежуточного слоя на прочность соединения льда с подложкой // ДАН. 2017. Т. 472, № 1. С. 27–32. **9.** *Епифанов В. П.* Разрушение льда при ударных взаимодействиях // ДАН. 1985. Т. 284, № 3. С. 599–603. **10.** *Кильчевский Н. А.* Динамическое контактное сжатие твердых тел. Удар. Киев, 1976. 320 с.

#### Сведения об авторе

*Епифанов Виктор Павлович* — доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник Института проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН, лаборатория моделирования в механике деформируемого твердого тела

E-mail: evp@ipmnet.ru

#### Author Affiliation

*Viktor P. Epifanov* — Dr. Sci. (Physics & Mathematics), Senior Researcher of Laboratory of Modeling in Mechanics of Deformable Solids, Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of RAS E-mail: evp@ipmnet.ru

#### Библиографическое описание статьи

*Епифанов В. П.* Тектоническая структура и распределение скоростей в придонных слоях ледников / *В. П. Епифанов* // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2018. — № 3 (10). — С. 141–146.

#### Reference

*Epifanov Viktor P.* Tectonic Structure and Velocity Distribution in the Bottom Layers of Glaciers. *Herald of the Kola Science Centre of the RAS*, 2018, vol. 3 (10), pp. 141–146 (In Russ.).

## ЭВОЛЮЦИЯ КРИОГЕННЫХ СКОПЛЕНИЙ ГИДРАТОВ ПРИРОДНОГО ГАЗА В АРКТИЧЕСКИХ РЕГИОНАХ В КВАРТЕРЕ\*

#### В. А. Друщиц, Т. А. Садчикова

ФГБУН Геологический институт РАН, г. Москва

#### Аннотация

Скопления криогенных гидратов природного газа встречаются в гляциальных и перигляциальных условиях в различных регионах Арктики. В течение четвертичного периода смена ледниковий на межледниковья способствует циклическому развитию газогидратов, превращая их в возобновляемый сырьевой ресурс. Мощности четвертичных отложений, многолетнемерзлых пород и зоны стабильности гидратов газа раскрывают эволюционный ход существования гидратов газа. Особенно благоприятные обстановки для развития газогидратов складываются в перигляциальных областях смежных с ледниковыми, когда они долгое время не подвергались оледенению. Эти области отличаются стабильными условиями для развития скоплений гидратов газа, что способствует их сохранению в течение четвертичного периода.

#### Ключевые слова:

криогенные гидраты природного газа, ледниковые, перигляциальные обстановки, Арктика, квартер.

#### PERMAFROST NATURAL GAS HYDRATE DEVELOPMENT IN THE ARCTIC REGIONS FOR QUATERNARY

## Valentina A. Drouchits, Tamara A. Sadchikova

Geological Institute of RAS, Moscow, Russia

#### Abstract

Permafrost natural gas hydrates are distributed in glacial and periglacial environments of the Arctic regions. Glacial and periglacial conditions create gas hydrate cyclic development in Quaternary, and they become the renewable natural resources. The thicknesses of quaternary sediments, permafrost, and gas hydrate stability zone show clathrate evolution in different arctic regions. Climate and tectonics influence on conservation and volume increasing both in glacial and periglacial environments. The best conditions for gas hydrate development are in periglacial areas, which are adjacent with glacial ones, especially if they were out of glacier for a long time. These areas are Mackenzie delta and adjacent offshore and Northern part of the Western Siberia, where there is significant field of relict gas hydrates. Vast periglacial regions have good stable conditions for gas hydrate formation. It maintains them during quaternary. Permafrost gas hydrates in similar environments decay more rapidly in tectonic active zones.

#### Keywords:

permafrost natural gas hydrates, glacial and periglacial environments, Arctic, quarter.





В Арктике на суше и в акваториях распространены криогенные гидраты природного газа, главным образом метана. Интерес к исследованиям этих образований вызван их принадлежностью к нетрадиционных углеводородным ресурсам, участием в глобальном цикле углерода и генерацией опасных природных явлений. Следует подчеркнуть, гидраты газа (ГГ) относятся к возобновляемым

\* Исследования проведены в соответствии с планами научно-исследовательской работы ГИН РАН (№ 0135-2016-0022, № 0135-2016-0009) при финансовой поддержке РФФИ (проект № 17-05-00795).

природным ресурсам. Залежи и скопления клатратной формы метана, как правило, приурочены к нефтегазоносным бассейнам. Проведено сравнение природных обстановок квартера для известных и доказанных по косвенным признакам скоплений ГГ.

Изучение природных обстановок квартера дает возможность пролить свет на проблему образования, сохранения и восстановления этого типа нетрадиционных ресурсов углеводородов.

Природная среда квартера разделяется на гляциальные и перигляциальные условия, которые сопровождаются трансгрессивно-регрессивными циклами, неотектоническими процессами, гляциоизостазией. Наиболее достоверные количественные данные по природным обстановкам четвертичного периода, относятся к позднему неоплейстоцену, поэтому основные выводы, полученные в ходе работы, основаны количественных характеристиках именно этого времени, которые экстраполируются на весь четвертичный период.

#### Гидраты природного газа в гляциальных и перигляциальных условиях

Гляциальные условия характеризуются развитием мощных ледниковых покровов, строение и динамика которых определяет пограничные условия существования ГГ. Ледниковый покров имеет очень сложную структуру, начиная с таких показателей, как мощность, боковые границы, скорость движения, наличие озер, и заканчивая такими аспектами, как, строение и динамика краевой зоны, температурный режим подошвы ледника. В межледниковье возникают изменения термобарического режима, мощная активизация эрозионных процессов. В результате в ходе резкой смены условий седиментации изменяются рельеф, литология, мощности отложений, сокращаются криолитозона, зона стабильности гидратов газа (ЗСГГ) или исчезают совсем (табл. 1, по [1–6]).

Проявления клатратной формы метана могли находиться в зонах разгрузки термогенного газа в области Балтийского шита, на площадях нефтегазовых месторождений Баренцева моря, однако скоротечный коллапс ледникового щита в период межледниковья приводил к диссоциации ГГ. Особо стоит отметить развитие процессов гляциоизостазии, которое привело к воздыманию центральной части Балтийского щита на 800 м в постгляциальное время [7]. Центр Кольского п-ова испытал изостатическое поднятие на 80 м 9000 лет назад [8]. На современном этапе Балтийский щит поднимается со скоростью 2–8 см/год от периферии к центру и вся его площадь и прилегающий шельф подвергаются землетрясениям [9]. Такие же скорости характерны и для Кольского п-ова. Все это свидетельствует об активной тектонике в послеледниковье.

Известны острова вечной мерзлоты на Кольском п-ове, сведений о ГГ нет. Шельф Баренцева моря также подвергался покровному оледенению. Изменение термобарических условий приводят к диссоциации ГГ. На шельфе наблюдаются множество факелов разгрузки метана, развитие специфических форм рельефа, пингоподобные структуры, покмарки. Многолетнемерзлые породы отсутствуют, распространены многолетнеохлажденные породы [2].

Возможно, ГГ существовали в западной части моря Лаптевых, в позднем валдае, на периферии Таймырского и Северо-Земельского ледников [3].

В области Канадского щита, по косвенным признакам, предполагается наличие клатратов метана в районе золоторудной шахты Люпин (зона сплошного распространения многолетнемерзлых пород). Судя по скорости воздымания, эта область находится под влиянием гляциоизостазии [4]. Также известны проявления ГГ на островах Канадского Арктического архипелага в интервале 470–930 м при сплошной криолитозоне мощностью 10–726 м [10]. По данным сейсмопрофилирования, ГГ, вероятно, сохранились на западном шельфе Гренландии, предполагается, что мощность гидратосодержащей толщи составляет 70 м [6].

Эти данные свидетельствуют о том, что при суровом климате таяние ледника не приводит к полному уничтожению ГГ, более того формируется или сохраняется мощная криолитозона, с которой они связаны.

Таблица 1 Table 1

## Характеристики гляциальных обстановок распространения ГГ Characteristics of gas hydrate glacial environments

	Север Norther	Европы n Europe		Гренл Gree	Гренландия Greenland			
Характеристика Characteristic	Суша Land	Mope Sea	Mope Лаптевых, зап. часть Laptev Sea, western part	Суша Land	Mope Sea	щита, шахта Люпин North of Canadian Shield, Lupin mine		
Мощность ледника, м Glacier thickness, m	2000–3000	2000	200	2000– 3500	1500	≥3500		
Мощность ММП, м Permafrost thickness, m	Островная Island		50–350	Сплошная Continuous 200–400		Сплошная Continuous 400–600		
Мощность четвертичных осадков, м Quaternary sediment thickness, m	0–170	0–150	≥100	0–10	40	0		
Современные тектонические движения, мм/год Recent tectonic movement, mm/yr	8,1–8,5	-12,911,0	1,1–3,0	Побережье shore 0,0–8,0 центр centre -2,05,0	-1,08,0	10,85		
Мощность ЗСГГ, м Thickness of gas hydrate stability zone, m		500-1000				540–1130		

*Перигляциальные условия*. Необходимо отметить, что клатратные образования существовали с начала формирования криолитозоны в позднем плиоцене и могли консервироваться и сохраняться в межледниковые эпохи, что мы и наблюдаем в настоящее время [11]. Природные обстановки периглягляциальных зон довольно разнообразны (табл. 2).

Печорское море отличается от остальной акватории Баренцева моря наличием островных массивов многолетнемерзлых пород. Предполагается, что наблюдаемая интенсивная эмиссия метана вызвана диссоциацией ГГ. Север Западной Сибири, помимо Мессояхских месторождений, обладает крупным полем метастабильных реликтовых ГГ в четвертичных отложениях ряда газоконденсатных месторождений. Их образование может объясняться суровыми природными условиями перигляциальных областей, смежных с ледниковыми покровами. Это может быть следствием и пассивного оледенения [1, 6].

Таблица 2 Table 2

## Характеристики перигляциальных обстановок распространения $\Gamma\Gamma$ (по [2, 11–14]) Characteristics of gas hydrate periglacial environments (after [2, 11–14])

Характеристика Characteristic	Печорское море Pechora	Север Западной чорское Сибири море Northern part of echora Western Siberia		Северное Аля Alaska No	побережье аски orth Slope	Дельта р. Маккензи Mackenzie Delta	
	Sea	Суша	Mope	Суша	Mope	Суша	Mope
		Land	Sea	Land	Sea	Land	Sea
Мощность MMП, м Permafrost thickness, m	Островная Island 30–40	Сплошная Continuous 320–350	Островная Island	Сплошная Continuous 600	Островная Island 300	Сплошная Continuous 700	Сплошная Continuous 400–700
Мощность четвертичных осадков, м Quaternary sediment thickness, m	120	≥ 200	0–120	100		22–55	
Мощность ЗСГГ, м Thickness of gas hydrate stability zone, m	100–300	200–550		180–900	180–900	500–700	600–1300
Интервал ГГ, м Gas hydrate interval, m		730–770 40–150*		210–950		890–1100	550–1450

\*Метастабильные ГГ.

\*Metastable gas hydrates.

Наиболее крупные скопления ГГ находятся в море Бофорта, на северном побережье Аляски и в районе дельты р. Маккензи. В этих регионах, помимо залежей ГГ на суше, доказано наличие клатратов на шельфе. Эти территории не подвергались оледенению, но дельта Маккензи находилась в непосредственной близости к леднику во время последнего ледникового максимума. На шельфе, прилегающем к дельте, сформировалась мощная и значительная по площади субаквальная криолитозона, к ней приурочены мощные скопления ГГ. Северное побережье Аляски занимает более скромное положение относительно распространения ГГ в акватории: многолетнемерзлые породы и сопряженные с ними газогидраты выклиниваются к 20-метровой изобате [12, 13].

Восточная Арктика находилась в перигляциальной обстановке в течение четвертичного периода. Мощность криолитозоны может достигать 800 м. Здесь обнаружены только проявления ГГ на суше и косвенные признаки их присутствия в морях Лаптевых, Восточно-Сибирском и Чукотском. Море Лаптевых с рифтовой системой (расположение границы Североамериканской и Евроазиатской литосферных плит) является современной активной геодинамической областью, где разрушается криолитозона, фиксируются очаги разгрузки метана, частые землетрясения [11]. Чукотское море отличается также активной тектоникой и находится под влиянием Тихого океана. На основании расчетов предполагается, что ГГ могут сохраняться в береговой зоне западной части Чукотского п-ова [15].

## Заключение

Выделенные обстановки (ледниковые и перигляциальные), в которых распространяются ГГ, обладают значительным разнообразием вследствие взаимодействия многих природных факторов (климата, тектонической активности, геологической ситуации, палеогеографии квартера).

Примером является континентальная окраина севера Европы. Здесь на фоне резкого потепления наблюдается тектоническая активность на границах с Северо-Атлантическим срединноокеаническим хребтом и хребтом Гаккеля, что вызывает разгрузку метана из ГГ. В море Лаптевых, где распространялись и гляциальные, и перигляциальные условия, фиксируется мощная эмиссия метана, возможно связанная с разложением ГГ. В то же время на месте прошлых ледников, существует криолитозона, содержащая или покрывающая ГГ (север Канадского щита, Канадский Арктический архипелаг). Наиболее ярким примером широкого распространения ГГ на суше и на море является дельта р. Маккензи, которая долгое время развивалась в перигляциальной области, граничащей с ледниковым щитом. На севере Западной Сибири сформировался крупный массив реликтовых ГГ, возможно связанный с пассивным оледенением.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Peltier W. R. Ice age paleotopography // Science. 1999. Vol. 265. P. 195-201. 2. Мельников В. П., Спесивиев В. И. Инженерногеологические и геокриологические условия Баренцева и Карского морей. Новосибирск: Наука, 1995. 198 с. 3. Разумов С. О., Спектор В. Б., Григорьев М. Н. Модель позднекайнозойской эволюции криолитозоны шельфа западной части моря Лаптевых // Океанология. 2014. Т. 54, № 5. С. 679–693. 4. Lambeck K., Purcell A., Zhao S. The North American Late Wisconsin ice sheet and mantle viscosity from glacial rebound analyses // Quaternary Science Reviews. 2017. Vol. 158. Р. 172-210. 5. Роль новейших вертикальных тектонических движений в формировании рельефа побережий Российской Арктики: дис. ... канд. геол. наук / А. В. Баранская. СПб., 2015. 250 с. 6. Methane and possible gas hydrates in the Disko Bugt Region, central West Greenland / N. Mikkelson [et al.] // Geol. Surv. of Denmark and Greenland bul. 2012. Vol. 26. P. 59-72. 7. Mörner N. A. Glacial Isostasy: Regional - Not Global // Intern. J. Geosciences. 2015. No. 6. P. 577-592. 8. Евзеров В. Я. Четвертичный период в Кольском регионе (вопросы стратиграфии и тектоники // Вестник Кольского научного центра РАН. 2016. № 1. С. 3–14. 9. Богданов В. И., Малова Т. И. Проблемы современной концепции изостазии и масштабные эффекты трещиноватой земной коры континентов и океанов // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2016. Т. 9, № 3. С. 3–17. 10. Majorowicz J., Osadetz K., Safanda J. Gas Hydrate Formation and Dissipation Histories in the Northern Margin of Canada: Beaufort-Mackenzie and the Sverdrup Basins // J Geol. Res. 2012. Article ID 879393. 17 р. 11. Друщиц В. А., Садчикова Т. А. Природные условия образования и сохранения континентальных гидратов метана на арктических континентальных окраинах // Бюлл. комис. по изуч. четв. периода. М.: ГЕОС. 2017. № 75. С. 135–146. 12. Permafrost — associated natural gas hydrates occurrences on Alaska North Slope / T. S. Collett [et al.] // Marine and Petroleum Geology. 2011. 28 (3). P. 279–294. 13. Evidence for gas hydrate occurrences in the Canadian Arctic Beaufort Sea within permafrost-associated shelf and deep-water marine environments / M. Riedel [et al.] // Marine and Petroleum Geology. 2017. Vol. 81. P. 66-78. 14. Gas Hydrate Stability Zone of the Barents Sea and Kara Sea Region / P. Klitzke [et al.] // Energy Procedia. 2016. Vol. 97. Р. 302–309. 15. Перспективы газогидратоносности Чукотского моря / Т. В. Матвеева [и др.] // Зап. Горн. ин-та. 2017. T. 226. C. 387–396.

#### Сведения об авторах

Друщиц Валентина Александровна — кандидат географических наук, старший научный сотрудник Геологического института РАН E-mail: drouchits@ginras.ru Садчикова Тамара Александровна — кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудни, Геологического института РАН

E-mail: tamara-sadchikova@yandex.ru

#### **Author Affiliation**

Valentina A. Drouchits — PhD (Geography), Senior Researcher, Geological Institute of RAS E-mail: drouchits@ginras.ru *Tamara A. Sadchikova* — PhD (Geology & Mineralogy), Senior Researcher, Geological Institute of RAS E-mail: tamara-sadchikova@yandex.ru

#### Библиографическое описание статьи

Друшиц, В. А. Эволюция криогенных скоплений гидратов природного газа в арктических регионах в квартере / В. А. Друщиц, Т. А. Садчикова // Вестник Кольского научного центра РАН // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2018. — № 3 (10). — С. 147–151.

#### Reference

Drouchits Valentina A., Sadchikova Tamara A. Permafrost Natural Gas Hydrate Development in the Arctic Regions for Quaternary. Herald of the Kola Science Centre of the RAS, 2018, vol. 3 (10), pp. 147–151 (In Russ.).

## DOI: 10.25702/KSC.2307-5228.2018.10.3.152-164 УДК 551.324.63

## ИЗМЕНЕНИЕ ЛЕДНИКА АЛЬДЕГОНДА С НАЧАЛА ХХ ВЕКА\*

## Б. Р. Мавлюдов, А. В. Кудиков

ФГБУН Институт географии РАН, г. Москва

#### Аннотация

Язык ледника Альдегонда на Шпицбергене с начала XX в. отступил от берега моря более чем на 2 км. Скорость отступания языка ледника не была равномерной, она изменялась во времени. Использование старых фотографий, карт, аэросъемки, космических снимков и собственных наблюдений позволило оценить характер изменений ледника на протяжении более чем 100-летнего периода. Если характер климата не изменится и таяние льда будет продолжаться теми же темпами, что и сейчас, то примерно через 40–50 лет большая часть ледника исчезнет. В настоящее время ледник Альдегонда потерял способность к пульсации.

#### Ключевые слова:

Шпицберген, деградация ледника, отступание края ледника, понижение поверхности, пульсирующий ледник.

#### CHANGING OF THE ALDEGONDA GLACIER SINCE THE BEGINNING OF THE 20<sup>TH</sup> CENTURY

#### Bulat R. Mavlyudov, Arsenij V.Kudikov

Institute of geography of RAS, Moscow

#### Abstract

Aldegonda Glacier is situated in area of Grønfiord Bay closely to Russian settlement Barentsburg, Spitsbergen. Tongue of Aldegonda Glacier from the beginning of the 20<sup>th</sup> century has retreated from sea coast more than 2 km. Velocity of glacier tongue replacement was not uniform, it increases with time from 10 to 37 m per year. Using of old photos, maps, aerial photographs, space images and own observations (since 2001) has allowed to estimate the character of glacier changes during the period of more than 100 years (Fig. 1). If the character of the climate in future does not change and ice melting will continue at the same rate as now, the most part of glacier will disappear approximately in 40-50 years. Glacier Aldegonda at the beginning of the 20<sup>th</sup> century was surging but as a result of modern strong degradation it has lost ability to surge.

#### Keywords:

Spitsbergen, glacier degradation, retreat of glacier edges, surface lowering, surging glacier.



#### Введение

Горно-долинный ледник Альдегонда расположен на западном берегу залива Грёнфьорд, в 7 км к юго-западу от российского пос. Баренцбург. Ледник ориентирован на восток, имеет протяженность примерно 3 км и ширину около 2 км, площадь приблизительно 5,3 км<sup>2</sup>. Перепад высот ледника от 108 до 770 м н. ур. м. Средняя часть ледника располагается на высотах около 250 м н. ур. м. В настоящее время ледник находится в верховьях

собственной долины, его язык расположен более чем в 2 км от берега моря. Первые исследования на леднике Альдегонда проводились в 1980-х гг. [1], в том числе масс-балансовые наблюдения [2, 3]. Повторное обследование ледника было проведено в 2001 г., а с 2003 г. на леднике начались

<sup>\*</sup> Экспедиционные исследования на арх. Шпицберген выполнялась в рамках госзадания 0148-2017-0007 и логистической помощи РНЦШ.

регулярные масс-балансовые наблюдения [4, 5]. Данные об изменении размеров ледника Альдегонда имеются в работах Б. Р Мавлюдова [6, 7], И. И. Лаврентьева [8], Мавлюдова и с соавторами [9], а также О. В. Кокина [10], который рассмотрел динамику ледника в историческом аспекте.

Первые радиолокационные измерения толщины ледника были выполнены с борта вертолета в периоды 1974–1975 и 1977–1979 гг. [11], которые показали, что толщина льда в верховьях ледника превышает 100 м. Согласно более поздним и более детальным геофизическим исследованиям в 1999 г. [12], толщина льда варьирует от первых метров на языке ледника до 80– 100 м в средней части и до 200 м в правой части ледника. При этом выяснилось, что ледник Альдегонда является двухслойным (верхний слой представлен холодным льдом, а нижний теплым). Такие ледники получили название политермальных (или политермических). Ограниченные геофизические исследования толщины ледника были выполнены И. И. Лаврентьевым [8]. Имеется предположение, что в конце XIX — начале XX вв. ледник Альдегонда мог быть пульсирующим ледником [13, 14]. Проанализируем его изменение во времени.

#### Методика исследований

Для оценки характера изменения ледника во времени были использованы старые фотографии [15, 16], английская карта 1911 г. [17], топографические карты Норвежского полярного института (НПИ) 1936 и 1990 гг., перспективные самолетные снимки НПИ 1936 г. [18], космоснимки 1965 г. [19], аэрофотоснимки НПИ 1990 г., космоснимки других лет из открытых источников (Google Earth, Sentinel и др.).

Для определения толщины льда на разных участках ледника были использованы результаты геофизических съемок 1970–1980-х [11], 1999 [12] и 2007 гг. [8], а отметки высот поверхности ледника в разные годы снимались с имеющихся топографических карт, а также использовались данные собственных наблюдений. Кроме того, для выяснения приблизительной мощности льда после подвижки (пульсации) ледника были использованы измерения высотного положения боковых морен, проведенные с помощью GPS с точностью ±10 м.

#### Результаты работ и обсуждение

Первые сведения о леднике Альдегонда можно почерпнуть из фотографий 1909 и 1911 гг. [15, 16] и карты 1911 г. [17]. В это время язык ледника спускался в море и заканчивался ледяным обрывом. Язык ледника не находился на плаву и продуцировал айсберги. По приблизительным оценкам, высота ледяного обрыва над уровнем воды в это время превышала 10–20 м, а общая мощность льда, вероятно, достигала 50 м (рис. 1).



Рис. 1. Фотографии ледника Альдегонда в 1909 г. (*a*) [15] и 1912 г. (б) [16] Fig. 1. Photos of Aldegonda Glacier in 1909 (*a*) [15] and in 1912 (б) [16]

Однако положение ледяного обрыва в 1909 г. не достигало максимального распространения ледника во время малого ледникового периода в конце XIX в. — начале XX в., поскольку после подвижки ледник уже отступил. Изучение рельефа морского дна в прибрежной акватории у ледника Альдегонда с помощью эхолота показало, что гряды стадиальных морен ледника распространяются примерно на 600-700 м в море [14]. Положение моренных гряд на дне моря может свидетельствовать о гораздо больших размерах ледника по сравнению с положением ледяного обрыва 1909 г. Есть предположение о том, что выдвижение языка ледника в море явилось последствием пульсации ледника, но в какое время язык ледника располагался у края конечных морен, мы не знаем. Это могло быть как в конце XIX в., так и в начале XX в. Можно предположить, что это произошло незадолго до 1909 г., так как на старых фотографиях начала ХХ в. [15] видно, что ледники Западный и Восточный Грёнфьорд в это время имели максимальное распространение. Поверхность льда на этих ледниках в это время находилась почти вровень с конечной мореной, но при этом оба ледника заканчивались на суше. По этой причине их языки не подвергались регулярному воздействию морских приливов и агрессивному воздействию теплой морской воды залива Гренфьорд, как, например, язык ледника Альдегонда, спускавшийся в море. Вероятно, именно по этим причинам язык ледника Альдегонда быстро деградировал от положения своего максимального распространения до положения близ берега моря, как это было в 1909 г. Дополнительная причина быстрой деградации языка ледника — отсутствие поступления новых порций льда из его верховий, так как после пульсации ледяной материал в верховьях ледника был исчерпан. И требовалось некоторое количество лет для того, чтобы в верховьях накопилось достаточное количество нового льда, который был бы способен восстановить движение ледника.

Что происходило с ледником Альдегонда до окончания малого ледникового периода в конце XIX в. — начале XX в., мы не знаем. Похоже, что последняя пульсация ледника была максимальной. Поэтому она перекрыла все имевшиеся до этого следы предыдущих этапов усиления масштабов оледенения. Единственным следом предыдущих этапов оледенения является боковая морена, которая находится на некотором удалении от свежей левой боковой морены малого ледникового периода. До настоящего времени нет уверенности в том, что это боковая морена ледника Альдегонда. С тем же успехом она может быть мореной ледника, который некогда располагался в долине Брюде и от которого в настоящее время остались лишь фрагменты. Если предположить, что эта древняя морена принадлежала леднику Альдегонда, как это делается в работе [10], то это может означать, что ранее ледник Альдегонда мог быть гораздо мощнее современного, а если и тогда он был пульсирующим, то в этом случае одна из предыдущих пульсаций ледника была интенсивнее последней подвижки. В период с 1909 по 1936 гг. язык ледника Альдегонда передвинулся на сушу, в связи с чем скорость отступания языка ледника стала заметно слабее. За 27-летний период ледник отодвинулся от берега моря примерно на 250 м. Поскольку точного положения фронта льда в 1909 г. мы не знаем, то можем говорить, что скорость отступания льда в течение этого периода превышала 10 м/год. Положение ледника в 1936 г. зафиксировано на топографической карте НПИ и перспективных фотографиях с самолета [20]. На снимке хорошо видно, что край ледника заканчивается у самого берега моря (рис. 2).

Можно предположить, что впоследствии в таком состоянии язык ледника располагался довольно продолжительное время. О некоторой стабилизации положения языка ледника говорит и наличие насыпного моренного вала у берега моря [10]. Во всяком случае, именно в это время был построен водопровод по забору воды с языка ледника Альдегонда, которая потом баржами доставлялась в пос. Баренцбург. Возможно, стабилизация положения края ледника была связана с тем, что в районе языка ледник имел еще очень значительную толщину, что хорошо видно на аэрофотоснимке.

Дальнейший период с 1936 по 1965 гг. характеризуется значительным сокращением длины и площади ледника. За этот период край ледника отступил в правой части примерно на 500 м и в левой — до 1000 м, что соответствует скорости отступания края льда около 22 м/год в левой части и до 43 м/год в правой. Столь значительное сокращение площади ледника было связано как с плоским основанием ледника, так и с уменьшившейся толщиной ледника, который не получал питания льдом из верховий ледника.



Рис. 2. Ледник Альдегонда в 1936 г. (*a*, перспективный аэрофотоснимок [20]) и в 2003 г. (*б*, снимок с вертолета) Fig. 2. Aldegonda Glacier in 1936 (*a*, perspective aerial photo [20]) and in 2003 (*б*, helicopter photo)

Если проанализировать характер изменения ледника Альдегонда с 1966 г. по 1990 г., то видно, что язык ледника за 24 года отодвинулся от своего положения приблизительно на 400 м, что означает скорость отступания края льда около 17 м/год. Вплоть до 1990 г. язык ледника отступал достаточно равномерно, поскольку лед лежал на относительно выровненном ложе. В это время язык ледника представлял собой выпуклую лопасть (рис. 3, *a*). В дальнейшем отступание края ледника на разных частях его языка стало крайне неравномерным. Это было связано как с изменившимся рельефом на ложе ледника, поскольку именно в этом месте на ложе ледника имелось несколько выступов, протянувшихся поперек ледника, так и с тем, что крутой скальный правый борт ледника стал затенять часть поверхности ледника. В результате язык ледника стал сильно изрезанным (рис. 3,  $\delta$ ), при этом на выровненных участках ложа отступание края льда было более интенсивным, чем на краях выступов ложа.



Рис. 3. Ледник Альдегонда: *a* — съемка 22 июля 1990; *б* — аэросъемка НПИ в 2013 г. (данные с сайта Google Earth) Fig. 3. Aldegonda Glacier: *a* — photo taken on July 22, 1990; *б* — airgraphy of NPI in 2013 (Google Earth data)

Наиболее значительное отступание края ледника произошло за период с 1990 по 2017 гг., когда на центральной линии край льда отступил примерно на 1000 м, что соответствует скорости отступания около 37 м/год. При этом прямые измерения показали, что за лето 2003 г. отдельные участки языка

ледника, расположенные на выровненном ложе у левого борта, отступили на расстояние до 70 м, в то время как соседние участки на склоне выступа ложа отступили всего на 5–10 м.

Мы показали изменение положения языка ледника Альдегонда в течение XX и в начале XXI вв. Площадь ледника в течение этого периода непрерывно сокращалась. Если в 1910 г. площадь ледника равнялась приблизительно 10,5 км<sup>2</sup>, то в настоящее время она не превышает 5,3 км<sup>2</sup>. На рис. 4, *a*, показан характер изменения площади ледника во времени. При этом дата начала отступания ледника от его максимального распространения выбрана условно — как 1900 г., что, судя по наклону кривой близко к действительности.



Рис. 4. Изменение площади ледника Альдегонда (*a*) и нормированной скорости отступания языка ледника (б) во времени

Fig. 4. Changing of Aldegonda Glacier area in time (*a*) and changing of normalized retreating rate of glacier tongue in time ( $\delta$ )

Как видим, изменение площади ледника происходит неравномерно. До 1990 г. площадь ледника изменялась достаточно равномерно, а после 1990 г. сокращение усилилось: если до 1990 г. скорость уменьшения площади ледника равнялась 0,029 км<sup>2</sup>/год, то в период с 1990 по 2003 гг. она составила уже 0,173 км<sup>2</sup>/год. В дальнейшем с 2003 по 2017 гг. скорость уменьшения поверхности ледника вновь понизилась до 0,056 км<sup>2</sup>/год. Значительное уменьшение площади ледника в период с 1990 по 2003 гг. было связано с тем, что в расчет изменения площади ледника за этот период, кроме части у языка ледника, была также включена территория по всей периферии ледника, поскольку именно с 1990 г. началось отступание края льда не только на языке ледника, но и по его периферии, чего не было в предыдущие годы. В последующие годы интенсивное оступание края льда отмечалось только на отдельных участках периферии ледника, в результате чего скорость сокращения площади ледника уменьшилась.

Ранее исследователи отмечали [8–10] некоторое уменьшение интенсивности таяния ледника в начале XXI в., которое выражалось в уменьшении величины отрицательного баланса массы ледника и сокращении скорости отступания края льда в отдельные годы. Это, вероятно, было связано с уменьшением интенсивности таяния льда с высотой, ведь абсолютная высота языка и средняя высота всего ледника при его удалении от моря повысилась, а также с окончанием таяния выдвинувшихся во время подвижки части ледника [10].

Рассмотрим скорость отступания края ледника. Если проанализировать данные, полученные разными авторами [6–10], то увидим, что информация о скорости отступания языка ледника довольно сильно разнится. Это связано в первую очередь с тем, что в последнее время в разных частях языка ледника величина отступания края льда может отличаться очень существенно. И в зависимости от выбранного участка измерений скорость отступания языка ледника будет различной. Чтобы получить более объективные данные, мы рассчитали нормированные величины скорости отступания края льда. Для этого для каждого периода уменьшившуюся площадь ледника

разделили на осредненную ширину ледника (2 км), и уже эту величину отступания края льда разделили на продолжительность периода. Полученные величины нормированной скорости отступания языка ледника показаны на рис. 4, б. Можно видеть, что нормированная скорость отступания льда мало менялась с 1900 по 1990 гг., колеблясь в промежутке от 13 до 16 м/год. За период с 1990 по 2003 гг. скорость отступания языка ледника резко выросла до 26 м/год, а к 2009 г. достигла 30 м/год, что было связано с быстрым обнажением многочисленных скальных выступов ложа, расположенных в этом районе. К настоящему времени скорость отступания языка ледника несколько снизилась до 26 м/год, что, видимо, было связано с уменьшением количества выступов на ложе. Как видим, полученные результаты отличаются от предыдущих.

