

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ
И МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ



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



ПРОБЛЕМЫ АРКТИКИ И АНТАРКТИКИ

Том 64, № 3, 2018

ARCTIC AND ANTARCTIC RESEARCH

Издается с июня 1937 г.

Санкт-Петербург
ААНИИ
2018

Журнал продолжает основанное в 1937 г. периодическое издание «Проблемы Арктики».

Выходит 4 раза в год. ISSN 0555-2648 (Print), ISSN 2618-6713 (Online)

The journal continues the series of "Arctic Research", founded in 1937.

Four issues per year. ISSN 0555-2648 (Print), ISSN 2618-6713 (Online)

Журнал издается под научно-методическим руководством Отделения наук о Земле РАН

СОСТАВ РЕДКОЛЛЕГИИ:

Главный редактор – чл.-корр. РАН И.Е. Фролов

Ученый секретарь редколлегии – канд. биол. наук И.А. Алехина (тел. (812) 416-4251)

Литературный редактор – Е.В. Миненко

Члены редколлегии:

д-р геогр. наук Г.В. Алексеев, канд. физ.-мат. наук Л.П. Бобылев, чл.-корр. РАН Н.Б. Вахтин, д-р Т. Вихма (Финляндия), д-р геогр. наук М.Н. Григорьев, канд. физ.-мат. наук А.И. Данилов, д-р Д.В. Дивин (Норвегия), чл.-корр. РАН С.А. Добролюбов, **д-р физ.-мат. наук В.В. Иванов** (зам. главного редактора), **чл.-корр. РАН В.Д. Каминский** (зам. главного редактора), д-р физ.-мат. наук В.М. Катцов, д-р физ.-мат. наук Б.В. Козелов, академик РАН В.М. Котляков, д-р геол.-минерал. наук Г.Л. Лейченко, проф. М. Леппаранта (Финляндия), **канд. геогр. наук В.Я. Липенков** (зам. главного редактора), канд. техн. наук В.А. Лихоманов, академик НАН В.Ф. Логинов (Беларусь), д-р геогр. наук А.С. Макаров, д-р геогр. наук В.Н. Калинин, д-р физ.-мат. наук А.П. Макштас, проф. А.В. Марченко (Норвегия), **академик РАН Г.Г. Матишов** (зам. главного редактора), д-р геогр. наук Е.У. Миронов, канд. биол. наук А.В. Неелов, д-р геогр. наук А.Ю. Прошутинский (США), академик РАН О.Н. Пугачев, канд. геогр. наук В.Ф. Радионов, д-р Д. Райно (Франция), д-р физ.-мат. наук В.А. Рожков, акад. РАН В.А. Румянцев, д-р техн. наук К.Е. Сазонов, д-р техн. наук К.Г. Ставров, проф. Й. Тиде (Германия), **д-р физ.-мат. наук Л.А. Тимохов** (зам. главного редактора), чл.-корр. РАН А.А. Тишков, д-р физ.-мат. наук О.А. Трошичев, чл.-корр. РАН Н.Н. Филатов, д-р геогр. наук К.В. Чистяков

EDITORIAL BOARD:

Editor-in-Chief – corresponding member of the Russian Academy of Sciences

Ivan E. Frolov

Editorial Secretary – Irina A. Alekhina (phone: (812) 416-4251)

Literary Editor – Elena V. Minenko

Members of the editorial board:

G.V. Alekseev, L.P. Bobylev, K.V. Chistyakov, A.I. Danilov, D.V. Divine (Norway), S.A. Dobrolyubov, N.N. Filatov, M.N. Grigoriev, **V.V. Ivanov** (deputy of the Editor-in-Chief), **V.D. Kaminsky** (deputy of the Editor-in-Chief), V.M. Kattsov, V.M. Kotliakov, B.V. Kozelov, G.L. Leitchenko, M. Leppäranta (Finland), V.A. Likhomanov, **V.Ya. Lipenkov** (deputy of the Editor-in-Chief), V.F. Loginov (Belarus), A.S. Makarov, A.P. Makshtas, V.N. Malinin, A.V. Marchenko (Norway), **G.G. Matishov** (deputy of the Editor-in-Chief), E.U. Mironov, A.V. Neelov, A. Yu. Proshutinsky (USA), O.N. Pugachev, V.F. Radionov, D. Raynaud (France), V.A. Rozhkov, V.A. Rumiantsev, K.E. Sazonov, K.G. Stavrov, **L.A. Timokhov** (deputy of the Editor-in-Chief), J. Tiede (Germany), A.A. Tishkov, O.A. Troshichev, N.B. Vakhtin, T. Vihma (Finland)

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

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

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

Выданы Федеральной службой по надзору в сфере связи и массовых коммуникаций

Журнал включен в перечень рецензируемых научных изданий ВАК, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук. Журнал публикует статьи по группе научных специальностей ВАК 25.00.00 – Науки о Земле.

Адрес редакции журнала «Проблемы Арктики и Антарктики»:

199397 Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38.

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт.
e-mail: aaresearch@aaari.ru. Сайт журнала: <http://www.aaari.ru/misc/publicat/paa.php>

Подписные индексы издания в каталоге «Газеты. Журналы» ОАО «Агентство Роспечать»
70279 – на год; 48657 – на полгода; 70278 – на полгода (для предприятий и организаций).

© ГНЦ РФ ААНИИ, 2018; © Росгидромет, 2018.

СОДЕРЖАНИЕ

ОКЕАНОЛОГИЯ

- А.В. Юлин, М.В. Шаратунова, Е.А. Павлова, В.В. Иванов.* Сезонная и межгодовая изменчивость ледяных массивов Восточно-Сибирского моря..... 229
- Ю.П. Гудошников, А.В. Нестеров, В.А. Рожков, Е.А. Скутина.* Изменчивость течений Карского моря 241

ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ГИДРОСФЕРЫ

- Е.Е. Сибир, В.Ф. Радионов.* Вариации общего содержания озона на российских антарктических станциях. Результаты многолетних наблюдений 250
- Г.В. Алексеев, В.Ф. Радионов, В.М. Смоляницкий, К.В. Фильчук.* Результаты и перспективы исследований климата и климатического обслуживания в Арктике... 262

ГЕОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА

- Г.В. Артеменко, В.И. Ганоцкий.* Геохимические особенности дайковых пород островов архипелага Арджентайн и прилегающей части Антарктического полуострова (Западная Антарктида) 270

ЭКОЛОГИЯ. БИОЦЕНОЛОГИЯ. БИОГЕОГРАФИЯ.

- В.Г. Дворецкий, А.Г. Дворецкий.* Широтные вариации структуры сообществ и продуктивности зоопланктона в Баренцевом море (лето 2013 г.) 294
- Н.В. Лебедева, Н.Н. Фатеев, А.Л. Никулина, О.Л. Зимина, Е.А. Гарбуль.* Ртуть в компонентах экосистемы заливов Западного Шпицбергена в летний период 2017 года 311
- С.Ю. Гагаев.* Сходство и отличие биоэнергетических характеристик полихет в донных сообществах мелководных заливов Арктики и Антарктики 326

ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ

- П.В. Коробов.* Численная реализация начально-краевой задачи для нелинейных одномерных уравнений пороупругости для системы вода-лед 337

CONTENTS

OCEANOLOGY

- A.V. Yulin, M.V. Sharatunova, E.A. Pavlova, V.V. Ivanov.* Seasonal and interannual changes of ice massifs in East Siberian sea 229
- Yu.P. Gudoshnikov, A.V. Nesterov, V.A. Rozhkov, E.A. Skutina.* Currents variability of the Kara sea 241

ATMOSPHERE AND HYDROSPHERE PHYSICS

- E.E. Sibir, V.F. Radionov.* Total ozone variations at russian antarctic stations. Results of long-term observations 250
- G.V. Alekseev, V.F. Radionov, V.M. Smolyanitsky, K.V. Filchuk.* Results and prospects of the climate studies and climate service in the Arctic 262

GEOLOGY AND GEOPHYSICS

- G.V. Artemenko, V.I. Ganotskiy.* Geochemical features of dike rocks of the argentine islands and the near area of the antarctic peninsula (Western Antarctica) 270

ECOLOGY. BIOCEANOLOGY. BIOGEOGRAPHY.

- V.G. Dvoretzky, A.G. Dvoretzky.* Latitudinal variations of zooplankton community structure and productivity in the Barents sea (summer 2013) 294
- N.V. Lebedeva, N.N. Fateev, A.L. Nikulina, O.L. Zimina, E.A. Garbul.* Mercury in components of ecosystems of Western Spitsbergen fjord in summer, 2017 311
- S.Yu. Gagaev.* Similarity and difference of bioenergy characteristics of polychaetes in bottom communities in the shallow gulfs of the Arctic and Antarctic 326

APPLIED ISSUES

- P.V. Korobov.* Numerical implementation of the initial-boundary value problem for nonlinear the one-dimensional equations of poroelasticity for the water–ice system ... 337

ОКЕАНОЛОГИЯ

УДК 551.326.1: 551.383. (268.52)

DOI: 10.30758/0555-2648-2018-64-3-229-240

СЕЗОННАЯ И МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ЛЕДЯНЫХ МАССИВОВ ВОСТОЧНО-СИБИРСКОГО МОРЯ

А.В. ЮЛИН, М.В. ШАРАТУНОВА, Е.А. ПАВЛОВА, В.В. ИВАНОВ*

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

**icefor@aari.ru*

SEASONAL AND INTERANNUAL CHANGES OF ICE MASSIFS IN EAST SIBERIAN SEAS

A.V. YULIN, M.V. SHARATUNOVA, E.A. PAVLOVA, V.V. IVANOV*

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

**icefor@aari.ru*

Received June, 7, 2018

Accepted August, 14, 2018

Keywords: climatic changes, East Siberian Sea, ice conditions, ice extent, ice massifs.

Summary

The paper considers the seasonal and interannual variability of the Novosibirsky and Ayonsky ice massifs of the East Siberian Sea, which represent the main difficulty for navigation during summer.

Analysis of ice conditions showed the tendency towards the onset of a new climatic period - "relative warming". This is consistent with the regional quasi-periodic 30-year alternations between the "relatively cold" and "relatively warm" climatic periods identified in the AARI.

We have compared ice conditions of the "relatively cold" period of 1958–1987 and the "relatively warm" period of 1988–2017. Since the end of the 1980s the ice massifs began to decrease more intensively with the onset of break up some 10–20 days earlier.

In general, the drift ice area during summer has decreased by 15–20 % in the western part of the sea and by 20–30 % in eastern one. The fast decrease of close floating ice in the East Siberian Sea observed in the last decades resulted in increase of the possibilities of autonomous navigation.

The latest works containing the analysis of in conditions of the East Siberian Sea belong to the 90s of last century. In these works ice conditions of the period of the 40–80s of the 20th century were considered. During this period, the background of the ice cover extent was high. As a result, the usage of the average values of ice massifs areas calculated on all observations series (since 1946), is not informative for characterizing ice conditions during separately taken periods.

Citation: *Yulin A.V., Sharatunova M.V., Pavlova E.A., Ivanov V.V.* Seasonal and interannual changes of ice massifs in East Siberian sea. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2018, 64, 3: 229–240. [In Russian]. doi: 10.30758/0555-2648-2018-64-3-229-240

Ключевые слова: Восточно-Сибирское море, климатические изменения, ледовитость моря, ледяные массивы, ледовый режим.

В работе рассмотрены сезонная и межгодовая изменчивости площадей ледяных массивов Восточно-Сибирского моря. Представлены результаты расчетов изменения ледовитости и повторяемости типов развития ледяных массивов в период 60–80-х годов прошлого столетия и за последние десятилетия.

Эти изменения хорошо согласуются с выявленными в ААНИИ квазипериодическими чередованиями «относительно» холодных и «относительно» теплых климатических периодов с продолжительностью около 30 лет.

За последние десятилетия уменьшение ледяных массивов стало происходить более интенсивно. В целом площадь сплоченных льдов в летний сезон уменьшилась на 15–20 % в западной части моря и на 20–30 % в восточной, существенно расширив возможности самостоятельного плавания судов.

ВВЕДЕНИЕ

Восточно-Сибирское море является одним из наиболее суровых из всех российских арктических морей. Холодные зимы, короткое лето, сильные ветры формируют на акватории моря мощный и торосистый ледяной покров, состоящий из припайных и дрейфующих льдов.

Нарастание ледяного покрова происходит весь зимний период и заканчивается в конце мая. В начале июня под влиянием радиационного тепла в прибрежной зоне на льду появляются снежицы — первые признаки таяния, которые затем распространяются в северные районы моря.

Сформировавшийся к началу таяния ледяной покров (неподвижный и дрейфующий) состоит в основном из однолетних толстых льдов (толщиной более 120 см). Эти льды занимают около 80 % площади западной части моря и около 65 % — восточной.

В среднем около 12 % в западной и около 30 % в восточной части моря занимают старые льды (двухлетние и многолетние), которые поступают в море из Арктического бассейна и наблюдаются в северной части моря. Незначительная часть ледяного покрова представлена более молодыми по возрасту однолетними тонкими (толщиной 30–70 см) и средними (толщиной 70–120 см) льдами, которые образуются в течение зимнего периода в зонах заприпайных полыней.

Особую сложность для плавания судов в летний период представляют сплоченные льды, или ледяные массивы. Ледяными массивами называются квазистационарные скопления сплоченных льдов (сплоченностью в 7–10 баллов), которые локализируются в определенных районах моря и имеют важное навигационное значение для обеспечения безопасного судоходства [1].

Долгосрочный прогноз сезонного хода площади массивов, краткосрочный прогноз распределения сплоченных льдов по акватории, навигационные рекомендации являются наиболее востребованной информацией для планирования и проведения летней навигации. Разработка прогнозов, режимных справок и навигационных рекомендаций для плавания невозможна без изучения закономерностей межгодовой и сезонной изменчивости ледяных массивов в динамично меняющейся природной среде.

В работе рассмотрены данные из постоянно пополняемого архива по ледовитостям и площадям ледяных массивов отдела ледового режима и прогнозов ААНИИ. Архив содержит сведения о распределении льдов в течение всего года

(карты ледяного покрова), а также количественные оценки ледовитости и площади ледяных массивов. Материалы носят выборочный характер начиная с 30-х гг. прошлого столетия и регулярный характер начиная с середины 40-х гг. прошлого столетия. С середины 1940-х гг. наблюдения за ледовыми условиями в арктических российских морях стали регулярными и площадными, благодаря выполняемым ледовым авиационным разведкам. С конца 1970-х гг. ледовые авиаразведки заменили спутниковые наблюдения. Таким образом, анализируется непрерывный ряд наблюдений за состоянием ледяных массивов Восточно-Сибирского моря, за каждую декаду летнего периода с июля по октябрь, с 1946 по 2017 г. (длина рядов наблюдений составляет 72 года).

ЛЕДЯНЫЕ МАССИВЫ ВОСТОЧНО-СИБИРСКОГО МОРЯ

В Восточно-Сибирском море выделяют два ледяных массива — Новосибирский, занимающий юго-западную часть моря, и Айонский, в восточной части моря. Массивы были так названы по географическому положению — Новосибирские острова в западной части моря и остров Айон в восточной части (рис. 1).

Новосибирский ледяной массив формируется из взломанных припайных однолетних льдов местного образования. Массив занимает юго-западную часть акватории моря площадью 192 тыс. км². В некоторые годы в массиве наблюдаются включения многолетнего льда. В июле–августе льды массива блокируют восточные подходы к проливам Санникова и Дмитрия Лаптева. В большинстве случаев лед в массиве полностью вытаивает в течение августа. В отдельные годы Новосибирский массив бывает соединен с Айонским и может сохраняться до конца периода таяния.

Айонский ледяной массив является отрогом океанического массива, за счет которого он пополняется многолетними льдами. Льды массива располагаются в восточной части Восточно-Сибирского моря площадью 407 тыс. км². В зависимости от положения (западного, центрального или восточного) массив блокирует центральные

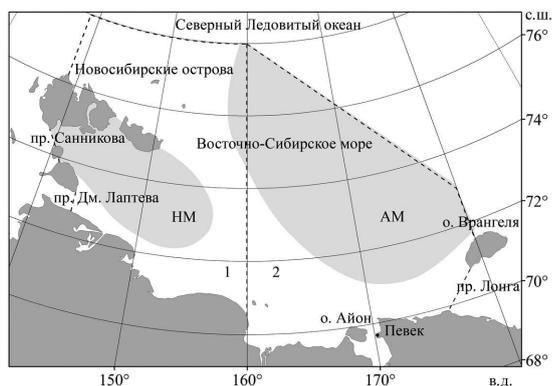


Рис. 1. Положение ледяных массивов в Восточно-Сибирском море в летний период: пунктирная линия — граница моря, 1 — западная часть моря, 2 — восточная часть моря, НМ — Новосибирский ледяной массив, АМ — Айонский ледяной массив

Fig. 1. Position of ice massifs in the East Siberian sea in summer: dashed line — sea border, 1 — western part of the sea, 2 — eastern part of the sea, НМ — the Novosibirsky ice massif, АМ — the Ayonsky ice massif

районы моря или пролив Лонга с запада. Массив формируется из местных однолетних и многолетних льдов, поступающих из Арктического бассейна. Однако с начала 90-х гг. прошлого столетия формирование массива происходило преимущественно из местных однолетних льдов осеннего образования. Массив отличается повышенной мощностью льдов в зимний период и пониженной их разрушенностью в летний период. В среднем около 40–50 % льдов массива остаются не вытаявшими к началу нового ледообразования (то есть около половины акватории моря занято сплоченными льдами).

До конца 1980-х гг. участок трассы Северного морского пути в восточной части Восточно-Сибирского моря считался одним из наиболее сложных из-за сплоченных льдов Айонского ледяного массива, которые часто блокировали прибрежный район плавания. Именно здесь в 1983 г. произошла гибель теплохода «Нина Сагайдак» в результате тяжелых ледовых условий и сжатий льдов [2].

С конца 80-х гг. прошлого столетия ледовые условия Восточно-Сибирского моря существенно изменились. Чаще стали наблюдаться легкие ледовые условия. Первое anomальное сокращение льдов в море в летний период произошло в 1990 г. В летний период 1990 г. впервые за многолетний ряд наблюдений (с 1946 г.) акватория моря практически полностью очистилась от дрейфующих льдов [3]. Формированию крупных аномалий ледовых условий начали уделять больше внимания [4]. Однако вскоре стало понятно, что anomальные проявления и увеличение повторяемости легких ледовых условий в летний период — это не случайное совпадение крупномасштабных гидрометеорологических условий, а тенденция, свидетельствующая о наступлении нового климатического периода «относительного» потепления [5].

Накопленные с середины 1940-х гг. наблюдения позволили установить, что межгодовые колебания ледовитости в период с конца 50-х до конца 80-х гг. прошлого столетия существенно отличаются от колебаний, происходящих в период с начала 1990-х гг. по настоящее время.

Эти изменения хорошо согласуются с выявленными в ААНИИ квазипериодическими чередованиями «относительно» холодных и «относительно» теплых климатических периодов с продолжительностью около 30 лет [4, 5, 6].