Ранее мы оценивали изменение высоты поверхности ледника по сравнению с картой 1936 г. [6]. За период с 1936 по 2004 гг. поверхность льда сильно уменьшилась. Максимальное уменьшение толщины льда было отмечено для центральной части языка ледника, которое составило около 130 м (от 85 до 160 м, или 1,25–2,5 м в год; среднее около 2 м). В среднем поверхность ледника за этот период понизилась примерно на 64 м (или около 1 м в год). Средний баланс массы ледника за этот период составил 86 г/см<sup>2</sup>. Попробуем оценить характер изменения поверхности ледника до 1936 г. Согласно нашим оценкам, толщина льда на языке ледника в 1910 г. составляла не менее 50 м (с учетом подводной части ледника, спустившегося в Грёнфьорд). Ясно, что этот лед лежал на ложе, а не находился на плаву. Поскольку весь этот лед исчез к 1936 г., понятно, что его исчезновение происходило не только при понижении поверхности льда под действием таяния, но и за счет откола айсбергов при активном содействии приливов и активной эрозии льда водой теплого моря.

Определить долю участия каждого из этих процессов в разрушении льда в настоящее время не представляется возможным. Однако мы можем приблизительно оценить вклад таяния льда с поверхности ледника в это время по аналогии с данными, полученными нами при измерении современных скоростей таяния льда на низко расположенных языках ледников Восточный и Западный Грёнфьорд, находящихся по соседству. Измерения показали, что скорость таяния льда на уровне моря составляет 2–3 м/год. Это означает, что за 25-летний период на языке ледника Альдегонда могло растаять не менее 50 м льда. Но с учетом того, что в начале XX в. климат в регионе был несколько холоднее современного, это значение явно завышено. Скорее всего, в деградации края ледника, спускающегося в море, воздействие моря и поверхностное таяние участвовали примерно поровну. Согласно выполненным измерениям высоты левой и правой боковой морены ледника 1936 г. составила 50 м. При средней скорости понижения поверхности льда около 2 м/год за период с 1910 по 1936 гг. вся эта толща должна была растаять, что соответствует действительности.

На основе имеющихся данных (высота морен, топографические карты, собственные измерения) удалось оценить высоту поверхности ледника в разные периоды времени (табл. 1).

Таблица 1

Table 1

Высота (м, н. ур. м.) поверхности льда в разные периоды времени (вдоль линии А-Б на рис. 6) Elevation (m asl) of ice surface in different periods of time (along line A-Б in Fig. 6)

Годы	Mope	Mope Eeper		Расстояние от берега моря, км Distance from sea shore, km					
Tears	Sea	Shore	1	2	3	4			
1910	20?	50	140	250	310	360			
1936	0	0	125	240	307	347			
1990	0	0	40г	185	265	315			
2010	0	0	40г	150	250	297			
2016	0	0	40г	140г?	240	291			

ВЕСТНИК Кольского научного центра РАН 3/2018 (10)

Примечание. Знак вопроса означает примерную оценку; г — грунт.

*Note.* The question sign means an approximate estimation,  $\Gamma$  — ground.

Как видим, поверхность ледника понижается в течение всего периода наблюдений. Хорошо видно, что наибольшее понижение поверхности происходило в нижней части ледника, где ледник полностью растаял. С высотой понижение поверхности уменьшается: если на расстоянии 1 и 2 км от берега понижение поверхности составляло 100 и 110 м соответственно, то в 3 и 4 км от берега понижение поверхности не превышало 70 м. Оценка изменения поверхности ледника Альдегонда на разном удалении от берега моря (точка 0 м) в течение известного периода представлена в табл. 2.

Таблица 2

Table 2

# Характер изменения поверхности ледника и интенсивность понижения поверхности льда ледника Альдегонда в разные периоды времени (вдоль линии А-Б на рис. 6)

Character of changes of Aldegonda Glacier surface and intensity of surface ice lowering in different periods of time (along line A-B in Fig. 6)

Период	Процесс	Расстояние от берега моря, м Distance from sea shore, m							
Period	Process	0	1 000	2 000	3 000	4 000			
1010 1026	Понижение поверхности, м Surface lowering, m	50	15	10					
1910–1930	Интенсивность, м/год Intensity, m per year	1,9	0,6	0,4					
1036 1000	Понижение поверхности, м Surface lowering, m	_	85	55	42	32			
1930-1990	Интенсивность, м/год Intensity, m per year	_	1,6	1	0,8	0,6			
1000 2010	Понижение поверхности, м Surface lowering, m			35	15	8			
1770-2010	Интенсивность, м/год Intensity, m per year			1,75	0,8	0,4			
2010–2016	Понижение поверхности, м Surface lowering, m	_		10	10	6			
	Интенсивность, м/год Intensity, m per year			>1,7	1,7	1			
1990–2016	Понижение поверхности, м Surface lowering, m			45	25	24			
	Интенсивность, м/год Intensity, m per year			1,73	1,0	0,9			
1010 0015	Понижение поверхности, м Surface lowering, m	50	100	100	67	56			
1910-2010	Интенсивность, м/год Intensity, m per year	1,9*(26)	1,25*(80)	0,94*(106)	0,6	0,5			

\* За период полного стаивания льда (продолжительность в скобках).

\* During complete ice melting (duration in brackets, years).

Анализ данных табл. 2 показывает, что понижение поверхности ледника происходило в течение всего периода наблюдений за ледником. Можно видеть, что интенсивность понижения поверхности ледника в течение всего рассматриваемого периода возрастало. Это хорошо

согласуется с общим потеплением климата в регионе (рис. 5). Обобщенная оценка изменения границ и поверхности ледника во времени приведена на рис. 6.



Рис. 5. Изменение средней летней температуры (июль-август) воздуха на метеостанции Баренцбург с 1913 по 2010 гг.: 1 — измеренные значения; 2 — сглаживание по пятилетним интервалам [9]
Fig. 5. Changing of mean summer air temperature (July-August) on weather station in Barentsburg from 1913 to 2010: 1 — data of measurements; 2 — five years' intervals smoothing [9]



Рис. 6. Изменение ледника Альдегонда во времени. Вверху — план ледника, внизу — разрез по линии А-Б. Ложе ледника показано по данным [12]. Горизонтали показаны тонкими линиями по карте 1936 г. Расстояние между горизонталями 50 м. Точками обозначены высоты вокруг ледника, цифрами — высота н. ур. м., м

Fig. 6. Change of Aldegonda Glacier in time. Above — the glacier plan, below — longitudinal cross section A-Б. The glacier bed is shown according to [12]. Horizontals are shown by thin lines from the map of 1936. Distance among horizontals is 50 m. The points show heights near the glacier, figures — heights in meters a. s. l. Несмотря на то, что в 2006 г. высота границы питания ледников в районе Баренцбурга опустилась до 400–450 м н. ур. м. [8–9] и продолжает оставаться на этой высоте до настоящего времени, это не сильно сказалось на леднике Альдегонда. Накопление снега началось только в верховьях склонов на правом борту ледника, где отмечен небольшой участок с положительным балансом массы льда, но размер этого участка ледника мал и практически никак не влияет на остающуюся площадь ледника.

Если в будущем ситуация с климатом не изменится, а величина таяния льда останется на современном уровне, то большая часть льда на леднике Альдегонда растает за 40–50 лет, при этом самое продолжительное время будет сохраняться та часть ледника, которая приурочена к правому борту долины, где была отмечена самая большая мощность льда и где в верховьях сохраняется положительный баланс массы льда. Этот участок ледника может сохраняться еще несколько десятков лет. Используя тенденцию сокращения площади ледника (рис. 4,  $\delta$ ), можем предположить, что полное исчезновение ледника возможно к середине XXII в. Однако ситуация может кардинально измениться, если в котловине остаточного ледника возникнет озеро существенных размеров. В этом случае деградация ледника может ускориться. Небольшое озеро, возникшее у края ледника в 2017 г., может быть предвестником формирования подобного водоема. Насколько этот прогноз окажется верным, покажет время.

Следует добавить, что в этой статье мы говорили только об изменении границы чистого льда ледника Альдегонда. Именно эту границу можно фиксировать на аэрофото- и космических снимках. Во многих случаях это соответствовало смещению границы ледника, но есть несколько участков в пределах моренного комплекса ледника, где на месте отступившего ледника длительное время сохраняются массивы мертвого льда.

В 2003–2004 г. мертвый лед был обнаружен под толщей донной морены в русле реки Альдегонда примерно в 1,5 км от берега моря. Толщина моренных отложений здесь составляла около 4 м. Сохранился ли мертвый лед в этой точке до настоящего времени, был захоронен перекрывающими мореными отложениями или растаял полностью, не известно. В то же время был обнаружен мертвый лед ближе к середине долины в пределах наледной поляны — выровненного участка моренного комплекса, не доходя выступа ложа — ригеля. Несмотря на отступание границы льда от этого участка на значительное расстояние, мертвый лед сохранился до настоящего времени, о чем свидетельствуют небольшие озера в просадках грунта. В 2016 г. мертвый лед был обнаружен на берегу озера, расположенного в левой части моренного комплекса неподалеку от берега моря. Получается, что обособленные участки мертвого льда под толщей моренных отложений могут сохраняться в течение длительного времени (около 100 лет).

В соответствии с вышесказанным возникает вопрос: насколько правомочно говорить об отступании ледника, если на части территории его моренного комплекса сохраняется мертвый лед, участки которого уверенно не идентифицируются на дистанционных материалах. Наглядным примером может служить ледник, не имеющий названия, который был обнаружен нами в 2010 г. и который не внесен в каталог ледников арх. Шпицберген. На карте НПИ [18] ледник показан в виде скопления моренных отложений. Ледник расположен непосредственно к югу от оз. Конгресс, и некогда в прошлом были периоды, когда воды ледника дренировались в озеро. В настоящее время практически весь лед ледника перекрыт моренным чехлом так, что на снимках идентифицировать его как ледник не удается. Приблизительные размеры ледника: длина около 500 м, ширина около 500 м. Тем не менее талые воды этого ледника питают ручей, протекающий к югу от оз. Конгресс. Из этого следует простой вывод: при изучении изменения площадей ледников арх. Шпицберген во времени нельзя базироваться только на дистанционных методах, они должны быть подтверждены наземными исследованиями. В противном случае могут возникнуть значительные ошибки.

В заключение хотелось бы обратить внимание на то, что в связи с существенным сокращением ледников на западе Шпицбергена ледники, которые ранее были пульсирующими

(такие как Альдегонда, Западный и Восточный Грёнфьорд), оказавшись ниже высоты границы питания полностью (или почти полностью), потеряли области аккумуляции и в настоящее время деградируют с большой скоростью. Это означает, что они полностью потеряли способность к пульсациям, которые были характерны для них в конце малого ледникового периода. Таким образом, пульсирующие ледники на Шпицбергене могут быть разделены, по крайней мере, на две группы. К первой группе относятся ледники, пульсации на которых происходят регулярно через определенные периоды времени, ко второй — ледники, на которых пульсации происходят нерегулярно или даже разово только при благоприятных условиях, когда в верховьях этих ледников накапливается большое количество снега и льда. Поэтому при картировании пульсирующих ледников необходимо выделять обе эти группы.

#### Заключение

Ледник Альдегонда с начала XX в. сильно деградировал, отступив от берега моря на расстояние более 2 км. Это привело к освобождению большой территории моренного комплекса ото льда. Нормированная скорость отступания края льда на языке ледника варьировала от 13 до 30 м/год, усилившись в течение последних лет, что, вероятно, было связано с большим количеством неровностей в коренном ложе ледника. При сохранении темпов деградации ледника большая его часть исчезнет через 40–50 лет. Полное исчезновение ледника возможно к середине XXII в. Несмотря на то, что в начале XX в. ледник Альдегонда, скорее всего, был пульсирующим, в настоящее время ни о каких пульсациях в будущем речи идти не может, если структура накопления и таяния льда на нем кардинально не изменится, а баланс массы льда не станет положительным.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Троицкий Л. С. Баланс массы ледников разных типов на Шпицбергене // Материалы гляциологических исследований. 1988. Вып. 63. С. 117–121. 2. Гляциология Шпицбергена / под ред. В. М. Котлякова. М.: Наука, 1985. 200 с. 3. Троицкий Л. С. О балансе массы ледников Шпицбергена в 1985/1986, 1986/1987 и 1987/1988 балансовых годах // Материалы гляциологических исследований. 1988. Вып. 63. С. 194–197. 4. Мавлюдов Б. Р., Соловьянова И. Ю. Баланс массы ледника Альдегонда в 2002/03 и 2003/04 балансовых годах // Комплексные исследования природы архипелага Шпицберген. Апатиты: КНЦ РАН, 2005. Вып. 5. С. 331–340. 5. Соловьянова И. Ю., Мавлюдов Б. Р. Балансовые наблюдения на ледниках Шпицбергена // Комплексные исследования природы Шпицбергена. Апатиты: КНЦ РАН, 2007. Вып. 7. С. 202–214. 6. Мавлюдов Б. Р. О деградации горно-долинных ледников Шпицбергена // Комплексные исследования природы архипелага Шпицберген. Мурманск: КНЦ РАН, 2004. Вып. 4. С. 207-216. 7. Мавлюдов Б. Р. Влияние изменения климата на ледники Земли Норденшельда, Шпицберген // Комплексные исследования природы Шпицбергена. М.: ГЕОС, 2012. Вып. 11. С. 160–164. 8. Лаврентьев И. И. Строение и режим ледников земли Норденшельда (Шпицберген) по данным дистанционных исследований: автореф. дис. М., 2008. 24 с. 9. Мавлюдов Б.Р., Саватюгин Л. М., Соловьянова И. Ю. Реакция ледников Земли Норденшельда (арх., Шпицберген) на изменение климата // Проблемы Арктики и Антарктики. СПб.: ААНИИ, 2012. Вып. 1 (91). С. 67–77. 10. Кокин О. В. Рельеф и отложения краевых зон ледников Западного Шпицбергена (на примере ледников Грёнфьорд и Альдегонда): автореф. дис. М., 2010. 24 с. 11. Мачерет Ю. Я., Журавлев А. Б., Боброва Л. И. Толщина, подледный рельеф и объем ледников Шпицбергена по данным радиозондирования // Материалы гляциологических исследований. 1984. Вып. 51. С. 49-63. 12. Радиофизические исследования ледника Альдегонда на Шпицбергене в 1999 г. / Е. В. Василенко [и др.] // Материалы гляциологических исследований. 2001. Вып. 90. С. 86-99. 13. Мавлюдов Б. Р. Пульсирующие ледники Шпицбергена // Комплексные исследования природы Шпицбергена. Апатиты: КНЦ РАН, 2007. Вып. 7. С. 177–187. 14. Мавлюдов Б. Р., Кокин О. В. Был ли ледник Альдегонда пульсирующим? // Природа шельфа и архипелагов Европейской Арктики. М.: ГЕОС, 2008. Вып. 8. С. 222-226. 15. Isachsen G. Exploration du Nord-Ouest du Spitsberg entreprise sous les auspices de S.A.S. le Prince de Monaco par la Mission Isachsen. 1st part. Resultats des Campagnes Scientifiques Prince Albert de Monaco. 1912. 113 p. 16. Prospekt A/S De Norske Kulfelter Green harbour (No. 5). Tromsø Statsarkiv, SNSK's archive. 1912. Vol. 455. 17. Map of central Spitzbergen with the mail coal districts by Gerard de Geer, 1911, 1:300000. URL: https://api.npolar.no/map/archive-jpeg/ 03157029-639c-4d16-9da0-867a740bd230/\_file/Anmeldelse\_41-3000px.jpeg. 18. Toposvalbard. URL: https://toposvalbard.npolar.no. 19. USGS science for a changing world. URL: https://earthexplorer.usgs.gov. 20. Spitsbergen — Svalbard. A complete guide around the arctic archipelago. URL: https://toposvalbard.npolar.no/xflyfoto.html?lang=en&id=s36\_1677.

## Сведения об авторах

*Мавлюдов Булат Рафаэлевич* — кандидат географических наук, старший научный сотрудник Института географии РАН E-mail: bulatrm@bk.ru *Кудиков Арсений Валерьевич* — инженер-исследователь Института географии РАН E-mail: arskud@yandex.ru

## **Author Affiliation**

Bulat R. Mavlyudov — PhD (Geography), Senior Researcher of the Institute of Geography of RAS E-mail: bulatrm@bk.ru Arsenij V. Kudikov — Research Engineer of the Institute of Geography of RAS E-mail: arskud@yandex.ru

## Библиографическое описание статьи

*Мавлюдов, Б. Р.* Изменение ледника Альдегонда с начала XX века / *Б. Р. Мавлюдов, А. В. Кудиков* // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2018. — № 3 (10). — С. 152–162.

## Reference

*Mavlyudov Bulat R., Kudikov Arsenij V.* Changing of the Aldegonda Glacier since the Beginning of the 20<sup>th</sup> Century. *Herald of the Kola Science Centre of the RAS*, 2018, vol. 3 (10), pp. 152–162 (In Russ.).

## МНОГОЛЕТНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ВОДНОГО БАЛАНСА РЕКИ АЛЬДЕГОНДА (ОСТРОВ ЗАПАДНЫЙ ШПИЦБЕРГЕН)

#### М. В. Третьяков, В. А. Бирюкова

ФГБУ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург

#### Аннотация

Рассматриваются многолетние изменения элементов водного баланса реки Альдегонда. На основе модельных расчетов восстановлены гидрографы стока для реки Альдегонда за весь период гидрологического цикла от начала таяния снега до полного осеннего перемерзания реки с 2005 по 2016 гг. Анализ рядов показывает, что сток реки Альдегонда хорошо реагирует на многолетние климатические перемены, происходящие в последнее десятилетие на арх. Шпицберген.

#### Ключевые слова:

снеготаяние, ледник, расчетные методы, восстановление рядов, анализ изменений, высотные зоны.

# LONG-TERM CHANGES OF WATER BALANCE ELEMENTS OF ALDEGONDA RIVER (WEST SPITSBERGEN)

#### Mikhail V. Tretiakov, Valentina. A. Biryukova

Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg

#### Abstract

Long-term changes of elements of water balance of Aldegonda river are considered. Flow hydrographs for Aldegonda river were restored for the entire period of the hydrological cycle from the beginning of snow melting to the full autumn freezing of the river from 2005 to 2016, on the basis of model calculations. An analysis was carried out on the rows, which showed that the flow of Aldegonda river responds well to the long-term climatic changes occurring in Spitsbergen in the last decade.

#### Keywords:

snowmelt, glacier, calculation methods, recovery of long-term series, analisys of changes, highaltitude areas.



#### Введение

Глобальные климатические изменения, которые связаны с океанической циркуляцией, в первую очередь проявляются на арх. Шпицберген вследствие его географического положения. По этой причине изучение поведения системы «атмосфера — криосфера — гидросфера — биосфера» на архипелаге представляет особый интерес.

В последние десятилетия на архипелаге наблюдается деградация ледников, что говорит об изменениях, происходящих в этой системе. Пресные воды,

образующиеся в результате таяния ледниковых поверхностей, поступают на водосборы рек, впадающих в фьорды. Увеличение притока пресных и холодных вод, несущих значительное количество взвешенных частиц, приводит к значительному изменению свойств верхнего слоя фьордов. Исследования климатических изменений, оледенения и прибрежных районов моря требуют оценки водного баланса ледниковых бассейнов арх. Шпицберген. Если сведения о метеорологических, гляциологических, океанографических характеристиках могут быть получены методами прямых наблюдений или дистанционного зондирования (спутниковая информация) практически в течение всего года, то получение гидрологических характеристик, которые позволяют исследовать изменчивость составляющих водного баланса архипелага в течение всего года, особенно в переходные периоды, в силу многих причин затруднено. Среди последних можно назвать значительную удаленность региона, затрудняющую регулярные наблюдения, сложности с доставкой оборудования и его установкой на исследуемых объектах.

Пока не будут решены методические вопросы организации и проведения наблюдений за гидрологическими характеристиками на водосборах в весенний переходный период, для получения этих характеристик необходимо привлекать расчетные методы.

На противоположной стороне от пос. Баренцбург во внутренней части залива Грёнфьорд расположен бассейн р. Альдегонда (рис. 1), который делится на две части — моренную и ледниковую. Ледник ориентирован с запада на восток, длиной около 3,0 км и шириной 2–2,5 км в самой широкой части, относится к типу горно-долинных, а также является политермическим. В последние несколько десятилетий он быстро деградирует, при этом язык ледника отступил на расстояние порядка 1,5 км. В настоящее время язык ледника расположен на высоте выше 100 м над ур. м. Вся ледниковая поверхность расположена в зоне интенсивной абляции.



Рис. 1. Водосбор реки Альдегонда, 1 — замыкающий створ Fig.1. The catchment of Aldegonda river, 1 — the outlet

Сток реки образован следующими составляющими: таяние снежного покрова, таяние поверхности ледника, внутриледниковый сток в виде источников, разгружающихся непосредственно в реку, моренный сток и осадки в виде дождя. Изменения этих источников питания и их соотношения формирует характерный для рек Шпицбергена режим стока. Как правило, в зимний период сток отсутствует. На р. Альдегонда сток обычно начинается в конце мая и продолжается до середины ноября.

#### Материалы и методы

Для восстановления стока воды р. Альдегонда в периоды, не освещенные прямыми гидрологическими наблюдениями, была разработана модель его формирования, основанная на теплобалансовом методе расчета снеготаяния П. П. Кузьмина [1], распространенного также на ледниковую поверхность, методе расчета водоотдачи из снега Г. П. Ковзеля [2] и методе трансформации стока Г. П. Калинина и П. И. Милюкова.

Метод П. П. Кузьмина позволяет рассчитывать интенсивность снеготаяния за любые интервалы, т. е. дает возможность получить ее внутрисуточный ход. При условии использования репрезентативных метеорологических данных метод дает хорошие результаты [1]. Кроме того, расчет водоотдачи из снега базируется на теплобалансовом методе расчета интенсивности снеготаяния П. П. Кузьмина. В основу схемы расчета положен графоаналитический способ учета регулирования талых вод снежным покровом в условиях неравномерного распределения запасов воды в снеге по площади [2].

К данному региону была проведена адаптация метода П. П. Кузьмина путем деления водосбора на высотные зоны. Водосбор реки Альдегонда состоит из ледника и морены. Морена находится на высоте порядка 80 м над ур. м. Самая высокая точка ледника находится на высоте 600 м над ур. м. Такая методика применима для горных регионов, так как присутствует существенная разница температур. В среднем значение температуры понижается каждые 100 м примерно на 0,6 °C. В табл. 1 приведено деление водосбора на высотные зоны, что позволяет произвести расчет снеготаяния и водоотдачи отдельно для каждой зоны.

Таблица 1 Table 1

Параметр	Морена	Зона 1	Зона 2	Зона З	Зона 4
Indicator	Moraine	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4
Абсолютная высота					
местности $H_{abc}$ , м	0–80	80-200	200-300	300-400	400–600
Absolute terrain altitude, $H_{a\delta c}$ , m					
Площадь, км <sup>2</sup>	3,50	1,41	1,60	1,90	0,62
Area, km <sup>2</sup>					

## Характеристики высотных зон водосбора р. Альдегонда Characteristics of high-altitude zones of Aldegonda river catchment

Для проведения расчетов необходимы характеристики водозапасов. На водосборе проводятся ежегодные регулярные наблюдения в рамках проведения высокоширотных арктических экспедиций на арх. Шпицберген: в летний период с июля по август, в зимний — с апреля по начало мая. Снегозапасы распределены неравномерно, что обусловлено множеством причин, таких как местоположение и высота местности, характер подстилающей поверхности, действие ветра, лавины, экспозиция склонов, оттепели.

За период экспедиционных наблюдений ААНИИ на водосборе р. Альдегонда было выявлено, что наибольшая высота снега, как правило, наблюдается на бортах ледника, что, видимо, связано с метелевым переносом снега вблизи крутых склонов и действием лавин. Средняя высота снега на леднике Альдегонда за период с 2002–2017 гг. составила 160 см. Плотность снега на водосборе р. Альдегонда к моменту его максимального накопления, по данным наблюдений с 2002 по 2017 гг., в среднем составляет 0,4 г/см<sup>3</sup>. Максимальное значение средней плотности по водосбору наблюдалось в 2004 г. — 0,52 г/см<sup>3</sup>, минимальное в 2016 г. — 0,29 г/см<sup>3</sup>.

Многолетние наблюдения позволили выявить, что пространственное распределение плотности снежного покрова на поверхности ледника Альдегонда имеет четкую зависимость от абсолютной высоты местности. Связи между высотой снега и его плотностью не прослеживается как на ледниковой, так и на неледниковой части водосбора.

Запас воды в снеге (водный эквивалент) *Q*с для этого водосбора за период наблюдений изменяется от 364 (2016 г.) до 801 мм (2012 г.), в среднем составляя 661 мм. Значимой многолетней тенденции в водозапасах на этом водосборе не прослеживается (рис. 2).



год

Рис. 2. Межгодовая изменчивость запасов воды в снеге (водного эквивалента) на водосборе р. Альдегонда в период максимального снегонакопления Fig. 2. Interannual variability of snow water resources (water equivalent) on the catchment area of Aldegonda river during the maximum snow accumulation

Для расчета процессов снеготаяния и водоотдачи необходимы метеоданные, а именно такие, как средняя скорость ветра, средняя температура, нижняя и общая облачность, средние осадки. Метеорологические наблюдения проводит зональная гидрометеорологическая обсерватория (ЗГМО) «Баренцбург». За расчетный период (с 1 апреля по 15 ноября) среднегодовые значения температур составляли 0,5 °C. Наиболее теплым был 2016 г. (2,6 °C), холодным — 2008 г. (-0,7 °C).

Кроме того, потребуются и результаты изменения альбедо снежного покрова. Величина альбедо меняется в зависимости от таяния снега. Для свежевыпавшего снега величина стремится к 1,00, к концу периода таяния доходит до 0. Для упрощения модели расчетов значение альбедо принято постоянным (0,1) за весь период таяния.

#### Результаты

Наибольший вклад в расчет притока тепла оказывает турбулентный теплообмен и суммарная солнечная радиация. Турбулентный теплообмен — это процесс переноса тепла из одной среды в другую, возникающий при различии температур верхнего слоя воды и приводного слоя воздуха. Пики интенсивности турбулентного теплообмена приходятся на июль — период, когда происходит интенсивная водоотдача, в отличие от суммарной солнечной радиации, высокие значения которой приходятся на конец первой декады мая.

За дату начала снеготаяния принимаются первые сутки, в которые интенсивность снеготаяния составляет не менее 3 мм/сут. В среднем это конец апреля — начало мая. Снеготаяние начинается примерно в одно и то же время, что объясняется небольшим различием в высотах между мореной и ледниковыми зонами. Водоотдача из снежного покрова на морене начинается примерно в первых числах мая. Пик водоотдачи приходится на середину мая. К концу первой декады июня снег практически полностью стаивает с поверхности водосбора. Расчет водоотдачи

заканчивается при нулевых значениях. На леднике водоотдача из снега начинается в среднем в середине мая и прекращается к началу июля. Дальнейшее формирование стока р. Альдегонда происходит за счет таяния ледника и выпадения жидких атмосферных осадков.

Интенсивность таяния ледника варьируется в зависимости от высотных зон (табл. 2). Самая низкая из которых в зоне 4. Чем ближе зона к морене, тем интенсивность выше. Можно отметить, что высокие значения абляции (среднее значение по всем зонам 3,73 мм/год) наблюдались в 2016 г., который является также самым теплым за 13 лет.

Таблица 2 Table 2

N⁰	Абляция, м/год / Ablation, m per year												
$\Pi/\Pi$	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
1	3,45	2,98	2,89	2,76	3,13	2,78	3,59	3,04	3,57	3,03	3,59	4,37	3,65
2	3,09	2,59	2,56	2,41	2,84	2,46	3,21	2,65	3,16	2,69	3,22	3,91	3,25
3	2,82	2,24	2,28	2,09	2,54	2,20	2,87	2,29	2,80	2,35	2,90	3,50	2,84
4	2,55	1,93	2,05	1,80	2,28	1,96	2,57	1,96	2,46	2,06	2,60	3,12	2,46

Многолетняя абляция ледника Альдегонда по высотным зонам Perennial ablation of the Aldegonda glacier by elevation zones

Моделирование стока р. Альдегонда показало удовлетворительное соответствие результатам данных наблюдений за речным стоком в последние годы (2014–2016). Восстановленный сток за 2016 г. (рис. 3) показал соответствие значениям, полученным в результате наблюдения, с критерием качества Нэша — Сэтклифа, равным 0,67, и средней относительной погрешностью около 14 %. За предыдущие годы (2005–2013) модельные расчеты в целом соответствуют отрывочным наблюдениям за расходами воды. В некоторые годы (2005–2007) наблюденный расход воды оказывается меньше рассчитанного по модели, однако следует заметить, что в эти годы для измерения расходов применялся недостаточно проработанный метод ионного паводка.





Месяцем с наибольшей водностью является июль, что демонстрирует рис. 4. За этот месяц проходит 29 % стока. В соотношении источников питания реки по многолетним данным можно заключить, что в приходной части водного баланса на долю снегового питания приходится в среднем 26 %, дождевая составляющая незначительна — около 10 %, основная составляющая приходной части формируется за счет таяния ледника — 64 %.



Puc. 4. Среднемноголетний гидрограф стока р. Альдегонда Fig. 4. Average annual Aldegonda river runoff hydrograph

В многолетнем разрезе соотношение источников питания реки меняется несущественно. Можно отметить в последние годы уменьшение доли снегового питания и увеличение доли питания за счет абляции ледника.

#### Выводы

Расчет элементов водного баланса р. Альдегонда показал, что процесс таяния снега развивается под действием турбулентных потоков тепла, имеющих большую изменчивость, на фоне положительного и слабо изменяющегося потока тепла за счет солнечной радиации, при этом турбулентный поток тепла равен влиянию потока тепла за счет солнечной радиации. Незадолго до начала водоотдачи из снега начинается его таяние. Водоотдача из снега начинается дружно для всего водосбора, несмотря на то, что на нем можно выделить различные высотные зоны. Максимальное снеготаяние происходит в начале июня, а к первой декаде июля снег успевает стаять со всей территории водосборного бассейна, не создавая условий для положительного баланса массы ледника, что подтверждается гляциологическими наблюдениями на леднике Альдегонда, который в последние десятилетия активно деградирует.

На основе модельных расчетов восстановлены гидрографы стока для р. Альдегонда за весь период гидрологического цикла от начала таяния снега до полного осеннего перемерзания реки с 2005 по 2016 гг. По рядам проведен анализ, который показал, что сток р. Альдегонда хорошо реагирует на многолетние климатические изменения, происходящие в последнее десятилетие на арх. Шпицберген.

Необходимы наблюдения за внутренней дренажной системой ледника, так как была выдвинута гипотеза о перехвате талых ледниковых вод подледниковыми полостями и выводе их в другие водосборные бассейны. Возможно, следует расширить наблюдения и включить в них информацию о подморенном таянии ледника Альдегонда, поскольку на него не оказывают воздействия (механического и теплового) жидкие осадки и потоки талой воды по поверхности ледника.

#### ЛИТЕРАТУРА

**<sup>1.</sup>** *Кузьмин П. П.* Процесс таяния снежного покрова. Л.: Гидрометеоиздат, 1961. С. 345. **2.** *Ковзель А. Г.* Упрощенная схема водоотдачи из снега // Труды ГГИ. 1962. Вып. 99. С. 141–176.

## Сведения об авторах

*Третьяков Михаил Вячеславович* — кандидат географических наук, зав. отделом гидрологии устьев рек и водных ресурсов Арктического и антарктического научно-исследовательского института E-mail:tmv@aari.ru

*Бирюкова Валентина Андреевна* — магистр, инженер I категории отдела гидрологии устьев рек и водных ресурсов Арктического и антарктического научно-исследовательского института E-mail: welga994@mail.ru

#### **Author Affiliation**

*Mikhail V. Tretiakov* — PhD (Geography), Head of Department of Hydrology of River Mouths and Water Resources, Arctic and Antarctic Research Institute I E-mail: tmv@aari.ru *Valentina A. Biryukova* — Master First Category Engineer of Department of Hydrology of River Mouths and Water Resources, Arctic and Antarctic Research Institute

E-mail: welga994@mail.ru

## Библиографическое описание статьи

*Третьяков, М. В.* Многолетние изменения элементов водного баланса реки Альдегонда (остров Западный Шпицберген) / *М. В. Третьяков, В. А. Бирюкова* // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2018. — № 3 (10). С. 163–169.

#### Reference

*Tretiakov Mikhail V., Biryukova Valentina A.* Long-Term Changes of Water Balance Elements of Aldegonda River (West Spitsbergen). *Herald of the Kola Science Centre of the RAS*, 2018, vol. 3 (10), pp. 163–169 (In Russ.).

## ВЛИЯНИЕ ЕСТЕСТВЕННЫХ ФАКТОРОВ НА МОРФОЛОГИЮ СНЕЖНОГО ПОКРОВА

## В. П. Епифанов

ФГБУН Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН, г. Москва

#### Аннотация

Разработана научная концепция, позволяющая с помощью акустических методов определять деформационное изменение структуры снега. Выполнены многоплановые акустико-механические исследования разновозрастных слоев, выявлен метаморфизм снега, обусловленный воздействием внешних факторов. Установлена количественная связь между микро- и макрохарактеристиками снега. Предложена теоретическая модель, описывающая деформационные изменения структуры снега.

#### Ключевые слова:

акустическая сжимаемость, акустические спектры, структура и текстура снега, стратиграфия, твердость.

#### EFFECT OF NATURAL FACTORS ON THE MORPHOLOGY OF THE SNOW COVER

#### Viktor P. Epifanov

Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences

#### Abstract

A scientific concept is developed that allows using acoustic methods to determine the change in the structure of snow. Multidimensional acoustic and mechanical studies of different ages were carried out, metamorphism of snow caused by external factors was revealed. A quantitative relationship has been established between the micro and macro characteristics of the snow. A theoretical model describing the deformation changes in the snow structure, is proposed.

#### Keywords:

acoustic compressibility, acoustic spectra, structure and texture of snow, stratigraphy, hardness.



#### Введение

Проблема формирования и эволюции снежного покрова на горных склонах включает ряд взаимосвязанных задач: измерение физико-механических и прочностных характеристик снега, определение его строения (структура и текстура), нахождение корреляций между микро- и макрохарактеристиками, а также изучение процессов метаморфизма и уплотнения в снегу, в результате которых возникает целый спектр разновидностей текстуры. Ключевой является задача установления связи механических и физических свойств снега с его

структурой, решение которой открывает возможность дистанционного мониторинга эволюции структуры и текстуры снега с целью определения момента потери устойчивости на горном склоне. Механические и прочностные свойства снега неразрывно связаны с его микроструктурой [1]. Поиск корреляции между тензором структуры и модулями Юнга льда [2] и вычисление ортотропных тензоров жесткости для снега разной плотности и морфологии зерен позволяют рассматривать это направление как достаточно перспективное [3].

Под снегом понимается природное упруго-вязкопластическое тело с открытой пористой структурой, образованной смерзшимися между собой кристаллами льда. Под структурой снега понимается форма и размер слагающих снежную толщу ледяных кристаллов. Под текстурой снега

понимаются особенности строения одновозрастных слоев снежного покрова, обусловленные преимущественной ориентацией в пространстве и расположением кристаллов льда (зерен), жесткость связей между ними, а также объем и ориентация пор в снежном слое и наличие ледяных прослоек.

Ранее был предложен параметр структуры, устанавливающий количественную связь между макро- и микрохарактеристиками снега: акустической сжимаемостью, плотностью, температурой и размером подвижных структурных элементов (например, радиус зерен) и их резонансной частотой [4], а также метод акустической стратиграфии [5–7].

Исследована тонкая структура спектров акустической эмиссии, возникающей при контактном разрушении снега в разновозрастных слоях снежного покрова при индентировании наконечниками простой и сложной формы. Использован комплексный подход, основанный на определении твердости снега, размеров ледяных зерен, температуры, плотности, а также регистрации акустических спектров в рабочем диапазоне от 15 до 25 000 Гц.

Ранее была установлена нелинейная зависимость динамического модуля от плотности снега [5]. Этот факт имеет принципиальное значение, поскольку исключает использование плотности как параметра состояния снега. Причиной нелинейности, то есть зависимости характеристик снега от амплитуды напряжений, являются пластические деформации кристаллической решетки льда. Поэтому были выбраны акустические свойства, которые отражают текстуру снега в виде интегрального параметра.

Основными естественными факторами, влияющими на морфологию снежного покрова, являются атмосферные осадки, включая дожди в приморских районах, суточная смена температуры воздуха, а также ветер, воздействие солнечных лучей и рельеф склона. Общеизвестно влияние этих факторов на формирование ледяных прослоек и последующее их воздействие на процессы теплои массопереноса. Можно было предположить, что ливневые дождевые осадки должны «оставлять» следы своего воздействия в виде своеобразных вертикальных воздушных каналов, по которым происходит интенсивный массоперенос влаги из нижних слоев в верхние. Разработка высокочувствительной аппаратуры и методики индентирования горизонтальных слоев в шурфах [4, 7], позволяющих «нащупать» вертикальную анизотропию текстуры снега в одновозрастном слое, послужила основой для реализации такой рабочей гипотезы.

Принципиально новым в исследовании «вертикальной анизотропии» снежных текстур на горных склонах арх. Шпицберген было применение наконечников разной формы (крестообразной, ножевого и конического типа), что упрощало интерпретацию выполненных измерений.

## Материал и методики исследований

*Снежный покров* рассматривается как слоистая конструкция, состоящая из разновозрастных слоев, обладающих разной структурой и текстурой, с учетом предыстории их формирования.

*Объект исследований* — амплитудно-частотные характеристики спектров разрушения снега и его твердость в разновозрастных слоях снежного покрова.

Базовые методики определения твердости снега описаны в работах [5, 6]. Принципиально новым методическим приемом было определение осевого усилия индентирования с помощью цифрового динамометра и применение наконечников сложной формы. Стратиграфические описания включали измерения толщины слоев, глубины их залегания, плотности снега, температуры вблизи межслоевых границ, макрофотосъемку кристаллов, а также измерения твердости снега и запись амплитудно-частотных спектров АЭ. Измерения выполняли в точках, отстоящих одна от другой на 10–20 см. Для записи сигналов АЭ применяли датчик типа KD 910 и измерительную акустическую линию с диапазоном частот от 50 Гц до 25 кГц, коэффициентом усиления 97 дБ [4].

Портативный твердомер собран на базе цифрового динамометра типа «Мегеон-030550». К штоку динамометра присоединяли (резьба) наконечники разных типов [7, 8] и пьезоакустические датчики (рис. 1).



Рис. 1. Внешний вид наконечников (крестообразной формы, в виде обоюдоострого ножа и конического) и их «следы» на стенке шурфа (тупой конический наконечник типа Хеффели не показан). Поверхность крестообразного наконечника ≈ 72,8 см<sup>2</sup>, его миделево сечение ≈ 2,5 см<sup>2</sup>; поверхность наконечника ножевого типа ≈ 6,6 см<sup>2</sup>, его миделево сечение ≈ 0,56 см<sup>2</sup>

Fig. 1. Appearance of tips (cruciform shape, in the form of a double-edged knife and a tapered one) and their "marks" on the wall of the hole (a blunt conical tip like Heffeli is not shown). The surface of the cross-shaped tip is  $\approx$  72,8 cm<sup>2</sup>, its midsection is  $\approx$  2,5 cm<sup>2</sup>. The surface of the tip of the knife type is  $\approx$  6,6 cm<sup>2</sup>, its midsection is  $\approx$  0,56 cm<sup>2</sup>

## Результаты и их обсуждение

Спектрограмма снежного покрова. Лавинный зонд с закрепленным на нем акустическим датчиком вертикально перемещали в снежном покрове (толщина 127 см) от его дневной к подстилающей поверхности. Излучаемые при контактном разрушении снега упругие колебания (сигналы АЭ) записывали в цифровом виде на жесткий диск планшета. Одна из форм записи в координатах амплитуда-время (спектрограмма) представлена на рис. 2. Масштаб по времени — 0,001 с. Согласно представленной записи, время прохождения всей толщи снежного покрова составляет 1,36 с.

Изменение амплитуды и длительности сигналов в процессе прохождения снежной толщи обусловлено реакцией структур снега. Более плотной и жесткой локальной текстуре снега соответствует большая амплитуда сигнала (более 20 дБ) и наоборот (5–7 дБ). Длительность сигнала пропорциональна толщине слоя или прослойки. Локальные особенности структуры и текстуры снега фактически характеризуются амплитудой и длительностью акустических сигналов. Наблюдаемое «чередование» всплесков сигналов не противоречит разной плотности разновозрастных слоев и прослоек.

Отметим, что амплитуды сигналов в одновозрастном слое снега отличаются от среднего уровня всего лишь на несколько децибел (1,5-4), тем не менее этого достаточно, чтобы выявить в этих слоях тонкие прослойки льда. Отметим также непрерывность спектров разрушения снега во всем рабочем диапазоне частот (от 15 до 25 кГц). Разный уровень амплитуд, входящих в этот спектр сигналов (энергий разрушения), отражает сложную иерархию строения природного снега, прежде всего его слоистое строение и неоднородность структуры его одновозрастных слоев. Коллективное движение подвижных элементов структуры и текстуры снега и их разная энергия разрушения проявляются в виде пиков, детальное рассмотрение которых является ключевым в исследовании строения снежного покрова [9].



Рис. 2. Схема внедрения лавинного зонда в снежный покров (*a*) и зависимость амплитуды сигнала акустической эмиссии (А, дБ) (б) от времени (секунды). Пояснение в тексте

Fig. 2. Diagram of the introduction of the avalanche probe into the snow cover (*a*) and the dependence of the amplitude of the acoustic emission signal (A, dB) ( $\delta$ ) on time (second). Explanation is in the text

*Твердость снега в разновозрастных слоях снежного покрова.* В следующей серии измерений использовали тот же конический наконечник, но индентирование было не вертикальным, а горизонтальным, то есть наконечник перемещался параллельно межслоевым прослойкам. Результаты измерений представлены в таблице. Последовательность расположения строк в таблице (сверху вниз) соответствует расположению исследуемых слоев в снежном покрове.

Сопротивление<sup>\*</sup>, твердость снега и разброс их значений (Δσ, %) при внедрении конического наконечника сечением 0,64 см<sup>2</sup> в слои снежного покрова, имеющие различную плотность и температуру

Resistance, snow hardness and scatter of their values ( $\Delta\sigma$ , %) when a conical tip is inserted with a cross section of 0,64 cm<sup>2</sup> in layers of snow cover having different density and temperature

Плотность $\rho$ , г/см <sup>3</sup> Density $\rho$ , $g/cm^3$	Сопротивление <i>P</i> , кгс Resistance <i>P</i> , kgf	Температура Temperature T, °C	$\overline{P}$ , kgf	Твердость снега σ, кПа Snow hardness σ, kPa	Δσ, %
0,27	0,312; 0,397; 0, 397; 0,223; 0,224; 0,23	-6,2	0,30±0,06	46	20
0,22	0,22; 0,206; 0,233; 0,2; 0,263; 0,271	-5,2	0,23±0,02	35	9
0,23	0, 25; 0,36; 0,75; 0,39; 0,36; 0,4	-7,3	0,4±0,1	61	25
0,41	0,187; 0,241; 0,078; 0,167; 0,103; 0,303; 0,132; 0,251; 0,15	-5,1	0,18 ±0,08	28	44
0,27	0,218; 0,274; 0,309	-5,1	0,27±0,03	41	11
0,43	0,478; 0,41; 0,499; 0,42; 0,508	-5,5	0,46±0,04	70	9

<sup>\*</sup>Сопротивление P дано в единицах шкалы измерительного прибора «Мегеон» (динамометра цифрового). <sup>\*</sup>Resistance P is given in Megeon units of measurement (digital dynamometer). «Разброс» твердости снега в пределах одновозрастных слоев изменяется от 9 до 44 % при относительной ошибке для однородного материала 5–7 %. Факт большого разброса твердости может быть объяснен степенью завершенности процесса рекристаллизации. Изменения текстуры снега наблюдались нами и ранее [7]. Возможно, что к моменту проведения измерений половина первоначальной равновесной текстуры «перешла» в другое квазиравновесное состояние.

Отметим, что снег в некоторых разновозрастных слоях имел почти одинаковые значения плотности (например, 0,43 и 0,41 г/см<sup>3</sup>), но существенно разные (70 кПа / 2,8 кПа = 2,5) значения твердости. Из этого следует, что, во-первых, плотность снега не однозначно характеризует его механические свойства и, во-вторых, в разновозрастных слоях присутствуют как «плотные», так и «рыхлые» структурные неоднородности.

Таким образом, выполненная серия экспериментов подтверждает, что в одновозрастном слое снега могут содержаться неоднородности, которые являются результатом непрекращающегося процесса вторичного метаморфизма.

**Твердость одновозрастного снега.** В этой серии экспериментов выбран один визуально однородный толщиной 13 см слой снежного покрова и рассматривается реакция снега на горизонтальное (параллельное межслоевым прослойкам) индентирование двумя разными наконечниками. Характеристики исследуемого: плотность —  $366\pm9$  кг/м<sup>3</sup>, диаметр зерна —  $0,6\pm0,1$  мм, модуль сдвига —  $7308\pm15$  МПа, коэффициент Пуассона  $0,26\pm0,01$ , динамический модуль упругости —  $2,2\pm0,1$  ГПа, объемный модуль упругости —  $1,53\pm0,07$  ГПа, время релаксации — 330-377 с, сдвиговая вязкость снега — 240-270 ГПа, вязкость разрушения —  $29\pm2$  кПа·м<sup>0,5</sup> при Ts = -15 °C.

Применены большой (6×6 см<sup>2</sup>) крестообразный наконечник и малый (диаметром 0,9 см) конический типа Хеффели (тупой). Миделево сечение большого наконечника около 2,5 см<sup>2</sup> (см. рис. 1), малого — 0,64 см<sup>2</sup>. Рабочие поверхности наконечников были равны около 72,8 и 4,24 см<sup>2</sup> соответственно. Индентирование выполняли в средней части слоя, на фиксированных расстояниях от одной точки измерений до другой. Результаты измерений приведены на рис. 3.

Экстремумы на экспериментальных кривых подтверждают присутствие в одновозрастном слое неоднородностей с эффективным диаметром (~1 см) и расстоянием между неоднородностями (около 15 см). Косвенным подтверждением присутствия неоднородностей являются метеоданные с близко расположенной метеостанции о ливневых дождевых осадках, относящиеся ко времени формирования исследуемого слоя.

Наконечник малых размеров (конический) реже, чем крестообразный, «наталкивается» на эти неоднородности. Поскольку вероятность прямого попадания в такую «мишень» для наконечника малых размеров мала, то на нижней кривой наблюдают один пик и небольшие отклонения от средних значений. Возможно, что причиной этих отклонений является прохождение наконечника вблизи неоднородности.

Зависимость между структурой снега и параметрами акустического сигнала. В визуально однородных слоях снега разной плотности и возраста были измерены и рассчитаны собственные резонансные частоты. Расчет выполняли для первой гармоники, как наиболее достоверной при фиксированных значениях жесткости связей зерен (k = 15,5 и 56 H/м) [10]. Наилучшее (±0,015 %) соответствие расчетных и экспериментальных значений получено для 6-го и 9-го слоя (k = 56 H/м), что соответствует предположению о завершении стадии формирования текстуры снега в этих слоях и преимущественном виде напряженного состояния (изгиб). В нижнем слое — 11-м, если судить по соответствию экспериментальных значений теоретическим значениям, при k = 15,5 H/м изменяется вид напряженного состояния (изгиб сменяется растяжением). К тому же отклонения от теоретических значений в сторону, характерную для увеличения размеров зерен, не противоречат факту формирования анизотропных текстур с большим размером подвижных элементов. Даже небольшие отклонения расчетных резонансных частот от достоверно определенных их значений носят принципиальный характер (рис. 4).



Рис. 3. Реакция ледяного скелета в одновозрастном снеге на внедрение индентора: крестообразного (верхняя ломаная кривая) и конического (нижняя кривая)





Рис. 4. Тонкая структура акустического спектра ледяных зерен вблизи резонансной частоты f = 1426,5 Гц Fig. 4. The fine structure of the acoustic spectrum of ice grains near the resonant frequency f = 1.426,5 Hz

По-видимому, наложение резонансов обусловлено именно вариациями размеров излучателей в снежной массе. Фактически наблюдаемая на рис. 4 кривая по своему физическому смыслу характеризует в интегральной форме момент эволюции кристаллов, например, переход от меньшего к большему размеру, причем количество пиков и их амплитуды характеризуют количественное соотношение таких «фракций»/фаций в слое.

Для расшифровки акустических спектров применена улучшенная линейная модель, состоящая из подвижных жестких шаров (ледяных кристаллов) различной массы, соединенных деформируемыми связями, жесткость которых принимает значения, соответствующие виду напряженного состояния (рис. 5) [4].



Рис. 5. Цепочечная модель осциллятора, состоящего из n подвижных материальных точек разной массы  $m^1...m^n$ , соединенных упругими связями фиксированной жесткости k Fig. 5. A chain-like model of an oscillator consisting of n moving material points of different mass  $m_1...m_n$  connected by elastic links of fixed stiffness k

Масса *т* подвижных элементов считается переменной величиной. Ее эффективный радиус *R* изменяется в интервале экспериментально определенных при шурфовании значений, например, от  $R^{\min}$  до  $R^{\max}$ . Коэффициент жесткости *k* может принимать значения, соответствующие виду преобладающего напряжения. Так, при растяжении или изгибе коэффициент жесткости примет значения 15,5 или 56 Н/м соответственно [10].

С помощью этой модели установлена связь структуры снега с его макроскопическими характеристиками твердости. В результате удалось объяснить уширение резонансного спектра присутствием нескольких резонансов, параметры которых количественно характеризуют соотношение фаций в эволюционном процессе вторичного метаморфизма. Количественное подтверждение функциональности цепочечной модели получено при сравнении расчетных (теоретических) значений резонансных частот с экспериментальными значениями в акустических спектрах разрушения. Экспериментальные наблюдения также показали, что при переходе от дневной поверхности снежного покрова к слоям снега, которые соприкасаются с подстилающей поверхностью грунта, особенно на склонах, преимущественный изгиб в верхних слоях сменяется на растяжение в нижележащих слоях. Это изменение отражается в теоретической модели выбором соответствующего виду напряженного состояния коэффициента жесткости.

#### Заключение

Исследованы амплитудно-частотные спектры разрушения снега в разновозрастных слоях снежного покрова с целью количественной оценки размеров кристаллов льда, образующих снежный каркас. Установлена тонкая структура акустических спектров в интервале частот вблизи собственных резонансных частот кристаллов льда. Получено согласие расчетных значений резонансов с экспериментально наблюдаемыми значениями. Количественно подтверждено формирование кластеров вертикальной ориентации.

Выполненные исследования показали перспективность метода акустической стратиграфии снежного покрова для количественных определений размеров ледяных зерен снежного каркаса и выявления анизотропных текстур, формирующихся под действием естественных факторов в слоях снежного покрова.

#### ЛИТЕРАТУРА

**1.** Пенетрометр: пат. 2508448 Рос. Федерация / *Епифанов В. П., Казаков Н. А.* Опубл. 27.03.14, Бюл. № 6. **2.** *Schweizer J., Jamieson J. B., Schneebeli M.* Snow avalanche formation // Rev. Geophys. 2003. Vol. 41. P. 1016–1041. URL: http://dx.doi.org/10.1029/2002RG000123. **3.** *Shertzer R.H., Adams E. E.* Anisotropic thermal conductivity model for dry snow // Cold Reg. Sci. Technol. 2011. Vol. 69. P. 122–128. **4.** Prediction of anisotropic elastic properties of snow from its microstructure / *P. K. Srivastava [et al.]* // Cold Reg. Sci. Technol. 2016. Vol. 125. P. 85–100. **5.** *Епифанов В. П.* Применение акустических методов в исследованиях снежного покрова // Криосфера Земли. 2014. Т. XVIII, № 3. C. 101–113. **6.** *Епифанов В. П., Осокин Н. И.* Пластическое течение и разрыв снежного покрова на горных склонах острова Шпицберген // Криосфера Земли. 2009. Т. XIII, № 2. С. 82–93. **7.** *Епифанов В. П., Осокин Н. И.* Исследование прочностных свойств снега на горном склоне архипелага Шпицберген // Криосфера Земли. 2010. Т. XIV, № 1. С. 81–91. **8.** *Епифанов В. П., Казаков Н. А.* Акустическая эмиссия как индикатор эволюции снежного покрова на горных склонах // Комплексные исследования природы Шпицбергена и прилегающего шельфа: материалы междунар. науч. конф. (Мурманск, 6–8 ноября 2014 г.). М.: ГЕОС, 2014. Вып. 12. С. 81–86. **9.** Способ прогнозирования лавинной опасности. Авторское свидетельство № 1608600, кл. G 01 V/00 // Бюл. №43, 23.11.1990. **10.** *Zimmerman* 

R., Pimental G. C. The infrared spectrum of ice: temperature dependence of the hydrogen bond potential function // Advances in molecular spectroscopy / ed. MacMilan. N. Y. 1962. Vol. 2. P. 726-737.

## Сведения об авторе

Епифанов Виктор Павлович — доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории моделирования в механике деформируемого твердого тела Института проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН E-mail: evp@ipmnet.ru

#### Author Affiliation

Viktor P. Epifanov - Dr. Sci. (Physics & Mathematics), Senior Researcher of Laboratory of Modeling in Mechanics of Deformable Solids, Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of RAS E-mail: evp@ipmnet.ru

#### Библиографическое описание статьи

Епифанов, В. П. Влияние естественных факторов на морфологию снежного покрова / В. П. Епифанов // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2018. — № 3 (10). — С. 170–177.

#### Reference

Epifanov Viktor P. Effect of Natural Factors on the Morphology of the Snow Cover. Herald of the Kola Science Centre of the RAS, 2018, vol. 3 (10), pp. 170–177 (In Russ.).

## ВЛИЯНИЕ МОХОВОГО И СНЕЖНОГО ПОКРОВОВ НА УСТОЙЧИВОСТЬ МНОГОЛЕТНЕЙ МЕРЗЛОТЫ НА ЗАПАДНОМ ШПИЦБЕРГЕНЕ ПРИ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЯХ\*

#### А. В. Сосновский, Н. И. Осокин

ФГБУН Институт географии РАН, г. Москва

#### Аннотация

На основе данных измерений рассмотрено влияние мохового и снежного покровов на температурный режим многолетней мерзлоты на Западном Шпицбергене. Дана оценка критических значений высоты снежного покрова, при которых образуется талик. Представлены результаты расчетов времени формирования талика по региональной и глобальной моделям изменения климата при разной высоте снежного покрова и наличии мохового покрова.

#### Ключевые слова:

деградация многолетней мерзлоты, климатические изменения, мох, снежный покров, температура грунта.

## IMPACT OF MOSS AND SNOW COVER ON THE SUSTAINABILITY OF PERMAFROST IN WEST SPITSBERGEN DUE TO CLIMATE CHANGE

Alexander V. Sosnovsky, Nikolai I. Osokin Institute of Geography of RAS

#### Abstract

Based on the measurements, the influence of moss and snow cover on the temperature regime of permafrost in West Spitsbergen, is considered. Depending on the thickness of the snow cover, the ground temperature at depth of 0 to 80 cm can differ by 10–20 °C in winter and 3–6 °C in summer. The ground temperature under the 8 cm moss cover is 4 °C lower than in its absence. We estimated the critical value of snow cover height at which a talik is formed. With an average negative air temperature of -7,8 °C, an increase in the average positive air temperature to 6 °C results in the degradation of permafrost for a snow cover height of more than 1,5 m. The results of calculating the time of talic formation from regional and global models of climate change at different snow cover heights and the presence of moss cover, are presented. Under a snow cover thickness of 1,0 m and 1,5 m without a moss cover, formation of talik according to the regional model, will occur in 2032 and 2023, whereas under moss cover 5 cm thick — in 2055 and 2042.

#### Keywords:

degradation of permafrost, climatic changes, moss, snow cover, ground temperature.



#### Введение

Одной из составляющей природной среды арх. Шпицберген является многолетняя мерзлота. Ее деградация может привести к отрицательным явлениям как для природной среды, так и для инженерных сооружений и коммуникаций из-за потери прочности оснований сооружений и активизации склоновых процессов. Потеря устойчивости многолетней мерзлоты вызывается образованием несливающейся мерзлоты, переходящей в талик, что происходит при неполном

промерзании сезонно-талого слоя при росте температуры воздуха и толщины снежного покрова.

<sup>\*</sup> Математическое моделирование проводилось при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-05-60067, экспериментальные исследования в полевых условиях и обработка экспериментальных данных — по проекту «Оценки современного состояния и текущих изменений внутреннего гидротермического режима ледников, с выделением данных по эталонным ледникам», рег. № 01201352474 (0148-2014-0006), экспедиционные исследования на арх. Шпицберген выполнялись при финансовой поддержке госзадания 0148-2017-0007 и логистической помощи РНЦШ.

За периоды с 1985–2000 по 2001–2010 гг. рост средней годовой температуры воздуха на Западном Шпицбергене составляет от –5,3 до –3,9 °C [1], что ведет к росту температуры многолетнемерзлых пород (ММП). В дальнейшем это может привести к деградации ММП и сокращению их площади. Сохранность ММП, их термическая и механическая устойчивость зависит от термического состояния многолетней мерзлоты и определяется как параметрами поверхностных покров (снежного и мохового) и грунта, так и возможными климатическими изменениями.

Цель работы — анализ влияния параметров снежного и мохового покровов на температурный режим, промерзание и таяние ММП и оценка времени начала формирования несливающейся мерзлоты с учетом климатических изменений.

## Влияние мохового и снежного покрова на термический режим грунта

Измерения показали [2], что различие в температуре грунта на глубине 0–80 см при толщине снежного покрова 15 и 150 см может составлять 10–20 °С в зимний период и 3–6 °С в летний период (рис. 1). Измерения в районе пос. Баренцбург в последнее время показали, что при максимальной толщине снежного покрова 1 м температура грунта на глубине 1 м составляет 0...-1 °С, а температура поверхности грунта не опускается ниже –3 °С. При высоте снежного покрова 2 м уже и температура поверхности грунта в зимний период не опускается ниже –1 °С, при высоте снежного покрова на уровне 2 м и более в ряде случаев (отсутствие мохового покрова, повышенная влажность грунта и др.) может сформироваться слой несливающейся мерзлоты [1], что ослабит прочностные свойства и несущую способность грунта.



Рис. 1. Температура грунта на глубине 0–80 см в районе метеостанции Баренцбург при максимальной толщине снежного покрова 150 см (2, 4) и в районе Грёндалена при толщине снежного покрова 15 см (1, 3): 1 и 2 — 4 февраля 2011г.; 3 и 4 — 5 августа 2011 г.

Fig. 1. Ground temperatures at depth of 0–80 cm near Barentsburg weather station with maximum snow cover thickness 150 cm (2, 4) and in Grøndalen area with snow cover thickness 15 cm (1, 3): 1 and 2 — 04.02.2011; 3 and 4 — 05.08.2011

Если сезонный снежный покров является препятствием для выхолаживания грунта в зимний период, то влияние мохового покрова на температурный режим грунта разнонаправленно. В холодный период моховой покров увеличивает слой теплоизоляции и препятствует охлаждению ММП, тогда как в период с положительными температурами воздуха он защищает ММП от быстрого прогревания и протаивания.

Измерения в районе пос. Баренцбург показали, что температура грунта под 8-сантиметровым моховым покровом на 4 °С ниже, чем в его отсутствие (рис. 2) [3]. При моховом покрове толщиной 7–8 см скорость протаивания грунта в конце июля — начале августа составляет около 0,33 см в сутки, что в 3 раза ниже, чем при отсутствии мохового покрова.

ВЕСТНИК Кольского научного центра РАН 3/2018 (10)


Рис. 2. Температура грунта: 1 — под моховым покровом толщиной 8 см; 2 — без мохового покрова Fig. 2. Soil temperature: 1 — under moss cover thickness of 8 cm; 2 — without moss cover

Таким образом, в условиях небольших положительных температур воздуха на арх. Шпицберген (4-5 °С) снижение температуры грунта под моховым покровом на несколько градусов может компенсировать возможный температуры воздуха при потеплении, рост предохраняет многолетнюю мерзлоту что от деградации. В работе [4] показано, что некоторых ландшафтах Западной Аляски В отсутствие мохового слоя указывает на отсутствие вблизи поверхности многолетней мерзлоты.

### Параметры снежного и мохового покровов

Рост толщины снежного покрова в расчетах принят равным 20 % за 100 лет. За основу были

приняты теплофизические параметры снежного покрова Шпицбергена. Динамика снегонакопления задавалась зависимостью

 $h_{\rm s} = (0,0089\tau + 0,013)/1,8h_{\rm smax},$ 

где  $h_s$  — толщина снега, м;  $h_{smax}$  — максимальная высота снежного покрова, м,  $\tau$  — время, сут. Если  $\tau > 200$ , то принималось условие  $h_s = h_{smax}$ .

Плотность снега принята в виде  $\rho_s = 250h_s + 100$ , кг/м<sup>3</sup>, при значении  $\rho_s > 400$  кг/м<sup>3</sup> принималось значение  $\rho_s = 400$  кг/м<sup>3</sup>.

На арх. Шпицберген часть территории суши покрыта моховым покровом, который защищает грунт от нагревания в летний период. Одним из наиболее распространенных видов мха является *Hylocomium splendens var alascanum*. Для исследования его теплофизических свойств проводилось измерение температурного режима мохового покрова и грунта на специально выбранных площадках [3]. Измерение температуры во мхе *Hylocomium splendens var alascanum* позволило установить зависимость для определения коэффициента теплопроводности мха:

в теплый период λ<sub>мвл</sub> = 0,0003w + 0,0645;

• в холодный период  $\lambda_{\text{мвз}} = 0,0014w + 0,0645$ , где *w* — весовая влажность мха.

В холодный период года теплопроводность мха в 3–4 раза больше, чем в летний [3], поэтому моховой покров не является существенным препятствием для выхолаживания подстилающих пород в холодный период года. В период с положительными температурами воздуха наличие мохового покрова снижает температуру грунта и значительно уменьшает глубину его протаивания.

# Климатические изменения на арх. Шпицберген

По данным метеостанции Баренцбург, средняя суточная положительная и отрицательная температура воздуха за 2001–2010 гг. составляет 4,3 и –7,8 °C соответственно, при этом наблюдается тенденция к их росту. Тренды положительной и отрицательной температуры воздуха за период 1982–2013 гг. задаются уравнениями:

 $y = 0,0382x - 72,271, R^2 = 0,3094$  и  $y = 0,1189x - 246,81, R^2 = 0,2725$  соответственно,

где х изменяется от 1982 до 2013 гг. [1].

Комплекс региональных моделей изменения климата на арх. Шпицберген рассмотрен в работе [5]. Прогнозируемый рост средней годовой температуры воздуха за период 2071–2100 гг. относительно 1961–1990 гг., согласно работе [5], составил 3–4 °С на западе арх. Шпицберген, тогда как рост средней суточной положительной температуры воздуха по среднему значению из региональных моделей составляет 0,046 °С/год, а отрицательной — 0,08 °С/год.

Рост средних годовых осадков на большей части архипелага составляет 10–20 %, в западных районах — менее 10 %. Прогнозные оценки температуры воздуха, по разным региональным моделям, в целом соответствуют трендам температуры воздуха на территории аэропорта Свальбарда (Longyearbyen).

Значительно отличается динамика температуры воздуха по глобальной модели изменения климата с учетом естественного 60-летнего колебания температуры воздуха, полученной на основании работы [6]. Тренды положительной и отрицательной температуры воздуха по глобальной модели задаются уравнениями:

• за 2011 по 2030 гг.:

y = -0,1821x + 370,74 ( $R^2 = 0,3915$ ) и y = -0,1032x + 202,02 ( $R^2 = 0,4462$ );

- за 2030 по 2070 гг.:
- $y = 0,0782x 155,87 \ (R^2 = 0,248)$  и  $y = 0,0552x 118,69 \ (R^2 = 0,3499).$

По этой модели до 2030 г. будет происходить снижение положительной температуры воздуха на 0,18 °C/год и отрицательной — на 0,10 °C/год, после 2030 г. рост положительной и отрицательной температуры воздуха составит 0,078 и 0,055 °C/год.