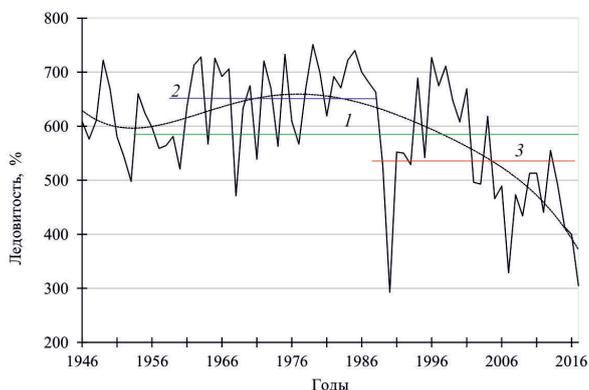


Рис. 2. Межгодовые изменения суммарной ледовитости за летний период (июль–август) в Восточно-Сибирском море

Fig. 2. Interannual changes in total ice cover extent during the summer period (July–August) in the East Siberian sea

На рис. 2 приведен многолетний ход суммарной ледовитости за летний период года (июль–август) Восточно-Сибирского моря за ряд наблюдений с 1946 г. Ход кривой убедительно показывает, что изменения ледовитости в Восточно-Сибирском море с середины 1940-х до конца 1950-х гг., а также с начала 1990-х гг. по настоящее время происходят на пониженном фоне ледовитости, а с конца 1950-х до конца 1980-х гг. — на повышенном фоне ледовитости, что хорошо подтверждает выявленные закономерности.

Последние работы, в которых анализировались ледовые условия Восточно-Сибирского моря, относятся к 1990-м гг. [3, 4]. В этих работах рассматривались ледовые условия периода 40–80-х гг. прошлого столетия, когда фон ледовитости в летний период был повышен. На основе этих данных велся поиск прогностических связей, строились прогностические модели, делались режимные обобщения. Однако за последние несколько десятилетий произошли существенные изменения в летнем ледовом режиме моря. Ледовые условия стали легче, произошло уменьшение ледовитости моря и площадей ледяных массивов, возросла продолжительность безледного периода, изменились условия летнего плавания.

Однако по-прежнему широко используются среднееголетние значения (нормы) и другие статистические характеристики по полному ряду наблюдений для получения различных режимных оценок ледовых условий по морю.

На рис. 3 приведены гистограммы плотности вероятности среднесезонных значений площадей ледяных массивов Восточно-Сибирского моря для августа за весь ряд наблюдений с 1946 г. Из приведенных графиков хорошо видно, что распределение значений площадей очень далеко от нормального, сильно смещено и является, скорее двух- и трехмодальным (рис. 3).

Таким образом, использование статистических характеристик площадей массивов, рассчитанных по всему ряду наблюдений (72 года), для описания ледовых условий в отдельно взятые периоды «относительного» похолодания и «относительного» потепления не совсем информативно. В этом случае целесообразно выявлять средние характеристики для отдельных периодов лет, которые хорошо выделяются на приведенном графике (рис. 2). Это «относительно» холодный период, наблюдавшийся с конца 50-х до конца 80-х гг. прошлого столетия (в дальнейшем просто

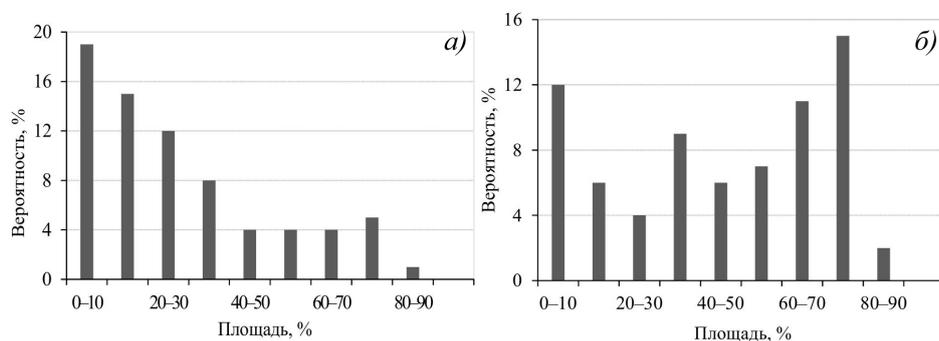


Рис. 3. Плотность вероятности среднесезонных значений площадей Новосибирского (а) и Айонского (б) ледяных массивов

Fig. 3. Probability density of average season values of Novosibirsky (a) and Ayonsky (b) ice massifs areas

«холодный» период) и «относительно» теплый период (в дальнейшем «теплый» период), наблюдающийся с конца 80-х гг. по настоящее время.

СЕЗОННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ЛЕДЯНЫХ МАССИВОВ

Основной особенностью сезонной изменчивости площади ледяных массивов является устойчивое уменьшение количества сплоченных льдов в море в течение летнего периода. При этом для Новосибирского ледяного массива, расположенного в мелководной западной части моря, и Айонского массива, в более глубоководной восточной части, уменьшение происходит с разной интенсивностью.

Новосибирский ледяной массив

В таблице 1 приведены основные статистические характеристики сезонного хода изменения площади Новосибирского ледяного массива в летний период, рассчитанные для всего ряда наблюдений, а также отдельно для «холодного» и «теплого» периодов.

Для Новосибирского ледяного массива характерно существенное сокращение площади от июля к сентябрю. В среднем площадь массива сокращается на 90 %. В наиболее легкие годы сплоченные льды в западной части моря исчезают уже в третьей декаде июля. В наиболее тяжелые по ледовым условиям годы до 70 % сплоченных льдов может сохраняться до конца летнего периода.

Таблица 1

Основные статистические характеристики сезонной изменчивости площади Новосибирского ледяного массива за различные временные периоды, %

Показатели	Месяцы, декады								
	VII			VIII			IX		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Весь ряд наблюдений в период 1946–2017 гг.									
Среднее значение	92	84	65	41	25	16	12	11	10
Минимум	25	16	0	0	0	0	0	0	0
Максимум	100	100	98	98	90	74	71	65	72
Амплитуда	75	84	98	98	90	74	71	65	72
Стандартное отклонение	12	16	24	30	26	21	19	19	18
«Холодный» период 1958–1987 гг.									
Среднее значение	95	89	74	52	36	26	18	18	18
«Теплый» период 1988–2017 гг.									
Среднее значение	88	79	57	29	13	6	5	4	4
Разность между средними значениями в «холодный» и «теплый» периоды									
Разность	–7	–10	–17	–23	–23	–20	–13	–14	–14

Для Новосибирского ледяного массива характерно быстрое сокращение площади в начале лета (конец июня — первая половина июля, с 92 до 65 %), очень быстрое сокращение площади с конца июля и в августе (с 65 до 16 %) и прекращение сокращения площади в течение сентября (площадь массива в течение сентября составляет 10–12 %). Наибольшие значения амплитуды и среднеквадратического отклонения значений площадей приходятся на период вторая половина июля — август (см. табл. 1).

Сезонный ход изменения площади Новосибирского ледяного массива и интенсивность этого изменения приведены на рисунке 4. Нетрудно увидеть, что основ-

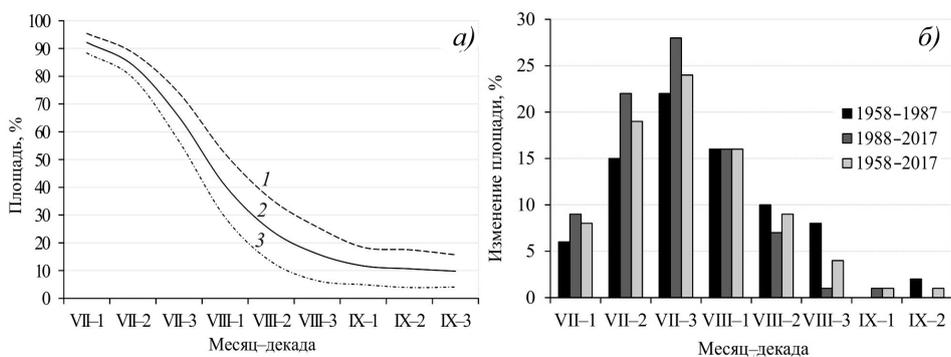


Рис. 4. Сезонный ход (а) и интенсивность изменения (б) средних значений площади Новосибирского ледяного массива в различные климатические периоды: 1 — «холодный», 2 — весь ряд наблюдений, 3 — «теплый»

Fig. 4. The seasonal course (a) and the rate of change (b) in the Novosibirsky ice massif are in different climatic periods: 1 — “cold”, 2 — the whole series of observations, 3 — “warm”

ное сокращение площади ледяного массива происходит в течение июля–августа. В «теплый» период сокращение массива происходит интенсивнее и раньше, чем в среднем за весь ряд наблюдений и, тем более, чем в «холодный» период. В сентябре изменения массива практически заканчиваются для любого климатического периода (см. рис. 4).

Однако при сохранении основных черт в сезонной изменчивости площади массива в «холодный» и «теплый» периоды между ними проявляются существенные различия. Так, в «теплый» период средние значения площадей в каждую из декад летнего периода на 10–20 % меньше, чем в «холодный». Это означает, что за последний 30-летний «теплый» период уменьшение площади Новосибирского ледяного массива стало происходить интенсивнее и раньше на 1–2 декады. Если в «холодный» период площадь массива к сентябрю в среднем сокращалась до 18 %, а вероятность полного исчезновения сплоченных льдов составляла 40 %, то в «теплый» период площадь массива сокращалась в среднем до 5 %, а вероятность полного исчезновения сплоченных льдов увеличилась до 80 %. Разность между оценками средних значений в «холодный» и «теплый» периоды составляет: в начале летнего сезона 7–10 %, в середине сезона 20–23 % и в сентябре снижается до 13–14 % (см. табл. 1).

Айонский ледяной массив

В таблице 2 приведены основные статистические характеристики сезонного хода изменения площади Айонского ледяного массива в летний период, рассчитанные для всего ряда наблюдений, а также отдельно для «холодного» и «теплого» периодов.

Для Айонского ледяного массива также характерно значительное уменьшение его площади в течение летнего периода. По оценкам, полученным за весь ряд наблюдений, в среднем площадь массива сокращается на 50 % и более. В наиболее легкие годы сплоченные льды в восточной части моря могут исчезнуть в середине августа. В тяжелые по ледовым условиям годы до 85–90 % сплоченных льдов может сохраняться до конца летнего периода. В тяжелые годы льды массива наблюдаются непосредственно в прибрежной части моря на судоходных трассах и значительно осложняют условия для плавания судов.

**Основные статистические характеристики сезонной изменчивости
площади Айонского ледяного массива за различные временные периоды, %**

Показатели	Месяцы								
	VII			VIII			IX		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Весь ряд наблюдений в период 1946–2017 гг.									
Среднее значение	91	85	77	67	59	49	44	41	40
Минимум	58	48	21	1	0	0	0	0	0
Максимум	100	98	97	92	91	94	91	85	89
Амплитуда	42	50	76	91	91	94	91	85	89
Стандартное отклонение	9	12	16	22	24	27	27	29	29
«Холодный» период 1958–1987 гг.									
Среднее	93	89	83	75	69	62	58	57	56
«Теплый» период 1988–2017 гг.									
Среднее	88	81	71	59	49	38	30	26	25
Разность между средними значениями в «холодный» и «теплый» периоды									
Разность	-5	-8	-12	-16	-20	-24	-28	-31	-31

Для Айонского ледяного массива, который формируется из однолетних толстых льдов местного образования и старых льдов в северной части моря, характерно более равномерное уменьшение площади в течение всего летнего периода по сравнению с Новосибирским массивом. Уменьшение площади массива происходит практически одинаково в течение июля–августа (уменьшение в течение июля с 91 до 77 %, или на 14 %, а в августе с 67 до 49 %, или на 18 %). В сентябре наблюдается постепенное прекращение сокращения площади массива (уменьшение в течение сентября с 44 до 40 %, или на 4 %). Наибольшие значения амплитуды приходятся на август — начало сентября, а среднеквадратического отклонения — на сентябрь (см. табл. 2).

Сезонный ход изменения площади Айонского ледяного массива и интенсивность этого изменения приведены на рисунке 5. Если сопоставить кривые, описывающие сезонный ход изменения площади Айонского ледяного массива, то становится очевидным, что в последний 30-летний «теплый» период сокращение массива начало

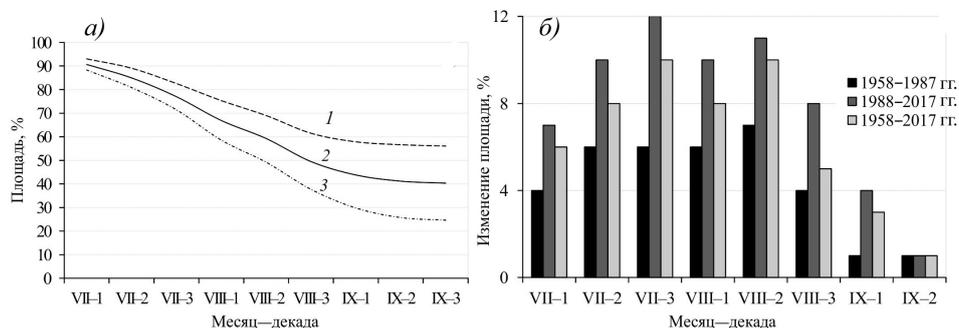


Рис. 5. Сезонный ход (а) и интенсивность изменения (б) площади Айонского ледяного массива в различные климатические периоды: 1 — «холодный», 2 — весь ряд наблюдений, 3 — «теплый»

Fig. 5. The seasonal course (a) and the rate of change (b) in the Ayonsky ice massif are in different climatic periods: 1 — “cold”, 2 — the whole series of observations, 3 — “warm”

происходить с большей интенсивностью и продолжается до начала сентября. Увеличение интенсивности таяния и разрушений льдов в последний 30-летний «теплый» период привело к более существенному сокращению площади массива (в сентябре площадь массива составляет 25–30 %) по сравнению с «холодным» периодом (площадь массива в сентябре составляет 56–58 %) (см. рис. 5).

Однако при сохранении основных черт в сезонной изменчивости площади массива в «холодный» и «теплый» периоды проявляются существенные различия. Так, в «теплый» период средние значения площадей в каждую из декад летнего периода на 10–30 % меньше, чем в «холодный». Это означает, что в последний 30-летний «теплый» период уменьшение площади Айонского ледяного массива стало происходить гораздо интенсивнее и ранее на 1–2 декады.

Например, сокращение площади массива до 60 %, когда вся прибрежная часть моря становится свободной от сплоченных льдов, в «теплый» период в среднем происходит в первой декаде августа, а в «холодный» период только в третьей декаде августа. Если в «холодный» период площадь массива к сентябрю в среднем сокращалась до 56–58 %, а полного исчезновения сплоченных льдов не наблюдалось, то в «теплый» период площадь массива сокращалась в среднем до 25–30 %, а вероятность полного исчезновения сплоченных льдов увеличилась до 20 %. Разность между оценками средних значений в «холодный» и «теплый» периоды составляет: в начале летнего сезона 5–12 %, в середине сезона 16–24 % и в сентябре увеличивается до 28–31 % (см. табл. 2).

ПОВТОРЯЕМОСТЬ ТИПОВ ЛЕДОВЫХ УСЛОВИЙ В РАЗЛИЧНЫЕ КЛИМАТИЧЕСКИЕ ПЕРИОДЫ

Для оценки сложности гидрометеорологических и ледовых условий принято использовать упрощенное, но хорошо зарекомендовавшее себя разделение ряда наблюдений на три типа, соответствующие легким, средним и тяжелым условиям. В данной работе за критерий типизации принята величина, равная $0,8\sigma$, где σ величина среднего квадратичного отклонения. Эта величина общепринята в гидрометеорологии. В частности, она в соответствии с «Наставлением по службе прогнозов» рекомендована в качестве допустимой ошибки в долгосрочных ледовых прогнозах, поскольку позволяет выделить действительно значимые отклонения от среднего или от прогнозируемой величины. Поэтому ее часто используют для установления

Таблица 3

Количество лет (N) с различными типами развития ледяных массивов и их повторяемость (P , %) в Восточно-Сибирском море в «холодный» и «теплый» климатические периоды

Годы климатических периодов	Длина ряда	Тип развития массива					
		Тяжелый		Легкий		Средний	
		N	P , %	N	P , %	N	P , %
<i>Новосибирский массив</i>							
«Холодный» период 1958–1987 гг.	30	13	43	5	17	12	40
«Теплый» период 1988–2017 гг.	30	1	3	14	47	15	50
<i>Айонский массив</i>							
«Холодный» период 1958–1987 гг.	30	15	50	2	7	13	43
«Теплый» период 1988–2017 гг.	30	5	17	10	33	15	50

границы аномалий, по которой могут выделяться отдельные группы (типы). К среднему типу условий отнесены годы, для которых величина нормированной аномалии площадей массивов находится в диапазоне $\pm 0,8\sigma$, к тяжелому типу — годы с положительными аномалиями, равными или большими $0,8\sigma$, к легкому типу — годы с отрицательными аномалиями, равными или меньшими $-0,8\sigma$ [8].

Для оценки изменчивости типов ледовых условий был выполнен анализ повторяемости выделенных типов в различные климатические периоды. Результаты представлены в таблице 3.

Как следует из табл. 3, как в «холодный», так и в «теплый» климатические периоды преобладает повторяемость среднего типа развития площадей ледяных массивов, которая составляет 40–50 %.

Характерной особенностью повторяемости различных типов ледовых условий является появление как крупных положительных, так и отрицательных аномалий площадей ледяных массивов во всех климатических периодах. Однако повторяемость их в разные климатические периоды различна.

Для «холодного» периода характерна высокая повторяемость тяжелого типа развития площадей массивов и малая повторяемость легкого типа. Повторяемость тяжелого типа составляет 43 % для Новосибирского ледяного массива и 50 % для Айонского. В этот же период повторяемость реализации легкого типа развития площадей массивов составляет соответственно только 7 и 17 % (см. табл. 3).

В годы «теплого» периода наблюдается обратное соотношение. Преобладают крупные отрицательные аномалии среднемесячных площадей ледяных массивов. Повторяемость легкого типа составляет 47 % для Новосибирского ледяного массива и 33 % для Айонского. Повторяемость реализации тяжелого типа развития площадей массивов была значительно ниже и составила соответственно только 3–17 % (см. табл. 3).

Если оценивать повторяемость реализации типов ледовых условий за весь 60-летний ряд наблюдений, то оценка даст осредненный результат. Повторяемость среднего типа останется такой же высокой и составит 45–55 %, а повторяемость «легкого» и «тяжелого» типов составит около 20–25 %, то есть будет приблизительно одинаковой.

Таким образом, по результатам выполненного исследования становится очевидным, что развитие ледяных массивов, повторяемость реализации легких, средних и тяжелых типов ледовых условий в Восточно-Сибирском море в «холодный» и «теплый» климатические периоды существенно различаются. Эти различия необходимо обязательно учитывать при описании ледового режима, разработке среднесрочных и долгосрочных ледовых прогнозов, построении сценариев развития ледовых условий для морских операций.