# Оценка условий деградации многолетней мерзлоты

Деградация многолетней мерзлоты вызывается образованием несливающейся мерзлоты, переходящей в талик. Это происходит при росте температуры воздуха и толщины снежного покрова до их критических значений. Для супеси плотностью 1450 кг/м<sup>3</sup> и влажностью 18 % по математической модели работы [7] были рассчитаны критические значения высоты снежного покрова в комбинации с возможной положительной и отрицательной температурами воздуха. Количество незамерзшей воды на границе мерзлой и талой зоны супеси принималось в 7 %. Значения теплоемкости и коэффициента теплопроводности талого и мерзлого грунта от влажности вычислялись по данным СНиП 2.02.04-88 [8]. Толщина слоя мерзлой горной породы принималась равной 100 м. Начальная температура грунта, по данным сайта<sup>\*</sup> Университетского центра на Свальбарде, была принята –3 °C.

На рис. З представлена зависимость критических значений максимальной толщины снежного покрова от средней суточной положительной температуры воздуха. Так, при средней отрицательной температуре воздуха –7,8 °C рост средней положительной температуры воздуха до 6 °C приводит к деградации многолетней мерзлоты при высоте снежного покрова больше 1,5 м. Критические значения комбинации высоты снежного покрова и положительной температуры воздуха воздуха находятся над кривой.

В другой серии расчетов были использованы сценарии изменения климата по региональной [5] и глобальной климатическим моделям [6]. За основу были приняты теплофизические параметры снежного и мохового покровов Западного Шпицбергена. Расчеты времени начала деградации ММП по региональной модели изменения климата показали, что при толщине снежного покрова 0,5, 1 и 1,5 м (без мохового покрова) время начала формирования несливающейся мерзлоты приходится на 2053, 2032, 2023 г. при максимальной толщине талого слоя 1,82, 1,65 и 1,5 м соответственно. Расчеты по глобальной модели изменения климата показали, что при толщине снежного покрова 1, 1,5 и 2 м (без мохового покрова) время начала формирования несливающейся мерзлоты приходится на 2057, 2047, 2041 гг. при максимальной толщине талого слоя 1,55, 1,39 и 1,35 м соответственно (рис. 4).

<sup>\*</sup> URL: unis.no.



 Рис. 3. Критические значения максимальной толщины снежного покрова от средней суточной положительной температуры воздуха
 Fig. 3. Critical values of maximum thickness of snow cover depending on the average daily positive air temperature



Рис. 4. Время начала формирования несливающейся мерзлоты и максимальная толщина талого слоя грунта по глобальной (*a*) и региональной (*б*) моделям изменения климата при разной толщине снежного покрова
Fig. 4. Beginning time of formation of non-merging permafrost and maximum thickness of thawed layer estimated with global (*a*) and regional (*б*) models of climate change and with different depth of snow cover

При наличии мохового покрова *Hylocomium splendens var alascanum* толщиной 5 см начало формирования несливающейся мерзлоты по региональной модели изменения климата для снежного покрова толщиной 1, 1,5 и 2 м произойдет в 2055, 2042 и 2034 гг. соответственно (рис. 5). Время начала формирования несливающейся мерзлоты зависит от климатических изменений, параметров снежного и мохового покровов, влажности грунта. Результаты расчетов показали, что на участках без мохового покрова в ближайшее время возможна комбинация параметров, при которых будет происходить деградация многолетней мерзлоты. Согласно расчетам по глобальной и региональной модели, скорость роста талика через 5–10 лет после его формирования составляет 8–9 см/год при толщине снежного покрова 1,5–2,0 м и 3–4 см/год при толщине снежного покрова происходит большее выхолаживание грунта и замедляется рост талика.



Рис. 5. Время начала формирования несливающейся мерзлоты в зависимости от толщины снежного покрова по региональной модели изменения климата при разной толщине снежного покрова и наличии мохового покрова *Hylocomium splendens var alascanum* толщиной 5 см

Fig. 5. Beginning time of formation of non-merging permafrost depending on snow cover depth estimated with regional models of climate change with moss cover (*Hylocomium splendens var alascanum*) thickness of 5 cm

# Заключение

Данные измерений показали влияние мохового и снежного покровов на температурный режим многолетней мерзлоты на Западном Шпицбергене. Рост высоты снежного покрова приводит к значительному повышению температуры приповерхностного слоя грунта. В условиях небольших положительных температур воздуха на арх. Шпицберген возрастает роль мохового покрова. Снижение температуры грунта под моховым покровом на несколько градусов может компенсировать рост температуры воздуха при изменении климата и предотвратить деградацию многолетней мерзлоты. Численные эксперименты на математической модели позволили оценить критические значения высоты снежного покрова, при которых образуется талик. При средней отрицательной температуре воздуха –7,8 °C рост средней положительной температуры воздуха до 6 °C приводит к деградации многолетней мерзлоты при высоте снежного покрова больше 1,5 м. Результаты расчетов времени формирования талика по региональной модели изменения климата при разной высоте снежного покрова и наличии мохового покрова показали, что при толщине снежного покрова 1,0 и 1,5 м и в отсутствие мохового покрова образование талика произойдет в 2032 и 2023 гг., тогда как при моховом покрове толщиной 5 см — в 2055 и 2042 гг.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Климатические изменения и возможная динамика многолетнемерзлых грунтов на архипелаге Шпицберген / *Н. И. Осокин [и др.]* // Лед и снег. 2012. № 2. С. 115–120. **2.** Влияние снежного покрова на промерзание и протаивание грунта на Западном Шпицбергене / *А. Б. Шмакин [и др.]* // Лед и снег. 2013. № 4. С. 52–59. **3.** *Тишков А. А., Осокин Н. И., Сосноеский А. В.* Влияние синузий мохообразных на деятельный спой арктических почв // Изв. РАН. Сер. географическая. 2013. № 3. С. 39–46. **4.** *William L. Cable 1, Vladimir E. Romanovsky and M. Torre Jorgenson* // Scaling-up permafrost thermal measurements in western Alaska using an ecotype approach // The Cryosphereю 2016. 10. Р. 2517–2532. **5.** Temperature and Precipitation Development at Svalbard 1900–2100 / *E. J. Førland [et al.]* // Hindawi Publishing Corporation Advances in Meteorology, Article ID 893790. 2011. 14 p. Research Article. **6.** *Large W. G., Yeager S. G.* The Global Climatology of an Internally Varying Air-Sea Flux Data Set. Clim. Dyn. // 2009. 33. Р. 341–364. **7.** *Сосновский А. В.* Математическое моделирование промерзания грунта с учетом пространственно-временной изменчивости параметров снежного покрова // Материалы гляциологических исследований. 2000. Т. 89. С. 30–35. **8.** СНиП 2.02.04–88. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах / Минстрой России. М.: ГУП ЦПП. 1997. 52 с.

## Сведения об авторах

Сосновский Александр Вульфович — доктор географических наук, ведущий научный сотрудник Института географии РАН E-mail: sosnovsky@igras.ru Осокин Николай Иванович — кандидат географических наук, заместитель директора Института географии РАН E-mail: osokin@igras.ru

## **Author Affiliation**

Alexander V. Sosnovsky — Dr. Sci. (Geography), Leading Researcher, Institute of Geography of RAS E-mail: sosnovsky@igras.ru Nikolai I. Osokin — PhD (Geography), Deputy Director of the Institute of Geography of RAS E-mail: osokin@igras.ru

ВЕСТНИК Кольского научного центра РАН 3/2018 (10)

## Библиографическое описание статьи

Сосновский, А. В. Влияние мохового и снежного покровов на устойчивость многолетней мерзлоты на Западном Шпицбергене при климатических изменениях / А. В. Сосновский, Н. И. Осокин // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2018. — № 3 (10). — С. 178–184.

## Reference

Sosnovsky Alexander V., Osokin Nikolai I. Impact of Moss and Snow Cover on the Sustainability of Permafrost in West Spitsbergen due to Climate Change. *Herald of the Kola Science Centre of the RAS*, 2018, vol. 3 (10), pp. 178–184 (In Russ.).

# К ОЦЕНКЕ ТЕРМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ СНЕЖНОГО ПОКРОВА НА ЗАПАДНОМ ШПИЦБЕРГЕНЕ\*

## А. В. Сосновский, Н. И. Осокин

ФГБУН Институт географии РАН

### Аннотация

Рассмотрены результаты экспериментальных исследований коэффициента теплопроводности снега на арх. Шпицберген (Свальбард). Теплопроводность снега и его твердость зависят от контактов между кристаллами льда. Для слоев снежного покрова различной твердости получены зависимости теплопроводности снега от плотности. Это позволяет оценить коэффициент теплопроводности и определить термическое сопротивление снежного покрова в полевых условиях путем измерения плотности и твердости различных слоев снега.

### Ключевые слова:

классификация снега, коэффициент теплопроводности, плотность снега, твердость снега, структура снега.

## TO THE ASSESSMENT OF THERMAL RESISTANCE OF SNOW COVER IN WEST SPITZBERGEN

#### Alexander V. Sosnovsky, Nikolai I. Osokin Institute of Geography of RAS

#### Abstract

The results of experimental studies of the coefficient of thermal conductivity of snow on the Svalbard archipelago under conditions of natural occurrence, are considered. The thermal conductivity of snow and its hardness depend on the contacts among the ice crystals. For layers of snow cover of different hardness, the dependences of the thermal conductivity of snow on density, are obtained. The obtained formulas for the coefficient of thermal conductivity of very soft, soft, medium and hard snow (according to the international classification for seasonally falling snow) are compared with the data of other studies. They showed that with a snow density of 200–400 kg/m<sup>3</sup>, the obtained dependences cover the main range of variation in the thermal conductivity of snow. This makes it possible to estimate the thermal conductivity coefficient and determine the thermal resistance of the snow cover in the field conditions by measuring the density and hardness of various layers of snow.

### **Keywords:**

classification of snow, coefficient of heat conductivity, hardness of snow, snow density, structure of snow.



### Введение

Снежный покров является важным фактором взаимодействия в системе атмосфера — подстилающие породы. Он оказывает влияние на промерзание грунта и термическое состояние верхних горизонтов многолетнемерзлых пород [1, 2]. Тепловой поток через снежный покров при квазистационарном режиме прямо пропорционален температурному градиенту и обратно

<sup>\*</sup> Математическое моделирование проводилось в рамках фундаментальных научных исследований по проекту «Оценки современного состояния и текущих изменений внутреннего гидротермического режима ледников, с выделением данных по эталонным ледникам», рег. № 01201352474 (0148-2014-0006), а экспериментальные исследования в полевых условиях и обработка экспериментальных данных — по Программе Президиума РАН № 55 «Арктика — научные основы новых технологий освоения, сохранения и развития», экспедиционные исследования на арх. Шпицберген выполнялись при финансовой поддержке госзадания и логистической помощи РНЦШ.

пропорционален термическому сопротивлению снежного покрова [3]. Поэтому влияние температуры воздуха и термического сопротивления снежного покрова на термическое состояние верхних горизонтов многолетнемерзлых пород соизмеримо [4].

Теплозащитные свойства снежного покрова определяются его термическим сопротивлением, равным отношению толщины снежного покрова к коэффициенту эффективной теплопроводности снега [5]. Определению коэффициента теплопроводности снега посвящено много работ, наиболее полный их обзор представлен в статье [6]. Известные зависимости коэффициента теплопроводности снега дают большой разброс значений при одинаковой плотности снега [7]. Одной из причин этого являются структурные особенности снежного покрова. Так, коэффициент теплопроводности глубинной изморози в несколько раз меньше, чем коэффициент зернистого снега при равной плотности. Поэтому слоистость снежного покрова, обусловленная как метеорологическими условиями, так и процессами метаморфизма, влияет на его термическое сопротивление и температурный режим подстилающих оснований. Для определения коэффициента теплопроводности снега требуется проведение трудоемких экспериментальных исследований.

Теплопроводность снега состоит в основном от двух составляющих — конвективной и кондуктивной теплопроводности. Кондуктивная теплопроводность снега зависит от контактов между кристаллами льда: чем больше площадь контактов, тем лучше происходит передача тепла от одного слоя к другому. Но от связей между кристаллами льда зависят и прочностные характеристики снега, в частности, его твердость. Поэтому теплопроводность и твердость снега зависят от плотности и структуры снега. При этом измерения твердости снега менее трудоемки, чем измерения его теплопроводности.

Цель исследования — определить влияние твердости снега на коэффициент теплопроводности снега, разработать методику оценки коэффициента теплопроводности снега по его плотности и твердости и оценить влияние структуры снега на термическое сопротивление снежного покрова.

## Экспериментальные исследования коэффициента теплопроводности снега

Экспериментальные исследования проводились весной 2013–2015 гг. Первые результаты полевых исследований коэффициента теплопроводности снега разной структуры и плотности, выполненные весной 2013 г. в районе метеостанции Баренцбург, приведены в работе [8]. В период полевых работ толщина снежного покрова составляла 0,8–1,2 м. Снежный покров был представлен слоями разной структуры и плотности. Температура воздуха во время исследований колебалась от –14 до –4 °C. Температура снега измерялась при помощи температурных логгеров — термохрон iButtons DS1922L/DS1922T, точность измерения температуры составляла 0,0625 °C. Центры трех термохрон находились на расстоянии 5 см друг от друга. Интервал записи температур составлял 20 мин. Измерения проводили как с горизонтальной дневной поверхности снежного покрова, так и в вертикальной стенке шурфа. Температура снежного слоя измерялась в стенке шурфа на глубине 5, 10 и 15 см. При измерении температурного режима в глубине вертикальной стенки шурфа датчики помещали в слой снега выбранной структуры. Изменение температуры снега выбранной структуры. Наибольший перепад температур между крайними термохронами составлял 6 °C при средних значениях 2–4 °C, что соответствовало градиенту температуры 20–40 °C/м.

Вертикальный поток тепла на глубине 10 см от стенки шурфа был более чем на порядок меньше горизонтального. Коэффициент температуропроводности рассчитывался на основании решения обратной задачи для уравнения теплопроводности Фурье:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial z^2},\tag{1}$$

где *t* — температура снега, К;  $\tau$  — время;  $a = \lambda c^{-1} \rho^{-1}$  — коэффициент температуропроводности ( $\lambda$  — коэффициент теплопроводности снега; *c* — удельная теплоемкость;  $\rho$  — плотность снега); *z* — координата по глубине снежной толщи.

Для оценки коэффициента температуропроводности *а* для каждого типа снега необходимо измерить динамику температуры снега в трех горизонтах снежной толщи. При этом характер теплового процесса в период наблюдений в этих трех точках должен отвечать условиям охлаждения или нагревания. В результате измерений и расчетов нами были получены более 500 значений коэффициента температуро- и теплопроводности снега в режимах охлаждения и нагревания поверхности снежного покрова.

Рассмотрим результаты определения коэффициента теплопроводности мелкозернистого рыхлого снега плотностью 0,292 г/см<sup>3</sup>. На рисунке (часть *a*) приведена температура снега в стенке шурфа в течение 60 ч. Результаты расчетов коэффициента теплопроводности мелкозернистого рыхлого снега на глубине 30 см от дневной поверхности приведены на рисунке (части *б-д*). На участках монотонного хода температур — этапах охлаждения (интервал времени от начала измерений 11–14 ч на рисунке (часть *a*) и нагрева (интервал 2–6, 22–27 и 45–53 ч) — было использовано уравнение (1) для определения коэффициента теплопроводности снега  $\lambda = c \rho a$  (см. рис., части *б-д*). Средняя теплопроводность на этапе охлаждения составила 0,16 Вт/(м·К) (рис., часть *в*) и на этапе нагрева (рис., части *б, г* и *д*) равна 0,14, 0,17 и 0,16 Вт/(м·К). Аналогичные исследования по измерению температурного режима и определению коэффициента теплопроводности.



Температура снежного покрова и коэффициент теплопроводности мелкозернистого рыхлого снега: *а* — температура боковой поверхности шурфа на глубине: *1* — 5; 2 — 10; *3* — 15 см; *б*-*д* — коэффициент теплопроводности снега плотностью 292 кг/м<sup>3</sup>; *б* — на этапе нагрева (интервал 2–6 ч на рис., часть *a*); *в* — на этапе охлаждения (11–14 ч); *г* и *д* — на этапе нагрева (22–27 и 45–53 ч соответственно)

Snow temperature and coefficient of heat conductivity of fine-grained loose snow: *a* — temperature at depth in the pit wall: I = 5 cm; 2 = 10 cm; 3 = 15 cm;  $\delta = \partial = \text{coefficient of heat conductivity}$ of fine-grained loose snow with density of 292 kg/m<sup>3</sup>;  $\delta = \text{in heating step}$  (time interval is 2–6 hours in Figure, part *a*); *e* — in cooling step (same as 11–14 hours); *e* and  $\partial = \text{in heating step}$  (same as 22–27 and 45–53 hours accordingly)

Для проверки достоверности рассмотренного подхода к определению теплопроводности снега были выполнены численные эксперименты. Распределение температуры в снежном покрове в рамках одномерной математической модели определялось по уравнению Фурье с учетом диффузии и сублимации-конденсации пара водяного пара [9]. Отличие средних значений коэффициента теплопроводности снега, определенных по математической модели и по уравнению (1), с использованием рассчитанной температуры снега не превышало 2 %.

## Зависимость коэффициента теплопроводности от твердости снега

Коэффициент теплопроводности, как и прочность снега, зависит от состояния контактов между кристаллами льда, поэтому при измерении термического режима разных слоев снега одновременно велись измерения его твердости с использованием цифрового динамометра «Мегеон 03005». В мждународной классификации для сезонно выпадающего снега за 2012 г. диапазон изменения твердости снега определяется по проникновению в снег зонда Хефели или с использованием ручного индекса прочности. По диапазону изменения твердости снега, которая измеряется зондом Хефели или ручным индексом прочности, снег по международной классификации для сезонно в слег зонда Хефели или с использованием ручного индекса прочности. По диапазону изменения твердости снега, которая измеряется зондом Хефели или ручным индексом прочности, снег по международной классификации делится на очень рыхлый (твердость 0–50 H), рыхлый (50–175 H), средний (175–390 H) и твердый (390–715 H). Для очень рыхлого, рыхлого, среднего и твердого снега средние значения твердости по указанной классификации составляют 20, 100, 250 и 500 H соответственно. Для установления соответствия между значениями твердости снега, измеренными динамометром «Мегеон» и зондом Хефели были проведены измерения твердости снега зтими пенетрометрами. Результаты измерений и пересчета значений твердости снега, измеренной динамометром «Мегеон», в значения для зонда Хефели позволили определить характеристики твердости снега разного типа.

К очень рыхлому по прочности снегу относились свежий снег, в том числе и свежий слежавшийся (через 1,5 суток), и глубинная изморозь. Рыхлый снег соответствовал рыхлому несмерзшемуся мелкозернистому снегу, свежему метелевому снегу и крупнозернистому (в том числе с очень крупными зернами — от 2 до 5 мм) снегу с огранными кристаллами, средний по прочности снег — мелкозернистому частично смерзшемуся снегу, твердый — средне- и крупнозернистому смерзшемуся. Такое деление соответствовало также измеренному ручному индексу прочности снега.

После пересчета результатов измерений твердости снега на зонд Хефели значения коэффициента теплопроводности были распределены по группам в соответствии с твердостью снега. В результате были получены регрессионные зависимости коэффициента теплопроводности снега исходя из плотности снега — от очень рыхлого до твердого.

Регрессионные зависимости коэффициента теплопроводности снега  $\lambda$  плотностью  $\rho$  от 0,2 до 0,45 г/см<sup>3</sup> описываются следующими формулами [10]:

- для очень рыхлого снега λ = 0,7398ρ 0,0907;
- для рыхлого λ = 0,4021ρ + 0,0674;
- для среднего  $\lambda = 0,3824\rho + 0,1362, R^2 = 0,378;$
- для твердого  $\lambda = 0.4219\rho + 0.1922$ .

Установлено, что при плотности снега 0,20–0,45 г/см<sup>3</sup> полученные зависимости охватывают основной диапазон изменения теплопроводности снега. Это позволяет оценить коэффициент теплопроводности и определить термическое сопротивление снежного покрова в полевых условиях путем измерения плотности и твердости различных слоев снега. Для применения полученных зависимостей в натурных условиях измеряются плотность слоев снега и их твердость или используется ручной метод измерения твердости и по эмпирическим формулам оценивается коэффициент теплопроводности  $\lambda$ .

Результаты проведенных исследований показали, что для снега плотностью 200 кг/м<sup>3</sup> значения коэффициента теплопроводности снега твердостью от очень рыхлого до среднего изменяются от 0,06 до 0,21 Вт/(м·К) соответственно. Для снега плотностью 300 (400) кг/м<sup>3</sup> коэффициент теплопроводности снега твердостью от очень рыхлого до твердого изменяется в пределах 0,13–0,32 (0,21–0,36) Вт/(м·К). Таким образом, коэффициент теплопроводности для снега плотностью 200 кг/м<sup>3</sup> и разной твердостью различается в 3–4 раза, для снега плотностью 300 кг/м<sup>3</sup> — в 2,5 раза и для снега плотностью 400 кг/м<sup>3</sup> — в 1,7 раза.

## Термическое сопротивление снежного покрова

На примере стратиграфии конкретного шурфа в снежном покрове Зап. Шпицбергена, представленного в таблице, были рассмотрены значения термического сопротивления без учета структуры снега и с ее учетом — с использованием полученных зависимостей теплопроводности снега от твердости разных слоев снежной толщи. Так, для снежного покрова высотой 1,45 м термическое сопротивление без учета структуры снега составило 4,24 м<sup>2</sup>·K/Вт, с учетом структуры снега —  $5,29 \text{ м}^2$ ·K/Вт. Такая разница в значениях термического сопротивления снежного покрова аналогична росту эффективной толщины снега на 25 % — от 1,45 до 1,81 см, при этом еще более значительная ошибка в определении термического сопротивления снежного покрова. В последнем случае термическое сопротивление составило 4,08 м<sup>2</sup>·K/Вт. Таким образом, неучет структуры и стратиграфии снежного покрова может привести к занижению термического сопротивления снежного сопротивления снежного сопротивления снежного покрова, что увеличит расчетное выхолаживание грунта в холодный период. В реальности промерзание будет меньше, и можно упустить из виду момент опасного снижения прочности грунта и деградации многолетней мерзлоты.

Таблица Table

Толщина слоя, см Layer thickness, ст	Плотность снега, кг/м <sup>3</sup> Snow density, kg per m <sup>3</sup>	Тип слоев снега Snow layer type	Твердость снега Snow hardness	Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Bт/(м·K) Thermal conductivity $\lambda$ , W/m·K	Термическое сопротивление, м <sup>2</sup> ·K/Вт Thermal resistance, m <sup>2</sup> ·K/W
1	220	Метелевый Snowstorm	Средний Moderate	0,29	0,035
1,5	450	Инсоляционная корка Sun crust	Очень твердый Extremely solid	0,5	0,03
20,5	284	Рыхлый мз. Loose мз.	Рыхлый Loose	0,18	1,139
15	345	Смерзшийся мз. Frozen together мз.	Средний Moderate	0,27	0,556
3	450	Mерзлые корки Frozen crusts	Очень твердый Extremely solid	0,5	0,06
4	280	Огранные кристаллы Faceted crystals	Очень рыхлый Extremely loose	0,12	0,333
3	450	Мерзлые корки Frozen crusts	Очень твердый Extremely solid	0,5	0,06
15	450	Мерзлые корки Frozen crusts	Очень твердый Extremely solid	0,5	0,3

# Parameters of snow cover and its thermal resistance

Параметры снежного покрова и его термическое сопротивление

ВЕСТНИК Кольского научного центра РАН 3/2018 (10)

					(
10	366	Смерзшийся сз. Frozen together сз.	Средний Moderate	0,28	0,362
10	366	Смерзшийся мз. Frozen together мз.	Средний Moderate	0,28	0,362
6	366	Смерзшийся мз. Frozen together мз.	Средний Moderate	0,28	0,217
36	425	Смерзшийся сз. Frozen together сз.	Твердый Solid	0,38	0,957
4	425	Смерзшийся сз. Frozen together сз.	Твердый Solid	0,38	0,106
10	434	сзкз. Medium-grained — coarsegrained	Твердый Solid	0,38	0,266
6	300	Глубинная изморозь Deep frost	Очень рыхлый Extremely loose	0,12	0,5

# Окончание таблицы Table 3 (Continued)

*Примечание.* Использованы сокращения: мз. — мелкозернистый; сз. — среднезернистый; кз. — крупнозернистый.

Note. Acronyms: мз. — finegrained; сз. — medium-grained; кз. — coarsegrained.

# Заключение

В результате многочисленных экспериментальных исследований, выполненных на Западном Шпицбергене, получены зависимости коэффициента теплопроводности снега от его твердости при температуре снега от -4 до -14 °C. На основе математической модели проверена достоверность методики определения коэффициента теплопроводности снега. Проведено разделение различных типов снега по их твердости. Для очень рыхлого, рыхлого, среднего и твердого снега, согласно Международной классификации, для сезонно выпадающего снега получены эмпирические зависимости теплопроводности снега от его плотности. Сравнение полученных формул с данными других исследований показало, что выявленные зависимости в диапазоне изменения плотности снега от 0,20 до 0,45 г/см<sup>3</sup> охватывают основной диапазон изменения коэффициента теплопроводности снега. Применение полученных эмпирических зависимостей теплопроводности снега разной твердости будет способствовать повышению точности определения коэффициента теплопроводности в условиях естественного залегания снежного покрова, что позволит точнее оценивать термический режим подстилающих оснований.

## ЛИТЕРАТУРА

**1.** Влияние снежного покрова на промерзание и протаивание грунта на Западном Шпицбергене / *А. Б. Шмакин* [*u dp.*] // Лед и снег. 2013. № 4. С. 52–59. **2.** Климатические изменения и динамика многолетнемерзлых грунтов на архипелаге Шпицберген / *Н. И. Осокин* [*u dp.*] // Лед и снег. 2012. № 2. С. 115–120. **3.** Термическое сопротивление снежного покрова и его влияние на промерзание грунта / *Н. И. Осокин* [*u dp.*] // Лед и снег. 2013. № 1. С. 93–103. **4.** *Осокин Н. И., Сосновский А. В.* Влияние термического сопротивления снежного покрова на устойчивость многолетнемерзлых пород // Криосфера Земли. 2016. №. 3. С. 105–112. **5.** *Осокин Н. И., Сосновский А. В.*, *Чернов Р. А.* Влияние стремическое сопротивление // Лед и снег. 2013. № 3. С. 63-70. **6.** The thermal conductivity of seasonal snow / *M. Sturm* [*et al.*] // J. Glaciology. 1997. Vol. 43, No. 143. Р. 26–41. **7.** *Осокин Н. И., Сосновский А. В.*, *Чернов Р. А.* Коэффициент теплопроводности снега и его изменчивость // Криосфера Земли. 2017. **Т.** XXI, № 3. С. 60–68. **8.** *Осокин Н. И., Сосновский А. В.* Экспериментальные исследования коэффициента эффективной теплопроводности снежного покрова на Западном Шпицбергене // Лед и снег. 2014. Т. 54, № 3. С. 50–58. **9.** *Котляков В. М., Осокин Н. И., Сосновский А. В.* Математическое моделирование тепломассообмена в снежном покрове при таянии //

Криосфера Земли. 2004. Т. VIII, № 1. С. 78–83. **10.** Способ определения коэффициента теплопроводности снега в условиях естественного залегания снежного покрова: пат. 2627971 РФ, МПК G01N 25/18 (2006.01) / *Сосновский А. В., Осокин Н. И.* № 2016118849; заявл. 17.05.16; опубл. 14.0817, Бюл. № 23, Приоритет 17.05.16.

## Сведения об авторах

Сосновский Александр Вульфович — доктор географических наук, ведущий научный сотрудник Института географии РАН E-mail: sosnovsky@igras.ru Осокин Николай Иванович — кандидат географических наук, заместитель директора Института географии РАН E-mail: osokin@igras.ru

## **Author Affiliation**

Alexander V. Sosnovsky — Dr. Sci. (Geography), Leading Researcher, Institute of Geography of RAS E-mail: sosnovsky@igras.ru Nikolai I. Osokin — PhD (Geography), Deputy Director of the Institute of Geography of RAS E-mail: osokin@igras.ru

## Библиографическое описание статьи

Сосновский А. В. К оценке термического сопротивления снежного покрова на Западном Шпицбергене / А. В. Сосновский, Н. И. Осокин // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2018. — № 4 (10). — С. 185–191.

## Reference

Sosnovsky Alexander V., Osokin Nikolai I. To the Assessment of Thermal Resistance of Snow Cover in West Spitzbergen. Herald of the Kola Science Centre of the RAS, 2018, vol. 4 (10), pp. 185–191 (In Russ.).

# DOI: 10.25702/KSC.2307-5228.2018.10.3.192-197 УДК 631.4

# МОРФОЛОГО-ГЕНЕТИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТОРФЯНО-ГЛЕЕЗЕМА В ПОЙМЕ РЕКИ ГРЁНДАЛЕН ОСТРОВА ЗАПАДНЫЙ ШПИЦБЕРГЕН

## Т. И. Литвинова, Г. М. Кашулина, Н. М. Коробейникова

ФБГУН Полярно-альпийский ботанический сад-институт им. Н. А. Аврорина КНЦ РАН

### Аннотация

Представлена полная морфолого-генетическая характеристика торфяно-глеезема кочковатого болота в пойме реки Грёндален. Приведены сведения о гранулометрическом составе минеральной части профиля, валового химического состава, физико-химических свойств и данные по количественному и качественному составу органического вещества всех почвенных горизонтов. Из-за близости моря в составе почвенно-поглощающего комплекса увеличивается доля Na<sup>+</sup> по сравнению с более удаленными от берега моря разрезами. Распределение органического вещества, а также химического элементного состава по профилю обусловлено долей минеральной примеси.

### Ключевые слова:

торфяно-глеезем, морфология, валовой состав, физико-химические свойства, содержание и состав органического вещества, Шпицберген.

## HISTIC GLEYSOL OF THE HILLY BOG AT THE COASTAL AREA OF THE GRENFJORD, SVALBARD: MORPHOLOGY AND CHEMISTRY

### Tatyana I. Litvinova, Galina M. Kashulina, Natalia M. Korobeynikova

Avrorin Polar-Alpine Botanical Garden and Institute of KSC RAS

### Abstract

This article presents morphological and chemical characteristics of the Histic Gleysol of a hummocky bog near the mouth in the Grendalen River. The data of the granulometric composition of the mineral part of the profile, total chemical composition, physico-chemical properties, and data on the quantitative and qualitative composition of the organic matter of all soil horizons, are presented. Because of the sea proximity in the composition of the soil-absorbing complex the proportion of Na<sup>+</sup> increases compared to the sites more remote from the sea coast. Distributions of the organic matter as well as the chemical composition follow to the proportion of the mineral particles.

### **Keywords:**

Histic Gleysol, morphology, chemical composition, physico-chemical properties, organic matter content and composition, Svalbard.



## Введение

Архипелаг Шпицберген — один из участков арктической суши в Северном Ледовитом океане, наиболее близко расположенный к Северному полюсу. За счет влияния теплого атлантического течения западное побережье острова Западный Шпицберген характеризуется относительно мягким и влажным для таких

широт климатом, а также более сомкнутым растительным покровом. На участках под сплошным растительным покровом формируются серогумусовые грубогумусные почвы, которые к настоящему времени уже достаточно хорошо изучены [1, 2]. В силу сложного рельефа заболоченные почвы занимают относительно небольшие площади. В данной статье будет представлена полная морфолого-генетическая характеристика торфяно-глеезема кочковатого болота около устья Грёндален.

## Материалы и методика исследований

Разрез был заложен в июле 2013 г. Координаты места заложения разреза: 78°01'32" с. ш., 14°19'41" в. д., абсолютная отметка — 5 м над ур. м. В полевых условиях было проведено морфологическое описание разреза и отобраны образцы основных генетических горизонтов. Подготовка проб и химический анализ образцов проводились в лаборатории почвоведения Полярно-альпийского ботанического сада-института КНЦ РАН (ПАБСИ КНЦ РАН) традиционными методами [3, 4]. Химический анализ фракции менее 1 мм воздушно-сухих образцов почвы включал определение общего содержания С<sub>орг</sub> и N<sub>орг</sub>, группового и фракционного состава органического вещества, валового химического состава и физико-химических свойств (рН водной вытяжки, гидролитическую кислотность, обменные Ca<sup>++</sup>, Mg<sup>++</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>). В минеральном горизонте был также определен гранулометрический состав.