Если при прогностической и оперативной работе ориентироваться на статистические оценки и повторяемость реализации различных типов ледовых условий для всего ряда наблюдений, то это может приводить к неверным заниженным (для «холодного» периода) или завышенным (для «теплого» периода) оценкам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развитие ледяных массивов, повторяемость реализации легких, средних и тяжелых типов ледовых условий в Восточно-Сибирском море в «холодный» и «теплый» климатические периоды существенно различаются.

Для каждого климатического периода наблюдается характерный сезонный ход изменений ледовых условий, повторяемость полного очищения ото льдов, величина остаточной ледовитости и целый набор других характеристик. Среднемноголетние характеристики, рассчитанные по всему ряду наблюдений, не совсем точно отражают особенности развития ледовых условий в Восточно-Сибирском море в конкретном климатическом периоде.

Не вдаваясь в споры об ожидаемые климатических изменениях ледовых условий в арктических морях России, идущих с неухающей силой, можно однозначно утверждать, что, как бы ни развивались ледовые условия — необратимо по варианту дальнейшего потепления или циклически, с переходом к очередному «холодному» циклу, для оценки ледовых условий в Восточно-Сибирском море необходимо учитывать особенности развития ледяных массивов, характерные для каждого климатического цикла.

Выявленные различия в сезонной изменчивости ледяных массивов Восточно-Сибирского моря могут быть использованы в оперативной и прогностической работе по обеспечению плавания судов на трассе СМП.

Благодарности. Статья подготовлена по результатам проектов «Исследование гидрометеорологических процессов в Мировом океане, морях и устьях рек России, Арктике и Антарктике» ЦНТП Росгидромета.

Acknowledgments. The article was prepared based on the results of the projects “Study of hydrometeorological processes in the world ocean, seas and estuaries of Russia, Arctic and Antarctic» of the Roshydromet CSTP.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карклин В.П., Юлин А.В., Шаратунова М.В., Мочнова Л.П. Климатическая изменчивость ледяных массивов Карского моря // Проблемы Арктики и Антарктики. 2017. № 4 (114). С. 37–46.
2. Опасные ледовые явления для судоходства в Арктике / Под ред. Е.У. Миронова. СПб.: ААНИИ, 2010. 320 с.
3. Юлин А.В., Ковалев Е.Г. Формирование экстремальных ледовых условий в Восточно-Сибирском море в летний период 1990 г. // Труды ААНИИ. 1994. Т. 432. С. 5–17.
4. Юлин А.В., Бабко О.И. Особенности развития крупных аномалий площадей ледяных массивов Восточно-Сибирского моря в летний период // Труды ААНИИ. 1994. Т. 432. С. 17–28.
5. Карклин В.П., Юлин А.В., Карелин И.Д., Иванов В.В. Климатические колебания ледовитости арктических морей сибирского шельфа // Труды ААНИИ. 2001. Т. 443. С. 5–11.

REFERENCES

1. Karklin V.P., Yulin A.V., Sharatunova M.V., Mochnova L.P. Climate variability of the Kara sea ice massifs. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Problems of Arctic and Antarctic. 2017, 4 (114): 37–46. [In Russian].
2. *Opasnye ledovye javlenija dlja sudohodstva v Arktike*. Dangerous ice conditions for shipping in the Arctic. E.U. Mironov eds. St. Petersburg: AARI, 2010: 320 p. [In Russian].
3. Kovalev E.G., Yulin A.V. Formation of Extreme Ice Conditions in the East Siberian Sea in Summer 1990. *Trudy AANII*. Proc. AARI. 1994, 432: 5–17. [In Russian].
4. Yulin A.V., Babko O.I. Features of development of large anomalies of ice massifs areas in East Siberian sea during a summer. *Trudy AANII*. Proc. AARI. 1994, 432: 17–28. [In Russian].
5. Karklin V.P., Yulin A.V., Karelin I.D., Ivanov V.V. Climatic fluctuations of ice cover extent in the Siberian shelf Arctic seas. *Trudy AANII*. Proc. AARI. 2001, 443: 5–11. [In Russian].

6. Фролов И.Е., Гудкович З.М., Карклин В.П., Ковалев Е.Г., Смоляницкий В.М. Научные исследования в Арктике. Т. 2. Климатические изменения ледяного покрова морей Евразийского шельфа. СПб.: Наука, 2007. 136 с.
7. Frolov I., Gudkovich Z., Karklin V., Kovalev E. Smolyanitsky V. Climate Change in Eurasian Arctic Shelf Seas. Centennial Ice Cover Observations. Praxis Publishing Ltd. UK, Chichester, 2009. 164 p.
8. Юлин А.В., Бровин А.И. К вопросу о выделении градаций аномальности в рядах гидрометеорологических элементов // Труды ААНИИ. 1990. Т. 423. С. 84–88.
6. Frolov I.E., Gudkovich Z., Karklin V., Kovalev E. Smolyanitsky V. *Nauchnye issledovanija v Arktike. V. 2. Klimaticheskie izmenenija ledjanogo pokrova morej Evrazijskogo shel'fa.* Scientific research in the Arctic. V. 2. Climate Change of ice cover extent in Eurasian Arctic Shelf Seas. St. Petersburg: Nauka, 2007: 136 p. [In Russian].
7. Frolov I., Gudkovich Z., Karklin V., Kovalev E. Smolyanitsky V. Climate Change in Eurasian Arctic Shelf Seas. Centennial Ice Cover Observations. Praxis Publishing Ltd. UK, Chichester, 2009: 164 p.
8. A.V. Yulin, A.I. Brovin. On the issue of the allocation of gradation anomalies in the series of hydrometeorological elements. *Trudy AANII.* Proc. AARI. 1990, 423: 84–88. [In Russian].

УДК 551.465.53

DOI: 10.30758/0555-2648-2018-64-3-241-249

ИЗМЕНЧИВОСТЬ ТЕЧЕНИЙ КАРСКОГО МОРЯ

Ю.П. ГУДОШНИКОВ¹, А.В. НЕСТЕРОВ¹, В.А. РОЖКОВ^{1,2}, Е.А. СКУТИНА^{1*}

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

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

*elskut@aari.ru

CURRENTS VARIABILITY OF THE KARA SEA

Yu.P. GUDOSHNIKOV¹, A.V. NESTEROV¹, V.A. ROZHKOV^{1,2}, E.A. SKUTINA^{1*}

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

² — Saint-Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

*elskut@aari.ru

Received July, 12, 2018

Accepted September, 7, 2018

Keywords: Kara Sea currents, spectral analysis of vector stochastic processes and fields, vector variance analysis.

Summary

To study the water dynamics of the Kara Sea in the prospective areas of shelf development, the instrumental measurements of currents speeds were made at 6 submerged autonomous buoy stations with about a year duration for 5 of them and about half a year duration for 1.

A spectral analysis of implementations of these measurements allowed to determine, that characteristic currents feature is a presence of annual, tidal and synoptical components of currents speeds variability. The contribution estimate of each of these components into the total process variance using the method of vector variance analysis was performed in the work.

Estimates of currents speeds show almost the same character of variability at all submerged autonomous buoy stations by all parameters. It is appearing in the numerical values of main parameters of variability, profiles shape of their vertical distribution, evolution of these profiles in the annual course and in the correlations of summary current characteristic and its nonperiodical component. At all 6 submerged autonomous buoy stations along all depths, mean currents are directed to N-NNE-NE and

Citation: Gudoshnikov Yu.P., Nesterov A.V., Rozhkov V.A., Skutina E.A. Currents variability of the Kara sea. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2018, 64, 3: 241–249. [In Russian]. doi: 10.30758/0555-2648-2018-64-3-241-249

values of mean scalar speed of summary current and maximum at upper horizons are changing within relatively small limits of 10,5–1,5 cm/s and 65–80 cm/s correspondingly. For vertical distribution, it is typical a decrease with a depth the values of speeds and their variability when the direction of mean transfer and relative proximity to it of maximum variability direction is preserved. The annual course is well-defined and becomes apparent in increase of current speeds and their variability in case of simultaneous strengthening of vertical contrast in spring and summer. The variability of nonperiodical current at all depths and corresponding vertical contrasts are weakened in comparison with summary current and ellipses shape of standard deviation is more elongate.

Поступила 7 июля 2018 г.

Принята к печати 7 сентября 2018 г.

Ключевые слова: векторный дисперсионный анализ, спектральный анализ векторных случайных процессов и полей, течения Карского моря.

Для изучения динамики вод Карского моря в перспективных районах хозяйственного освоения шельфа были сделаны инструментальные измерения скорости течений на 6 плавучих автономных буйковых станциях, продолжительностью около года на 5 из них и около полу-года на Викуловской.

Спектральный анализ реализаций этих измерений позволил установить, что характерной особенностью течений является наличие годовой, приливной и синоптической составляющих изменчивости скорости течения. В работе выполнена оценка вклада каждой из этих составляющих в общую дисперсию процесса методом векторного дисперсионного анализа.

Оценки скоростей течений демонстрируют практически одинаковый характер изменчивости на всех плавучих автономных буйковых станциях по всем параметрам. Это проявляется в числовых значениях основных параметров изменчивости, форме профилей их вертикального распределения, эволюции этих профилей в годовом ходе и в соотношениях характеристик суммарного течения и его непериодической составляющей. На всех шести плавучих автономных буйковых станциях на всех глубинах средние течения направлены на С-ССВ-СВ, а значения средней скалярной скорости суммарного течения и максимума на верхних горизонтах изменяются в относительно узких пределах 10,5–1,5 см/с и 65–80 см/с соответственно. Для вертикального распределения характерно уменьшение с глубиной величин самих скоростей и их изменчивости при сохранении направления среднего переноса и относительной близости к нему направления максимальной изменчивости. Годовой ход хорошо выражен и проявляется в увеличении весной и летом скоростей течения и их изменчивости при одновременном усилении вертикальных контрастов. Изменчивость непериодического течения на всех глубинах и соответствующие вертикальные контрасты ослаблены сравнительно с суммарным течением, а форма эллипсов СКО более вытянутая.

ВВЕДЕНИЕ

В Карском море в 2012–2013 гг. были поставлены шесть плавучих автономных буйковых станций (ПАБС) большой продолжительности в районах хозяйственного освоения шельфа. На рисунке 1 показано их положение.

В таблице 1 приведены сведения о месте постановки станций: номер, глубина места, количество горизонтов измерений, время и продолжительность измерений. Дискретность измерений составила для отсчетов вектора скорости — 10 мин, для горизонтов — 2 м.

В настоящей статье дана обобщенная характеристика вектора скорости течений \vec{V} , выявлена зависимость \vec{V} от вертикальной координаты z и времени t , установлены черты сходства и различия скорости течений на этих 6 станциях.

Для обобщения исходных данных приняты вероятностные характеристики:

– плоский вектор математического ожидания $\vec{m}_V(z, t)$ с проекциями m_{v_1} на меридиан и m_{v_2} на параллель, модулем $|\vec{m}_V|$ и направлением φ ;



Рис. 1. Положение ПАБС в 2012–2013 гг.

Районы освоения шельфа, в которых были установлены ПАБС: ПАБС-1 — Рогозинская, ПАБС-2 — Нансена, ПАБС-3 — Университетская, ПАБС-4 — Викуловская, ПАБС-5 — Татариновская, ПАБС-6 — Матусевича

Fig. 1. SABS location in 2012–2013.

Areas offshore, which were installed SABS: ПАБС-1 — Rogozinskaya, ПАБС-2 — Nansena, ПАБС-3 — Universitetskaya, ПАБС-4 — Vikulovskaya, ПАБС-5 — Tatarinovskaya, ПАБС-6 — Matusевича

Таблица 1

Характеристика наблюдений за течениями

Номер станции	Глубина места, м	Количество горизонтов измерений	Время и продолжительность измерений
ПАБС-1	53	19 горизонтов от 7,1 до 43,1 м	Измерения с 15.08.2012 по 22.07.2013, 340 суток
ПАБС-2	195	29 горизонтов от 6,9 до 62,9 м	Измерения с 15.08.2012 по 22.07.2013, 340 суток
ПАБС-3	180	32 горизонта от 7,4 до 69,4 м	Измерения с 25.08.2012 по 23.07.2013, 332 суток
ПАБС-4	150	28 горизонтов от 6,7 до 60,7 м	Измерения с 26.08.2012 по 21.02.2013, 179 суток
ПАБС-5	245	29 горизонтов от 6,5 до 62,5 м	Измерения с 13.08.2012 по 20.07.2013, 340 суток
ПАБС-6	130	27 горизонтов от 6,0 до 58,0 м	Измерения с 14.08.2012 по 23.07.2013, 341 сутки

– диадный тензор дисперсии $D_{\vec{v}}(z, t)$,

– ковариационный тензор $K_{\vec{v}}(z, t, \tau)$,

– тензор спектральной плотности $S_{\vec{v}}(z, t, \omega)$,

где τ — временной сдвиг, ω — частота колебаний [1].

Инвариантами тензоров являются:

– линейный I_1 — сумма элементов на главной диагонали,

– индикатор вращения Θ — разность недиагональных элементов,

– оси эллипса λ_1, λ_2 [1].

ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕЧЕНИЙ ПО СТАНЦИЯМ

Наиболее общую характеристику изменчивости течений дают оценки спектра и распределения вероятностей. Оценка $S_V(\omega)$ получена корреляционным методом при усечении коррелограммы $K_V(\tau)$ в точке $\tau_{max} = 3$ месяца (около 0,3 длины ряда).

Для выделения неперидической (без прилива) составляющей использовано скользящее осреднение на периоде 13 часов.

На рисунке 2 приведены графики инвариантов тензора $S_V(\omega)$ на верхнем и нижнем горизонтах.

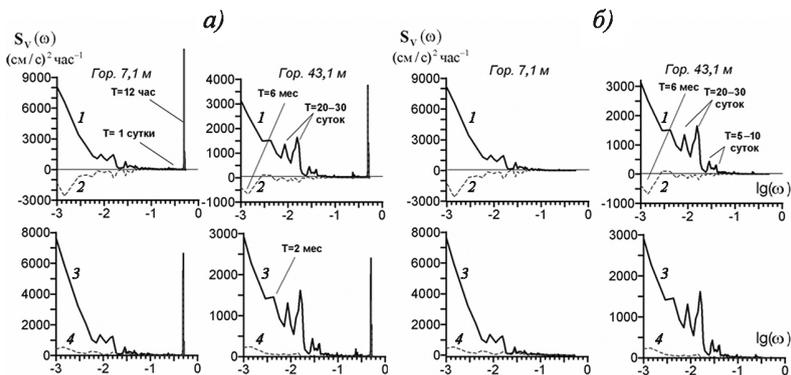


Рис. 2. Инварианты спектра: 1 — линейный $I_1(\omega)$, 2 — индикатор вращения $\vartheta(\omega)$, 3, 4 — полуоси эллипса $\lambda_{1,2}(\omega)$; а — суммарная скорость, б — неперидическая составляющая

Fig. 2. Spectrum invariants: 1 — linear $I_1(\omega)$, 2 — rotation indicator $\vartheta(\omega)$, 3, 4 — ellipse semiaxes $\lambda_{1,2}(\omega)$; а — summary speed, б — nonperidical component

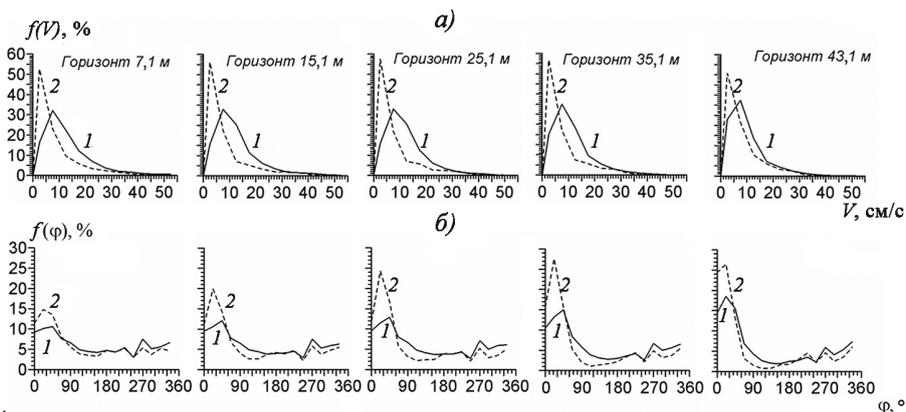


Рис. 3. Одномерная повторяемость скорости суммарного течения (1) и неперидической составляющей (2) по градациям модуля (а) и направления (б)

Fig. 3. One-dimensional frequency of the summary current speed (1) and nonperidical component (2) according to gradations of modulus (а) and direction (б)

Знак индикатора вращения показывает, что в низкочастотном диапазоне с периодами колебаний более 10 суток преобладает вращение против часовой стрелки, так как $\vartheta(\omega) < 0$, а на частоте полусуточного прилива — вращение по часовой стрелке, так как $\vartheta(\omega) > 0$, а $\lambda_2(\omega) \neq 0$. Эта особенность приливов отмечена на всех 6 станциях.

Сильная вытянутость эллипсов рассеяния в низкочастотной области характерна для всех станций, кроме ПАБС-5.

Распределение по градациям модуля скорости $f(V)$ (рис. 3) одномодальное, у суммарного течения мода приходится на 5–10 см/с, а у непериодической составляющей на 1–5 см/с.

В распределении по румбам преобладает ССВ направление. Вторая мода $f(\varphi)$ (на 3-ЗСЗ) суммарных течений обусловлена приливом, у непериодической составляющей она отсутствует.

Эмпирические распределения скорости суммарных течений и непериодической составляющей $f(V)$ по форме близки к логарифмически нормальному закону распределения.

Значения \bar{V} , σ_V , V_{\max} , $I_1^{0.5}$, $\lambda_{1,2}$ уменьшаются с глубиной. Наибольшее ослабление максимальных скоростей течений V_{\max} происходит на глубинах 10–15 м, у остальных параметров изменение более равномерное. При этом у непериодической составляющей скорость изменения \bar{V} и V_{\max} заметно меньше, чем у суммарного течения. Значения основных параметров для суммарного течения и непериодического компонента составляют: $\bar{V} = 13,5\text{--}10,5$ и $8,5\text{--}7,8$ см/с; $\sigma_V = 9,5\text{--}7,0$ и $8,0\text{--}7,0$ см/с; $V_{\max} = 80\text{--}50$ и $70\text{--}45$ см/с; $I_1^{0.5} = 12,5\text{--}9,5$ и $10,0\text{--}8,0$ см/с. Распределение дисперсии по направлениям неравномерное. Согласно рисунку 4 эллипсы непериодического компонента вытянуты

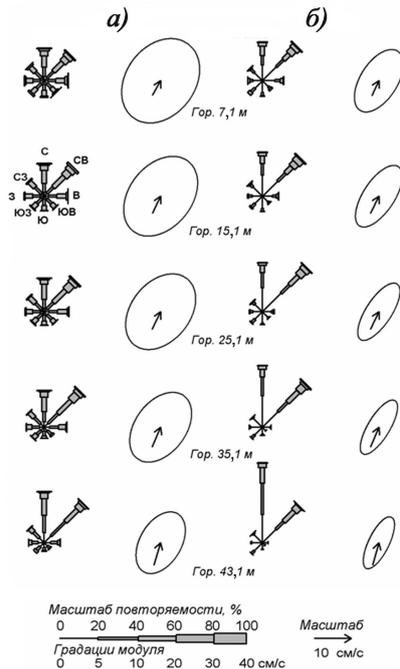


Рис. 4. Характеристики распределения вероятностей скорости течения и его моментов: розы повторяемости (%) и совмещенные векторы средней скорости и эллипсов СКО суммарного течения (а) и непериодической составляющей (б)

Fig. 4. Probability distribution characteristics of current speed and its quantiles: frequency roses (%) and combined vectors of mean speed and ellipses of MRSD of summary current (a) and nonperiodical component (b)

ты значительно сильнее, чем эллипсы суммарного течения. Значение χ уменьшается с глубиной от 0,75 до 0,6 и от 0,55 до 0,35.

Корреляция между течениями на различных горизонтах обусловлена совместными однонаправленными флуктуациями коллинеарных составляющих \vec{V} , то есть $r_{\perp} \cong 0$, $r_{\uparrow\downarrow} \cong \mu$ [2].

Таблица 2

Матрица индикатора общей векторной корреляции

Горизонт, м	7,1	13,1	19,1	21,1	31,1	37,1	43,1	7,1	13,1	19,1	21,1	31,1	37,1	43,1
	Суммарное течение							Неприливная составляющая						
7,1	1	0,91	0,87	0,82	0,76	0,71	0,64	1	0,96	0,93	0,89	0,85	0,81	0,76
13,1	-	1	0,97	0,91	0,86	0,80	0,72	-	1	0,98	0,95	0,91	0,87	0,82
19,1	-	-	1	0,96	0,90	0,84	0,76	-	-	1	0,98	0,94	0,90	0,85
25,1	-	-	-	1	0,95	0,88	0,79	-	-	-	1	0,98	0,94	0,89
31,1	-	-	-	-	1	0,95	0,86	-	-	-	-	1	0,98	0,93
37,1	-	-	-	-	-	1	0,93	-	-	-	-	-	1	0,97
43,1	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	1

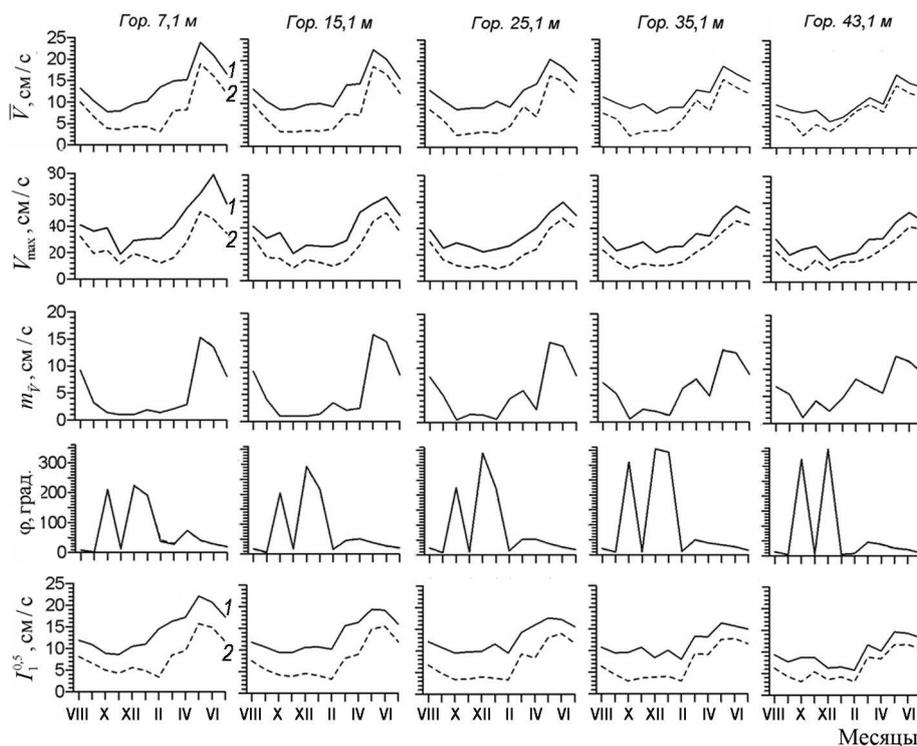


Рис. 5. Годовой ход средней скалярной скорости, максимума, модуля и направления среднего вектора и полного среднеквадратического отклонения суммарного течения (1) и непериодической составляющей (2) на верхнем, нижнем и трех промежуточных горизонтах

Fig. 5. Annual course of mean scalar speed, maximum, modulus and direction of mean vector and full mean root square deviation of summary current (1) and nonperiodical component (2) at upper, lower and three intermediate horizons

Моменты распределения: средняя скалярная скорость \bar{V} , максимум V_{\max} , модуль $m_{\bar{v}}$ и направление φ среднего вектора, полное среднеквадратическое отклонение $I_1^{0,5}$, вытянутость χ и ориентация α эллипса СКО, коэффициент вариации v .

В корреляционных матрицах (таблица 2) использован только индикатор общей корреляции μ и ограниченное количество горизонтов.

Годовой ход характеристик изменчивости скорости течения по месяцам описан в терминах моментов распределения. На рисунке 5 показаны графики годового хода средней скалярной и максимальной скорости, модуля и направления среднего вектора и полного векторного СКО.

В зависимости от сезона переход от месяца к месяцу может быть как относительно плавным, так и скачкообразным. При этом на всех глубинах характер годового хода качественно одинаков и во все месяцы сохраняется отмеченная ранее закономерность — примерно однонаправленное изменение параметров изменчивости с глубиной.

На рисунке 6 совмещены векторы $\bar{m}_{\bar{v}}$ и эллипсы $\sigma_{\bar{v}}$ по месячным сериям наблюдений.

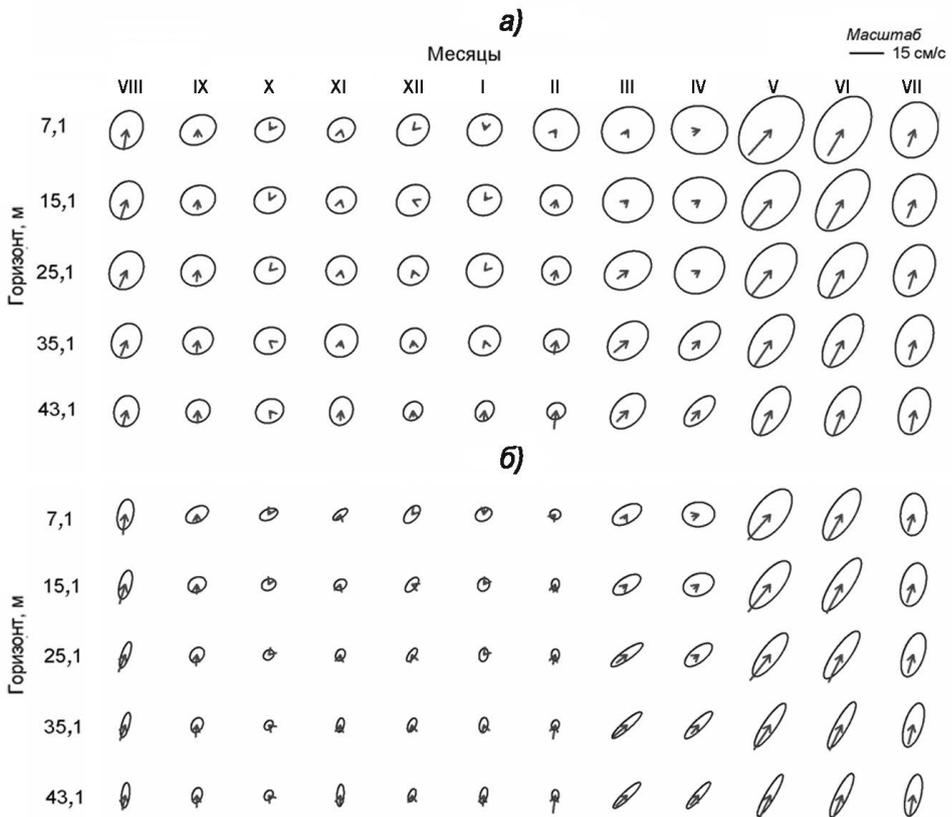


Рис. 6. Векторы средней скорости и эллипсы СКО суммарного течения (а) и неперидической составляющей (б) по месяцам

Fig. 6. Vectors of mean speed and ellipses of MRSD of summary current (a) and nonperiodical component (b) by months

Они показывают на всех горизонтах увеличенные значения \bar{V} , σ_v , V_{\max} , $I_1^{0,5}$ с апреля по сентябрь (с максимумом в мае) и пониженные значения с сентября–октября по февраль–март (и минимумом в октябре–феврале). Наиболее сильные изменения происходят от апреля к маю и от августа–сентября к октябрю. Направление φ среднего вектора $\bar{\mathbf{m}}_v$ и ориентация α эллипса СКО σ_v (на ССВ) в месяцы со значительными скоростями и изменчивостью стабильны и близки друг к другу, а отдельные выбросы отмечены только в месяцы с малыми значениями модуля $m_{\bar{v}}$ и резко ослабленными значениями \bar{V} и V_{\max} .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На стадии разведочного анализа этих многомерных (по количеству горизонтов и по продолжительности) исходных данных удалось установить, что характерная особенность реализаций скорости течений в Карском море — это наличие годовой и приливной ритмик, а также межсезонной, синоптической и мелкомасштабной изменчивости.

Оценки скоростей течений демонстрируют практически одинаковый характер изменчивости на всех ПАБС по всем параметрам. Это проявляется в числовых значениях основных параметров изменчивости, форме профилей их вертикального распределения, эволюции этих профилей в годовом ходе и в соотношениях характеристик суммарного течения и его непериодической составляющей. На всех шести ПАБС на всех глубинах средние течения направлены на С-ССВ-СВ, а значения средней скалярной скорости суммарного течения и максимума на верхних горизонтах изменяются в относительно узких пределах 10,5–1,5 см/с и 65–80 см/с соответственно. Для вертикального распределения характерно уменьшение с глубиной величин самих скоростей и их изменчивости при сохранении направления среднего переноса и относительной близости к нему направления максимальной изменчивости. Годовой ход хорошо выражен и проявляется в увеличении весной и летом скоростей течения и их изменчивости при одновременном усилении вертикальных контрастов. Изменчивость непериодического течения на всех глубинах и соответствующие вертикальные контрасты ослаблены сравнительно с суммарным течением, а форма эллипсов СКО более вытянутая.

Для выполнения конформаторного (подтверждающего) анализа этих данных необходимо задать модель вида

$$\vec{V}(t, z) = \sum_k a_k(t) \vec{\varphi}_k(z) \quad \text{или} \quad \vec{V}(t, \vec{r}) = \sum_k \vec{a}_k(t) \varphi_k(\vec{r}),$$

где $\varphi(\bullet)$ — базисные функции, $a(\bullet)$ — коэффициенты.

В пределах этой статьи это нецелесообразно, но, безусловно, необходимо рассмотреть в следующей статье, проведя совместный анализ разложения системы временных рядов скорости течения по базисным естественным ортогональным функциям и векторным естественным ортогональным функциям [3–8].

Благодарности. Исследования выполнены в рамках инновационной деятельности ПАО «НК «Роснефть»».

Acknowledgments. The research was carried out within the framework of innovative activities of PJSC “NK “Rosneft”».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кочин Н.Е. Векторный анализ и начала тензорного исчисления. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 425 с.
2. Иванов Н.Е. О характеристиках корреляции скоростей ветра, морских течений и дрейфа льда // Метеорология и гидрология. 2004. № 8. С. 61–72.
3. Меццерская А.В., Руховец Л.В., Юдин М.И., Яковлева Н.И. Естественные составляющие метеорологических полей. Л.: Гидрометеоиздат, 1970. 200 с.
4. Бельшев А.П., Клеванцов Ю.П., Рожков В.А. Вероятностный анализ морских течений. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. 264 с.
5. Зубакин Г.К. Крупномасштабная изменчивость состояния ледяного покрова морей Северо-Европейского бассейна. Л.: Гидрометеоиздат, 1987. 160 с.
6. Методическое письмо по вероятностному анализу векторных временных рядов скоростей течения и ветра / Под ред. В.А. Рожкова. Л.: Гидрометеоиздат, 1984. 61 с.
7. Клеванцов Ю.П., Рожков В.А. и др. Вертикальная структура течений в Финском заливе // Изв. РГО. 2013. Т. 145. Вып. 4. С. 24–43.
8. Рожков В.А., Сухих Н.А. Типизация эпюр вертикального распределения скорости морских течений в Финском заливе Балтийского моря // Изв. РГО. 2014. Т. 146. Вып. 4. С. 24–38.

REFERENCES

1. Kochin N.E. *Vektorny analiz i nachala tenzornogo ischisleniia*. Vector analysis and basics of tensor calculus. Moscow: Russian Academy of Sciences, 1961: 425 p. [In Russian].
2. Ivanov N.E. Correlation characteristics of wind, sea currents, and ice drift. *Meteorologiya i gidrologiya*. Russian Meteorology and Hydrology. 2004, 8: 61–72. [In Russian].
3. Meshcherskaia A.V., Rukhovets L.V., Iudin M.I., Iakovleva N.I. *Estestvennye sostavliaiushchie meteorologicheskikh polei*. Natural components of meteorological fields. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1970: 200 p. [In Russian].
4. Belyshev A.P., Klevantsov Yu.P., Rozhkov V.A. *Veroiatnostnyi analiz morskikh techenii*. Probability analysis of sea currents. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1983: 264 p. [In Russian].
5. Zubakin G.K. *Krupnomasshtabnaia izmenchivost' sostoiianiia ledianogo pokrova morei Severo-Evropetskogo basseina*. A large-scale variability of the ice cover of the North-European basin seas. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1987: 160 p. [In Russian].
6. *Metodicheskoe pis'mo po veroiatnostnomu analizu vektornykh vremennykh riadov skorostei techeniia i vetra*. Methodological letter on probability analysis of vector time series of current and wind speeds. Ed.: V.A. Rozhkov. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1984: 61 p. [In Russian].
7. Klevantsov Yu. P., Rozhkov V.A., Smirnov K.G., Sukhikh N.A. Vertical structure of currents in the Gulf of Finland. *Izvestiia RGO*. Proceedings of the Russian Geographical Society. 2013, 145, 4: 24–43. [In Russian].
8. Rozhkov V.A., Sukhikh N.A. Typing of the vertical distribution of the sea current velocity in the Gulf of Finland. *Izvestiia RGO*. Proceedings of the Russian Geographical Society. 2014, 146, 4: 24–38. [In Russian].

ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ГИДРОСФЕРЫ

УДК 551.510.534 (99)

DOI: 10.30758/0555-2648-2018-64-3-250-261

ВАРИАЦИИ ОБЩЕГО СОДЕРЖАНИЯ ОЗОНА НА РОССИЙСКИХ АНТАРКТИЧЕСКИХ СТАНЦИЯХ. РЕЗУЛЬТАТЫ МНОГОЛЕТНИХ НАБЛЮДЕНИЙ

Е.Е. СИБИР*, В.Ф. РАДИОНОВ

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

*sibrus@aari.ru

TOTAL OZONE VARIATIONS AT RUSSIAN ANTARCTIC STATIONS. RESULTS OF LONG-TERM OBSERVATIONS

E.E. SIBIR*, V.F. RADIONOV

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

*sibrus@aari.ru

Received July, 19, 2018

Accepted August, 6, 2018

Keywords: Antarctica, ozone hole, total ozone.

Summary

The results of observations of total ozone content (TOC) at the Russian Antarctic stations Mirny (66° 34' N, 93° 01' E), Novolazarevskaya (70° 46' S, 11° 50' E) and Vostok (78° 38' S, 106° 52' E) from 1975 to 2017 are presented. Measurements were carried out by filters ozonemeters M-83/M-124. Throughout this period, there have been steady decreases in TOC in spring time. Early 1990s, the average TOC in September and October at Mirny decreased by 70–75 % of its average values for 1975–1980. The effect of the ozone hole and its intensity depend on ozone-depleting substance (ODS) levels, the dynamical processes and variations of temperature in the stratosphere. Considering the slow rate of decrease ODSs concentration, changes in size and depth of ozone hole have been mainly controlled by variations in temperature and dynamical processes. The destruction of the stratospheric circumpolar vortex early spring of 1988 was the reason that the spring negative anomaly of the TOC was not formed at all. A sharp increase of temperature in the stratosphere in the spring of 2002 was accompanied by an increase in the TOC. It led to reduction in the size of the “ozone hole” and even its dividing into two parts at the end of September. Since the early 2000s, there has been a tendency

Citation: *Sibir E.E., Radionov V.F.* Total ozone variations at russian antarctic stations. Results of long-term observations. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2018, 64, 3: 250–261. [In Russian]. doi: 10.30758/0555-2648-2018-64-3-250-261.

to return the TOC to the values observed in 1970s and to increase its interannual variability in comparison to 1990s.

Поступила 19 июля 2018 г.

Принята к печати 6 августа 2018 г.

Ключевые слова: Антарктика, общее содержание озона, озоновая дыра.

В статье представлены результаты наблюдений за общим содержанием озона на российских антарктических станциях Мирный (66° 34' ю.ш., 93° 01' в.д.), Новолазаревская (70° 46' ю.ш., 11° 50' в.д.) и Восток (78° 38' ю.ш., 106° 52' в.д.) с 1975 г. по настоящее время. Измерения выполнялись фильтровыми озонотрами М-83/М-124. За этот период наблюдалась устойчивая тенденция уменьшения общего содержания озона антарктической весной. К началу 1990-х гг. средние величины общего содержания озона в сентябре и октябре на ст. Мирный составляли лишь 70–75 % от их среднего значения за 1975–1980 гг. Степень проявления эффекта озоновой дыры существенно зависит от количества озоноразрушающих веществ в атмосфере, динамических факторов и температуры в стратосфере. Учитывая медленное уменьшение количества озоноразрушающих веществ в атмосфере, изменения размеров и интенсивности озоновой дыры вызываются в основном колебаниями температуры и динамическими процессами. Разрушения стратосферного циркумполярного вихря уже ранней весной в 1988 г. было причиной того, что весенняя отрицательная аномалия общего содержания озона вообще не сформировалась. Резкое значительное повышение температуры стратосферы весной 2002 г. сопровождалось ростом общего содержания озона. Это привело к уменьшению размеров дыры и даже ее разделению на две части к концу сентября. С начала 2000-х гг. наблюдается тенденция возвращения величин общего содержания озона к значениям, характерным для периода, предшествовавшего проявлению эффекта озоновой дыры, и увеличение межгодовой изменчивости общего содержания озона весной по сравнению с последним десятилетием прошлого века.