# Результаты и их обсуждение

Обследованный торфяно-глеезем сформировался на морской глине в условиях избыточного увлажнения, представлен в виде торфяной кочки высотой 26 см (рис. 1). Растительный покров — ивково-травяно-моховое сообщество. Проективное покрытие ивки (*Salix* sp.) составляет 10 %, травянистых растений — 30 %, гигрофитных мхов — 90 %.



Рис. 1. Разрез торфяно-глеевой почвы кочковатого болота в пойме реки Грёндален Fig. 1. Studied Histic Gleysol at hummocky bog near the mouth of the Grendalen River

Почва характеризуется следующим набором горизонтов:

T<sub>1</sub>, 0–6 см. Зеленовато-коричневый торфяный горизонт сложен из слабо разложившихся остатков мхов трав и листьев ивки, сохранивших свои морфологические особенности, рыхлый, сырой, минеральная примесь, много корней, переход постепенный.

T<sub>2</sub>, 6–12 см. Серовато-коричневый, более высокая степень разложения: фрагментированные растительные остатки, рыхлый, сырой, минеральная примесь, много корней.

T<sub>3</sub>, 12–20 см. Темно-коричневый, среднеразложившийся торфяный горизонт, рыхлый, сырой, много корней, переход постепенный.

T<sub>4</sub>, 20–25 см. Темно-коричневый, среднеразложившийся торфяный горизонт, рыхлый, сырой, многочисленные корни, минеральная примесь с ржавыми пятнами, переход заметный.

T<sub>5</sub>, 24–26 см. По центру кочки, темно-коричневый, хорошо разложившийся торфяный горизонт с высоким содержание минеральных частиц, уплотнен, густо переплетен корнями растений, сырой, переход заметный.

CG, 26–32 см. Сизовато-серый с охристыми пятнами, тяжелый суглинок, компактный, бесструктурный, сырой, редкие корни.

*Гранулометрический состав СG-горизонта* по содержанию физической глины (частиц <0,01 мм) — 45 % классифицируется как тяжелый суглинок. Преобладающими фракциями мелкозема (<1 мм) являются мелкий песок (0,25–0,05 см) — 25,1 % и крупная пыль (0,05–0,01) — 24,8 %.

**Валовой химический состав почвы.** Горизонт CG, как и в почвах, сформированных на континентальных отложениях [1, 5, 6], характеризуется высоким содержанием SiO<sub>2</sub> и экстремально низким содержанием щелочноземельных элементов — CaO и MgO. Отличительной особенностью морского суглинка является сравнительно высокое содержание MnO благодаря преобладанию восстановительных условий.

Химический состав торфяной толщи значительно варьирует с глубиной. Самым низким содержанием SiO<sub>2</sub> (около 60 % на прокаленную навеску) и высоким содержанием важных для растений CaO, MgO K<sub>2</sub>O, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, MnO и SO<sub>3</sub> характеризуется самый верхний слой торфа —  $T_1$  (табл. 1). Следующий слой торфа —  $T_2$  резко отличается от остальных торфяных горизонтов самым высоким содержанием SiO<sub>2</sub> и низким — важных для растений элементов. Это обусловлено высоким содержанием минеральной примеси эолового происхождения. Как было показано ранее [6], минеральная пыль с оголенных поверхностей гор и грунтов оказывает существенное влияние на химический состав растений и верхних органогенных горизонтов почв в регионе. Остальные слои торфа почв также в различной степени обогащены минеральными частицами.

Таблица 1

Table 1

Горизонт Horizon	Глубина, см Depth, cm	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	K <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>
T <sub>1</sub>	0–6	60,23	12,79	5,58	0,98	7,9	3,2	1,27	0,35	3,05	3,76
T <sub>2</sub>	6–12	72,49	14,09	5,11	0,69	1,84	1,31	0,31	0,12	2,11	0,97
T <sub>3</sub>	12-20	62,33	15,73	7,46	0,65	5,12	2,01	0,77	0,39	2,28	0,69
T <sub>4</sub>	20-25	61,37	15,93	10,59	1,03	2,67	2	0,6	0,15	2,38	1,2
T <sub>5</sub>	24-26	67,68	14,75	8,08	0,69	1,84	1,79	0,62	0,09	2,23	0,9
CG	26–32	70,46	14,16	6,14	1,40	0,61	0,87	0,20	0,87	2,52	2,35

Валовой химический состав основных горизонтов торфяно-глеезема, % от прокаленной навески Total chemical composition of the major soil horizons, % of ash

**Физико-химические показатели почвы.** Обследованный торфяно-глеезем характеризуется слабокислой реакцией среды: актуальная кислотность ( $_{\rm PH_{H_2O}}$ ) в торфяной части профиля варьирует от 5,8 (гор. T<sub>3</sub>) до 5,5 (гор. T<sub>4</sub>), а в минеральном горизонте CG — 5,3 pH-единицы (табл. 2). Содержание обменного H<sup>+</sup> в значительной степени определяется содержанием органического вещества. Наибольшими показателями отличаются торфяные горизонты: в них содержание обменного H<sup>+</sup> варьирует от 19,6 до 26,1 мг-экв/100 г, а в минеральном горизонте CG содержание обменного H<sup>+</sup> составляет всего 2,61 мг-экв/100 г. В составе обменных оснований — как в торфяной части профиля, так и в минеральном горизонте CG — доминирует кальций. В верхних торфяных горизонтах содержание обменного Ca варьирует от 19,6 до 40,4 мг-экв/100 г. Содержание обменного Mg в торфяных горизонтах почвы варьирует от 10,4 до 22,9 мг-экв/100 г, а в минеральном горизонте CG его содержание составляет 2,9 мг-экв/100 г.

Особенностью состава почвенно-поглощающего комплекса (ППК) торфяной части торфяно-глеезема является довольно значительная доля обменного Na<sup>+</sup>, что обусловлено влиянием морских аэрозолей в силу близкого расположения к берегу моря.

Таблица 2 Table 2

Горизонт	Глубина, см	(pH)	$\mathrm{H}^{+}$	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	$\mathbf{K}^+$	Na <sup>+</sup>				
Horizon	Depth, cm	$(\text{PII}_{\text{H}_2\text{O}})$	мг-экв/100 г / mg-eq/100 g								
$T_1$	0–6	—	—	-	—	-	—				
$T_2$	6–12	5,7	19,6	19,6	10,4	0,85	4,02				
T <sub>3</sub>	12-20	5,8	26,1	40,4	22,9	1,12	6,35				
$T_4$	20–25	5,5	26,1	32,04	16,6	0,85	6,03				
T <sub>5</sub>	25-26	—	—	26,6	14,9	—	—				
CG	26–32	5,3	2,6	4,6	2,9	0,21	0,37				

# Физико-химические показатели торфяно-глеевой почвы Physico-chemical properties of Histic Gleysol

Примечание. Прочерк означает, что параметр не был определен.

Note: A dash means that the parameter was not defined.

**Органическое вещество почвы.** Количество и состав содержащихся в почве органических веществ тесно связаны с направлением процесса почвообразования. Распределение органического вещества в торфяной части профиля обычно обусловлено степенью разложения растительных остатков, возрастающего с глубиной, однако в данном случае распределение органического вещества обусловлено долей минеральной примеси. Наиболее высокие концентрации органического вещества определены в верхней части — горизонте  $T_1$  ( $C_{opr} = 36,6$  %), который состоит из слабо разложившихся растительных остатков (рис. 2, *a*). Содержание  $C_{opr}$  в слое 6–12 см торфа резко снижается. Именно здесь морфологически фиксируется наиболее высокое содержание минеральных частиц. В средней торфяной части (горизонты  $T_3$ ,  $T_4$ ) содержание  $C_{opr}$  выше (26,1 и 26,3 % соответственно) из-за меньшей доли минеральной примеси. В нижнем торфяном горизонте  $T_5$  содержание минеральной примеси снова увеличивается и  $C_{opr}$  снижается до 20,3 %. В минеральном горизонте CG на глубине 26–32 см концентрация органического вещества 1,34 %.



Рис. 2. Распределение общего содержания органического углерода С<sub>орг</sub> (*a*) и азота N<sub>орг</sub> (*б*) по профилю торфяно-глеезема, % а.с.н.

Fig. 2. Total organic carbon  $C_{org}(a)$  and nitrogen  $N_{org}(\delta)$  distribution in the soil profile, % of absolutely dry soil

Преобладающая часть почвенного азота находится в составе органического вещества, поэтому наблюдается тесная корреляция между показателями содержания в почве углерода и азота [2]. В торфяной части профиля концентрация органического азота варьирует незначительно — от 0,47 до 0,58 % (рис. 2,  $\delta$ ). Поскольку большая часть азота сосредоточена в органическом веществе, то и распределение органического азота ( $N_{opr}$ ) носит тот же характер, что и распределение органического азота высокие содержания  $N_{opr}$  отмечены в верхнем горизонте  $T_1$  и в средней части органогенной части профиля, т. е. в горизонте  $T_3$ , — 0,57 и 0,58 %, соответственно. Минеральный горизонт СG обеднен органическим азотом, содержание  $N_{opr}$  здесь составляет всего 0,16 %.

*Соотношение* C:N характеризует обогащенность органического вещества азотом и является важным диагностическим показателем. Эта величина в торфяных горизонтах торфяно-глеезема варьирует от 28 до 64, то есть органическое вещество характеризуется экстремально низким содержанием азота. В минеральной части профиля обогащенность органического вещества азотом значительно выше — C:N = 8.

Состав органического вещества. Характерной чертой обследованного торфяно-глеезема является высокая доля негидролизуемого остатка (НО). Распределение НО в торфяной части почвы хорошо отражает степень гумификации органического вещества, повышающееся с глубиной, при этом доля НО снижается от 79,5 % в верхней части ( $T_1$ ) до около 60 % в средней части ( $T_1$ – $T_4$ ) и до 15 % в нижней части ( $T_5$ ) (табл. 3). В минеральной части профиля доля НО в составе органического вещества возрастает и составляет 54,5 %, такое значение показателя здесь может быть обусловлено прочностью связи с глинистыми частицами, содержание которых в почвообразующем материале высокое.

Таблица 3

Table 3

Горизонт Horizon	ГК1	ГК2	ГКЗ	ΣΓΚ	ФК1а	ФК1	ФК2	ФК3	ΣФК	НО	$C_{\Gamma K}:C_{\Phi K}$
$T_1$	1,8	0,0	1,2	3,0	1,8	2,8	3,0	2,0	9,6	79,5	0,3
T <sub>2</sub>	3,5	0,0	2,8	6,3	5,3	2,4	11,3	7,0	26,1	59,6	0,2
T <sub>3</sub>	5,9	0,0	3,4	9,4	2,0	3,7	8,4	8,1	22,1	62,9	0,4
$T_4$	8,4	0,0	1,9	10,3	3,0	6,0	5,1	9,3	23,3	60,8	0,4
T <sub>5</sub>	13,2	0,0	2,9	16,0	3,8	9,8	25,0	19,3	57,9	15,0	0,3
CG	9,0	3,7	4,5	17,2	6,0	0,0	11,2	0,7	17,9	54,5	1,0

Групповой и фракционный состав гумуса торфяно-глеезема, углерод фракции, % от общего  $C_{opr}$ Groups and fractions of the organic matter, % of total  $C_{org}$ 

В обследованном торфяно-глееземе в составе гумуса фульвокислоты значительно преобладают над гуминовыми кислотами: соотношение  $C_{\Gamma K}:C_{\Phi K}$  варьирует от 0,2 до 0,4. В минеральном горизонте CG соотношение  $C_{\Gamma K}:C_{\Phi K}$  равно 0,97 и гумус характеризуется как гуматно-фульватный. Как и серогумусовые грубогумусные почвы в регионе [1, 2], обследованный торфяно-глеезем характеризуется низким содержанием в профиле наиболее агрессивной и подвижной фракции фульвокислот  $\Phi K1a$ . Среди гуминовых кислот во всем профиле преобладает свободная и связанная с подвижными соединениями железа и алюминия фракция ГК1. Среди фульвокислот в торфяной части профиля преобладают фракции, связанные с кальцием  $\Phi K2$  и с устойчивыми соединениями железа и алюминия. В минеральном горизонте CG фульвокислоты представлены в основном фракцией  $\Phi K2$ .

### ЛИТЕРАТУРА

1. Переверзев В. Н. Почвы побережий фьордов острова Западный Шпицберген. Апатиты, 2012. 122 с. 2. Литвинова Т. И., Кашулина Г. М. Органическое вещество почв побережий фьордов острова Западный Шпицберген. Апатиты: КНЦ РАН, 2015. 122 с. 3. Аринушкина Е. В. Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во МГУ, 1970. 487 с. 4. Агрохимические методы исследования почв. М.: Наука, 1975. 656 с. 5. Кашулина Г. М. Геохимические особенности почв окрестностей пос. Баренцбург, Шпицберген // Комплексные исследования природы Шпицбергена: сб. материалов VI Междунар. конф. Апатиты: КНЦ РАН, 2006. Вып. 6. С. 321–330. 6. Комплексные биогеохимические исследования окружающей среды на острове Западный Шпицберген / Г. М. Кашулина [и др.] // Вестник КНЦ РАН. 2017. Вып. 4. С. 75–80.

# Сведения об авторах

*Литвинова Татьяна Ивановна* — младший научный сотрудник Полярно-альпийского ботанического сада-института им. Н. А. Аврорина КНЦ РАН

# E-mail: lita\_0409@mail.ru

*Кашулина Галина Михайловна* — доктор биологических наук, главный научный сотрудник Полярно-альпийского ботанического сада-института им. Н. А. Аврорина КНЦ РАН

E-mail: galina.kashulina@gmail.com

*Коробейникова Наталья Михайловна* — младший научный сотрудник Полярно-альпийского ботанического сада-института им. Н. А. Аврорина КНЦ РАН

# Author Affiliation

*Tatyana I. Litvinova* — Junior Researcher of Avrorin Polar-Alpine Botanical Garden and Institute of KSC RAS E-mail: lita\_0409@mail.ru

Galina M. Kashulina — Dr. Sci. (Biology), Chief Researcher of Avrorin Polar-Alpine Botanical Garden and Institute of KSC RAS

E-mail: galina.kashulina@gmail. com

Natalia M. Korobeynikova — Junior Researcher of Avrorin Polar-Alpine Botanical Garden and Institute of KSC RAS

# Библиографическое описание статьи

*Литвинова, Т. И.* Морфолого-генетическая характеристика торфяно-глеезема в пойме реки Грёндален острова Западный Шпицберген / *Т. И. Литвинова, Г. М. Кашулина, Н. М. Коробейникова* // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2018. — № 3 (10). — С. 192–197.

## Reference

*Litvinova Tatyana I., Kashulina Galina M., Korobeynikova Natalia M.* Histic Gleysol of the Hilly Bog at the Coastal Area of the Grenfjord, Svalbard: Morphology and Chemistry. *Herald of the Kola Science Centre of the RAS*, 2018, vol. 3 (10), pp. 192–197 (In Russ.).

# ВЛИЯНИЕ ЛАНДШАФТНОГО ПОЛОЖЕНИЯ НА ЭМИССИЮ СО₂ ПОЧВОЙ В ОКРЕСТНОСТЯХ ПОС. БАРЕНЦБУРГ, ШПИЦБЕРГЕН

# Г. М. Кашулина<sup>1</sup>, Т. И. Литвинова<sup>1</sup>, О. Р. Сидорова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГБУН Полярно-альпийский ботанический сад-институт им. Н. А. Аврорина КНЦ РАН <sup>2</sup>ФГБУ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт

### Аннотация

Представлены результаты определения суточной эмиссии CO<sub>2</sub> почвами на пяти площадках, расположенных на разных элементах ландшафтах в окрестностях пос. Баренцбург, в летний период. Медианы суточной эмиссии CO<sub>2</sub> в период с 23 июля по 2 августа 2017 г. варьировали от 52 до 63 мг/м<sup>2</sup>. Несмотря на различия в абсолютных отметках и характере растительности между площадками, значимых различий по интенсивности эмиссии CO<sub>2</sub> почвами в летний период выявлено не было.

### Ключевые слова:

серогумусовые почвы, литоземы, летняя эмиссия СО<sub>2</sub>, Шпицберген.

## SUMMER CO2 EMISSION BY SOIL AT FIVE LOCALITIES NEAR BARENTSBURG, SVALBARD

### Galina M. Kashulina<sup>1</sup>, Tatjana I. Litvinova<sup>1</sup>, Ol'ga R. Sidorova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Avrorin Polar-Alpine Botanical Garden and Institute of KSC RAS <sup>2</sup>Arctic and Antarctic Research Institute

### Abstract

Daily CO<sub>2</sub> emission by soil at 5 different localities near Barentsburg, Svalbard, was measuring from 23 of July to 2 of August 2017. Temperature and moisture of the upper organic horizon were determined at the same time. Median air temperature according to the nearest meteostation "Barentsburg" was 6,9 °C. Soil temperature varies from 5,8 to 7,2 °C. Summer daily CO<sub>2</sub> emission by Arctic Umbrisols was very low: median value varies from 52 to 63 mgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>. In spite of enough essential (170 m) gradient in elevation and evident difference in vegetation cover, the distribution of soil temperature among plots displayed no any dependence on altitude and there were no significant differences in CO<sub>2</sub> emission among plots. Altitude can influence annual emission by the differences in negative temperature and snow cover duration.

## Keywords:

Umbrisols, Leptosols, summer CO<sub>2</sub> emission, Svalbard.

## Введение

Благодаря влиянию теплого атлантического течения, а также воздействию теплых и влажных воздушных потоков из Атлантики западное побережье острова Западный Шпицберген характеризуется относительно мягким и влажным для таких широт климатом. Более благоприятные климатические условия обусловливают наличие более сомкнутого растительного покрова [1]. На участках под сплошным растительным покровом формируются хорошо развитые арктические серогумусовые почвы [2]. Одной из наиболее характерных особенностей этих почв является относительно высокое для таких широт содержание органического вещества. Выявление происхождения высокой гумусированности почв Шпицбергена является одной из наиболее интересных фундаментальных задач почвенных исследований на Шпицбергене. Высокое содержание органического вещества в арктических почвах уже было отмечено многими исследователями (см., например, работы [3, 4]), при этом данный феномен для хорошо дренируемых почв, каковыми являются серогумусовые грубогумусные почвы на Шпицбергене, объяснялся заторможенностью процессов трансформации растительных остатков и их накоплением в почве вследствие низких температур и короткого периода с положительными температурами [3]. Однако полевые эксперименты (наши неопубликованные данные) показали,

что скорость разложения растительных остатков в серогумусовых грубогумусных почвах в районе Баренцбурга является достаточно высокой, соизмеримой с лесными почвами Кольского п-ова. По предварительным данным, интенсивность выделения CO<sub>2</sub> (традиционно используется в качестве показателя суммарной микробиологической активности почв) серогумусовыми почвами соизмерима с почвами тундровой зоны Евразийского континента [5]. Для выявления влияния локальных условий в данной статье будет проведен анализ интенсивности выделения CO<sub>2</sub> почвами, сформированными в различных ландшафтных условиях около пос. Баренцбург в летний период. Поскольку CO<sub>2</sub> является парниковым газом и одним из звеньев в цепи глобального биогеохимического круговорота углерода, то изучение газообмена в системе почва-атмосфера также является актуальным в свете современных тенденций в изменении климата.

# Материалы и методы

Интенсивность эмиссии CO<sub>2</sub> почвами определялась на 5 стационарных площадках, расположенных на склоне горного хребта выше пос. Баренцбург на отметках 92 (пл. 1), 142 (пл. 2), 148 (пл. 3), 252 (пл. 4) и 258 (пл. 5) м над ур. м., с 23 июля по 2 августа 2017 г. На пл. 1, 2 и 3 растительность представлена сплошным покровом мха и кустарничков, на пл. 4 — этот покров фрагментарный, а на пл. 5 — растительность представлена отдельным пятном из мхов и лишайников. На пл. 1, 2, 3 и 4 под растительностью сформированы серогумусовые грубогумусные почвы, на пл. 5 — литозем. Эмиссию CO<sub>2</sub> определяли по методу Штатнова [6] с 23 июля по 2 августа. В статье приведены средние значения из двух повторностей.

Для характеристики условий, в которых протекает деятельность населяющих почвы организмов, велись наблюдения за температурой и влажностью верхнего органогенного горизонта почв. На пл. 1, 2, 4 и 5 с середины июля 2016 г. на глубине 2 см (нижняя часть верхнего органогенного горизонта) были установлены регистраторы температуры (табл.). Среднесуточные температуры воздуха и почвы рассчитывались для периода между сменами поглотителя CO<sub>2</sub> под контейнерами. Влажность почвы на площадке определялась в начале и по окончании эксперимента в 4–7-кратной повторности (рис. 1).

Показатель	Воздух*	Почва на глубине 2 см Soil at the 2 cm depth				
value	Air	Пл. 1	Пл. 2	Пл. 4	Пл. 5	
Период с положительными температурами до 23 июля						
Period with positive temperatures up to 23 July						
Количество дней	70	78	73	76	76	
The number of days	13	70	75	70	70	
Сумма температур > 0 °С	241	189	185	247	107	
The sum of temperatures $> 0$ °C					197	
Среднесуточная температура с 23 июля по 2 августа, °С						
The average temperature from 23 July to 2 August 0 °C						
Медиана	6.0	6.1	50	71	7.2	
Median	0,9	0,4	5,0	/,1	1,2	
Минимальная	5.0	5.0	<i>E</i> 1	()	5.2	
Minimum	3,0	5,9	3,4	0,2	5,5	
Максимальная	7.2	7 1	60	96	0 1	
Maximum	1,2	/,1	0,2	0,0	0,1	
Сумма Sum	73	70	64	78	77	

Температурные условия на обследованных стационарных площадках Temperature conditions in the surveyed stationary plots

<sup>\*</sup>Данные гидрометеорологической обсерватории «Баренцбург» (www.rp5.ru).

\*Data of Hydrometeorological Observatory "Barentsburg" (www.rp5.ru).



Рис. 1. Медиана и минимум-максимум варьирование влажности (% на воздушно-сухую почву) верхнего органогенного горизонта почв на стационарных площадках до начала (А) и после окончания эксперимента (Б) Fig. 1. Median and minimum-maximum variation of humidity (% air dry soil) of the upper organic soil horizon at the study plots before (A) and after the end of the experiment (Б)

По данным гидрометеорологической обс. Баренцбург (www.rp5.ru), переход среднесуточной температуры воздуха через 0 °C в 2017 г. произошел 30 мая. В верхних слоях почв переход на положительные температуры задержался всего на несколько дней: на 1 (пл. 1), на 3 (пл. 4 и 5) и на 6 (пл. 2). К началу эксперимента сумма положительных температур воздуха составила 240 °C. На том же уровне (247 °C) сумма положительных температур была на глубине 2 см в почве на пл. 4 (252 м над ур. м., вершина хребта). На других площадках сумма положительных температур была ниже и составила: 184 °C на пл. 2 (142 м над ур. м.), 189 °C на пл. 1 (92 м над ур. м.) и 197 °C на пл. 5 (258 м над ур. м., северо-восточный склон).

Медиана среднесуточных температур воздуха за время проведения эксперимента (23 июля — 2 августа) составила 6,9 °C, в почве на пл. 1 — 6,4, пл. 2 — 5,8, пл. 4 — 7,1 и пл. 5 — 7,2 °C. Сумма положительных температур воздуха за период проведения эксперимента составила 73 °C, в почве на пл. 1 — 70, пл. 2 – 64, пл. 4 — 78 и пл. 5 — 77 °C. Интересно, что температура почвы на глубине 2 см значимо, согласно *U*-критерию Манна — Уитни, отличалась от температуры воздуха на ближайшей метеостанции только на пл. 2. На остальных площадках различия между среднесуточными температурами в верхнем слое почв и воздуха на метеоплощадке не были значимыми.

В то же время *U*-критерий Манна — Уитни показал, что между площадками различия среднесуточных температур почвы в большинстве случаев были значимы: на пл. 1 и 2 температура почвы была значимо ниже по сравнению с пл. 4 и 5, а среднесуточная температура на пл. 2 значимо ниже по сравнению с пл. 1, 4, 5. Только между пл. 4 и 5 эти различия не были значимы, то есть самыми теплыми за время проведения эксперимента оказались площадки, занимающие самое верхнее положение в ландшафте — пл. 4 и 5, самой холодной пл. 2 — занимающее среднее положение в ландшафте.

Варьирование среднесуточной температуры воздуха за время проведения эксперимента составило 1,6 °C, варьирование температуры почвы значительно различалось между площадками. На пл. 2 среднесуточная температура почвы была более устойчива: различия за 10 дней эксперимента составили всего 0,8 °C. На пл. 4 и 5 эти различия были более значительными и составили 2,4 и 2,8 °C соответственно. Максимальные среднесуточные температуры воздуха и температуры почвы на пл. 1, 2 и 4 пришлись на 1 августа, на пл. 5 — на 26 июля. Приуроченность минимальных температур была индивидуальной для каждой площадки.

Различия по влажности верхних слоев почв между площадками перед началом эксперимента были более значительными: медиана влажности варьировала от 209 до 104 (рис. 1, А). Наиболее высокая влажность была свойственна почвам на пл. 1 и 3. Площадки 2 и 4 представляли наиболее сухие местообитания. Поскольку за время эксперимента (с 23 июля по 2 августа 2017 г.) выпало

незначительное количество осадков — 3,4 мм, то влажность почв за время эксперимента значительно снизилась на всех площадках (рис. 1, Б). Наиболее значительно снижение влажности было отмечено на пл. 3 — на 78 % и на пл. 5 — на 136 %.

Предварительные исследования летом 2013 г. показали, что эмиссия CO<sub>2</sub> серогумусовой грубогумусной почвой около метеоплощадки ГМО «Баренцбург» варьировала от 100 до 135 мг/м<sup>2</sup>/сут и была соизмерима с почвами тундровой зоны России [5]. В данных исследованиях, несмотря на тот же метод определения, суточная эмиссия CO<sub>2</sub> на всех обследованных площадках оказалась значительно ниже: на пл. 1 эта величина варьировала от 56 до 77, на пл. 2 — от 28 до 63, на пл. 3 — от 50 до 73, на пл. 4 — от 51 до 67, на пл. 5 — от 43 до 63 мг/м<sup>2</sup>. Низкие величины эмиссии летом 2017 г. относительно 2013 г., возможно, обусловлены различиями в погодных условиях (лето 2013 г. было более холодным и влажным) и особенностями температурного режима и влажности почв на месте проведения эксперимента в 2013 г.

Согласно распределению медиан, самая низкая интенсивность эмиссии CO<sub>2</sub> летом 2017 г. была свойственна почве на пл. 2 (самая сухая и самая холодная) — 52 мг/м<sup>2</sup>/сут и на пл. 5 (почва представлена только маломощным органогенным горизонтом, залегающим на обломках горной породы, т. е. минеральная часть профиля отсутствует) — 54 мг/м<sup>2</sup>/сут, наиболее высокая — на пл. 1 — 63 мг/м<sup>2</sup>/сут.

Одной из характерных особенностей эмиссии является ее значительное варьирование за период исследований относительно ее абсолютной величины на всех площадках. Например, минимальная суточная эмиссия CO<sub>2</sub> почвой на пл. 1 отличалась от максимальной на 18 мг/м<sup>2</sup> при медиане из набора данных, представляющих эту площадку равной 63 мг/м<sup>2</sup>. Наиболее значительное варьирование этого показателя было свойственно пл. 2. Различия между минимальной и максимальной суточной эмиссией CO<sub>2</sub> на этой площадке составили 34 мг/м<sup>2</sup> при медиане 52 мг/м<sup>2</sup>. Для этой площадки характерно увеличение эмиссии со временем (рис. 2). Такая динамика эмиссии на этой площадке, возможно, обусловлена особенностями температурного режима почвы. Переход к положительным температурам верхних слоев почв на этой площадке произошел позднее, и, возможно, повышение эмиссии со временем здесь обусловлено постепенным прогреванием и увеличением участия в эмиссии минеральной части профиля. Для пл. 1 и 3, наоборот, характерно постепенное уменьшение эмиссии СО<sub>2</sub> со временем, что может быть связано с существенным снижением влажности (рис.) почвы во время проведения эксперимента из-за небольшого количества выпавших осадков. В меньшей степени иссушение почвы сказалось на динамике эмиссии на пл. 4 и 5. Большую роль влажности в интенсивности дыхания серогумусовой почвы продемонстрировали исследования 2013 г. [5]: поступление большого количества осадков за два дня (около 20 мм) в конце эксперимента сопровождалось прибавкой суточной эмиссии в 30 мг CO<sub>2</sub>/м<sup>2</sup>.





Fig. 2. Distribution of daily CO<sub>2</sub> emissions by soil (mg/m<sup>2</sup>) on stationary plots from 23 July to 2 August

Распределение площадок по интенсивности эмиссии CO<sub>2</sub> в отдельные дни летом 2017 г. не имело регулярного характера. На пл. 1, например, 28, 29 и 31 июля интенсивность эмиссии была самой высокой среди всех площадок, а 1 августа, наоборот, — самой низкой. Различия между площадками по эмиссии CO<sub>2</sub> почвой в отдельные дни также значительно варьировали. Например, 27 июля суточная эмиссия CO<sub>2</sub> на пл. 2 составила 28,4 мг/м<sup>2</sup>, а на пл. 3 — 64,5 мг/м<sup>2</sup>, т. е. различия между максимальной и минимальной эмиссии в этот день составили 36 мг/м<sup>2</sup> и превысили абсолютную величину интенсивности эмиссии на пл. 2(!). Интенсивность эмиссии 1 августа, наоборот, на всех площадках сравнялась: различия между минимальной (пл. 5 и 1) и максимальной (пл. 2) эмиссией составили всего около 4 мгCO<sub>2</sub>/м<sup>2</sup>. Отсутствие четкого распределения интенсивности эмиссии CO<sub>2</sub> между площадками свидетельствует о том, что высотное положение места не оказывает влияния на интенсивность дыхания почв. Расчеты *U*-критерия Манна — Уитни подтвердили отсутствие значимых различий по суточной эмиссии CO<sub>2</sub> между всеми обследованными площадками. Исключением являются различия между пл. 1 и 5, эмиссия на пл. 1 была от 3 до 17 мгCO<sub>2</sub>/м<sup>2</sup> выше по сравнению с пл. 5, кроме 1 августа, когда эмиссия на этих площадках была одинакова.

При расчетах суммарной эмиссии за все время проведения исследований различия по интенсивности эмиссии между площадками становятся более значительными: минимальная суммарная эмиссия  $CO_2$  за 8 дней (с 26 июля по 2 августа) составила 406 (пл. 2), максимальная — 499 мг/м<sup>2</sup> (пл. 1). Однако и по величине суммарной эмиссии площадки расположились в том же порядке, что и медианы — 1 > 4 > 3 > 5 > 2, и также не зависели от ландшафтного положения площадки.

Таким образом, данные исследования продемонстрировали отсутствие существенных различий по суточной эмиссии CO<sub>2</sub> почвами в самый теплый период между площадками, расположенными на разных элементах ландшафта. Какие-то индивидуальные особенности места (температура и влажность, скорость оттаивания и активизация микроорганизмов минеральной части профиля, а также количество и состав растительного опада) оказывают влияние на интенсивность дыхания почв. Влияние абсолютной отметки, однако, может сказаться в годовом цикле, например, за счет различий по продолжительности отрицательных температур и залегания снежного покрова.

# ЛИТЕРАТУРА

**1.** *Ronning O. I.* The flora of Svalbard. Oslo: Norwegian Polar Institute, 1996. 184 р. **2.** *Переверзев В. Н.* Почвы побережий фьордов острова Западный Шпицберген. Апатиты: КНЦ РАН, 2012. 122 с. **3.** *Васильевская В. Д.* Почвообразование в тундрах Средней Сибири. М.: Наука, 1980. 235 с. **4.** *Горячкин С. В.* Почвенный покров Севера (структура, генезис, экология, эволюция). М.: ГЕОС, 2010. 414 с. **5.** *Кашулина Г. М., Литвинова Т. И., Баскова Л. А.* Эмиссия углерода арктическими серогумусовыми грубогумусными почвами острова Западный Шпицберген в летний период // Комплексные исследования природы Шпицбергена и прилегающего шельфа. Ростов н/Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2016. Вып. 13. С. 183–188. **6.** Агрохимические методы исследования почв. М.: Наука, 1975. 656 с.

# Сведения об авторах

*Кашулина Галина Михайловна* — доктор биологических наук, главный научный сотрудник лаборатории почвоведения Полярно-альпийского ботанического сада-института им. Н. А. Аврорина КНЦ РАН E-mail: galina.kashulina@gmail.com

*Литвинова Татьяна Ивановна* — младший научный сотрудник лаборатории почвоведения Полярно-альпийского ботанического сада-института им. Н. А. Аврорина КНЦ РАН E-mail: lita\_0409@mail.ru

Сидорова Ольга Руслановна — зам. начальника зимовочного состава РАЭ-Ш Арктического и антарктического научно-исследовательского института

E-mail: hutsy02@rambler.ru

Author Affiliation Galina M. Kashulina — Dr. Sci. (Biology), Chief Researcher of Avrorin Polar-Alpine Botanical Garden and Institute of KSC RAS E-mail: galina.kashulina@gmail.com Tatyana I. Litvinova — Junior Researcher of Avrorin Polar-Alpine Botanical Garden and Institute of KSC RAS E-mail: lita\_0409@mail.ru Ol'ga R. Sidorova — Wintering Staff Deputy Chief, Russian Arctic Scientific Expedition at the archipelago of Spitsbergen, Arctic and Antarctic Research Institute E-mail: hutsy02@rambler.ru

# Библиографическое описание статьи

*Кашулина, Г. М.* Влияние ландшафтного положения на эмиссию CO<sub>2</sub> почвой в окрестностях пос. Баренцбург, Шпицберген / *Г. М. Кашулина, Т. И. Литвинова, О. Р. Сидорова* // Вестник Кольского научного центра РАН. 2018. № 3 (10). С. 198–203.

## Reference

Kashulina Galina M., Litvinova Tatjana I., Sidorova Ol'ga R. Summer CO<sub>2</sub> Emission by Soil at Five Localities near Barentsburg, Svalbard. Herald of the Kola Science Centre of the RAS, 2018, vol. 3 (10), pp. 198–203 (In Russ.).

# ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ БАРЕНЦЕВА МОРЯ ДЛЯ АНАЛИЗА ЗАГРЯЗНЕНИЯ

# М. А. Новиков

ФГБНУ «Полярный научно-исследовательский институт морского рыбного хозяйства и океанографии им. Н. М. Книповича» (ПИНРО), г. Мурманск

### Аннотация

На основе фондовых данных ПИНРО выполнена цифровая модель рельефа и гранулометрического состава донных отложений Баренцева моря. Модель включает распределение пяти основных типов грунта — песка, илистого песка, песчанистого ила, ила и глинистого ила по узлам регулярной координатной сетки. Выполнена трехмерная цифровая карта распределения донных отложений (ДО) моря, отражающая зависимость их состава от глубины. С использованием цифровой модели показано распределение Pb, Cu, Hq, Cr в донных отложениях в количествах, превышающих фоновые значения.

### Ключевые слова:

Баренцево море, донные отложения, рельеф дна, загрязнение.

## APPLICATION OF THE DIGITAL MODEL OF THE BARENTS SEA BOTTOM DEPOSITS FOR ANALYSIS OF THE CONTAMINATION

### Mikhail A. Novikov

Knipovich Polar Research Institute of Fisheries and Oceanography, Murmansk

### Abstract

Based on the PINRO's data, a digital grid model of bottom relief and granulometric composition of the Barents Sea bottom sediments, was made. The digital database on metals contains the results of a chemical analysis of samples taken by PINRO's specialists at 559 stations in the Barents Sea in 1998-2015. The model includes the distribution of the five main types of sediments — sand, silty sand, sandy silt, silt and clay silt, along the regular grid nodes. Developed a 3D digital map of distribution of the Barents Sea bottom sediments, reflecting the dependence of their composition on the depth. It was noted that the character of the bottom topography of the Barents Sea, the presence of sedimentation traps on the seabed, and also the bottom currents basically influenced the granulometric composition of the deposits of a given area. Using the digital model, the distribution of Pb, Cu, Hg, Cr in bottom sediments in quantities exceeding the background values, was shown.

### Keywords:

Barents Sea, bottom sediments, bottom relief, contamination.



## Введение

Картографирование глубины моря и типа донных отложений имеет особое значение при изучении их связи со структурой сообществ и биомассой распределения донных организмов, а также с целью выявления возможных районов аккумуляции антропогенного загрязнения. Кроме того, причинноследственные связи, существующие между гидродинамической активностью и распределением осадочного материала, позволяют на основе карт ДО лучше представлять себе характер распространения наиболее устойчивых водных потоков в гидродинамической системе Баренцева моря. Тип ДО обычно

определяется их гранулометрическим составом. Распространение грунтов различного гранулометрического состава в море в значительной степени отражает характеристики придонных течений и рельефа дна. В понижениях рельефа, как правило, скапливаются мелкодисперсные илы (пелит), а на мелководьях с активной гидродинамикой преобладает песок.

Наиболее известная карта ДО Баренцева моря (БМ) была опубликована М. В. Кленовой [1], разумеется, она является аналоговой и, в определенной степени, устаревшей. Карты ДО, представленные в работе [2], также аналоговые, и, кроме того, в них применена иная, чем у Кленовой, методика оценки гранулометрического состава отложений, что делает указанные материалы трудно сопоставимыми.

С целью анализа распространения техногенного загрязнения по дну Баренцева моря мы предприняли попытку создать цифровую карту ДО, совмещенную с цифровой трехмерной (3D) батиметрической картой. Очевидным преимуществом 3D цифровой карты — блок-диаграммы — является наглядное представление о распространении донных осадков, в том числе загрязненных, в связи с рельефом дна.

## Материалы и методы исследования

Для составления цифровой модели авторы обращались к фондовым базам данных Полярного научно-исследовательского института морского рыбного хозяйства и океанографии им. Н. М. Книповича.

При выполнении цифровой батиметрической карты Баренцева моря были использованы результаты более 7 тыс. промеров глубин на основной части его акватории в границах трапеции (по диагонали с юга-запада на северо-восток) 67°50' с. ш. 20° в. д. — 76° с. ш. 57° в. д. Информацию о составе ДО брали из характеристик промысловых квадратов — трапеций регулярной сетки координат в меркаторской проекции 10'×30' по широте и долготе соответственно, содержащихся в фондовых данных ПИНРО. Данные о гранулометрическом составе ДО кодировали, шкалировали и привязывали к узлам регулярной сетки в среде цифровой базы данных. В качестве последней использовали электронные таблицы приложения MS Excel. Цифровая модель поля глубин представлена массивом данных, в котором записаны геодезические координаты отметок глубин: широта и долгота (градусы), глубины (метры). Аналогично записаны данные по составу ДО, где атрибутивной характеристикой являются значения 5-ступенчатой шкалы градации их гранулометрического состава. На основе данных промеров глубин и состава ДО в среде GS Surfer методом кригинга (Kriging) выполнялся расчетный грид (grid) заданного размера. Количество точек — узлов регулярной сетки на итоговой цифровой карте, содержащее сведения о глубинах и составе ДО, соответствовало количеству промысловых квадратов на проанализированной акватории Баренцева моря и составляло 2830 значений для каждого тематического слоя. Достоинства метода Д. Крига общеизвестны. Кригинг является геостатистическим методом, который строит скорее статистическую модель реальности, чем модель интерполяции. Такой подход позволяет учитывать пространственную корреляцию данных.

Классификация грунтов приводилась на основе подходов, предложенных в работе [3] и в дальнейшем принятых и использованных рыболовными организациями Северного бассейна (включая ПИНРО) при проведении траловых съемок. Основным признаком для характеристики осадка в этой классификации принято считать содержание фракции размерностью меньше 0,01 мм. От количества этой фракции, по мнению М. В. Кленовой, зависит сыпучесть, пластичность осадка, и оно является решающим в его механической характеристике [3]. При количестве мелкой фракции менее 5 % по весу осадок называется песком, при 5–10 % — илистым песком, при 10– 30 % — песчанистым илом, при 30–50 % — илом, при количестве мелкой фракции более 50 % глинистым илом и глиной.

Трехмерная карта рельефа дна Баренцева моря была визуализирована в среде GS Surfer 11. Она совмещена с цифровой картой гранулометрического состава ДО. Для наглядности изображения выполнена аналитическая отмывка рельефа. Дополнительно на трехмерное изображение наложены данные по содержанию тяжелых металлов (TM), таких как Cu, Pb, Hg, Cr, в верхнем слое ДО (в мкг/г сух. мас.). Сведения о последних содержатся в отдельной цифровой

базе данных ПИНРО и являются результатом химического анализа ДО в лаборатории прикладной экологии и токсикологии. В этой базе обобщены результаты химического анализа проб, отобранных на 574 станциях в Баренцевом море в период с 1998 по 2016 гг.

## Результаты исследования и их обсуждение

Особенности распределения осадков в море тесно связаны с характеристиками рельефа дна и гидродинамическим режимом придонных вод. В связи с высокой гидродинамической активностью вод Баренцева моря механическая дифференциация осадочного материала протекает интенсивно и является важнейшим фактором седиментогенеза. Анализ распределения осадков Баренцева моря подтверждает положение о том, что изменение их гранулометрического состава связано с изменением глубины расположения морского дна. Это объясняется тем, что гидродинамическая обстановка осадконакопления в первую очередь определяется рельефом. Поэтому обширные районы юго-восточной части Баренцева моря, подводные береговые склоны арх. Новая Земля и Медвежинская равнина, расположенные на глубине 50–100 м, покрыты песками и илистыми песками (рис.). К этим же районам приурочены и максимальные концентрации обломочного материала — гальки, валунов, глыб. Более тонкозернистые отложения (песчанистый ил, ил и глина) выстилают дно желобов, ложбин и отдельных впадин. Максимальная глубина моря на представленной карте находится в Медвежинском желобе в северо-западной части моря и соответствует 488 м.



Распространение загрязнения Pb (кружки), Hg (треугольники), Cu (квадраты) и Cr (стрелки) на блок-диаграмме рельефа дна Баренцева моря, совмещенной с картой ДО. Типы грунтов на шкале: 0 — песок; 1 — илистый песок; 2 — песчанистый ил; 3 — ил; 4 — глинистый ил и глина The spread of contamination by Pb (circles), Hg (triangles), Cu (squares) and Cr (arrowhead) on the block-diagram of the relief of the Barents Sea bottom, combined with a map of the bottom sediments. Types of sediments on the scale: 0 — sand, 1 — silty sand, 2 — sandy silt, 3 — silt, 4 — clayey silt and clay

При анализе трехмерной карты рельефа дна и ДО следует отметить, что бо́льшая часть дна моря покрыта песчанистым илом. Значительные участки дна, особенно в северной половине и центральной части моря, заняты илом (дно Медвежинского желоба, желоба Персея, Центральной

впадины, участки Новоземельских желобов и др.). Наличие здесь системы замкнутых понижений способствует образованию ловушек, затишных зон и отложению илистого материала и глины. В южной части моря илом покрыто дно Норвежского желоба восточнее 26-го меридиана и большие участки дна у южной оконечности Новой Земли. Распределение песка связано с активными гидродинамическими процессами, происходящими в море, и в значительной степени приурочено к мелководьям. Песок располагается вдоль прибрежных склонов и на поверхности Медвежинской и Шпицбергенской банок, на Канино-Колгуевском мелководье, Северо-Канинской банке, в Западно-Центральном районе, Печорском море и у побережья Новой Земли. Илистый песок то узкой, то широкой полосой окаймляет прибрежные склоны и покрывает гребни Мурманской и Рыбачьей банок, Центральной возвышенности. В юго-восточной части Баренцева моря в связи с ослабленной подвижностью вод илистые грунты залегают на меньших глубинах, чем в западных районах. К востоку острова Колгуев можно встретить ил на глубине меньше 100 м. Осадки здесь более рыхлые, чем в западных районах.

В ряде мест отмечены выходы древней серой глины, размываемой Нордкапским и Мурманским течениями. Из-за неровного и резко изменяющегося рельефа в этом районе имеются зоны интенсивного размыва дна, образующиеся вследствие современного поднятия шельфа Баренцева моря.

Загрязнение ДО ТМ представляет значительный экологический интерес, так как оказывает влияние на интегральную токсичность среды обитания для гидробионтов в результате накопления по пищевым цепям, а также потому что может быть источником вторичного загрязнения воды.

На рисунке показано распространение высокотоксичных металлов Pb и Hg, а также Cu и Cr в ДО Баренцева моря в количествах, превышающих фоновые значения, то есть загрязнения (геохимические аномалии). Фоновые значения для Pb, Hg, Cu и Cr, составляющие 31,0, 0,15, 28 и 116 мкг/г соответственно, были выведены нами ранее специально для Баренцева моря [4]. Высокие уровни содержания Pb отмечены преимущественно на склонах Медвежинского желоба в северозападной части Баренцева моря на таких грунтах, как ил и глинистый ил (тонкозернистые осадки). В научной литературе для Pb указана относительно высокая склонность к адсорбции на глинистых минералах, в отличие, например, от Cu [5].

Высокие уровни Hg отмечены на северо-западной границе юго-восточной части Баренцева моря, в Центральной впадине (желобе) вдоль склонов Северо-Канинской и Гусиной банок в основном на тонкозернистых осадках — разных типах илов. Загрязнение остальными изученными TM также характерно для Центральной впадины и склонов указанных выше банок. В случае с Cr отмечено загрязнение илов Западно-Новоземельского желоба вдоль побережья Северного острова арх. Новая Земля. Согласно нашим предшествующим исследованиям, присутствие повышенных содержаний Hg и Pb в ДО Баренцева моря является следствием устойчивого техногенного загрязнения [4, 6].

В мелководной юго-восточной части Баренцева моря на песчаных (крупнозернистых) осадках повышенное содержание изученных металлов отмечено единично — только для Cr. Отметим, что высокие концентрации Cr встречались, как правило, только в прибрежной зоне (см. рис.). Для Белого моря аналогично указывалось, что кластофильные элементы (например, Cr и Zn) локализованы ближе к берегам [7], Cr — относительно слабо растворим в воде и вследствие этого почти без потерь перемещается из областей сноса в бассейны осадконакопления [8].

# Выводы

Характер рельефа дна Баренцева моря, наличие на морском дне седиментационных ловушек, затишных зон в значительной степени способствуют накоплению металлов, поступающих сюда со взвесью, приносимой в основном течениями и атмосферными осадками. Этот же фактор в основном определяет и преобладающий гранулометрический состав отложений того или иного участка морского дна. Преобладающий тип осадков в Баренцевом море — песчанистый ил.

Наиболее загрязненными тяжелыми металлами являются тонкозернистые осадки морских желобов и впадин — все виды илов и глина. В Центральном желобе Баренцева моря наблюдается комплексное загрязнение ТМ. Загрязнение песчаных грунтов — песка и илистого песка, за редким исключением, отсутствует. Основной причиной этого явления, очевидно, является активная гидродинамика мелководных морских зон.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кленова М. В. Отчет о работе комиссии по механическому анализу при Государственном океанографическом институте // Бюлл. ГОИН. 1931. Вып. 1. 8 с. 2. Gurevich V. I. Recent sedimentogenesis and environment on the Arctic shelf of Western Eurasia. Oslo: Norsk Polarinstitutt Meddelelser, 1995. No. 131. 92 р. 3. Кленова М. В. Геология Баренцева моря. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 367 с. 4. Новиков М. А. К вопросу о фоновых значениях уровней содержания тяжелых металлов в донных отложениях Баренцева моря // Вестник МГТУ. 2017. Т. 20, № 1/2. С. 280–288. 5. Формы нахождения тяжелых металлов в современных ДО Белого и Баренцева морей / Д. Ф. Будько [и др.] // ДАН. 2017. Т. 474, № 1. С. 93–98. 6. Новиков М. А., Жилин А. Ю. Характер распределения тяжелых металлов в донных отложениях Баренцева моря (по результатам статистического анализа) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2016. Вып. 29, № 1. C. 78-88. 7. Specific features of the distribution of trace and rare earth elements in recent bottom sediments in the lower course of the Severnaya Dvina River and White Sea / A. V. Maslov [et al.] // Lithology and Mineral Resources. 2014. Vol. 49, No. 6. P. 433–460. 8. Condie K. C. Chemical composition and evolution of the upper continental crust: contrasting results from surface samples and shales // Chem. Geol. 1993. Vol. 104. P. 1-7.

## Сведения об авторе

Новиков Михаил Аркадьевич — кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник Полярного научно-исследовательского института морского рыбного хозяйства и океанографии им. Н. М. Книповича

E-mail: mnovik@pinro.ru

## Author Affiliation

Mikhail A. Novikov — PhD (Biology), Leading Researcher of Knipovich Polar Research Institute of Marine Fisheries and Oceanography E-mail: mnovik@pinro.ru

## Библиографическое описание статьи

Новиков, М. А. Применение цифровой модели донных отложений Баренцева моря для анализа загрязнения / М. А. Новиков // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2018. — № 3 (10). — C. 204–208.

## Reference

Novikov Mikhail A. Application of the Digital Model of the Barents Sea Bottom Deposits for Analysis of the Contamination. Herald of the Kola Science Centre of the RAS, 2018, vol. 3 (10), pp. 204–208 (In Russ.).

# ДЕНДРОХРОНОЛОГИЧЕСКАЯ ДАТИРОВКА РУССКИХ ПОСЕЛЕНИЙ НА ЮГЕ ШПИЦБЕРГЕНА: СРАВНЕНИЕ С РЕЗУЛЬТАТАМИ РАДИОУГЛЕРОДНОГО АНАЛИЗА И ПАЛЕОКЛИМАТИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКОЙ

О. И. Шумилов<sup>1,2</sup>, Е. А. Касаткина<sup>1,2</sup>, М. Крапиек<sup>3</sup>, Я. Хохоровски<sup>4</sup>,

Э. Жиховска-Крапиек<sup>3</sup>, А. Г. Канатьев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ФГБНУ Полярный геофизический институт, г. Апатиты

<sup>2</sup>ФГБУН Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ, г. Апатиты

<sup>3</sup>Научно-технический университет, г. Краков

<sup>4</sup>Институт археологии, Ягеллонский университет, г. Краков

### Аннотация

Вопрос о посещении Шпицбергена русскими поморами (XVI в.) или скандинавскими викингами (XII в.) до его официального открытия, которое в 1596 г. осуществил голландский мореплаватель В. Баренц, остается спорным и нуждается в подкреплении новыми данными. В работе представлены результаты дендрохронологического датирования поселений поморов, обнаруженных в южной части арх. Шпицберген в районе Земли Серкаппланд и залива Хорнсунн, а также их сравнение с данными радиоуглеродного анализа. Поселения впервые были исследованы в 1982–1985 гг. экспедицией Краковского Ягеллонского университета (Польша). Образцы древесины, найденные во время раскопок, являются фрагментами деревянных домов, монументальных крестов и обломков кораблей. Было исследовано 8 образцов древесины (лиственницы — 3, сосны — 5), представляющих собой различные конструктивные элементы жилых помещений. Для определения абсолютных дат «плавающие» хронологии были подвергнуты процедуре перекрестного датирования с более чем 200 древесными хронологиями из различных регионов прибрежной зоны севера Евразии, включая наши собственные данные (Сибирь, Коми, Карелия, Архангельская обл., Кольский п-ов, Северная Фенноскандия). При помощи программы CORINA удалось успешно датировать и определить места происхождения образцов для двух поселений Бернбайнфлюене (t = 5,7; 1759–1812 гг., Архангельская обл.) и Шеннингхолмане (t = 4,6; 1698–1776 гг., п-ов Ямал). Полученные результаты не противоречат данным радиоуглеродного и археологического датирования: обнаружение курительной глиняной трубки в жилом комплексе Бернбайнфлюене позволило определить период времени использования постройки как 1770–1810 гг. В других случаях требуется дополнительная информация, тем не менее второй результат согласуется с тем фактом. что с XV в. поморы регулярно отправлялись на своих кораблях из Архангельска на п-ов Ямал в район Обской губы, где впоследствии был основан город Мангазея. Этот маршрут, известный как «Мангазейский ход», был предшественником Северного морского пути. На основе анализа собственной древесно-кольцевой хронологии, полученной из образцов сосны Pinus sylvestris L., собранных вблизи северной границы леса на Кольском п-ове (68,6 N, 33,3 E), обсуждаются возможные климатические изменения в Арктике в периоды предполагаемого открытия Свальбарда викингами и поморами в XII и XVI вв.

## Ключевые слова:

поселения русских поморов, Шпицберген, дендрохронология, изменения климата.

### TREE-RING DATING OF RUSSIAN SETTLEMENTS AT SOUTHERN SPITSBERGEN: COMRARISON WITH THE RESULTS OF RADIOCARBON ANALYSIS AND PALAEOCLIMATIC SITUATION

Oleg I. Shumilov<sup>1,2</sup>, Elena A. Kasatkina<sup>1,2</sup>, Marek Krapiec<sup>3</sup>, Jan Chochorowski<sup>4</sup>,

**Elzbieta Szychowska-Krapiec<sup>3</sup>**, Alexander G. Kanatjev<sup>1</sup> <sup>1</sup>Polar Geophysical Institute, Apatity <sup>2</sup>Institute of North Industrial Ecology Problems of KSC RAS, Apatity <sup>3</sup>University of Science and Technology (AGH), Krakow <sup>4</sup>Institute of Archaeology, Jagiellonian University, Krakow

### Abstract

The earliest history of the Spitsbergen archipelago (Svalbard) is still a subject of discussion. According to the "Viking hypothesis" Svalbard was discovered in the 12<sup>th</sup> century by Norse sailors. Famous Russian archaeologist V. F. Starkov declared that Russian hunting in the Spitsbergen

archipelago was initiated in 1550 (if not earlier). Officially, the archipelago was discovered in 1596 by Dutch explorer Willem Barentsz. While Barentsz' discovery in 1596 is generally accepted as a historical fact, the question about the earlier visits of the Russian Pomors at Svalbard remains controversial and needs reinforcement with new data. The results of the dendrochronological analysis of the three Russian hunting stations in Southern Spitsbergen (Bjornbeinflyene, Palffyodden, and Schonningholmane) and their comparison with the results of radiocarbon and archaeological analysis are presented. These stations were discovered during excavations conducted by the Polish archaeological expedition of Jagiellonian University in the Sorkappland and Hornsund fjord regions of Spitsbergen. Wood samples found during excavations are fragments of wood dwellings, monumental crosses, and a shipwreck. Some of them were analyzed with help of radiocarbon dating and wiggle-matching method at the University of Science and Technology and the Laboratory of Absolute Dating (Krakow, Poland). Here we present the results of dendrochronological dating of some floating chronologies. In total, 8 samples of larch (3 pieces) and pine (5 pieces) were examined. These samples are constructional elements of dwellings, appearing to be prefabricates brought from the continent. Traditionally, the Pomor hunting huts were mostly prefabricated and brought from the mainland, and only the oldest ones were built of driftwood timber. To obtain absolute dates, these floating chronologies were cross-dated against more than 200 master treering chronologies from Siberia, Komi, Archangelsk region, Karelia, Kola Peninsula, and Northern Fennoscandia, including our own data, Cross-dating was performed by CORINA software which includes t-values calculated with different detrending options. Samples from two stations (Bjornbeinflyene and Schonningholmane) were successfully dendro-dated with the existing master tree-ring chronologies. The dendro-dating obtained for the wood samples from these two stations were established as AD 1759–1812 (t = 5,7; pine, Archangelsk region) and AD 1698–1776 (t = 4,6; larch, Yamal Peninsula) respectively. The first dating does not contradict the results of radiocarbon and archaeological dating. The discovery of some relics in Bjornbeinflyene (kaolinite pipe) helped determine 1770–1810 as the time period when the hut was used. In other cases, additional information is required. Nevertheless, the second dating is consistent with the fact that since the XV century, the Pomors regularly went on their ships from Arkhangelsk to the Yamal Peninsula and the Gulf of Ob where they founded the town of Mangazeya. This route, known as the Mangazeva seaway, was an early precursor to the Northern Sea Route, Using our own tree-ring chronology developed from Pinus sylvestris L. samples collected near the northern timber line at Kola Peninsula (68,6 N; 33,3 E), we discuss climatic variations in Arctic and ice cover in Barents sea during the periods of the supposed discovery of Svalbard by Vikings in the 12<sup>th</sup> century and by Russian Pomors in the 16th century. Our results confirmed the radiocarbon and archaeological dating of Russian hunting stations at South Spitsbergen.

## **Keywords:**

Russian Pomor settlements, Spitsbergen, dendrochronology, climate changes.

# Введение

Вопрос об открытии арх. Шпицберген в настоящее время остается предметом международной дискуссии. Шпицберген в переводе с голландского означает «острые горы». Такое название архипелагу дал голландский мореплаватель Виллем Баренц, который открыл эти острова во время своей третьей экспедиции в 1596 г. и впервые нанес их на карту. Если открытие Шпицбергена Баренцем является неоспоримым и общепризнанным историческим фактом, то имеющиеся свидетельства о более ранних посещениях архипелага скандинавскими викингами в XII в. [1, 2] и русскими поморами в XVI в. [3, 4] оспариваются и нуждаются в подкреплении новыми данными. В исландских летописях XII в. есть упоминание о том, что викинги нашли Свальбард («холодный берег», или «край с холодными берегами») [1, 2]. Эти записи позволили впоследствии норвежским исследователям ассоциировать Свальбард викингов с современным Свальбардом (норвежское название Шпицбергена), но на территории самого архипелага не найдено никаких доказательств присутствия там викингов в XII в. С другой стороны, на различных островах архипелага в большом количестве обнаружены остатки поселений русских поморов (фрагменты жилищ, обломки судов, поклонные кресты, места захоронений), из которых исследовано уже почти 60 объектов [4]. Результаты исследований известного российского археолога В. Ф. Старкова, полученные с помощью различных методов датировки (дендрохронологического, картографического, палеографического, историко-филологического) свидетельствуют о том, что поморы вели свои промыслы на Груманте (русское название Шпицбергена) еще в середине XVI в. (наиболее ранние постройки поселений Гравшен и Сернесет датируются 1548 и 1563 гг. соответственно) [3, 4]. Наиболее интересные археологические находки, найденные в местах русских поселений и датированные XVI–XVII вв., хранятся в музее Баренцбурга (арх. Шпицберген): русский алфавит и надписи на дощечках, иконы, крест-мощевик, шахматные фигурки [3, 5]; хотя следует отметить, что данные датировки оспариваются в работах норвежских исследователей [1, 2]. Основные продукты промысла поморов в этот период — моржовый клык, шкуры песца и белых медведей, белуший и тюлений жир [3, 5]. Для нужд собственного потребления в основном использовалась рыба, мясо северного оленя и птицы [3].

Расцвет русского мореплавания и освоение районов Крайнего Севера России приходится на вторую половину XVI в., когда поморы регулярно отправлялись на своих судах (большие и малые кочи) из Архангельска на Новую Землю и на север Западной Сибири, в район Обской губы и устья реки Таз, где в конце XVI в. был основан Тазовский городок, впоследствии переросший в город Мангазея, о чем свидетельствуют письменные источники и данные археологических раскопок [5]. «Мангазея златокипящая» — так называли этот первый заполярный город в Западной Сибири из-за богатого соболиного промысла, а «Мангазейский ход», проложенный русскими поморами в XVI в., был ранним предшественником Северного морского пути [5, 6]. В. Ф. Старков в своих работах приводит доводы в пользу своей гипотезы о том, что «Мангазейский морской ход» — в сторону западной Сибири, «Новоземельский ход» — к островам Новой Земли и «Ход груманландский» — к арх. Шпицберген осваивались поморами одновременно [3, 5].

Изменения климата и ледовая обстановка в Евро-Арктическом регионе в этот временной интервал, несомненно, оказали решающее воздействие на мореплавание и возникновение первых поселений на Шпицбергене. С учетом промысловых традиций и благоприятных ледовых условий нельзя исключить, по мнению ряда исследователей, также возможно более ранний маршрут поморов к Шпицбергену вдоль западных берегов Новой Земли до ее северной оконечности и дальше в западном направлении вдоль кромки льда, что обеспечивало им относительную безопасность и возможность ведения морских промыслов [3, 7]. Косвенным подтверждением такого вывода могут служить свидетельства самого Виллема Баренца, который во время своей первой экспедиции в 1594 г. встречал поморские поклонные кресты на территории Новой Земли почти повсеместно до самой северной ее части (о. Крестовый) [7]. Любопытным историческим документом является письмо датского короля Фредерика II своему наместнику в Норвегии, хранящееся в Королевском архиве и датированное 1576 г., которое было переведено на русский язык уже в 1901 г. [3]. В письме идет речь о нашем соотечественнике, русском кормщике Павле Нишеце из Колы (Мурманская обл.), которого следует нанять для сопровождения датских судов в Гренландию, т. е. к Шпицбергену, куда он плавал ежегодно с заходом в Варде [3].

Во второй половине XVIII в. на фоне возрастающей хозяйственной активности русские промысловые поселения появляются практически на всей территории арх. Шпицберген [3, 4]. Такие поселения представляли собой становища из 3–4 домов, рассчитанные для одновременного проживания 40–50 чел., и имели все необходимые службы: бани, мастерские, складские помещения [3, 4, 8]. Для строительства жилых помещений поморы обычно использовали заранее заготовленную древесину или готовые срубы, доставленные на судах, а также детали старых судов [3, 4], но, по некоторым данным, в отдельных случаях использовалась местная древесина (плавник) [8]. Самым известным свидетельством многолетнего пребывания промысловиков на Шпицбергене является факт из биографии известного помора Ивана Старостина, который жил там 32 года, из них 15 лет безвыездно, вплоть до 1826 г. [4, 7].

Обновление дендрохронологического банка данных и постоянное совершенствование различных методов датировки (дендрохронологического, радиоуглеродного, археологического) открывают новые возможности для более точного определения возраста обнаруженных на Шпицбергене поселений, а также места происхождения древесины, использованной для их постройки. В работе [8] приведены результаты радиоуглеродной датировки трех русских

поселений XVIII в. (Бернбайнфлюене, Шеннингхолмане, Пальфюодден), обнаруженных в южной части арх. Шпицберген и впервые исследованных экспедицией Краковского Ягеллонского университета (Польша) в 1982–1985 гг.

Основной целью данного исследования является оценка возможности применения современных методов дендроанализа с использованием длинных хронологий для точной датировки и определения места происхождения строительного материала поселений на Шпицбергене, а также для изучения климатической и ледовой обстановки в период его освоения.

Основные задачи, сформулированные для решения поставленной цели:

1) получение точной датировки и определение места происхождения образцов древесины из трех русских поселений (Бернбайнфлюене, Шеннингхолмане, Пальфюодден) при помощи современных методов дендрохронологии, сравнительная оценка с данными радиоуглеродного анализа [8];

2) анализ климатической ситуации и реконструкция ледовой обстановки в Баренцевом море в период освоения Шпицбергена с использованием собственной древесно-кольцевой хронологии по Кольскому п-ову (1445–2005 гг.) [9].

## Материалы

Материалы исследования — образцы древесины, обнаруженные в местах поселений русских поморов в южной части арх. Шпицберген 1982–1985 гг. экспедицией Краковского Ягеллонского университета (Польша) [8]. Исследуемые образцы являются фрагментами деревянных домов, монументальных крестов и обломков кораблей. Всего было исследовано 8 образцов древесины (3 образца лиственницы и 5 — сосны), представляющих собой различные конструктивные элементы жилых помещений трех поселений (Бернбайнфлюене, Шеннингхолмане, Пальфюодден), которые датируются XVIII в. [8] (рис. 1). Ниже приводится описание поселений [4, 8].



Рис. 1. Карта русских поселений и мест обнаружения образцов (цветные кружки): Бернбайнфлюене (SPITS12 и SPITS20 — красный), Шеннингхолмане (SPITS7 — коричневый), Пальфюодден (SPITS14 — пурпурный) [8]
 Fig. 1. Map of Russian settlements and sample detection sites (colored circles): Bernbeinfluene (SPITS12 and SPITS20 — red), Schoenningholmane (SPITS7 — brown), Palfuodden (SPITS14 — purple) [8]

**1.** Бернбайнфлюене. Поселение расположено на западном побережье Земли Серкаппланд в 40 м от берега моря, состоит из жилой постройки, креста и погребения. Жилая постройка (4×3,3 м) с кирпичной печкой и пристроенными сенями (2,1×2,1 м) создавалась из разнородного материала: в фундаменте находятся массивные бревна, вероятно из плавника, стены состоят из заготовок, скорее всего привезенных с материка, пол выложен из палубных досок корабля (рис. 2). В помещении найдена каолиновая курительная трубка, датированная временным интервалом 1770–1810 гг. [8].