ВВЕДЕНИЕ

Малые газовые составляющие атмосферы (МГС), такие как углекислый газ, озон, метан и некоторые другие, играют значительную роль в формировании радиационного режима системы Земля–атмосфера. При этом из-за очень высокой прозрачности антарктической атмосферы за счет малого содержания в ней водяного пара и аэрозоля роль МГС существенно выше, чем в других регионах Земли. Уменьшение общего содержания озона (ОСО) в атмосфере может негативно сказываться на состоянии биосферы. Образование и разрушение озона в атмосфере происходит в ходе фотохимических реакций под воздействием солнечного излучения, главным образом в ультрафиолетовой области его спектра. Жесткое ультрафиолетовое излучение с длиной волны менее 0,28 мкм, вредное и даже губительное для всего живого, полностью поглощается молекулами озона, находящимися в стратосфере, и не доходит до поверхности Земли.

Повышенный интерес мирового научного сообщества к проблеме уменьшения общего содержания озона над Антарктикой проявился во второй половине 1980-х гг. в связи с обнаружением устойчивого проявления эффекта уменьшения ОСО в весенние антарктические месяцы (сентябрь–ноябрь), получившего название «озоновая дыра».

Уменьшение ОСО в атмосфере Антарктиды в период антарктической весны было замечено еще в период Международного геофизического года (1957–1959 гг.). Тогда его объясняли влиянием только динамических процессов в атмосфере над антарктическим куполом [1]. Другие факторы, которые потенциально могли влиять на значительное уменьшение ОСО после окончания полярной ночи, включая

и фотохимические процессы, не рассматривались. Позднее на ст. Восток в 1978 и 1981 гг. и на японской станции Сева в октябре 1982 г. [2] измерения тоже показали уменьшение общего содержания озона до значений менее 220 ед. Добсона. В начале 1980-х гг. истощение озонового слоя было замечено по данным спутниковых наблюдений. В 1985 г. внимание мировой общественности привлекла публикация [3], в которой было высказано предположение, что причиной столь низких содержаний озона является воздействие на озоновый слой фреонов.

На появление аномалий ОСО над Антарктидой, степень их выраженности и продолжительность значительное влияние оказывает атмосферная циркуляция — развитие и устойчивое существование на протяжении достаточно длительного времени циркумполярного стратосферного вихря. Он блокирует поступление воздушных масс с высоким содержанием озона из стратосферы умеренных широт. Кроме того, внутри стратосферного вихря формируется область очень низких температур — ниже -78°C , — необходимых для протекания фотохимических озоноразрушающих реакций с участием хлор- и бромсодержащих веществ на поверхности частиц полярных стратосферных облаков [4, 5].

Образование озоновых дыр весной над Антарктидой продолжается до настоящего времени. При этом в текущем десятилетии наблюдается большая межгодовая изменчивость ОСО весной по сравнению с 1990-ми гг. [6, 7]. Такие достаточно резкие колебания вызваны в основном динамическими факторами. В то же время можно говорить о некотором увеличении ОСО над Антарктидой весной по сравнению с началом текущего века. Однако недостаточная определенность таких оценок не позволяет утверждать, что увеличение ОСО вызвано только уменьшением озоноразрушающих составляющих атмосферы [7]. Кроме того, в последние годы отмечаются значительные расхождения в данных измерений различных спутников, проводящих измерения ОСО над Антарктидой. Поэтому очевиден интерес к данным наземных наблюдений.

АППАРАТУРА И ПУНКТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Для измерений общего содержания озона на российских антарктических станциях, как и на всех станциях озонметрической сети России, использовался фильтровый озонметр М-83, а затем с 1983 г. его модернизированный аналог М-124. Методическую и аппаратную поддержку наблюдений осуществляет ГГО им. А.И. Воейкова, являющаяся центром ВМО по калибровке и контролю качества фильтровых озонметров и ответственная за методическое и метрологическое обеспечение наблюдений ОСО на озонметрической сети Росгидромета [8]. На протяжении многих лет (первые наблюдения озонметром М-83 на территории СССР были выполнены в 1958 г.) методика ГГО изменялась, но с 1974 г. данные измерений в Антарктиде можно считать репрезентативными и достаточно надежными. Этот вывод подтверждают, в частности, результаты сравнения наземных наблюдений со спутниковыми. Калибровка и контроль качества используемых фильтровых озонметров проводится в ГГО по озонному спектрофотометру Добсона № 108. Он является вторичным эталоном и каждые четыре года калибруется по Европейскому региональному эталону ОСО.

Наблюдения за общим содержанием озона (ОСО) регулярно проводятся на трех российских антарктических станциях (табл. 1).

Годы наблюдений ОСО на российских антарктических станциях

Станция	Южная широта	Восточная долгота	Высота над уровнем моря, м	Годы наблюдений
Мирный	66° 34′	93° 01′	36	1974–2018
Новолазаревская	70° 46′	11° 50′	130	1986–1991, 1993, 1995–1996, 2001–2018
Восток	78° 38′	106° 52′	3488	1976–1978, 1981, 1986–1991, 1998–2002, 2004–2005, 2007–2017

Измерения озонметром М-124 выполняются при высотах Солнца более 5° [9, 10], поэтому на станции Мирный они возможны только в период с 31 июля по 13 мая, на станции Новолазаревская — с 15 августа по 28 апреля, а на станции Восток — с 7 сентября по 6 апреля. С 2000 г. результаты измерений ОСО на российских станциях и их анализ размещаются в ежеквартальных бюллетенях «Состояние природной среды Антарктики» (<http://www.aari.aq/>). В этой статье обобщается информация об измерениях ОСО на трех российских станциях в Антарктиде с начала наблюдений на них до 2018 г.

РЕЗУЛЬТАТЫ И АНАЛИЗ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

На рис. 1 представлены результаты измерений ОСО на российских станциях. На нем для каждой станции в виде кривых приведены среднесуточные значения общего содержания озона: осредненные за весь период наблюдений и результаты измерений за три последних антарктических сезона (максимально с августа одного года по июнь следующего) в 61-й (2015/16 г.), 62-й (2016/17 г.) и 63-й (2017/18 г.) Российских антарктических экспедиций (РАЭ). Серым цветом выделена область, охватывающая все значения ОСО, наблюдавшиеся для конкретного дня года за весь имеющийся период наблюдений. Верхняя и нижняя границы этой области соответствуют максимальным и минимальным за весь период наблюдений среднесуточным значениям ОСО. На станциях Новолазаревская и Восток во внутригодовом ходе содержания озона антарктической весной отчетливо проявляется сезонный минимум его значений для величин как средних за весь период наблюдений, так и за отдельные сезоны. В Мирном столь явно выраженный сезонный ход ОСО отмечался в последние годы только в период 61-й РАЭ — сезон 2015/16 г.

На рисунке также хорошо видно, что в весенний период на станции Мирный амплитуда межсуточной изменчивости ОСО существенно больше, чем на двух других станциях. Этот факт объясняется географическим положением Мирного, находящегося на периферии образующейся весной озоновой дыры. Изменения границ дыры, обусловленные динамическими процессами в атмосфере, приводят к резким колебаниям ОСО над станцией ото дня ко дню и большим различиям среднесуточных значений для конкретного дня в разные годы. При рассмотрении данных измерений за последние три сезона наблюдений обращают на себя внимание сравнительно низкие (иногда минимальные за весь период наблюдений) и достаточно устойчивые значения ОСО весной 2015 г. В этот период циркумполярный вихрь был достаточно стабилен, а его форма близка к концентрической. «Центр вихря» в этом году находился вблизи полюса большую часть весны. Но в 2016 г. межсуточная изменчивость содержания

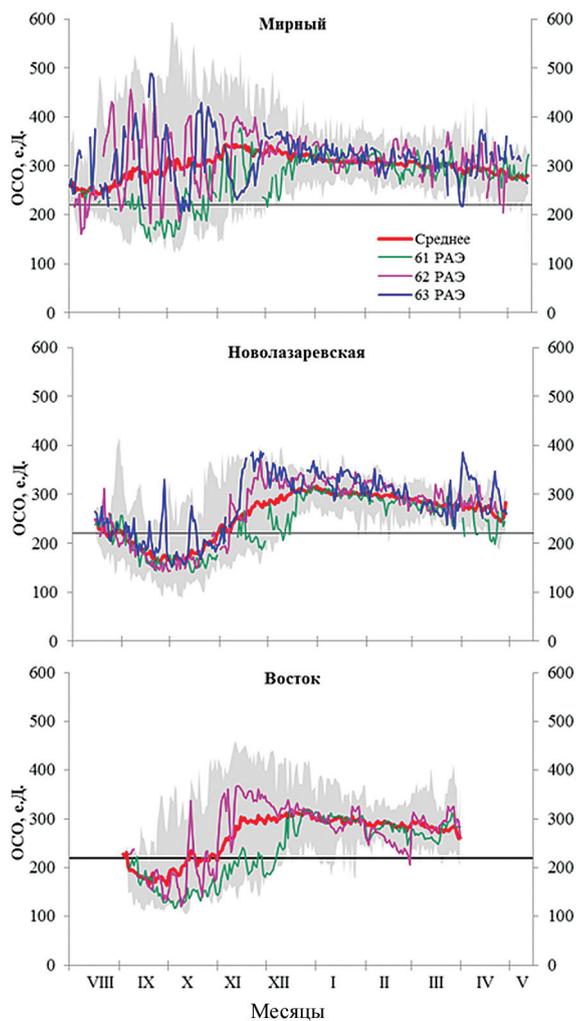


Рис. 1. Среднесуточные значения общего содержания озона на российских антарктических станциях Мирный, Новолазаревская и Восток

Fig. 1. Average daily values of total ozone at Russian Antarctic stations Mirny, Novolazarevskaya and Vostok

озона в весенний период значительно превосходила наблюдавшуюся в предыдущем году в Мирном и на Востоке, а в 2017 г. — в Мирном и Новолазаревской. Такое поведение СОЗ можно объяснить меньшей стабильностью циркумполярного вихря в 2016 и 2017 гг., наличием краткосрочных потеплений в стратосфере и частой сменной воздушных масс с различным содержанием озона (<https://legacy.bas.ac.uk/met/jds/ozone/>; Antarctic Ozone Bulletin, <http://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/ozone/index.html>). В эти годы на каждой станции в отдельные дни весны значения СОЗ были максимальными за все годы наблюдений.

Существует достаточно сильная связь между месячным ходом СОЗ и температурой в нижней стратосфере в слое 15–20 км. Величины коэффициентов корреляции

Коэффициенты корреляции среднесуточных значений ОСО и температуры воздуха на различных высотах в стратосфере, рассчитанные по данным измерений на станции Мирный.

Высота, км	Месяц	
	сентябрь	октябрь
15	0,82	0,85
20	0,78	0,76
25	0,55	0,30

среднесуточных значений ОСО и температуры воздуха (более 450 пар значений) на высотах 15, 20 и 25 км на станции Мирный за период с 2000 по 2017 г. приведены в табл. 2.

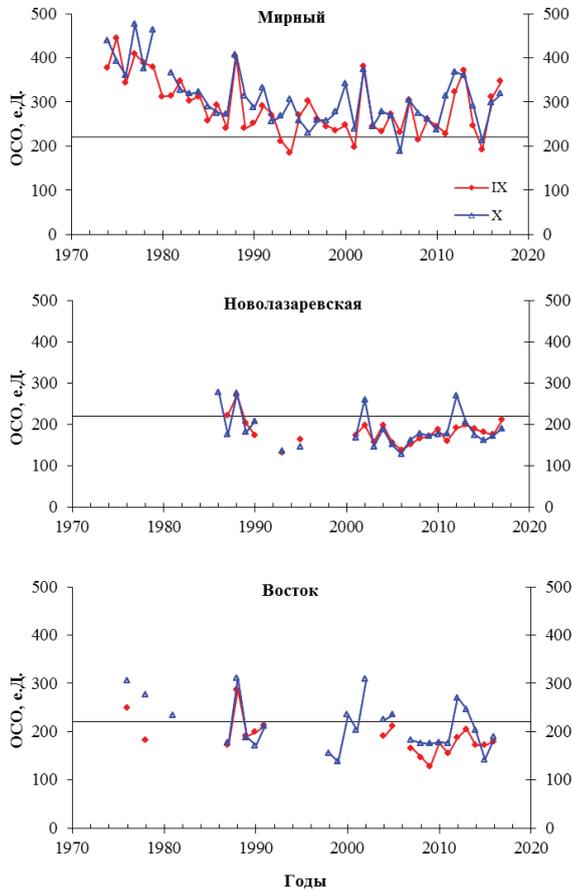


Рис. 2. Межгодовая изменчивость среднемесячных значений ОСО на российских антарктических станциях в весенние месяцы сентябрь (красный) и октябрь (синий)

Fig. 2. Interannual variability of monthly values of total ozone at Russian Antarctic stations in September (red) and October (blue)

Большие величины коэффициентов корреляции на высотах 15 и 20 км свидетельствуют о том, что преимущественно в этом слое стратосферы происходят фотохимические гетерогенные реакции разрушения озона, приводящие к образованию озоновой дыры.

На рис. 2 представлена межгодовая изменчивость среднемесячных значений ОСО на трех российских станциях антарктической весной (сентябрь и октябрь) с начала наблюдений по 2017 г. включительно. На станциях Мирный и Восток хорошо заметно уменьшение среднемесячных значений содержания озона с начала наблюдений до середины 80-х гг. прошлого столетия. В то же время, как уже отмечалось, наблюдаются значительные колебания ОСО от года к году. При этом на всех станциях выделяются значения ОСО в сентябре и октябре 1988 и 2002 гг., когда над Антарктидой не было зафиксировано весеннего уменьшения ОСО либо оно было существенно меньше, чем в соседние годы. В эти годы озоновые дыры развивались по нетипичным для этого периода времени сценариям. В 1988 г. весенняя отрицательная аномалия ОСО не сформировалась из-за разрушения стратосферного циркумполярного вихря уже ранней весной [11, 12]. В 2002 г. взрывное повышение температуры стратосферы сопровождалось ростом ОСО, что привело к уменьшению размеров дыры и даже ее разделению на две части к концу сентября [13]. В обоих случаях проявилась роль динамических факторов (а именно — стратосферной циркуляции) в процессах регулирования содержания атмосферного озона над Антарктидой. Сами значения ОСО в эти годы по величине сопоставимы со значениями ОСО в 1970-е гг.

В таблице 3 приведены минимальные значения ОСО, измеренные в различные годы на российских станциях и даты таких наблюдений в каждом году. К сожалению, непрерывный ряд наблюдений с 1974 г. имеется только на станции Мирный. На двух других станциях наблюдения проводились со значительными перерывами. Обращает на себя внимание, что значения ОСО ниже 220 е.Д. (эта величина принимается за показатель наличия озоновой дыры) были измерены на станции Восток в 1978 и 1981 гг., т.е. еще до появления в научной литературе самого термина «озоновая дыра» [14,15].

Таблица 3

Минимальные за год значения ОСО и даты их наблюдений на российских антарктических станциях

Год	Мирный		Новолазаревская		Восток	
	ОСО	Дата	ОСО	Дата	ОСО	Дата
1974	338	02.09	—	—	—	—
1975	294	29.10	—	—	—	—
1976	303	06.09	—	—	234	24.09
1977	325	22.09	—	—	—	—
1978	294	24.10	—	—	145	15.09
1979	303	17.11	—	—	—	—
1981	259	08.09	—	—	214	05.10
1982	268	13.10	—	—	—	—
1983	221	26.09	—	—	—	—
1984	220	14.10	—	—	—	—
1985	234	14.10	—	—	—	—
1986	202	10.10	212	11.11	—	—

Год	Мирный		Новолазаревская		Восток	
	ОСО	Дата	ОСО	Дата	ОСО	Дата
1987	193	24.10	151	07.10	155	26.10
1988	270	24.08	219	16.10	195	20.09
1989	188	15.10	148	09.10	145	06.10
1990	204	13.09	–	–	148	05.10
1991	170	06.10	–	–	136	05.10
1992	170	18.09	–	–	–	–
1993	155	25,26.09	–	–	–	–
1994	127	29.09	–	–	–	–
1995	160	17.10	114	06.10	–	–
1996	159	18.10	–	–	–	–
1997	146	21.09	–	–	–	–
1998	172	30.10	–	–	126	01.11
1999	177	20.09	–	–	104	12.10
2000	137	07.09	–	–	177	16.10
2001	143	23.09	127	29.09	173	09.09
2002	179	07.08	173	24.09	207	19.10
2003	175	07.10	87	08.10	–	–
2004	168	26.10	161	17.09	160	22,23.09
2005	138	10.10	103	10.10	180	19.10
2006	122	05.10	98	02.10	–	–
2007	159	06.08	124	13,15.09	118	07.10
2008	169	16.09	129	09.10	118	29.09; 3,9.10
2009	168	25.09	132	20.09	110	16,18.09
2010	179	08.10	130	02.10	135	25.09
2011	174	02,14	114	22.09	121	29.09
2012	224	11.09	157	19.09	151	26.09
2013	216	12.08	157	06.10	149	28.09
2014	174	30.09	137	07.10	133	28.09
2015	145	20.09	140	14,15.10	117	05.10
2016	160	08.08	142	26.09	120	09.10
2017	205	09.10	152	02.10	–	–

Примечание: жирным шрифтом выделены минимальные за весь период наблюдений величины ОСО.

На рис. 3 показана межгодовая изменчивость нормированных отклонений средних за сентябрь и средних за полные сезоны наблюдений величин ОСО (в %) на каждой из трех российских станций и их аппроксимации полиномами третьей степени. Отклонения рассчитывались по данным измерений в каждой антарктической экспедиции. Нормировка выполнена относительно средних значений соответствующей характеристики за 1981–2010 гг. Помимо результатов измерений на российских станциях на нем приведены также данные зарубежных станций: английской Халли (75° 35′ ю.ш., 26° 39′ з.д.), украинской Академик Вернадский (65° 15′ ю.ш., 64° 15′ з.д.) и японской Сёва (69° 00′ ю.ш., 39° 36′ в.д.), наблюдения на которых начались в 1960-е гг. (<https://legacy.bas.ac.uk/met/jds/ozone/>; http://www.woudc.org/data_e.html/).