522 J Chochorowski & M Krapiec



Рис. 2. Реконструированное жилище поселения поморов Бернбайнфлюене на арх. Шпицберген, датированное XVIII в. [8]



Для анализа использованы следующие образцы [8]:

а) SPITS12 (сосна, 54 кольца) — фрагмент доски пола, возможно, часть палубы корабля (вторично использованный материал);

б) SPITS20 (лиственница, 125 колец) — фрагмент бревна из фундамента стены *N* постройки, скорее всего, плавник.

2. Шеннингхолмане. Жилищно-хозяйственный комплекс расположен на южном берегу залива Хорнсунн в 130 м от устья речки, предназначен для одновременного проживания целой артели промысловиков. Комплекс состоит из трех построек, двух крестов и могильника. Все три дома были построены из однородного материала — хорошо обработанных бревен (лиственница) и, скорее всего, представляют собой готовые срубы, привезенные с материка: *А* (жилище кормщика); *В* (жилище для группы людей); *С* (баня). Образец SPITS7 (лиственница, 79 колец), являющийся фрагментом балки стены объекта *C* [8], был проанализирован в данной работе.

**3.** Пальфюодден. Поселение находится на северном участке Земли Серкаппланд, на мысе Пальфюодден между морем и озером, состоит из трех домов (*A*, *B*, *C*), креста и могильника. Дом *A* был построен из хорошо обработанных, заранее заготовленных бревен, пол состоял из корабельных досок. Фрагменты обнаруженной каолиновой трубки позволили установить вероятное время

использования жилища *A* как 1720 г. [8]. Объект *B* выстроен в основном из плавника и по своей конструкции напоминает постройку в Бернбайнфлюене [8] (см. рис. 2). Деревянные детали дома *C* практически не сохранились, найденный фрагмент каолиновой трубки указывает на период 1750–1760 гг. — как время вероятного использования жилища [8]. В отличие от комплекса Шеннингхолмане, по данным работы [8], все три постройки данного поселения были возведены в различное время. В настоящем исследовании проанализирован образец SPITS14 (сосна, 73 кольца), представляющий собой фрагмент доски пола дома *A*, ранее являвшейся частью палубы корабля [8].

Для анализа климатической ситуации и реконструкции ледовой обстановки в Баренцевом море в период освоения арх. Шпицберген использовалась собственная древесно-кольцевая хронология по Кольскому п-ову (длительностью 561 год — 1445–2005 гг.), составленная из 36 образцов сосны *Pinus sylvestris* L., собранных вблизи северной границы произрастания леса (ст. Лопарская; 68,6 N, 33,3 E) [9].

### Методы исследования

Исследуемые образцы первоначально подверглись стандартной процедуре обработки: ширина годичных колец измерялась с точностью до 0,01 мм с использованием установки Dendrolab 1,0 и программ TREE-RINGS и TSAP [8]. Полученные таким образом «плавающие» хронологии в настоящем исследовании подвергались процедуре стандартизации, перекрестного датирования и кросс-корреляции с использованием программного обеспечения CORINA. В процессе обработки было проанализировано более 200 древесно-кольцевых хронологий из различных регионов прибрежной зоны севера Евразии, включая наши собственные данные (Сибирь, Коми, Карелия, Архангельская обл., Кольский п-ов, Северная Фенноскандия), что позволило установить точные даты и место происхождения исследуемых образцов. В рамках программы CORINA также вычислялись статистические параметры, обеспечивающие надежность результатов, в частности, коэффициенты корреляции и *t*-величины (критерий Стьюдента).

Для некоторых образцов в работе [8] применялся метод радиоуглеродного датирования с последующей калибровкой методом *сопоставления флуктуаций* (wiggle-matching), что позволило их сравнить с абсолютными датами, полученными в рамках настоящей работы.

При получении древесно-кольцевой хронологии по Кольскому п-ову использовались образцы, ширина годичных колец которых измерялась с точностью до 0,01 мм с использованием собственной установки TREMET, состоящей из сканера и соответствующего программного обеспечения [10] с последующим тестированием на оборудовании LINTAB<sup>TM</sup>. Последующая обработка проводилась с применением стандартных методик дендрохронологического анализа (перекрестное датирование, кросс-корреляционный анализ, сравнение с мастер-хронологиями, стандартизация) [11, 12] и современных пакетов программ СОFECHA и ARSTAN. Данная хронология применялась для реконструкции ледовой обстановки в Баренцевом море, адекватность используемой модели реконструкции тестировалась с помощью критерия Фишера. Значимость коэффициентов корреляции и доверительные интервалы оценивались при помощи критерия Стьюдента.

## Результаты и их обсуждение

В результате дендрохронологического анализа удалось успешно датировать и определить предполагаемые места происхождения для четырех образцов из трех поселений (рис. 3, 4):

- a) SPITS12 Бернбайнфлюене (*t* = 5,7; 1759–1812 гг., Белое море, Архангельская обл.);
- б) SPITS20 Бернбайнфлюене (плавник, *t* = 4,9; 1597–1721 гг., район р. Обь и Обской губы);
- в) SPITS7 Шеннингхолмане (*t* = 4,6; 1698–1776 гг., п-ов Ямал, Обская губа);
- г) SPITS14 Пальфюодден (t = 4,7; 1568–1640 гг., район р. Обь и Обской губы).



Рис. 3. Древесно-кольцевые хронологии образцов (жирные линии) и соответствующие мастер-хронологии (тонкие линии), используемые для сравнения:  $a - SPITS12 (t = 5,7); \delta - SPITS20 (t = 4,9);$ s - SPITS7 (t = 4,6); c - SPITS14 (t = 4,7)Fig. 3. Tree-ring chronologies of the samples (bold lines) and the corresponding master chronologies (thin lines) used for comparison:  $a - SPITS12 (t = 5,7); \delta - SPITS20 (t = 4,9);$ s - SPITS7 (t = 4,6); c - SPITS14 (t = 4,7)

Величина *t*-оценки для каждого случая близка к 5 или превышает это значение (рис. 3), что в рамках кросс-корреляционного анализа, как правило, свидетельствует о наличии безусловного совпадения хронологий в конкретных временных интервалах [13]. Образец SPITS12 является фрагментом палубной доски корабля, которую использовали вторично для настила пола в жилище поселения Бернбайнфлюене. В результате анализа получено очень хорошее соответствие (t = 5,7) с хронологией по сосне из района Архангельской обл. (побережье Белого моря) для временного интервала 1759-1812 гг. На рис. 4 места обнаружения вероятного происхождения И данного образца нанесены кружками красного цвета. Известно, что поморы для строительства Шпицбергене поселений на традиционно применяли заранее заготовленную древесину или целые срубы, привезенные с материка, при этом палубные доски использовались вторично для настила пола [3, 4]. С целью последующего использования материала для строительства и отопления на Шпицберген иногда пригоняли старые суда, которые впоследствии разрушали [3]. Об этом косвенно может свидетельствовать большое количество фрагментов судов, найденных на побережье к северо-западу от поселения, которые поморы могли использовать при строительстве дома в Бернбайнфлюене [8].

Второй образец из данного поселения SPITS20 представляет собой фрагмент бревна из фундамента и, скорее всего, является плавником [8]. Присутствие плавника на Шпицбергене обусловлено особенностями морских течений и дрейфа льда вблизи архипелага. По данным исследований [14, 15], основными источниками плавника на архипелаге являются районы рек Северная Двина, Печора, Обь и Енисей. В результате сопоставления выявлено достаточно хорошее совпадение (t = 4,9) образца SPITS20 с хронологией по лиственнице из района Обской губы во временном интервале 1597–1721 гг. (красный кружок на рис. 4). Такое различие в датировках образцов SPITS12 и SPITS20 объясняется тем, что жилое помещение в Бернбайнфлюене построено из очень разнородного материала [8], а плавник из лиственницы может сохраняться в хорошем и пригодном для строительства состоянии десятки лет и более.

Редкое использование плавника поморами при строительстве поселений на Шпицбергене косвенно подтверждается тем фактом, что только 2 образца из 26 (SPITS1 и SPITS20), обнаруженных в трех русских поселениях на Шпицбергене, являлись плавником и оба относились к поселению Бернбайнфлюене [8]. Наиболее близкая к настоящему времени граница временного интервала образца SPITS1 (145 колец, лиственница, фрагмент бревна из фундамента стены *S*) была определена при помощи радиоуглеродного анализа и метода wiggle-matching как 1750 г. [8], что согласуется с возрастом образца SPITS20, определенным при помощи дендрохронологического анализа в данном исследовании. Возраст найденной на месте данной постройки каолиновой трубки (1770–1810 гг.), свидетельствующий о времени использования
жилища в Бернбайнфлюене, а также радиоуглеродное датирование образцов данного поселения [8] не противоречат результатам настоящего анализа. Величина *t*-оценки для каждого случая близка к 5 или превышает это значение (рис. 3), что в рамках кросс-корреляционного анализа свидетельствует, как правило, о безусловном совпадении хронологий в конкретных временных интервалах [13]. Образец SPITS12 является фрагментом палубной доски корабля, вторично используемой для настила пола в жилище поселения Бернбайнфлюене. В результате анализа получено очень хорошее соответствие (t = 5,7) с хронологией по сосне из района Архангельской обл. (побережье Белого моря) для временного интервала 1759–1812 гг. На рис. 4 места обнаружения и вероятного происхождения данного образца нанесены кружками красного цвета. Известно, что поморы для строительства поселений на Шпицбергене традиционно применяли заранее заготовленную древесину или целые срубы, привезенные с материка, при этом палубные доски использовались вторично для настила пола [3, 4]. С целью последующего использования материала для строительства и отопления на Шпицберген иногда пригоняли старые суда, которые впоследствии разрушали [3]. Об этом косвенно может свидетельствовать большое количество фрагментов судов, найденных на побережье к северо-западу от поселения, которые поморы могли использовать при строительстве дома в Бернбайнфлюене [8].



Рис. 4. Карта предполагаемых мест происхождения исследуемых образцов и соответствующих мастерхронологий (цветные кружки — цвета соответствуют рис. 1). Синим цветом нанесены места расположения всех хронологий, использованных при анализе

Fig. 4. The map of the expected locations of the samples considered and corresponding master chronologies (colored circles — colors correspond to Fig. 1). The locations of all the chronologies used in the analysis are marked in blue

Образец SPITS7 из поселения Шеннингхолмане был успешно датирован (t = 4,6, 1698-1776 гг.) при сопоставлении с хронологией из района Обской губы, п-ов Ямал. На картах данному образцу соответствуют кружки коричневого цвета (рис. 1, 4). Известно, что все три жилища данного поселения построены из лиственницы в одно и то же время и являются, скорее всего, готовыми срубами, привезенными с материка [8]. Результаты анализа, проведенного в настоящем исследовании, указывают на район Обской губы как на наиболее вероятное место происхождения образцов данного поселения. Этот участок, который с XV–XVI вв. фактически являлся одним из мест удаленных промыслов русских поморов, расположен вблизи Мангазейского морского и Енисейского речного и волокового ходов [5], что подтверждают наши результаты, поскольку

в данном месте основным строительным материалом являлась лиственница, которая могла быть переправлена по Мангазейскому ходу в район Архангельска для последующего использования. Датировка образца SPITS2 из данного поселения, являющегося фрагментом поклонного креста, при помощи радиоуглеродного анализа и метода wiggle-matching [8] согласуется с нашими результатами.

В результате кросс-корреляционного анализа выявлено достаточно хорошее соответствие (*t* = 4,7) образца SPITS14 из поселения Пальфюодден с хронологией по сосне из района р. Обь и Обской губы для временного интервала 1568–1640 гг. Данный образец являлся фрагментом палубной доски, которая была использована при строительстве жилища *A* данного поселения [8]. Возможно, что судно могло быть переправлено из Мангазеи в Архангельск и впоследствии использовалось в качестве строительного материала для жилого комплекса *A* поселения Пальфюодден. Найденные фрагменты каолиновой трубки позволили установить вероятное время использования жилища *A* как 1720 г. [8], что не противоречит результатам настоящего исследования.

Важными факторами для успешного ведения промыслов на Шпицбергене являлись климатические условия и связанная с ними ледовая обстановка в исследуемом регионе. Освоение Шпицбергена русскими поморами происходило во время Малого ледникового периода, т. е. в период глобального похолодания. Для анализа климатической ситуации в Евро-Арктическом регионе использовались данные о среднегодовой температуре в Европе за последнюю тысячу лет, а также собственная древесно-кольцевая хронология по Кольскому п-ову длительностью 561 год (1445–2005 гг.) [9] (рис. 5).



Рис. 5. Вариации среднегодовой температуры в Европе за последнюю тысячу лет (вверху) и индексов годичного прироста сосны *Pinus sylvestris* L. на Кольском п-ове (1445–2005 гг.) вместе с 23-летним усреднением (красная линия) (внизу). Вертикальными линиями обозначены наиболее мощные вулканические извержения (VEI ≥ 5) [9, 16]

Fig. 5. Variations of the average annual temperature in Europe for the last thousand years (above) and tree-ring indices of *Pinus sylvestris* L. at the Kola Peninsula (1445–2005) together with a 23-year moving average (red line) (bottom). The most powerful volcanic eruptions (VEI  $\geq$  5) [9, 16] are indicated by vertical lines



Рис. 6. Регрессионная зависимость ледовитости (*I*) в Баренцевом море от ширины годичных колец (*d*) по данным древесно-кольцевой хронологии по Кольскому п-ову за период 1900–2004 гг.

Fig. 6. Regression dependence of ice cover (1) in the Barents Sea on the tree-ring widths (d) according to the Kola tree-ring chronology for the period 1900–2004



Рис. 7. Реконструированный ряд (тонкая линия) ледовитости в Баренцевом море в мае-августе с 23-летней скользящей средней (сплошная жирная линия) и 95 %-м доверительным интервалом (штриховые линии); ряд инструментальных наблюдений с 1900 г. (красная линия) [19]

Fig. 7. Reconstructed ice cover in the Barents Sea in May-August (thin line) with a 23-year moving average (solid bold line) and 95 % confidence interval (dashed lines); instrumental observations since 1900 (red line) [19]

Из рис. 5 видно, что имеется достаточно хорошее соответствие между долговременными вариациями средней температуры в Европе и климатическими изменениями на Кольском п-ове: похолодание, связанное с Малым ледниковым периодом, отчетливо проявилось в двух записях. На фоне развития Малого ледникового периода заметны также значительные похолодания и уменьшения радиального прироста, которые связаны с глобальными минимумами солнечной активности — минимумами Шперера (1400-1540 гг.), Маундера (1645–1715 гг.), Дальтона (1790–1830 гг.) и Глэйсберга (1890-1910 гг.) (рис. 5). В работах [9, 16, 17] показано, что наиболее мощные (VEI $\geq$  5, Volcanic Explosivity Index) извержения низкоширотных вулканов приводят к уменьшению температуры и замедлению роста деревьев на Кольском п-ове и в Северной Лапландии в течение нескольких лет. Поэтому на рис. 5 нанесены даты извержений мощных (VEI ≥ 5) низкоширотных вулканов [9, 16]. Наиболее значительное уменьшение годичного прироста (на 25 % по отношению к предыдущему году) имело место в 1601 г., что явилось следствием извержения вулкана Уайнапутина в Перу в феврале-марте 1600 г. [9, 16, 17].

Летом 1601 г. в центральной России повсеместно отмечались сильные заморозки, которые привели к гибели урожая, сильному голоду и смерти более 500 тыс. человек в 1601– 1603 гг., вследствие чего возникли социальные беспорядки, положившие, по мнению некоторых исследователей, начало Смутному времени [18]. Как видно из рис. 5, значительное уменьшение радиального прироста во временном интервале 1780–1830 гг. совпало по времени не только

с Дальтоновским минимумом солнечной активности, но и с несколькими мощными вулканическими извержениями, включая извержение вулкана Тамбора в 1815 г. (Индонезия; VEI = 7), что, очевидно, явилось дополнительным фактором понижения температуры в этот период. С другой стороны, климатические оптимумы в первой половине XVI и XVIII столетий (рис. 5), связанные с максимумами солнечной активности и отсутствием значимых вулканических извержений [9], могли способствовать развитию мореплавания и освоению промыслов на Шпицбергене русскими поморами в данный период времени, что подтверждается историческими и археологическими фактами [3–5]. Аналогичная ситуация, и даже значительно более благоприятная с точки зрения изменений климата, складывалась в XII–XIII вв. в период освоения викингами Гренландии, в южной части которой в это время «прекрасно росли карликовые деревья, ягоды, простирались тучные пастбища» [3] (рис. 5). Таким образом, оценка климатических

условий не исключает возможного освоения Шпицбергена викингами в XII–XIII вв., хотя никаких археологических находок, подтверждающих их присутствие в этот отрезок времени на архипелаге, не обнаружено [3, 4, 7].

Для создания более полного представления о климатической ситуации в Евро-Арктическом регионе в прошлом была произведена реконструкция ледовой обстановки на основе данных о ледовитости в Баренцевом море в мае-августе [19] и собственной древесно-кольцевой хронологии по Кольскому п-ову. На рис. 6 представлена регрессионная зависимость величины ледовитости I(%) от ширины годичного прироста колец d (мм) за период 1900–2004 гг. Проведенный регрессионный анализ показал наличие значимой отрицательной связи между двумя переменными (r = -0,52, p < 0,001), что дало основания для выполнения реконструкции ледовитости в Баренцевом море на основе древесно-кольцевой хронологии по Кольскому п-ову с 1445 по 2005 гг. (рис. 7). Адекватность модели реконструкции ледовитости оценивалась по критерию Фишера (F(1,103) = 38,3, p < 0,001).

Как видно из рис. 7, наиболее высокие значения ледовитости за последние 560 лет наблюдались в начале XIX и XX вв., а ледовые условия в Баренцевом море в первой половине XVI в. приблизительно соответствовали современным условиям. С учетом указанной аналогичности ледовой ситуации в первой половине XVI в. и в конце XX — начале XXI вв. карта границы ледового покрова, составленная по данным наблюдений Норвежского полярного института (НПИ) за август 1963–1989 гг. [20] (рис. 8), может свидетельствовать о возможности существования раннего маршрута поморов к Шпицбергену вдоль западных берегов Новой Земли до ее северной оконечности и дальше в западном направлении вдоль кромки льда [3, 7]. В период Маундеровского минимума солнечной активности уровень ледовитости в Баренцевом море незначительно отличался от современного (рис. 7). Резкое увеличение ледового покрова в начале XVIII в. могло привести к снижению промысловой деятельности в этот период [4]. Следует что полученные результаты подтверждаются другими независимыми отметить, палеоклиматическими данными и данными реконструкций для исследуемого региона [4, 21].



Рис. 8. Карта границы ледового покрова по данным наблюдений НПИ за август 1963–1989 гг. [20]: *1* — открытая вода; 2 — промежуточная зона; 3 — вероятность встречи со льдом (50–100 %)

Fig. 8. The map of the ice cover boundary according to the observations of the Norwegian Polar Institute for August 1963–1989 [20]:
1 — open water; 2 — intermediate zone; 3 — probability of meeting with ice (50–100 %)

#### Выводы

1. При помощи современных методов дендрохронологического анализа и статистики проведены датировки и определены вероятные места происхождения образцов древесины, используемой для жилых построек трех поселений русских поморов на юге Шпицбергена. Места происхождения образцов SPITS12 (t = 5,7; 1759–1812 гг.) и SPITS20 (плавник, t = 4,9; 1597–1721 гг.) из поселения Бернбайнфлюене относятся к районам Белого моря (Архангельская обл.) и Обской губы соответственно. Вероятное происхождение образца SPITS7 (t = 4,6; 1698–1776 гг.) из Шеннингхолмане также связано с районом Обской губы. Место происхождения образца SPITS14 из поселения Пальфюодден (t = 4,7; 1568–1640 гг.), который является фрагментом палубной доски судна, использованной вторично, относится к району Обской губы. Полученные результаты не противоречат данным радиоуглеродного датирования [8] и свидетельствуют о возможном использовании лиственницы и старых судов из района города Мангазея в качестве строительного материала поселений русских поморов на арх. Шпицберген.

2. Анализ климатической ситуации и ледовой обстановки в Баренцевом море, реконструированной на основе собственной древесно-кольцевой хронологии по Кольскому п-ову (1445–2005 гг.), свидетельствуют о благоприятных для промысла условиях в первой половине XVI в., что могло способствовать освоению арх. Шпицберген русскими поморами в этот период.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Arlov T. B. The discovery and early exploitation of Svalbard. Some historiographical notes // Acta Borealia. 2005. Vol. 22. P. 3–19. 2. Hultgreen T. The chronology of the Russian hunting stations on Svalbard: A reconsideration // Acta Borealia. 2005. Vol. 22. Р. 79–91. 3. Старков В. Ф. Очерки истории освоения Арктики: в 2 т. Т. I: Шпицберген. М.: Науч. мир, 2009. 96 с. 4. Старков В. Ф., Державин В. Л., Захаров В. Г. Жилищно-хозяйственные комплексы // Материальная культура русских поморов по данным исследований на архипелаге Шпицберген. М.: Науч. мир, 2007. Вып. III. 152 с. 5. Старков В. Ф. Удаленные промыслы русских поморов в XV–XVIII вв. // Краткие сообщения Института археологии (КСИА). 2015. Вып. 241. С. 328–333. 6. Белов М. И., Овсянников О. В., Старков В. Ф. Мангазейский морской ход // Мангазея. Л.: Гидрометеоиздат, 1980. Ч. І. 164 с. 7. Гортер А., Гортер В., Минаева Т. Памятники поморской промысловой культуры на 80° северной широты // Соловецкое море. 2011. № 10. С. 86–96. 8. Chochorowski J., Krapiec M. Dating of Russian hunting stations in South Spitsbergen using dendrochronological and radiocarbon analyses // Radiocarbon. 2017. Vol. 59. P. 519-530. 9. Impact of powerful volcanic eruptions and solar activity on the climate above the Arctic Circle / E. A. Kasatkina [et al.] // Geofisica Internacional. 2018. Vol. 57. P. 317-333. 10. Канатьев А. Г., Шумилов О. И., Касаткина Е. А. Программное обеспечение для дендрохронологических измерений // Приборы и техника эксперимента. 2014. № 2. C. 127–130. 11. Holmes R. L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement // Tree-Ring Bulletin. 1983. Vol. 44. P. 69-75. 12. Cook E. R., Kairiukstis L. Methods of dendrochronology. Dordrecht: Kluwer Academic Publishing, 1990. 211 p. 13. Matskovsky V., Dolgikh A., Voronin K. Combined dendrochronological and radiocarbon dating of three Russian icons from the 15<sup>th</sup>-17<sup>th</sup> century // Dendrochronologia. 2016. Vol. 39. P. 60-68. 14. Eggertson O. Driftwood as an indicator of relative changes in the influx of Arctic and Atlantic water into the coastal areas of Svalbard // Polar Res. 1994. Vol. 13. P. 209–218. 15. Timber logging in central Siberia is the main source for recent Arctic driftwood / L. Hellmann [et al.] // Arctic, Antarctic, and Alpine Res. 2015. Vol. 47. P. 449-460. 16. Palaeovolcanos, solar activity and tree-rings from Kola Peninsula (northwestern Russia) over the last 560 years / O. I. Shumilov [et al.] // Intern. J. Environmental Res. 2011. Vol. 5. Р. 855-864. 17. Последствия мощных вулканических извержений по дендрохронологическим данным / Е. А. Касаткина [и др.] // Известия физики атмосферы и океана. 2013. Т. 49. C. 469-476. 18. Verosub K. L., Lippman J. Global impacts of the 1600 eruption of Peru's Huaynaputina // EOS Transactions. 2008. Vol. 89. Р. 141-142. 19. Бойцов В. Д. Изменчивость температуры воды Баренцева моря и ее прогнозирование. Мурманск: Изд-во ПИНРО, 2004. 292 с. 20. Hisdal V. Svalbard Nature and History. Oslo: Norsk Polarinstitutt, 1998. 125 р. 21. Захаров В. Г. Особенности колебаний ледников приатлантической Арктики (конец XIX начало XXI вв.) // Сложные системы. 2014. № 4. С. 33-45.

#### Сведения об авторах

Шумилов Олег Иванович — доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Полярного геофизического института, Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН E-mail: oleg@aprec.ru

Касаткина Елена Алексеевна — доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник Полярного геофизического института, Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН

E-mail: ekasatki@yandex.ru

Крапиек Марек — доктор наук, профессор Научно-технического университета

E-mail: mkrapiec@agh.edu.pl

*Хохоровски Ян* — доктор наук, профессор Института археологии Ягеллонского университета E-mail: j.chochorowski@uj.edu.pl

Жиховска-Крапиек Эльжбета — доктор наук, доцент Научно-технического университета E-mail: szycha@geol.agh.edu.pl

*Канатьев Александр Геннадьевич* — младший научный сотрудник Полярного геофизического института

# Author Affiliation

Oleg I. Shumilov — Dr. Sci. (Physics & Mathematics), Chief Researcher, Polar Geophysical Institute; Institute of North Industrial Ecology Problems of KSC RAS E-mail: oleg@aprec.ru Elena A. Kasatkina — Dr. Sci. (Physics & Mathematics), Senior Researcher, Polar Geophysical Institute; Institute of North Industrial Ecology Problems of KSC RAS E-mail: ekasatki@yandex.ru Marek Krapiec — PhD, Professor, University of Science and Technology

E-mail: mkrapiec@agh.edu.pl

Jan Chochorowski - PhD, Professor, Institute of Archaeology, Jagiellonian University

E-mail: j.chochorowski@uj.edu.pl

*Elzbieta Szychowska-Krapiec* — PhD, Associate Professor, University of Science and Technology E-mail: szycha@geol.agh.edu.pl

Alexander G. Kanatjev - Junior Researcher, Polar Geophysical Institute

# Библиографическое описание статьи

Дендрохронологическая датировка русских поселений на юге Шпицбергена: сравнение с результатами радиоуглеродного анализа и палеоклиматической обстановкой / *О. И. Шумилов* [*u др.*] // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2018. — № 4 (10). — С. 209–221.

#### Reference

Shumilov Oleg I., Kasatkina Elena A., Krapiec Marek, Chochorowski Jan, Szychowska-Krapiec Elzbieta, Kanatjev Alexander G. Tree-Ring Dating of Russian Settlements at Southern Spitsbergen: Comrarison with the Results of Radiocarbon Analysis and Palaeoclimatic Situation. Herald of the Kola Science Centre of the RAS, 2018, vol. 4 (10), pp. 209–221 (In Russ.).

# II Всероссийская конференция «Гелиогеофизические исследования в Арктике»

# Полярный геофизический институт и Совет по космосу РАН, 24–26 сентября 2018 г.

В период с 24 по 26 сентября 2018 г. в Мурманске проходила II Всероссийская конференция «Гелиогеофизические исследования в Арктике», организаторами которой выступили Полярный геофизический институт и Совет по космосу РАН.

Цель конференции — способствовать координации научных исследований, регулярных наблюдений и наблюдательных кампаний, проводимых профильными институтами в арктических регионах как самостоятельно, так и в кооперации с другими российскими научными организациями.

Работа конференции проходила в рамках четырех секций:

Секция 1. Фундаментальные исследования причинно-следственных связей солнечной активности с возмущениями магнитосферно-ионосферной системы (космической погодой).

Секция 2. Воздействие космической погоды на ионосферу и верхнюю атмосферу Арктики. Эксперименты по управляемому воздействию на ионосферу.

Секция 3. Влияние гелиогеофизических факторов на технические системы и биосферу полярных и приполярных областей Земли.

Секция 4. Методы и средства мониторинга космической погоды, рекомендации по ее прогнозу с целью парирования негативных последствий.

Кроме 35 устных научных докладов и обобщающей дискуссии по обозначенным выше направлениям, в рамках секции 5 «Комплексная сеть наблюдательных средств и базы оперативных гелиогеофизических данных в арктическом регионе РФ» представлено 20 технических стендовых докладов, посвященных обсерваториям, видам наблюдений, приборам и т. п.

В общей сложности в работе конференции приняли участие более 60 научных работников из 15 научных организаций из городов Москва, Санкт-Петербург, Мурманск, Апатиты и Нижний Новгород, а также студенты и курсанты МГТУ, МАГУ и института «Морская академия». В обсуждении актуальных прикладных вопросов арктической геофизики участвовали начальник и сотрудник Гидрометеорологической службы МО РФ и представитель Совета по космосу РАН.

К началу конференции был издан сборник тезисов, по ее итогам будет опубликован сборник трудов. Мурманское телевидение подготовило небольшой сюжет о конференции для новостного блока телеканала Россия-1, Вести-Мурман. В один из дней состоялась ознакомительная экскурсия участников конференции на атомоход «Ленин».

В ходе заключительной дискуссии участники пришли к единодушному мнению о необходимости продолжить укрепление существующих, восстановление утраченных, а также налаживание новых горизонтальных связей между профильными институтами и организациями. Признано также целесообразным регулярно проводить подобные конференции.

# IX Международная научно-практическая конференция «Север и Арктика в новой парадигме мирового развития. Лузинские чтения — 2018»

# ФИЦ «Кольский научный центр», Институт экономических проблем им. Г. П. Лузина, Правительство Мурманской обл., Мурманский арктический государственный университет (МАГУ), Мурманский государственный технический университет (МГТУ), 24–28 сентября 2018 г.

В работе IX Международной научно-практической конференции в рамках «Лузинских чтений приняли участие более 350 представителей научных и образовательных учреждений России, органов власти, предприятий, а также зарубежных ученых.

В соответствии с программой мероприятия проведено пленарное заседание, где было представлено 11 докладов, с которыми выступили: первый зам. губернатора Мурманской обл., к. т. н. А. М. Тюкавин; зам. председателя Президиума Коми научного центра УрО РАН, чл.-корр. РАН В. Н. Лаженцев; зам. директора по научной работе Института проблем нефти и газа РАН, чл.-корр. РАН В. И. Богоявленский; зампредседателя Президиума ФИЦ КНЦ РАН, д. т. н. В. А. Маслобоев; руководитель Центра наноматериаловедения ФИЦ КНЦ РАН, чл.-корр. РАН А. И. Николаев; зав. кафедрой экономической теории и менеджмента Института экономики и права ПетрГУ, д. э. н., проф. В. Б. Акулов; директор Высшей школы основ экономики и менеджмента Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, д. э. н., проф. Е. А. Мильская.

В рамках конференции была организована работа 8 тематических секций:

Секция І. Глобальные процессы и развитие транспортно-логистических систем в российской Арктике.

Секция II. Рациональное природопользование на Севере и в Арктике: минерально-сырьевая база, топливно-энергетический комплекс — экономика и экология.

Секция III. Устойчивое социальное развитие регионов и местных сообществ Арктики.

Секция IV. Инновационное развитие Арктики: экономика, переработка минерального сырья, новые материалы специального назначения.

Секция V. Регионы и муниципалитеты российской Арктики: тенденции, стратегии, перспективы социально-экономического развития.

Секция VI. Финансово-инвестиционный потенциал Севера и Арктики России.

Секция VII. Север и Арктика: междисциплинарные исследования.

Секция VIII. Школа молодых исследователей Арктики: «Перспективы развития Арктики — междисциплинарный подход».

Также были проведены круглые столы: «Исследования Севера и Арктики: вопросы организации исследований и представления результатов в научных публикациях» и «Международное научное сотрудничество в Арктике: от истории к современным возможностям». Участниками конференции было представлено более 120 выступлений и докладов.

На базе Апатитского филиала МГТУ и Филиала МАГУ в городе Апатиты была проведена Школа молодых исследователей Арктики, участниками которой стали стали около 100 человек. Ее ведущими стали: д. э. н., проф. Е. А. Мильская (директор Высшей школы основ экономики и менеджмента, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого), к. э. н. О. Н. Сеелева (доцент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого), к. б. н. Е. А. Боровичев (зам. директора по научной работе Института проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, г. Апатиты), к. т. н. А. Б. Котомин (в. н. с. Института экономических проблем им, Г. П. Лузина КНЦ РАН, г. Апатиты).

Отличительной чертой «Лузинских чтений — 2018» стал междисциплинарный подход в обсуждении проблем и перспектив развития северных и арктических территорий: проблемы развития Севера и Арктики совместно обсуждали ученые-экономисты, геологи, экологи, биологи, географы, социологи, представители других дисциплин.