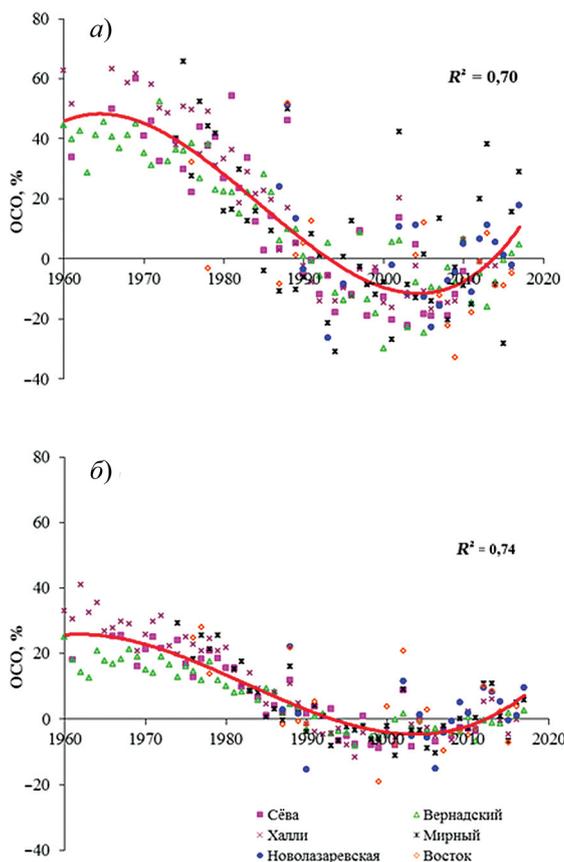


Рис. 3. Нормированные отклонения средних за сентябрь (а) и средних за сезоны наблюдений (б) значений ОСО. Нормы рассчитаны для периода 1981–2010 гг. Представленные значения аппроксимированы полиномом третьей степени методом наименьших квадратов

Fig. 3. Deviations of average values of total ozone for September (a) and for the seasons of observations (b). The norm calculated for the period 1981–2010. The data approximated by a third degree polynomial using RMSD method

До середины восьмидесятых годов прошлого века отклонения ОСО от нормы почти на всех станциях положительные. Затем, в течение нескольких лет, на разных станциях они различались даже по знаку. Однако с середины девяностых и примерно до 2010 г. преобладают все-таки отрицательные значения отклонений, а после 2010 г. — положительные. Причем такое поведение ОСО отмечается не только в весенний период (в сентябре), но и для среднегодовых значений на станциях. Амплитуда колебаний отклонений среднегодовых величин ОСО, конечно, меньше, чем среднемесячных, но характер их многолетних изменений такой же, как и для средних за сентябрь величин.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данные наземных наблюдений ОСО на российских антарктических станциях подтверждают наличие до настоящего времени факта значительного уменьшения общего содержания озона над Антарктидой в весенние месяцы.

Степень проявления весенней отрицательной аномалии ОСО на каждой из рассматриваемых станций сильно меняется от года к году. В значительной степени это регулируется динамическими процессами в атмосфере. В 1988 г. разрушение стратосферного циркумполярного вихря произошло ранней весной и озоновая дыра не сформировалась. В 2002 г. взрывное повышение температуры стратосферы, сопровождавшееся ростом ОСО, существенно уменьшило размеры дыры и привело к ее распаду к концу сентября на две части. В обоих случаях под влиянием динамических процессов отклонения от многолетних норм ОСО на всех антарктических озонотрических станциях были положительными и в сентябре, и в октябре [15].

На протяжении всего многолетнего периода наблюдений ОСО станция Мирный располагалась на периферии области, охватываемой стратосферным циклоном. При его перемещениях станция оказывалась или в области озоновой дыры, или вне ее. В результате наблюдались значительные межсуточная (см. рис. 1) и межгодовая (см. рис. 2) изменчивости ОСО в каждый из наблюдательных сезонов.

На всех антарктических станциях — и российских, и станциях других стран — на протяжении примерно 30 лет с середины 1970-х гг. наблюдалась устойчивая тенденция уменьшения общего содержания озона антарктической весной. К началу 1990-х гг. весенние значения ОСО на ст. Мирный уменьшились на 70–75 % от среднего значения за 1974–1980 гг. Но в последующие годы эффект проявления весенней отрицательной аномалии ОСО замедлился. С начала 2000-х гг. наблюдается тенденция возвращения величин ОСО к значениям, характерным для периода, предшествовавшего проявлению эффекта озоновой дыры. Это в определенной степени связано с результатами по ограничению выбросов в атмосферу озоноразрушающих веществ (около 50 % разрушения озона в полярных районах происходит за счет ClO+BrO каталитических реакций [4, 7]). Однако в связи со сложностью разделения влияния химических и динамических факторов на уменьшение ОСО в весенний период в Антарктиде трудно количественно оценить влияние уменьшения количества озоноразрушающих веществ в атмосфере на содержание озона [7]. В то же время в текущем веке межгодовая изменчивость ОСО весной больше, чем в последнее десятилетие прошлого. Такие достаточно резкие колебания вызваны главным образом динамическими факторами.

Благодарности. Работа выполнена в рамках работ РАЭ по Подпрограмме «Организация и обеспечение работ и научных исследований в Антарктике» ГП РФ «Охрана окружающей среды» на 2012–2020 гг. Авторы выражают глубокую благодарность всем специалистам, проводившим измерения общего содержания озона на российских антарктических станциях в различные годы.

Acknowledgments. The work was performed as part of the activity of Russian Antarctic Expedition in the frame of the sub-program “Organization and support of works and scientific researches in Antarctica” of State Programme of the Russian Federation “Environmental Protection” for 2012–2020. The Authors express their deep gratitude to all the observers who carried out the measurements for the total ozone at the Russian Antarctic stations.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Dobson G.M.B.* Annual variation of ozone in Antarctica // *Quart. J. Royal Met. Soc.* 1966. V. 92. P. 549–552.
2. *Chubachi S.* Preliminary result of ozone observations at Syowa Station from February 1982 to January 1983 // *Mem. Natl. Inst. Polar Res. Spec. Issue.* 1984. 34. P. 13–19.
3. *Farman J.C., Gardiner B.G., Shankin J.D.* Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClOx/NOx interaction // *Nature.* 1985. № 315. P. 207–210.
4. *Киселев А.А., Кароль И.Л.* Как поживаешь, антарктическая озоновая дыра? // *Природа.* 2016. № 10. С. 3–8.
5. *Озolin Ю.Э., Кароль И.Л., Киселев А.А.* Модельная оценка химической составляющей глобальных изменений озонового слоя Земли в период 1970–2050 гг. в результате антропогенного воздействия // *Вклад России в Международный полярный год 2007/08. Метеорологические и геофизические исследования.* М.; СПб: ООО «Паулсен», 2011. С. 187–198.
6. Scientific assessment of ozone depletion // *WMO Global Ozone Research and Monitoring Project.* WMO. Geneva. 2010. Report № 52. 517 p.
7. Scientific assessment of ozone depletion // *WMO Global Ozone Research and Monitoring Project.* 2014. Report № 55. WMO. Geneva. 416 p.
8. РД 52.04.567-2003. Руководящий документ. Положение о государственной наблюдательной сети (с Изменением № 1). СПб.: Гидрометеоздат, 2003. 50 с.
9. Методические указания по производству и обработке наблюдений за общим содержанием атмосферного озона. 3-е изд. Л.: Гидрометеоздат, 1981. 48 с.
10. *Шаламянский А.М.* Особенности измерений общего содержания озона приборами с широкими полосами пропускания // *Труды ГГО.* 1970. Вып. 255. С. 148–159.
11. *Александров Э.Л., Израэль Ю.А., Кароль И.Л., Хргиан А.Х.* Озонный щит Земли и его изменения. СПб.: Гидрометеоздат, 1992. 288 с.
12. *Радионов В.Ф., Русина Е.Н., Сибир Е.Е., Шаламянский А.М.* Особенности общего

REFERENCES

1. *Dobson G.M.B.* Annual variation of ozone in Antarctica. *Quart. J. Royal Met. Soc.* 1966, 92: 549–552.
2. *Chubachi S.* Preliminary result of ozone observation at Syowa station from February 1982 to January 1983. *Mem. Natl. Inst. Polar Res. Spec. Issue.* 1984, 34: 13–19.
3. *Farman J.C., Gardiner B.G., Shankin J.D.* Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClOx/NOx interaction. *Nature.* 1985, 315: 207–210.
4. *Kiselev A.A., Karol I.L.* How are you, Antarctic ozone hole? *Priroda.* *Nature.* 2016, 10: 3–8. [In Russian].
5. *Ozolin Yu.E., Karol I.L., Kiselev A.A.* Model'naya otsenka khimicheskoy sostavlyayushchey global'nykh izmeneniy ozonovogo sloya Zemli v period 1970–2050 gg. v rezul'tate antropogennogo vozdeystviya. *Assessment of chemical constituent of the Earth's ozone layer changes due to anthropogenic impact during 1970–2050 period.* Contribution of Russia to International Polar Year 2007/08. Meteorological and geophysical researches. Moscow; St. Petersburg: Paulsen Editions, 2011: 187–198. [In Russian].
6. Scientific assessment of ozone depletion. *WMO Global Ozone Research and Monitoring Project.* WMO. Geneva. 2010. Report № 52: 517 p.
7. Scientific assessment of ozone depletion. *WMO Global Ozone Research and Monitoring Project.* WMO. Geneva. 2014, Report № 55: 416 p.
8. RD 52.04.567-2003. Guidance document. Regulation on the state monitoring network (as amended No. 1). St. Petersburg: Hydrometeoizdat, 2003: 50 p. [In Russian].
9. The operating instructions on production and working of observations of the total ozone Publ. 3rd edition. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1981: 488 p. [In Russian].
10. *Shalamyanskiy A.M.* Features of measurements of the total ozone content by devices with wide bandpass filters. *Trudy GGO.* *Proceedings of Voeikov Main Geophysical Observatory.* 1970, 255: 148–159. [In Russian].
11. *Alexandrov E.L., Izrael Yu.A., Karol I.L., Khrgian A.Kh.* The Earth's ozone shield and its

содержания озона в северной и южной полярных областях // Проблемы Арктики и Антарктики. 2007. Вып. 75. С. 64–72.

13. Scientific assessment of ozone depletion // WMO Global Ozone Research and Monitoring Project. WMO. Geneva. 2002. Report № 47. 498 p.

14. Радионов В.Ф., Сибир Е. Е. Особенности временной изменчивости общего содержания озона на российских антарктических станциях // Метеорология и гидрология. 2000. № 3. С. 100–103.

15. Сибир Е.Е., Радионов В.Ф. Общее содержание озона в Антарктике в период Международного полярного года 2007/2008 // Вклад России в Международный полярный год 2007/08. Метеорологические и геофизические исследования. М.; СПб.: ООО «Паулсен», 2011. С. 178–186.

changes. St.Petersburg: Hydrometeoizdat, 1992: 288 p. [In Russian].

12. Radionov V.F., Rusina E.N., Sibir E.E., Shalamyanskiy A.M. Features of the total ozone content in the Northern and Southern polar areas. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Problems of the Arctic and Antarctic. 2007, 75: 64–72. [In Russian].

13. Scientific assessment of ozone depletion. WMO Global Ozone Research and Monitoring Project. WMO. Geneva. 2002, Report № 47: 498 p.

14. Radionov V.F., Sibir E.E. Features of time variability of total ozone content at Russian Antarctic stations. *Meteorologia i gidrologia*. Meteorology and Hydrology. 2000, 3: 100–103. [In Russian].

15. Sibir E.E., Radionov V.F. *Obshchee sodержanie ozona v Antarktike v period Mezhdunarodnogo polyarnogo goda 2007/08*. Total ozone content in Antarctica during International Polar Year. Contribution of Russia to International Polar Year 2007/08. Meteorological and geophysical researches. Moscow; St.Petersburg: Paulsen Editions, 2011: 178–186. [In Russian].

УДК 551.46; 551.83

DOI: 10.30758/0555-2648-2018-64-3-262-269

РЕЗУЛЬТАТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИССЛЕДОВАНИЙ КЛИМАТА И КЛИМАТИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ В АРКТИКЕ

Г.В. АЛЕКСЕЕВ, В.Ф. РАДИОНОВ, В.М. СМОЛЯНИЦКИЙ, К.В. ФИЛЬЧУК*
ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

*alexgv@aari.ru

RESULTS AND PROSPECTS OF THE CLIMATE STUDIES AND CLIMATE SERVICE IN THE ARCTIC

G.V. ALEKSEEV, V.F. RADIONOV, V.M. SMOLYANITSKY, K.V. FILCHUK*

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

*alexgv@aari.ru

Received August, 20, 2018

Accepted September, 10, 2018

Keywords: Arctic, climate, monitoring, investigation, climate services.

Summary

Climatic studies in AARI include monitoring changes in the Arctic climate system, ascertaining their causes and predictability. The beginning was laid in the 1920s by the works of V. Yu. Wiese, who investigated the causes of the warming of the Arctic in the 1920–1930s. Monitoring continues with the organization in 1932–1934 of a network of polar stations, and the first climatic assessments were created in the 1960s. At present, climate change monitoring in the Arctic is carried out on the basis of observations on the network of hydrometeorological stations, satellite observations of sea ice, ship-based expedition observations and measurements on autonomous buoy installations in the Arctic seas and the Arctic basin. The results are presented in regular reviews of climatic and ice conditions. Recent studies have evaluated the contribution of atmospheric heat transfers in the formation of temperature changes in winter and radiation inflows in summer. A scheme for the development and enhancement of warming in the Arctic has been proposed. The tasks of climate services in the Arctic are considered on the basis of the WMO initiative on the development of climate services in the form of the Arctic Regional Climate Center – network (ArcRCC-N).

Citation: *Alekseev G.V., Radionov V.F., Smolyanitsky V.M., Filchuk K.V.* Results and prospects of the climate studies and climate service in the Arctic. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2018, 64, 3: 262–269. [In Russian]. doi: 10.30758/0555-2648-2018-64-3-262-269

Ключевые слова: Арктика, исследования, климат, мониторинг, климатическое обслуживание.

Климатические исследования в ААНИИ включают мониторинг изменений в арктической климатической системе, выяснение их причин и предсказуемости. Начало положено в 1920-е гг. работами В.Ю. Визе, исследовавшего причины потепления климата Арктики в 1920–1930-е гг. Мониторинг продолжается с организации в 1932–1934 гг. сети полярных станций, а первые климатические обобщения созданы в 1960-х гг. В настоящее время мониторинг климатических изменений в Арктике осуществляется на основе наблюдений на сети гидрометеорологических станций, спутниковых наблюдений за морскими льдами, судовых экспедиционных наблюдений и измерений на автономных буйковых постановках в арктических морях и Арктическом бассейне. Результаты представляются в регулярных обзорах климатических и ледовых условий. В ходе недавних исследований был оценен вклад атмосферных переносов тепла в формирование изменений температуры зимой и радиационных притоков летом, предложена схема развития и усиления потепления в Арктике. Рассмотрены задачи климатического обслуживания в Арктике на основе инициативы ВМО по развитию климатического обслуживания в форме Арктического регионального климатического центра — сеть (АркРКЦ-сеть).

ВВЕДЕНИЕ

В арктической области Земли проблемам, связанным с глобальными изменениями климата, уделяется особенно пристальное внимание. Здесь отмечается так называемое «арктическое усиление» глобальных изменений температуры приземного слоя воздуха, связанное, в том числе, с сокращением площади морских арктических льдов. Климатические исследования в Арктике ведутся научными коллективами в России и во многих странах и включают мониторинг изменений в арктической климатической системе, выяснение их причин и предсказуемости.

В ААНИИ исследования климата Арктики имеют почти столетнюю историю, начавшуюся в 1920-е гг. работами В.Ю. Визе. Он впервые исследовал и описал причины потепления климата Арктики в 1920–1930-е гг. В.Ю. Визе [1] пришел к заключению, что потепление Арктики 1920–1930-х гг. явилось следствием усиления общей циркуляции атмосферы на земном шаре и притока атлантических вод в Арктический океан с одновременным усилением обратного потока вод и льдов из Арктического бассейна в Гренландское море. Он также ввел понятия циклонического и антициклонического режимов циркуляции атмосферы над Арктическим бассейном, которые в значительной степени определяют уменьшение или увеличение ледовитости арктических морей [2]. Позднее это положение было распространено З.М. Гудковичем [3] на дрейф льдов в Арктическом бассейне.

Благодаря организации в 1932–1934 гг. сети полярных станций стал возможным регулярный мониторинг гидрометеорологических условий в арктических морях. Первые климатические обобщения собранных данных метеорологических наблюдений были выполнены в ААНИИ в монографиях «Климат советской Арктики (метеорологический режим)» [4] и «Климат советской Арктики (радиационный режим)» [5].

В статье представлено сокращенное изложение доклада на семинаре в ААНИИ, посвященном обсуждению результатов климатических исследований, выполнявшихся в отделах взаимодействия океана и атмосферы, ледового режима и прогнозов, океанологии; обсуждаются задачи и перспективы дальнейших исследований изменений климата и развития климатического обслуживания в Арктике.

**НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ НЕДАВНИХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ,
ЗАДАЧИ ИХ ПРОДОЛЖЕНИЯ И РАЗВИТИЯ КЛИМАТИЧЕСКОГО
ОБСЛУЖИВАНИЯ**

В настоящее время в ААНИИ проводится мониторинг климатических изменений в Арктике по данным наблюдений на сети стационарных гидрометеорологических станций, на дрейфующих станциях, с ИСЗ, в судовых экспедициях, автономными дрейфующими и заякоренными буями в арктических морях и Арктическом бассейне. На их основе созданы и пополняются архивы и базы метеорологических, ледовых и океанографических данных, по которым выполняются оценки состояния атмосферы, морских льдов и океана.

Эти оценки и их анализ представлены в регулярных публикациях: квартальном «Обзоре гидрометеорологических процессов в Северном Ледовитом океане» [6] и еженедельных «Информационных материалах по мониторингу морского ледяного покрова Арктики и Южного океана на основе данных ледового картирования и пассивного микроволнового зондирования SSMR SSM/I-SSMIS-AMSR2» [7], издаваемых в ААНИИ; в разделе Северная полярная область ежегодного «Доклада об особенностях климата на территории Российской Федерации» Росгидромета.

Исследования современных изменений климата Арктики в ААНИИ ведутся по основным направлениям, которые находятся в центре внимания мировой климатической науки: причины усиления глобального потепления в Арктике, роль, масштабы и временная структура различных процессов в колебаниях климата полярных областей, предсказуемость климатических изменений.

В ходе недавних исследований были получены количественные оценки переносов тепла в Арктику, которые показали [8], что основной приток явного и скрытого тепла в высокоширотную Арктику в зимний период происходит через атлантическую часть ее южной границы по 70° с.ш. (от 0° до 80° в.д.) в слое от поверхности до 750 гПа. Вклад этого притока в межгодовую изменчивость средней зимней температу-

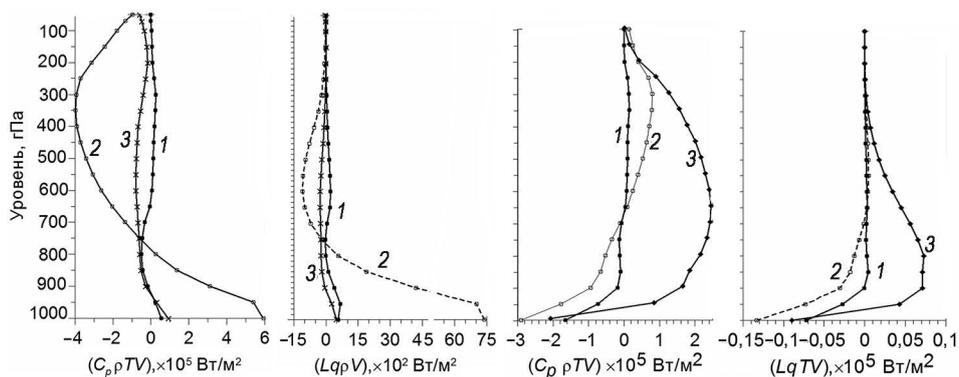


Рис. 1. Вертикальные профили средних меридиональных переносов явного и скрытого тепла через 70° с.ш. зимой и летом.

1 — средний перенос через весь круг широты, 2 — через атлантическую часть (0–80° в.д.), 3 — через тихоокеанскую часть (200–230° в.д.)

Fig. 1. Vertical profiles of mean meridional transfers of sensible and latent heat through 70° N in winter and summer.

1 — mean transfer through the whole latitude circle, 2 — through the Atlantic part (0–80° E), 3 — through the Pacific part (200–230° E)

ры воздуха на поверхности составляет более 50 %, и его величина возрастает. Летом основной вклад в потепление вносят радиационные притоки тепла к поверхности, в частности нисходящая длинноволновая радиация, а перенос тепла и влаги через 70° с.ш. не влияет на температуру воздуха и содержание водяного пара в нижней тропосфере, поскольку преобладает вынос водяного пара из Арктики (рис. 1).

Многолетние изменения общего содержания водяного пара в арктической атмосфере показывают, что наибольший его прирост происходит в летние месяцы параллельно с сокращением площади льда, в то время как перенос водяного пара через 70° с.ш. в эти месяцы не увеличивается. Летнее таяние и сокращение площади льда ведут к росту содержания водяного пара и нисходящей длинноволновой радиации. В результате почти на 40 % ускоряется процесс летнего очищения Северного Ледовитого океана ото льда [9].

На сокращение площади морских льдов влияет поступление теплой и соленой воды в Арктику из Северной Атлантики через Баренцево и Гренландское моря. В недавно выполненных исследованиях установлено влияние аномалий температуры поверхности океана (ТПО) в низких широтах Атлантического, Индийского и Тихого океанов на атмосферный и океанский перенос тепла в Арктику, температуру воздуха и площадь льда в Северном Ледовитом океане, которое проявляется спустя 2–3 года. Механизм этого влияния включает взаимодействие циркуляции океана и атмосферы, посредством которого климатический импульс от аномалий ТПО воздействует на Арктику [10].

Схематически процесс развития потепления в Арктике представлен на рисунке 2.

Задачи дальнейших климатических исследований включают:

– развитие методов мониторинга климата (новые индексы, использование новых реанализов, модельных расчетов в рамках проекта по сравнению совместных моделей Всемирной программы исследования климата ВМО (CMIP6));



Рис. 2. Схема развития и усиления потепления в Арктике

Fig. 2. Scheme of evolution and amplification of warming in the Arctic

– разработку методов климатического прогнозирования для Арктики на основе представленной на рис. 2 концепции влияния низких широт океана с привлечением глобальных моделей климата и региональных моделей морского льда;

– биполярные климатические исследования, исходя из общего для Арктики и Антарктики влияния аномалий в низких широтах океана;

– разработку методов оценки климатических рисков и рекомендаций по адаптации к изменениям климата;

– исследование природы и механизмов формирования аномалий ТПО в низких широтах океана.

Необходимость учета природно-климатических условий при освоении ресурсов Арктики проявилась в инициативе Всемирной метеорологической организации (ВМО) по развитию климатического обслуживания в форме Арктического регионального климатического центра — сеть АркРКЦ. Работа АркРКЦ предусматривает согласованное функционирование трех узлов, указанных ниже и расположенных в Региональных ассоциациях (РА) ВМО II, IV и VI с выполнением каждым из узлов максимально полного набора региональных функций и одной обязательной функции в панарктическом масштабе (рис. 3). Для Североамериканского узла (РАIV) это долгосрочный прогноз (ДП), для Северо-Европейского и Гренландского узла (РАVI) — управление данными, для Северо-Евразийского узла (РАII) — мониторинг климата. Координатором работы Северо-Евразийского узла АркРКЦ является ААНИИ Росгидромета. В поддержку АркРКЦ институтом разработана концепция Арктического климатического центра (АКЦ) с участием следующих НИУ Росгидромета: ААНИИ — координатор, ГГО, ВНИИГМИ-МЦД и Гидрометцентр России.

15–16 мая в Оттаве, Канада, специалистами приарктических стран – участниками АркРКЦ проведен первый Панарктический региональный форум по се-

Арктический региональный климатический центр – сеть (АркРКЦ)

План реализации одобрен ИС ВМО в мае 2017 года



Рис. 3. Структура и задачи АПРКЦ

Fig. 3. Structure and tasks of the ArcRCC

зонным прогнозам (ПАРКОФ-1). В период форума обсуждены и одобрены первые климатические сезонные обзор и прогноз параметров атмосферы и морского льда Арктики соответственно на периоды октябрь 2017 – май 2018 гг. и июнь–сентябрь 2018 г. По результатам форума ВМО выпущен пресс-релиз [11] и принято решение о начале демонстрационной работы АркРКЦ. Результаты экспресс-анализа подготовленного Северо-Американским узлом долгосрочного четырехмесячного прогноза показали хорошую сходимость к фактически наблюдаемым в июне — первой половине августа 2018 г. аномалиям температуры воздуха, осадкам и ледовитости регионов Арктики. Необходимо подчеркнуть, что как сезонный обзор состояния, так и валидация сезонного долгосрочного прогноза выполнены форумом на основе материалов, подготовленных специалистами Северо-Евразийского узла АркРКЦ (ААНИИ и Гидрометцентром России).

К числу ближайших задач сети АркРКЦ относятся следующие: создание портала данных (<https://arctic-prcs.met.no/>), разработка методов долгосрочного прогнозирования состояния морского льда, реализация одобренной ПАРКОФ-1 структуры панарктического климатического бюллетеня, подготовка и проведение в сентябре – октябре 2018 г. 2-го ПАРКОФ (координатор — Норвежский метеорологический институт), координация работ с программой ВМО «Глобальная служба криосферы».

В круг интересов/обязанностей АПЦ Росгидромета на начальном этапе входят следующие направления деятельности:

- поддержка панарктических и региональных функций Северо-Евразийского узла АркРКЦ, включая развитие методов мониторинга климата (новые индексы, использование новых реанализов, модельных расчетов из CMIP6);
- обеспечение информацией об изменениях климата Арктики государственных органов и организаций, компаний, общественности;
- публикация информации в «Единой системе информации о Мировом океане» (ЕСИМО) и поддержка национальной реализации Полярного кодекса в интересах судоходства по трассам Северного морского пути.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Задачи дальнейших климатических исследований включают:

- развитие методов мониторинга климата;
- разработку методов климатического прогнозирования для Арктики;
- биполярные климатические исследования исходя из общего для Арктики и Антарктики влияния аномалий в низких широтах океана;
- разработку методов оценки климатических рисков и рекомендаций по адаптации к изменениям климата;
- исследование природы и механизмов формирования аномалий ТПО в низких широтах океана.

Развитие климатического обслуживания в современных условиях, определяемых возрастающими темпами климатических изменений, требует объединения усилий профильных служб и организаций, как национальных, так и международных. ААНИИ имеет богатый опыт организации и проведения исследований в полярных областях, накопленные в течение многих десятилетий массивы гидрометеорологических данных и в состоянии выполнить серьезные задачи в процессе такой интеграции.

Благодарности. Мониторинг и климатическое обслуживание в Арктике выполняются и планируются в рамках ЦНТП Росгидромета по теме 1.3.1.1. Исследования поддерживаются грантами РФФИ 18-05-00334, 18-05-60107.

Acknowledgments. Monitoring and climate services in the Arctic are carried out and planned within the framework of Roshydromet's CSTP on topic 1.3.1.1. The research is supported by RFBR grants 18-05-00334, 18-05-60107.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Визе В.Ю.* Причины потепления Арктики // Советская Арктика. 1937. Т. 1. С. 1–7.
2. *Визе В.Ю.* Основы долгосрочных ледовых прогнозов для арктических морей // Тр. ААНИИ. 1944. Т. 190. 273 с.
3. *Гудкович З.М.* Связь дрейфа льдов в Арктическом бассейне с ледовыми условиями в арктических морях // Труды Океанографической комиссии АН СССР. 1961. Т. 2. С. 13–20.
4. *Прик З.М.* Климат Советской Арктики (метеорологический режим). Л.: Гидрометеоздат, 1965. 279 с.
5. *Черниговский Н.Т., Мариунова М.С.* Климат Советской Арктики (радиационный режим). Л.: Гидрометеоздат, 1965. 199 с.
6. Обзор гидрометеорологических процессов в Северном Ледовитом океане. URL: <http://www.aari.ru/misc/publicat/gmo.php> (дата обращения 01.09.2018).
7. Информационные материалы по мониторингу морского ледяного покрова Арктики и Южного Океана на основе данных ледового картирования и пассивного микроволнового зондирования SSMR SSM/I-SSMIS-AMSR2. URL: <http://wdc.aari.ru/resources/d0042/> (дата обращения 01.09.2018).
8. *Алексеев Г.В., Кузьмина С.И., Уразгильдеева А.В., Бобылев Л.П.* Влияние атмосферных переносов тепла и влаги на усиление потепления в Арктике в зимний период // Фундаментальная и прикладная климатология. 2016. Т. 1. С. 43–63.
9. *Алексеев Г.В., Кузьмина С.И., Глок Н.И.* Влияние аномалий температуры океана в низких широтах на атмосферный перенос тепла в Арктику // Фундаментальная и прикладная климатология. 2017. Т. 1. С. 106–123.
10. *Алексеев Г.В., Кузьмина С.И., Глок Н.И., Вязлова А.Е., Иванов Н.Е., Смирнов А.В.* Вли-

REFERENCES

1. *Vise V.U.* The reasons of Arctic warming. *Sovetskaya Arktika*. Soviet Arctic. 1937, 1: 1–7. [In Russian].
2. *Vise V.U.* The basics of long-term ice forecasts for the Arctic seas. *Trudy AANII*. Proc. of AARI. 1944, 190: 273 p. [In Russian].
3. *Gudkovich Z.M.* The connection of ice drift in the Arctic basin with ice conditions in the Arctic seas. *Trudy Okeanograficheskoy komissii Akademii nauk SSSR*. Proc. of the Oceanographic Commission of the USSR Academy of Sciences. 1961, 2: 13–20. [In Russian].
4. *Prik Z.M.* *Klimat Sovetskoy Arktiki (meteorologicheskiy rezhim)*. Climate of the Soviet Arctic (meteorological regime). Leningrad: Hydrometeoizdat, 1965: 279 p. [In Russian].
5. *Chernigovskiy N.T., Marshunova M.S.* *Klimat Sovetskoy Arktiki (radiacionnyy rezhim)*. Climate of the Soviet Arctic (radiation regime). Leningrad: Hydrometeoizdat, 1965: 199 p. [In Russian].
6. Review of hydrometeorological processes in the Arctic Ocean. [In Russian]. Available at: <http://www.aari.ru/misc/publicat/gmo.php> (accessed 01.09.2018).
7. Monitoring of the Arctic and Southern Ocean sea ice cover on the basis of ice charting and SSMR-SSM/I-SSMIS-AMSR2 passive microwave information. [In Russian]. Available at: <http://wdc.aari.ru/resources/d0042/> (accessed 01.09.2018).
8. *Alekseev G.V., Kuzmina S.I., Urazgildeeva A.V., Bobylev L.P.* Impact of atmospheric heat and moisture transport on arctic warming in winter. *Fundamentalnaya i prikladnaya klimatologiya*. Fundamental and Applied Climatology. 2016, 1: 43–63. [In Russian]
9. *Alekseev G.V., Kuzmina S.I., Glok N.I.* Influence of temperature anomalies of the ocean surface in low latitudes on the atmospheric heat transport to the Arctic. *Fundamentalnaya i prikladnaya*

яние Атлантики на потепление и сокращение морского ледяного покрова в Арктике // Лед и Снег. 2017. Т. 57. № 3. С. 381–390.

11. Пресс-релиз ВМО «ВМО запускает Арктический региональный климатический центр – сеть» (WMO Press Release “WMO launches Arctic Regional Climate Centre Network”), 18.05.2018. URL: <https://public.wmo.int/en/media/press-release/wmo-launches-arctic-regional-climate-centre-network> (дата обращения 01.09.2018).

klimatologiya. Fundamental and Applied Climatology. 2017, 1: 106–123. [In Russian].

10. *Alekseev G.V., Kuzmina S.I., Glok N.I., Vyazilova A.E., Ivanov N.E., Smirnov A.V.* Influence of Atlantic on the warming and reduction of sea ice in the Arctic. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2017, 57, 3: 381–390. [In Russian].

11. WMO Press Release “WMO launches Arctic Regional Climate Centre Network”, 18 May 2018. Available at: <https://public.wmo.int/en/media/press-release/wmo-launches-arctic-regional-climate-centre-network> (accessed 01.09.2018).

ГЕОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА

УДК 550.4 (477)

DOI: 10.30758/0555-2648-2018-64-3-270-293

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ДАЙКОВЫХ ПОРОД ОСТРОВОВ АРХИПЕЛАГА АРДЖЕНТАЙН И ПРИЛЕГАЮЩЕЙ ЧАСТИ АНТАРКТИЧЕСКОГО ПОЛУОСТРОВА (ЗАПАДНАЯ АНТАРКТИДА)

Г.В. АРТЕМЕНКО¹*, В.И. ГАНОЦКИЙ²

¹ — Институт геохимии, минералогии и рудообразования НАН Украины, г. Киев, Украина

² — Национальный технический университет «Днепровская политехника», г. Днепр, Украина

*regulgeo@gmail.com

GEOCHEMICAL FEATURES OF DIKE ROCKS OF THE ARGENTINE ISLANDS AND THE NEAR AREA OF THE ANTARCTIC PENINSULA (WESTERN ANTARCTICA)

G.V. ARTEMENKO¹*, V.I. GANOTSKIY²

¹ — Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation, Kiev, Ukraine

² — National Technical University “Dneprovskaya Polytechnica”, Dnepr, Ukraine

*regulgeo@gmail.com

Received June, 11, 2018

Accepted August, 13, 2018

Keywords: Antarctic Peninsula, Argentine Islands, dikes, Fe-Ti cumulates, multielement diagram, REE.

Summary

The block of the Antarctic Peninsula is part of a magmatic arc formed along the southwestern part of the paleo-Pacific margin of the Gondwana supercontinent. Currently, subduction processes continue only in its northwestern part — in the region of the South Shetland islands, and to the southwest of it — there is a passive segment of the continental margin, within which the Argentine islands are located. Here, subduction was completed in the late Miocene-Early Pliocene. In the geological structure of the Argentine islands archipelago, the rocks of the Upper Jurassic volcanic group (AP Volcanic Group) and intrusive batholiths of the batholiths (AP batholiths) are distinguished. In them, there are numerous dikes of basic, medium and acidic compositions. The activation of dyke magmatism on the passive margin of the Antarctic Peninsula was probably connected with subduction processes in its northwestern part.

Citation: Artemenko G.V., Ganotskiy V.I. Geochemical features of dike rocks of the Argentine islands and the near area of the antarctic peninsula (Western Antarctica). *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2018, 64, 3: 270–293. [In Russian]. doi: 10.30758/0555-2648-2018-64-3-270-293

The age sequence of dike formation in the rocks of the Antarctic Peninsula (AP) volcanic Group and intrusions of the gabbroids and granitoids of the Andean complex in the Argentine Islands and the near area of the Antarctic Peninsula is determined. The early dikes of the dacites in the volcanogenic stratum of the AP volcanic Group and the gabbrodiabases in the gabbroids of the Andean complex have a submeridional and northwestern strike. After the introduction of the granitoids of the Andean complex, dikes predominantly of the sublatitudinal and north-easterly strike are formed. The early dikes in the gabbroids of the Andean complex are Fe-Ti cumulates, and in granodiorite intrusions they are represented by aplites, probably formed from the residual magma of these intrusions. Later dikes were formed, probably due to the melting of the metasomatized mantle source at moderate depths under the influence of plumes. To their primitive (initial) melts, the composition of high-magnesian dike rocks is probably close. Products of deep mantle (plume) sources in the sample of selected samples were not detected. The dike rocks of this region according to their geochemical characteristics correspond to the mature island-arc formations of the calc-alkaline series.

Поступила 11 июня 2018 г.

Принята к печати 13 августа 2018 г.

Ключевые слова: Антарктический полуостров, дайки, мультиэлементная диаграмма, острова архипелага Арджентайн, РЗЭ, Fe-Ti кумулаты.

Земная кора Антарктического полуострова (Западная Антарктида), сформировавшаяся в юрское и меловое время, была в последующем разбита многочисленными разломами, трансформируемыми дайками разных направлений. Формирование даек связывается с тектоническими процессами, вызванными продолжающейся субдукцией океанической коры в крайней северо-восточной части Антарктического полуострова. В результате выполненных исследований в районе островов архипелага Арджентайн и прилегающей части Антарктического полуострова установлено, что ранние дайки ориентированы в северном и северо-западном направлении, а более поздние — в северо-восточном. В нескольких дайках выявлены контрастные геохимические аномалии — ванадия, хрома, никеля, меди, цинка и свинца. Палеомагнитные исследования дайковых пород позволяют получить важные данные о миграции Антарктического полуострова на Земле в послемеловое время.

ВВЕДЕНИЕ

Блок Антарктического полуострова (АП) является частью магматической дуги, формировавшейся вдоль юго-западной части палео-тихоокеанской окраины суперконтинента Гондвана [1]. Она была активной зоной на протяжении всего позднего мезозоя-кайнозоя, что обуславливалось субдукцией плиты Феникс под блок АП в направлении юго-запад-северо-восток [2]. В настоящее время процессы субдукции продолжаются только в северо-западной части АП в районе Южных Шетландских островов, а к юго-западу от нее (район моря Беллингсгаузен, северной части Земли Грейама и пролива Герлаха) — находится пассивный сегмент континентальной окраины АП [3].

В геологическом строении острова архипелага Арджентайн выделяются породами вулканической группы АП (AP Volcanic Group) и интрузивными образованиями батолита Антарктического полуострова (AP batholiths) (рис. 1) [4, 5, 6, 7]. Породы вулканической группы АП представлены лавами и туфогенными образованиями основного, среднего и кислого составов. Они формировались в интервале 188–153 млн лет [8]. Интрузивные породы батолита АП, представленные габбро, диоритами, гранодиоритами и гранитами, прорывают породы вулканической группы АП. U-Pb (SHRIMP) изотопный возраст габбро мыса Туксен составляет $88 \pm 1,1$ млн лет, а тоналита о. Питерман — $95,9 \pm 1,0$ млн лет [9].