#### XV Всероссийская научная школа «Математические исследования в естественных науках» Геологический институт КНЦ РАН при содействии Кольского отделения Российского минералогического общества, 22 октября 2018 г.

Очно и заочно в конференции приняли участие ученые из различных городов страны: Апатиты, Санкт-Петербург, Москва, Владимир, Сыктывкар, Казань и Благовещенск, чем подтвердили ее всероссийский статус.

На открытии конференции с приветственной речью выступил директор Геологического института Н. Е. Козлов, отметивший, в частности, возросшее количество участников из Кольского научного центра. Программа школы состояла из двух секций: «Геология, математика и кристаллография» и «Геофизика, медицина и биология». Как среди новых, так и уже среди известных докладчиков было приятно увидеть участника еще первой научной школы и впоследствии неоднократного гостя Я. В. Кучериненко, поделившегося новыми результатами в области «высокой» кристаллографии. Другой «резидент» конференции — научный сотрудник Полярного геофизического института В. И. Демин на животрепещущем примере г. Апатиты поведал о «подводных камнях», подстерегающих исследователей при моделировании, так называемого, городского острова тепла. По окончании конференции состоялась живая дискуссия, в ходе которой участники единодушно пришли к выводу о поддержке в стенах института мероприятий подобного формата, и высказали конструктивные предложения по их дальнейшей организации.

По результатам работы конференции будет опубликован очередной номер журнала «Математические исследования в естественных науках».

Комплексные исследования природы Шпицбергена и прилегающего шельфа: тез. докл. XIV Всерос. науч. конф. с междунар. участием (г. Мурманск, 30 октября — 2 ноября 2018 г.). — Апатиты: ФИЦ «КНЦ РАН», 2018. — 33 с.

Представлены материалы XIV Всероссийской научной конференции с международным участием «Комплексные исследования природы Шпицбергена и прилегающего шельфа» (г. Мурманск, 30 октября — 2 ноября 2018 г.), посвященные различным аспектам современных исследований архипелага.

Локшин, Э. П. Переработка апатитового концентрата методом сорбционной конверсии 978-5-91137-372-6 / Э. П. Локшин, О. А. Тареева, Т. А. Седнева. — Апатиты: ФИЦ «КНЦ РАН», 2018. — 64 с.: ил.

Обобщены результаты исследований по разработке нового метода переработки апатитового концентрата, основанного на разложении концентрата в фосфорнокислом растворе в присутствии сульфокатионита с получением фосфорной кислоты (который содержит катионы апатитового концентрата сорбента), и на переработке сорбента с получением целевых продуктов — редкоземельного концентрата, карбоната кальция, обогащенного стронцием карбонатного продукта.

Исследованы закономерности сорбции металлов из фосфатных растворов и десорбции катионов из сульфокатионита концентрированными растворами солей натрия. Обсуждается механизм сорбции и десорбции полизарядных катионов. Изучены особенности гидролитического осаждения целевых продуктов из элюатов на основе концентрированных растворов солей натрия, методы регенерации используемых реагентов. Предложена практически безотходная технологическая схема комплексной переработки апатитового концентрата, обсуждаются ее преимущества по сравнению с известными технологиями. Технология перспективна и для переработки фосфоритов.

Издание предназначено для инженерно-технических работников промышленности и научных организаций, предпринимателей, интересующихся проблемами комплексной переработки минерального сырья, в частности фосфатного, полезно студентам, обучающимся по соответствующим направлениям.

*Светочев, В. Н.* Гренландский тюлень: биология, экология, промысел / В. Н. Светочев, О. Н. Светочева; [отв. ред. Н. Н. Кавцевич]; Мурман. мор. биол. ин-т Кольского науч. центра РАН. — Апатиты: ФИЦ «КНЦ РАН», 2018. — 174 с.

Представлены современные основные методы исследования и результаты многолетних исследований авторов по биологии и экологии гренландского тюленя беломорской популяции. Приведены материалы о распределении, миграциях, численности гренландского тюленя в Белом и Баренцевом морях. Изучены особенности формирования щенных залежек, деторождение, рост и развитие тюленей беломорской популяции. Сделана оценка энергетических потребностей гренландского тюленя, показаны трофические взаимоотношения видов настоящих тюленей в Белом море. Приводятся материалы по уязвимости и основным рискам для беломорской популяции в условиях промышленного освоения шельфа северных морей. Подробно рассматривается история и современное состояние промысла гренландского тюленя.

Север и Арктика в новой парадигме мирового развития. Лузинские чтения — 2018: материалы IX Междунар. науч.-практ. конф. (Апатиты, 24–28 сентября 2018 г.) / под общ. ред. Р. В. Бадылевича, Л. О. Залкинд. — Апатиты: ФИЦ «КНЦ РАН», 2018. 158 с.

Представлены материалы IX Международной научно-практической конференции «Север и Арктика в новой парадигме мирового развития. Лузинские чтения — 2018», основной задачей которой является формирование научного и практического видения будущего Севера и Арктики на основе всестороннего обсуждения экспертным сообществом проблем, направлений и тенденций развития в современных сложных геополитических и экономических условиях.

Тематика охватывает широкий круг вопросов, ставших предметом научных дискуссий на пленарном и секционных заседаниях конференции: глобальные процессы и развитие транспортно-логистических систем в российской Арктике; рациональное природопользование на Севере и в Арктике: минерально-сырьевая база, топливно-энергетический комплекс —

экономика и экология; устойчивое социальное развитие регионов и местных сообществ Арктики; инновационное развитие Арктики: экономика, переработка минерального сырья, новые материалы специального назначения; регионы и муниципалитеты российской Арктики: тенденции, стратегии, перспективы социально-экономического развития; финансово-инвестиционный потенциал Севера и Арктики России; Север и Арктика: междисциплинарные исследования; проблемы Севера и Арктики России в работах молодых исследователей.

Издание предназначено для широкого круга читателей: органов власти различного уровня, научных работников, преподавателей, аспирантов, магистрантов, студентов, может быть полезно всем, кто интересуется вопросами социально-экономического и научно-технологического развития Севера и Арктики.

Финансовое регулирование развития регионов Крайнего Севера: институциональный аспект / коллектив авторов; под науч. ред. Г. В. Кобылинской. — Апатиты: ФИЦ «КНЦ РАН», 2018. — 150 с.

В коллективной монографии исследуются процессы формирования институциональных условий финансового регулирования регионального развития. Объектом исследования выступают регионы Крайнего Севера. Внимание концентрируется на поэтапном построении механизма финансового регулирования: анализируется функционирование налогово-бюджетной системы с позиции возможностей обеспечения социальных услуг и использования рычагов воздействия на экономическое развитие регионов. Оцениваются финансовая обеспеченность инвестиционной деятельности и влияние на данный процесс регулирующих воздействий федерального и регионального уровня. Результативность финансового регулирования развития регионов Крайнего Севера определяется посредством оценки финансового потенциала исследуемых субъектов РФ.

Работа рассчитана на широкий круг специалистов, включая научных работников и преподавателей, государственных и муниципальных служащих.

Вестник Кольского научного центра РАН. — Апатиты: ФИЦ «КНЦ РАН», 2018. — № 2 (10). — 143 с.

Вестник Кольского научного центра РАН. — Апатиты: ФИЦ «КНЦ РАН», 2018. — № 3 (10). — 232 с.

Север и рынок: формирование экономического порядка: науч.-информ. журн. / Ин-т экон. проблем им. Г. П. Лузина КНЦ РАН. — Апатиты: ФИЦ «КНЦ РАН», 2018. — № 1 (57). — 151 с.

Север и рынок: формирование экономического порядка: науч.-информ. журн. / Ин-т экон. проблем им. Г. П. Лузина КНЦ РАН. — Апатиты: ФИЦ «КНЦ РАН», 2018. — № 2 (58). — 158 с.

Север и рынок: формирование экономического порядка: науч.-информ. журн. / Ин-т экон. проблем им. Г. П. Лузина КНЦ РАН. — Апатиты: ФИЦ «КНЦ РАН», 2018.. — № 3 (59). — 188 с.

Труды XV (с междунар. участием) Ферсмановской научной сессии, посвященной 100-летию со дня рождения д. г.-м. н. Е. К. Козлова / Геол. ин-т КНЦ РАН. — 2018. — Вып. 15. — 524 с.

**Гелиогеофизические исследования в Арктике**: сб. тез. Всерос. конф. 24–26 сентября 2018 г. — Апатиты: ФИЦ «КНЦ РАН», 2018. — 79 с.

**Труды Кольского научного центра РАН**. — Апатиты: ФИЦ «КНЦ РАН», 2018. — № 1 (9). — 300 с. — (Химия и материаловедение, вып. 2).

**Труды Кольского научного центра РАН**. — Апатиты: ФИЦ «КНЦ РАН», 2018. — № 2 (9). — 151 с. — (Гуманитарные исследования, вып. 13).

**Труды Кольского научного центра РАН**. — Апатиты: ФИЦ «КНЦ РАН», 2018. — № 3 (9). — 162 с. — (Энергетика, вып. 16).

**Physics of Auroral Phenomena of the 41<sup>th</sup> Annual Seminar**: Abstracts (Apatity, 12–16 March 2018). — Apatity: Print. Kola Science Centre RAS, 2018. — 78 p.

# ЮБИЛЯРЫ



#### РАЗУМОВА Ирина Алексеевна

д. и. н., главный научный сотрудник Центра гуманитарных проблем Баренцрегиона КНЦ РАН.

В 1980 г. окончила Петрозаводский государственный университет по специальности «Русский язык и литература». В 1984 г. защитила кандидатскую диссертацию на тему «Повествовательная стереотипия в русской волшебной сказке». С 1994 г. — ведущий научный сотрудник, зав. сектором фольклора Института языка, литературы и истории Карельского научного центра РАН.

В 2000 г. в Музее антропологии и этнографии РАН (Санкт-Петербург) Ирина Алексеевна защитила докторскую диссертацию на тему «Современный русский семейный фольклор как этнокультурный феномен». Своими учителями считает Б. Н. Путилова, К. В. Чистова. С 2001 по 2003 г. — зав. кафедрой истории и этнологии Государственной полярной академии (Санкт-Петербург). С 2003 г. — главный научный сотрудник в Центре гуманитарных проблем Баренц-региона КНЦ РАН, является крупным специалистом в области филологических и исторических наук.

Сфера научных интересов Ирины Алексеевны обширна: этнография, фольклористика, социальная антропология, устная история. Она занималась изучением этнографии и фольклора этнических групп Европейского Севера России. Впервые в отечественной науке ею была реализована программа и методика изучения устной и письменной культуры семей и историкокультурной памяти родственных сообществ. И. А. Разумова показала возможности интегрального подхода к анализу явлений современной культуры на основе корреляции филологических, социологических, историко-этнографических методов. Ею получены ряд научных результатов в области изучения миграционного поведения населения Севера, механизмов формирования и функционирования локального самосознания, устной истории и социальных практик жителей северных индустриальных городов и традиционных сельских сообществ.

Ирина Алексеевна — член редколлегии журналов «Живая старина» (Москва), «Вестник РГГУ» (Москва), «Ученые записки ПетрГУ» (Петрозаводск), зам. отв. редактора серии «Гуманитарные исследования», входящей в сборник «Труды КНЦ РАН». Член Ассоциации этнологов и антропологов России, Российской социологической ассоциации, чл.-корр. РАЕН.

Ирина Алексеевна — признанный ученый в области этнографии, этнологии и антропологии, профессор кафедры экономики, управления и социологии Апатитского филиала Мурманского арктического государственного университета. Под ее руководством пять учеников успешно защитили кандидатские диссертации по специальности «Этнография, этнология и антропология». Все они являются научными сотрудниками ЦГП КНЦ РАН.

Ирина Алексеевна награждена Почетной грамотой Министерства науки и образования Мурманской области (2010), Почетной грамотой КНЦ РАН (2005), Почетной грамотой ПетрГУ (2009), грамотами Кольского филиала ПетрГУ (2004, 2008, 2014), Почетной грамотой (2015) и благодарственным письмом (2017) главы города Апатиты за большой вклад в укрепление научного и образовательного потенциала города, дипломом лауреата Конкурса монографий и научных трудов, направленных на социально-экономическое и иновационное развитие Мурманской обл. (2013). Имеет благодарность за научное руководство участника конкурса исследовательских работ молодых ученых «Вера и религия в современной России» (Москва, 2013), благодарственное письмо Мурманской государственной областной научной библиотеки за участие в создании электронной библиотеки «Кольский Север» (2014). Ирина Алексеевна — автор более 230 научных публикаций, в том числе 4 монографий, а также автор и составитель 4 фольклорно-исторических собраний. Среди основных публикаций: «Стилистическая обрядность русской волшебной сказки» (1991); «Сказка и быличка» (Мифологический персонаж в системе жанра) (1993); «Потаенное знание современной русской семьи. Быт. Фольклор. История» (2001); «Культурные ландшафты Кольского Севера: города у "Большой Воды" и Хибин: социально-антропологические очерки» (2009); «История семьи Жидких на фоне поморской культуры» (2012).

Поздравляем Ирину Алексеевну с юбилеем и желаем крепкого здоровья, счастья и дальнейших творческих успехов!

#### ВАСИЛЬЕВ Владимир Васильевич



к. геогр. н., ведущий научный сотрудник Института экономических проблем им. Г. П. Лузина КНЦ РАН.

Владимир Васильевич — крупный специалист в сфере развития и размещения производительных сил Севера, анализа структурных сдвигов переходного периода в северных регионах и Мурманской обл., истории освоения зарубежного Севера и его регулирования в современных условиях.

После окончания в 1965 г. Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова начал свою трудовую деятельность в должности экономиста отдела сельскохозяйственного освоения и экономики института «Гипроводхоз» Минмелводхоза СССР. С 1966 по 1970 гг. работал младшим научным сотрудником в Отделе экономических исследований Кольского филиала АН СССР, где занимался вопросами экономической оценки земель. С 1970 по 1986 гг. работал в секторе комплексов Северного и Северо-Западного районов Совета по изучению производительных сил (СОПС) при Госплане СССР: вначале в должности младшего научного сотрудника, в 1978 г. — и. о. старшего научного сотрудника. В 1980 г. защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата географических наук, после чего был избран и утвержден на должность старшего научного сотрудника.

Область его научных интересов была представлена проблематикой развития и размещения производительных сил Европейского Севера СССР, экономическими вопросами формирования Тимано-Печорского ТПК и регионального топливно-энергетического комплекса. По данной тематике им самостоятельно и в соавторстве было подготовлено более 100 научных работ, в том числе 16 опубликованных.

В 1986 г. Владимир Васильевич вернулся на работу в Институт экономических проблем КНЦ РАН на должность ведущего научного сотрудника, где осуществляет научное руководство исследованиями по проблемам районирования территорий Севера и РФ в целом по условиям дискомфортности и транспортной доступности, проводит исследования проблем регулирования и финансирования северного завоза. Кроме того, он осуществляет организационно-информационное взаимодействие Института с комитетами по Северу Совета Федерации и Государственной Думы ФС РФ, Минэкономразвития и Министерством регионального развития РФ, СОПС, ВАК РФ, НИИ труда и социального развития и др.

За добросовестный труд Владимиру Васильевичу неоднократно объявлялись благодарности и вручались премии. В 2007 г. за многолетний добросовестный труд и вклад в укрепление научного потенциала города и региона ему была объявлена благодарность и вручено благодарственное письмо Президиума КНЦ РАН, в 2010 г. за успехи в научной деятельности награжден Почетной грамотой Кольского научного центра РАН. За большой личный вклад в развитие фундаментальных и прикладных научных исследований в сфере развития и размещения производительных сил Севера, анализа структурных сдвигов переходного периода в северных регионах и Мурманской обл. В. В. Васильев награжден Почетной грамотой Президента Российской академии наук.

Поздравляем Владимира Васильевича с юбилеем, желаем ему крепкого здоровья, успехов в делах и благополучия!

# КАМЕНСКИЙ Игорь Леонидович



к. х. н., старший научный сотрудник Геологического института КНЦ РАН.

После окончания в 1961 г. геофизического факультета Ленинградского горного института Игорь Леонидович работал в поисковых геологоразведочных партиях Сосновской экспедиции (г. Иркутск).

С 1965 по 1966 гг. — младший научный сотрудник института Земной коры Ленинградского государственного университета. В 1970 г., после окончания аспирантуры Всесоюзного нефтяного геолого-разведочного института (ВНИГРИ),

защитил диссертацию «Исследование изотопного состава природного гелия» на соискание ученой степени кандидата химических наук. С 1971 по 1980 гг. — младший научный сотрудник ВНИГРИ. С 1982 г. Игорь Леонидович работает в Геологическом институте КНЦ РАН.

Основные направления научной работы — геохимия изотопов гелия, благородных газов, геохронология. Игорь Леонидович — один из высококвалифицированных исследователей и аналитиков России в области изучения и анализа благородных газов на масс-спектрометрической аппаратуре. Занимается экспериментальными работами, связанными с изучением изотопного состава благородных газов (в основном гелия и аргона) в природных материалах земного происхождения, производством изотопных анализов гелия (и других благородных газов) на масс-спектрометре МИ-1201 № 22-78 и МИ-1201 ИГ № 6-91-IV для горных пород и минералов девонских целочно-ультраосновных интрузий Кольского п-ова, ксенолитов типа лерцолитов из разных мест Земли, природных газов Евразии, природных вод.

«Тритий-гелий-3» — метод, предложенный И. Н. Толстихиным и И. Л. Каменским (1969), широко используется в мировой практике при изучении как открытых водных бассейнов (озер, морей, океанов), так и подземных вод. В рамках этого метода время, прошедшее от прекращения обмена газами, растворенными в воде, и газами атмосферы до момента отбора пробы, определяется из соотношения измеренных концентраций трития и гелия, образовавшегося при радиогенном распаде трития.

И. Л. Каменский — участник многих международных (INTAS, IGCP) и отечественных (РФФИ, ОНЗ РАН) научных проектов, является соавтором открытия в 1968 г. мантийного гелия. Опубликовал более 100 научных статей.

Желаем Игорю Леонидовичу крепкого здоровья и дальнейших творческих успехов!



#### ЧАНТУРИЯ Валентин Алексеевич

академик РАН, профессор, доктор технических наук, главный научный сотрудник Института проблем комплексного освоения недр им. акад. Н. В. Мельникова.

Валентин Алексеевич Чантурия — крупнейший ученый и организатор науки в области обогащения полезных ископаемых.

В 1962 г. окончил факультет цветных и редких металлов Московского института стали и сплавов по специальности «Обогащение полезных ископаемых», был направлен в аспирантуру Института горного дела им. А. А. Скочинского. В 1965 г. после досрочной защиты кандидатской диссертации продолжил научную и трудовую деятельность в Институте обогащения твердых горючих ископаемых (1967–1971), затем в Институте физики Земли (1972–1977). В 1973 г. Валентин Алексеевич защитил докторскую диссертацию на тему «Исследование роли энергетического состояния минералов и окислительно-восстановительных свойств водной фазы в процессе флотации», в которой теоретически и экспериментально обосновал использование электрохимических и радиационных воздействий в процессе флотации. Внедрение электрохимического метода на ряде обогатительных фабрик позволило повысить извлечение цветных металлов и снизить расход реагентов.

Тогда же выходят ставшие классическими монографии (Плаксин И. Н., Шафеев Р. Ш., Чантурия В. А. Влияние гетерогенности поверхности минералов на взаимодействие с флотационными реагентами. М.: Наука, 1965; Чантурия В. А., Шафеев Р. Ш., Якушкин В. П. Влияние ионизирующих излучений на процесс флотации. М.: Наука, 1971; Чантурия В. А., Шафеев Р. Ш. Химия поверхностных явлений при флотации. М.: Недра, 1977).

С 1977 г. трудовая деятельность В. А. Чантурия неразрывно связана с Институтом проблем комплексного освоения недр РАН (ИПКОН РАН). Он возглавлял лабораторию оптимизации процессов обогащения полезных ископаемых при комплексном их использовании, был заместителем директора по научной работе, директором ИПКОН РАН (2003–2011). В 1990 г. был избран членом-корреспондентом АН СССР по специальности «Обогащение полезных ископаемых», в 1994 г. — академиком РАН. В настоящее время Валентин Алексеевич — главный научный сотрудник ИПКОН РАН, научный руководитель отдела проблем комплексного извлечения минеральных компонентов из природного и техногенного сырья и аналитического центра изучения природного вещества при комплексном освоении недр.

На основе современных достижений физики полупроводников и химии поверхностных соединений им впервые обоснован механизм взаимодействия реагентов с минералами, разработаны новые методы селекции минералов с близкими технологическими свойствами. Валентином Алексеевичем с сотрудниками теоретически обоснованы и разработаны методы интергранулярного разрушения минеральных компонентов и повышения контрастности свойств минералов на основе использования энергетических воздействий в процессах первичной переработки руд сложного вещественного состава. Впервые в мировой практике разработаны научные основы, аппараты и оптимальные режимы экологически безопасной электрохимической технологии кондиционирования минеральных суспензий и промышленных вод в схемах обогащения полезных ископаемых. Установлен механизм воздействия мощных электромагнитных импульсов на вскрытие микро- и наночастиц благородных металлов, позволивший обеспечить повышение извлечения благородных металлов на 15–30 %.

Результаты этих научных исследований и практических разработок отражены в фундаментальных монографиях (Чантурия В. А., Лунин В. Д. Электрохимические методы интенсификации процесса флотации. М.: Наука, 1983; Чантурия В. А., Дмитриева Г. М., Трофимова Э. А. Интенсификация обогащения железных руд сложного вещественного состава. М.: Наука, 1988; Чантурия В. А., Вигдергауз В. Е. Электрохимия сульфидов. Теория и практика флотации, М.: Наука, 1993; Чантурия В. А., Трубецкой К. Н., Викторов С. Д., Бунин И. Ж. Наночастицы в процессах разрушения и вскрытия геоматериалов. М.: ИПКОН РАН, 2006).

Валентин Алексеевич Чантурия — автор более 450 научных трудов, 15 монографий, 55 изобретений и патентов. Научные разработки реализованы на крупнейших горнообогатительных предприятиях страны и за рубежом: АК «АЛРОСА», ПАО «ГМК "Норильский никель"», Уральской горно-металлургической компании и других.

Многогранна и плодотворна научно-организационная, педагогическая и общественная деятельность В. А. Чантурия. Он является членом бюро Отделения наук о Земле РАН, вицепрезидентом Международного комитета Международного конгресса по переработке минерального сырья, председателем Научного совета РАН по проблемам обогащения полезных ископаемых, председателем диссертационного совета ИПКОН РАН, действительным членом Академии горных наук, иностранным членом Инженерной академии Сербии (2002), профессором кафедры обогащения и переработки полезных ископаемых и техногенного сырья Московского горного института НИТУ «МИСиС» и научным руководителем современного направления в науке «Нанотехнологии в обогащении», членом Международного оргкомитета по технологической минералогии и современным методам первичной переработки минерального сырья, членом секции геологии и горного дела Совета по присуждению премий Правительства РФ (1995–2012). Входит в состав редколлегий журналов «Обогащение руд», «Физико-технические проблемы разработки полезных и скопаемых», «Горный журнал», «Инженерная минералогия» (Польша), «Горный журнал», «Сербия), член секции «Обогащение» в журнале «Цветные металлы».

Валентин Алексеевич возглавляет ведущую научную школу «Физико-химические методы разделения минеральных компонентов в процессах обогащения полезных ископаемых». Им подготовлено 45 докторов и кандидатов наук.

Ежегодно с 1978 г. под его председательством проводятся Международные совещания «Плаксинские чтения», посвященные памяти выдающегося ученого в области обогащения полезных ископаемых и гидрометаллургии члена-корреспондента АН СССР И. Н. Плаксина.

На этих совещаниях рассматриваются новые направления фундаментальных исследований и прогрессивные технологии комплексной и глубокой переработки природного и техногенного минерального сырья.

Ярким свидетельством широкого признания международной научной общественностью достижений отечественной науки служит блестящая организация и проведение по инициативе и под руководством В. А. Чантурия в сентябре 2018 г. крупнейших мероприятий мирового масштаба — XXIX Международного конгресса по обогащению полезных ископаемых в Москве IMPC 2018 и выставки IMPC 2018 EXPO, собравших 2000 делегатов из 40 стран.

Валентин Алексеевич награжден орденами «Знак Почета» (1986), «Дружбы» (1998) и «За заслуги перед Отечеством» IV степени (2009) и медалями «За доблестный труд» (1970), «академик А.Л. Яншин», золотыми знаками «Горняцкая слава» I степени (2007) и «Горняк России» (2008). Он дважды лауреат премий Совета Министров СССР (1983 и 1991), ему присуждены премии Правительства России (1999), Президента РФ в области образования (2001), премия им. В. А. Коптюга (2008). Его заслуги отмечены Академией горных наук премией им. И. Н. Плаксина (1997), а в 2015 г. — почетным дипломом Сербской инженерной академии, в 2016 г. — Патриаршим знаком Святой великомученицы Варвары.

Нам приятно отметить многолетние совместные исследования Валентина Алексеевича и сотрудников с коллективами лабораторий институтов ФИЦ «Кольский научный центр РАН» — Горного, ИХТРЭМС и ИППЭС.

Желаем Валентину Алексеевичу Чантурия крепкого здоровья, реализации всех намеченных планов, вдохновения и оптимизма, новых свершений и побед на благо российской науки и нашего Отечества!





#### ПАХОМОВСКИЙ Яков Алексеевич

к. г.-м. н., заведующий лабораторией физических методов исследования пород, руд и минералов Геологического института КНЦ РАН.

Яков Алексеевич окончил физический факультет Ленинградского государственного университета в 1972 г. В Геологическом институте с 1972 г., в 1985 г. успешно защитил кандидатскую диссертацию на тему «Минералогия тантала и ниобия в редкометалльных пегматитах Северо-Запада СССР».

Один из ведущих специалистов в области локальных методов анализа вещества и минералогии. При его участии открыты и изучены более 50 новых минеральных видов, эти исследования продолжаются в настоящее время. Яков Алексеевич Пахомовский участвовал в работе по изучению минералогии Хибинского и Ловозерского щелочных массивов, фосфатной минерализации Ковдорского массива, а также карбонатитовых комплексов по многочисленным российским и международным проектам.

В настоящее время продолжает работу по изучению минералов Ловозерского, Хибинского и Ковдорского массивов и ряда других объектов, обеспечивает методическое руководство локальным рентгеноспектральным, электронно-микроскопическим, рентгенофазовым и рентгеноструктурным методами исследования вещества.

Яков Алексеевич Пахомовский подготовил плеяду специалистов для работы на рентгеновских аппаратах и других установках. На протяжении многих лет он выполняет ремонт и наладку оборудования лаборатории. Автор более 300 научных трудов, включая несколько монографий.

Желаем Якову Алексеевичу творческих успехов, новых открытий и крепкого здоровья!

# САХАРОВ Ярослав Алексеевич



к. ф.-м. н., заведующий лабораторией геофизических наблюдений Полярного геофизического института (ПГИ).

После окончания в 1972 г. Московского физико-технического института Ярослав Алексеевич поступил на работу в ПГИ, где работал сначала старшим лаборантом, затем младшим научным сотрудником, научным сотрудником, ученым секретарем, помощником директора. В 1986 г. защитил диссертацию на соискание степени кандидата физико-математических наук. В настоящее бораторией геофизических наблюдений

время заведует лабораторией геофизических наблюдений.

Научная деятельность Ярослава Алексеевича связана с организацией и проведением геофизических наблюдений на Кольском п-ове. При его участии организована и успешно функционирует целая сеть территориально-распределенных измерительных комплексов, расположенных на Кольском п-ове в обсерваториях «Ловозеро» и «Лопарская», на полигонах в поселках Туманный, Верхнетуломск, городе Апатиты и на арх. Шпицберген.

Последние несколько лет активно занимается исследованием влияния геоиндуктированных токов на различные энергосистемы Кольского п-ова. Принимал участие в создании сети мониторинга геоиндуктированных токов на подстанциях Кольской энергосистемы. Ярослав Алексеевич — участник серии международных аэростатных экспериментов «САМБО» (1974–1982). Прошел научные стажировки в Германии, Швеции, Франции.

Автор более 30 научных публикаций.

Награжден Почетной грамотой Президиума и Профсоюза работников РАН.

Будучи с 1996 г. доцентом, а с 2005 г. заведующим кафедрой прикладной математики Кольского филиала Петрозаводского государственного университета, Ярослав Алексеевич много сил потратил на подготовку молодых специалистов, руководил курсовыми и дипломными работами студентов. Также очень много времени он уделяет физико-математическому образованию школьников, является организатором Математического праздника и преподавателем математической школы.

Коллектив Полярного геофизического института поздравляет Ярослава Алексеевича с замечательным юбилеем и от всей души желает ему крепкого здоровья, благополучия и дальнейших творческих успехов.



#### УСАЧЕВ Евгений Иванович

заместитель директора по общим вопросам Центра гуманитарных проблем (ЦГП) Баренц-региона. Стаж работы в занимаемой должности составляет 19 лет.

В 1973 г. окончил Рижский институт инженеров гражданской авиации, специальность «Техническая эксплуатация авиационного радиооборудования».

За все время трудовой деятельности в ЦГП Евгений Иванович успешно справляется с задачами организационного и материально-технического обеспечения научно-исследовательской работы учреждения. Будучи очень

высококвалифицированным инженером, специалистом в области электронной техники, он оргаизовал создание, развитие и успешное функционирование локальной компьютерной сети, внедрил использование электронных информационных ресурсов в практике научных исследований. Содействовал и принимал личное участие в экспедиционных полевых работах в области этнографии саами — коренных жителей Кольского п-ова. Под его руководством были осуществлены ремонтно-строительные и инженерно-технические работы, связанные с эксплуатацией здания и оснащением Центра современным оборудованием.

Е. И. Усачев пользуется в коллективе заслуженным авторитетом, ответственно относится к своим обязанностям. Неоднократно поощрялся ведомсвенными наградами: Почетная грамота Кольского научного центра (2005, 2010), благодарственное письмо главы города Апатиты (2008), Почетная грамота Кольского научного центра.

От всей души поздравляем Евгения Ивановича и желаем неисссякаемой энергии, крепкого здоровья и благополучия!





#### КАЛИНИН Аркадий Авенирович

к. г.-м. н., старший научный сотрудник Геологического института КНЦ РАН.

В 1980 г. Аркадий Авенирович окончил Ленинградский государственный университет по специальности «Геохимия» и поступил в аспирантуру Геологического института Кольского филиала АН СССР. В 1986 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему «Минералогия и генезис сульфидного оруденения в метасоматитах Вороньих тундр» и продолжил работу в Геологическом институте сначала в должности научного сотрудника, с 1997

по 1999 гг. — старшего научного сотрудника. В дальнейшем Аркадий Авенирович Калинин работал главным геологом ООО «Кольская горно-геологическая компания» (2000–2007), доцентом ЛГОУ им. Пушкина (1999) и КФ ПетрГУ (2002). С 2009 г. — старший научный сотрудник ГИ КНЦ РАН, заведующий лабораторией золота и других высоколиквидных полезных ископаемых (2016–2017).

Основные направления исследований: минералогия благороднометалльного, медномолибденового и полиметаллического оруденения в супракрустальных комплексах Кольского региона; изучение роли метасоматических изменений вмещающих пород в формировании сульфидной минерализации и оруденения благородных и редких металлов. Разработал модель формирования медно-молибденового и золотосеребряного оруденения, показана связь данной минерализации с зонами кислотного выщелачивания как благоприятной средой рудоотложения. Выявил ряд новых для региона минеральных видов, преимущественно соединений серебра, обнаружил рудопроявления серебряно-висмутовой И редкометалльной циркониеворедкоземельной минерализации в Кейвах. существенный изучение внес вклад в платинометалльного оруденения Восточно-Панского массива.

В настоящее время Аркадий Авенирович Калинин занимается вопросами золоторудного оруденения в Кольском регионе, связанного в том числе с метасоматически измененными породами.

Участвовал во многих научных проектах и программах Президиума РАН.

Автор более 100 научных трудов.

Желаем Аркадию Авенировичу крепкого здоровья, успехов, творческого долголетия и новых открытий!



кольский научный центр 184209, Мурманская область, г.Апатиты, ул.Ферсмана, 14

KOLA SCIENCE CENTRE 14, Fersman str., Apatity, Murmansk region, 184209, RUSSIA