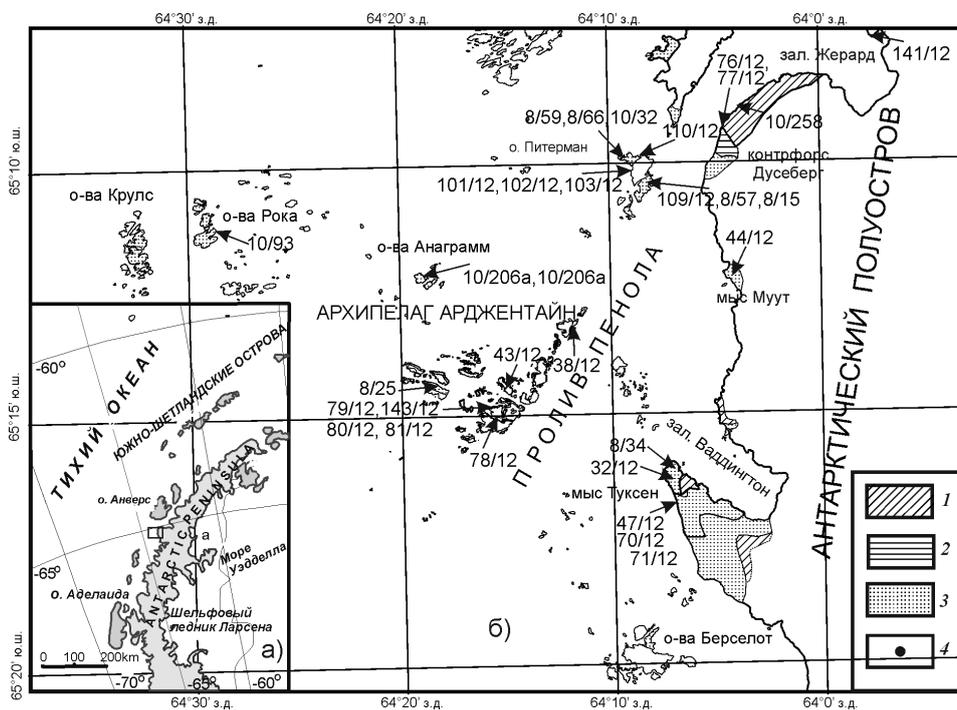


Рис. 1. Схематическая геологическая карта архипелага Арджентайн и прилегающей части Антарктического полуострова [12], с изменениями и дополнениями. 1 — базальты, андезиты, кислые вулканиды верхнеюрской вулканической группы; 2 — туфогенные породы вулканической группы АП; 3 — габбро, диориты, гранодиориты андского комплекса; 4 — точки отбора проб
 Fig. 1. Schematic geological map of the Argentine Islands and the adjacent part of the Antarctic Peninsula [12], with changes and additions. 1 — basalts, andesites, acid volcanics of the AP volcanic group; 2 — tuffs of the AP volcanic group; 3 — gabbro, diorites, granodiorites of the Andean complex; 4 — sampling points

В этом районе широко распространены многочисленные дайки, которые изучены значительно слабее. Впервые петрохимические исследования дайковых пород архипелага Арджентайн выполнены Д. Элиотом [7]. Среди дайковых пород этих островов постандского возраста он выделял две группы. Дайки первой группы, которые находятся в интрузивах plutonic пород андского комплекса, были отнесены к микрогабброидами, а дайки второй, которые находятся в вулканиках вулканической группы АП, к микродиоритам. Согласно его данным, постандские дайковые породы изменены не меньше, чем доандские. На момент его исследований было сделано только незначительное количество силикатных химических анализов дайковых пород.

Целью проведенной нами работы были геолог-структурные и геохимические исследования дайковых пород островов архипелага Арджентайн и прилегающей части Антарктического полуострова для определения последовательности их формирования и генезиса. Эти данные необходимы для определения особенностей дайкового магматизма на пассивной окраине магматической дуги Антарктического полуострова.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Силикатные анализы дайковых пород выполнены в Институте геохимии, минералогии и рудообразования Национальной академии наук Украины (ИГМР НАН Украины). Содержания редких и рассеянных элементов определялись методом индукционно-связанной плазмы с масс-спектрометрическим окончанием анализа (ICP-MS). Разложение образцов пород проводилось методом кислотного разложения как в открытой, так и в закрытой системах, в зависимости от состава породы. Анализ № 1 выполнен в Геологическом институте Кольского научного центра Российской академии наук (ГИ КНЦ РАН); анализы № 2–3 выполнены в Центральной лаборатории Всероссийского научно-исследовательского геологического института им. А.П. Карпинского (ЦЛ ВСЕГЕИ); анализы № 4–31 в Институте проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов Российской академии наук (ИПТМ РАН). Правильность анализов контролировали путем измерения международных и российских стандартных образцов GSP-2, VM, СГД-1А, СТ-1. Ошибки определения концентраций составляли от 3 до 5 мас. % для большинства элементов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Дайковые породы изучались на участках развития разновозрастных пород — вулканитов вулканической группы АП юрского возраста и интрузий габброидов и гранитоидов андского комплекса, сформировавшихся в мелу. Географические и геологические привязки изученных обнажений даек приведены на рис. 1 и в таблицах 1, 2, 3.

Результаты полевых геолого-структурных наблюдений

Дайки в породах вулканической группы АП. На о. Винтер, сложенном вулканитами вулканической группы АП, изучены дайки субмеридионального и северо-западного (ранние) и более поздние — северо-восточного простираний.

Ранними являются дайка дацитов (обр. 143/12) мощностью 1,3 м (аз. пад. СВ 20°, угол 85°), которых нет в интрузиях андского комплекса, и, вероятно, дайка базальтов (обр. 79/12) (аз. пад. ЮЗ 230°, угол 70°) и дайка андезитобазальтов (обр. 78/12) (аз. пад. З 270°, угол 75°), прорывающие (соответственно) — андезитовые порфириты и туфы кислого состава вулканической группы АП* (рис. 1).

К более поздним относятся дайка трахибазальтов, мощностью 3 м (обр. 81/12) (аз. пр. СВ 30°, угол 90°), прорывающая андезитовые порфириты и дайку вышеописанных ранних базитов субмеридионального простирания, и дайка андезитобазальтов, мощностью 7 м (обр. 80/12) (аз. пад. СЗ 285°, угол пад. 80°), прорывающая андезитовые порфириты вулканической группы АП.

На о. Ирizar и Гротто опробованы дайки базальтов и диабазов северо-западного простирания, прорывающие вулканиты вулканической группы АП (обр. 38/12 и 32/12 соответственно), а на мысе Туксен Антарктического полуострова, на склоне горы Де-Мария изучена дайка андезитобазальтов миндалекаменных северо-восточного простирания (обр. 32/12), прорывающая туфы основного состава вулканической группы АП.

Дайки в интрузиях габброидов и гранитоидов андского комплекса. *Габброиды* являются первой интрузивной фазой андского комплекса. Они прорываются дайками габбро, габбродолеритов, м/з габбро, долеритов, дайковых базальтов, амфиболитов, спессартитов, керсантитов и гранодиорит-порфиров.

Примечание. Здесь и далее приняты следующие сокращения: обр. — образец, аз. пад. — азимут падения пласта, аз. пр. — азимут простирания, угол — угол наклона в градусах.

Таблица 1

Силикатные анализы дайковых пород, %

Оксиды	1/ 10/93	2/ 8/59	3/ 8/66	4/ 101/12	5/ 102/12	6/ 103/12	7/ 109/12	8/ 110/12	9/ 8/57	10/ 8/57	11/ 8/25	12/ 80/12	13/ 81/12
SiO ₂	48,32	41,71	42,27	49,98	49,29	49,19	49,91	51,22	45,37	52,99	50,89	57,02	49,69
TiO ₂	2,08	2,66	3,62	1,66	1,29	1,29	1,06	0,89	1,14	2,00	0,94	1,29	1,01
Al ₂ O ₃	7,59	16,66	11,26	18,55	16,88	14,71	15,23	18,60	14,65	16,61	15,95	16,58	16,87
Fe ₂ O ₃	3,33	8,38	9,47	1,92	1,84	1,46	2,51	2,48	5,15	2,99	2,19	3,00	2,11
FeO	12,93	9,20	10,20	7,87	8,72	8,21	6,77	6,29	6,34	7,47	6,19	4,58	5,17
MnO	0,42	0,27	0,36	0,11	0,25	0,19	0,18	0,17	0,24	0,24	0,35	0,22	0,21
MgO	11,28	5,22	7,07	5,13	4,91	10,56	8,12	6,70	11,56	4,06	6,84	3,29	6,15
CaO	5,82	12,24	12,60	8,72	9,68	9,97	9,74	8,47	9,86	6,44	9,71	6,14	8,18
Na ₂ O	0,42	1,70	1,80	2,90	2,74	1,55	2,48	2,38	2,08	4,00	1,82	3,67	4,00
K ₂ O	4,29	0,40	0,20	0,85	0,60	0,40	1,00	1,00	1,20	0,80	2,10	1,15	2,75
S _{общ}		0,23	0,12	0,07	<0,02	<0,02	<0,02	0,10	0,03	0,06	0,10	0,02	<0,02
P ₂ O ₅	0,45	0,24	0,22	0,47	0,15	0,19	0,18	0,07	0,27	0,18	0,18	0,29	0,16
H ₂ O-	0,62	0,04	0,05	0,30	0,19	0,32	0,39	0,12	0,15	0,17	0,16	0,14	0,27
H ₂ O-п.п.	2,21	1,10	0,92	1,03	3,15	1,48	1,95	1,19	1,59	1,56	2,22	2,68	3,04
Сумма	99,76	99,94	100,10	99,56	99,69	99,52	99,52	99,66	99,65	99,57	99,64	100,07	99,61
#mg	0,55	0,36	0,40	0,49	0,46	0,66	0,62	0,59	0,65	0,42	0,60	0,41	0,41
Оксиды	14/ 78/12	15/ 79/12	16/ 143/12	17/ 76/12	18/ 77/12	19/ 44/12	20/ 32/12	21/ 8/34	22/ 47/12	23/ 70/12	24/ 71/12	25/ 38/12	26/ 10/258
SiO ₂	55,00	50,63	63,98	50,39	56,73	54,64	55,55	42,64	66,19	44,89	47,56	46,26	59,18
TiO ₂	1,56	1,57	1,14	0,96	1,04	2,38	1,29	2,38	0,66	1,15	2,20	0,95	0,74
Al ₂ O ₃	14,74	16,53	13,29	15,33	16,44	15,55	13,28	16,89	13,30	15,99	17,82	16,48	15,29
Fe ₂ O ₃	3,26	2,65	1,23	3,60	1,82	3,33	1,26	5,92	2,29	2,65	3,69	1,92	<0,10
FeO	6,86	9,58	5,46	5,86	6,44	5,89	9,07	9,36	2,02	5,39	7,18	8,26	6,75
MnO	0,12	0,15	0,20	0,22	0,14	0,19	0,11	0,19	0,05	0,09	0,34	0,63	0,76
MgO	3,87	4,72	1,56	7,04	3,86	3,12	4,20	6,44	1,36	9,40	5,60	8,24	3,07
CaO	6,59	6,83	3,70	10,50	5,65	5,75	8,48	11,87	4,26	9,60	9,86	10,27	4,49
Na ₂ O	4,28	3,23	4,20	2,05	4,06	4,40	2,70	1,82	3,62	2,49	3,40	1,20	4,80
K ₂ O	0,90	0,70	1,40	0,80	2,00	1,40	0,40	0,30	1,80	0,20	0,20	<0,01	2,80
S _{общ}	<0,02	0,04	0,67	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	0,11	0,02	<0,02	<0,02	0,67	0,04
P ₂ O ₅	0,19	0,27	0,13	0,13	0,15	0,42	0,17	0,07	0,13	0,19	0,39	0,09	0,10
H ₂ O-	0,20	0,05	0,25	0,12	0,09	0,17	0,31	0,10	0,13	3,93	0,23	0,45	0,16
H ₂ O-п.п.	2,60	2,59	2,65	2,85	1,44	2,30	2,78	1,52	3,89	3,67	1,09	4,42	1,78
Сумма	100,17	99,54	99,86	99,85	99,86	99,54	99,60	99,61	99,72	99,64	99,56	99,84	99,96
#mg	0,41	0,41	0,30	0,58	0,46	0,38	0,42	0,44	0,37	0,68	0,49	0,59	0,44

Примечание. 1 — дайка биотит-амфибол-кварцевой породы в гранодиоритах андского комплекса, мощность до 0,5 м, острв в архипелаге Роки, **обр. 10/93**; 2 — дайка габродолерита, частично амфиболитизированного (габродиабаз) в интрузии габброидов андского комплекса, мощность до 8 м, о. Питерман, **обр. 8/59**; 3 — то же, там же, **обр. 8/66**; 4 — дайка долерита порфирового в габброидах андского комплекса, мощность до 0,6 м, о. Питерман, **обр. 101/12**; 5 — дайка базальта, секущая габбро и тоналиты андского комплекса, а также дайку вышеописанных долеритов порфировых, мощность 1,5 м, там же, **обр. 102/12**; 6 — дайка амфиболита (вероятно, интенсивно амфиболитизированный мелкозернистый долерит) в интрузии габбро андского комплекса, мощность до 1 м, там же, **обр. 103/12**; 7 — дайка амфиболита (вероятно, интенсивно амфиболитизированный порфировый долерит или базальт) прорывает гранодиориты андского комплекса и секущую их дайку апгита, мощность 2 м, о. Питерман, **обр. 109/12**; 8 — дайка базальта прорывает катаклазиты по габбро возле интрузивного контакта гранодиоритов и габброидов андского комплекса, мощность 1,2 м, о. Питерман, **обр. 110/12**; 9 — дайка долерита амфиболитизированного в гранодиоритах андского комплекса, мощность 2 м, о. Питерман, **обр. 8/57**; 10 — дайка диабаз в андезитовых порфиритах вулканической группы Антарктического полуострова (АП), мощность до 5 м, о. Гротто, **обр. 43/12**; 11 — дайка базальта в гранодиоритах андского комплекса, мощность 0,3 м, о. Барханы, **обр. 8/25**; 12 — дайка андезитобазальтов с редкими миндалитами в андезитовых порфиритах вулканической группы АП, мощность до 7 м, о. Винтер, **обр. 80/12**; 13 — дайка миндалекаменных базальтов прорывает андезитовые порфириты вулканической группы АП и дайку базитов северо-западного простирания, мощность до 3 м, там же, **обр. 81/12**; 14 — дайка андезитобазальтов в метатифах кислого состава вулканической группы АП, мощность 1,5 м, о. Винтер, **обр. 78/12**; 15 — дайка базальтов прорывает андезитовые порфириты вулканической группы АП, мощность 1,3 м, о. Винтер, **обр. 79/12**; 16 — дайка дацита прорывает андезитовые порфириты вулканической группы АП, мощность 1,3 м, о. Винтер, **обр. 143/12**; 17 — дайка базальтов, мощностью 0,8 м, прорывает диориты андского комплекса, контрфорс Дусеберг, **обр. 76/12**; 18 — дайка андезитовых порфиритов, мощностью 0,7 м, прорывает гранодиориты андского комплекса, там же, **обр. 77/12**; 19 — дайка андезитобазальтов, мощностью до 3 м, прорывает диориты андского комплекса, мыс Муут, **обр. 44/12**; 20 — дайка андезитобазальтов миндалекаменных, мощностью 1,2 м, прорывает туфы основного состава вулканической группы АП, мыс Туксен, **обр. 32/12**; 21 — дайка долеритов в габбро андского комплекса, мощность 0,25 м, мыс Туксен, **обр. 8/34**; 22 — дайка гранодиорит-порфира, частично грейзенизированного в полосчатых габброидах андского комплекса, мощность 1 м, мыс Туксен, **обр. 47/12**; 23 — дайка долерита черного цвета, мощностью 0,25 м, прорывает светло-серые габбро андского комплекса и вышеописанную дайку гранодиоритов, там же, **обр. 70/12**; 24 — дайка сильно деформированных, трещиноватых мелкозернистых габбро, мощностью 3 м, прорывает светло-серые габбро андского комплекса, там же, **обр. 71/12**; 25 — дайка базальтов в миндалекаменных андезитобазальтах вулканической группы АП, мощность 2 м, о. Иризар, **обр. 38/12**; 26 — туфогенно-обломочная порода вулканической группы АП, обнажение у подножия г. Скотт, **обр. 10/258**; 27 — базальт вулканической группы АП, северный край залива Герлач у входа в пролив Лемьер, **обр. 141/12**; 28 — дайка апгита в гранодиоритах андского комплекса, мощность до 0,8 м, о. Питерман, **обр. 8/15**; 29 — дайка спессартита прорывает дайку габродиабазов (Fe-Ti кумулатов), мощность 0,5 м, о. Питерман, **обр. 10/32**; 30 — дайка габбро в габброидах андского комплекса, мощность 0,3 м, о. Ноб, **обр. 10/206а**; 31 — дайка керсангита в габброидах андского комплекса, мощность 20 м, там же, **обр. 10-206**.

Содержания элементов в дайковых породах, ppm

Элементы	1/ 10/93	2/ 8/59	3/ 8/66	4/ 101/12	5/ 102/12	6/ 103/12	7/ 109/12	8/ 110/12	9/ 8/57	10/ 43/12	11/ 8/25
Li	н/о	н/о	н/о	7,8	17,9	12,0	23,9	13,3	13,1	24,7	19,2
Be	н/о	0,80	0,53	1,7	0,71	0,79	0,77	0,73	0,91	0,77	0,60
Sc	54,47	н/о	н/о	29,8	36,6	28,0	34,7	34,4	31,5	39,2	30,9
V	800	575	861	275	298	194	246	268	209	218	197
Cr	100	27,1	16,6	65,5	37,5	413	174	34,3	618	5,8	315
Co	30	44,9	37,4	29,3	29,2	51,1	35,7	37,2	52,6	23,2	33,9
Ni	100	13,3	12,5	28,0	29,8	324	47,9	22,3	316	4,5	97,2
Cu	450	206	220	76,5	105,5	102	71,1	140	60,1	37,1	37,8
Zn	200	124	110	107	156	93,1	108	120	71,4	104	114
As	н/о	н/о	н/о	1,2	4,5	< ПО	11,6	2,2	2,7	3,0	< ПО
Rb	125,2	8,50	3,86	37,0	13,3	13,6	50,6	32,0	38,0	9,6	143,1
Sr	29,80	470	381	549	552	537	722	650	774	401	311
Y	31,48	8,24	11,5	31,4	18,9	16,9	11,8	16,4	16,4	23,3	15,9
Zr	21,53	19,6	24,0	18,8	59,1	25,4	32,5	26,5	52,6	35,8	51,5
Nb	13,47	1,02	1,29	6,6	2,0	3,7	1,4	2,7	3,3	2,5	1,9
Mo	2	0,75	0,63	0,53	0,82	1,3	0,73	0,87	0,20	0,47	0,61
Ag	н/о	н/о	н/о	< ПО	0,095	0,044	0,10	0,14	0,048	0,052	< ПО
Sn	5	н/о	н/о	1,6	0,87	1,2	0,73	0,93	0,76	2,8	0,75
Sb	н/о	0,38	0,24	0,25	0,25	0,27	2,3	0,58	0,39	0,98	0,75
Cs	2,887	1,27	0,37	2,4	1,3	2,3	4,3	1,9	5,1	0,71	9,9
Ba	487,8	125	68,2	369	183	119	288	366	655	201	161
La	18,65	2,73	2,69	21,9	9,9	8,5	8,4	11,1	15,8	6,0	6,1
Ce	48,81	6,15	5,83	49,9	23,1	19,6	18,3	24,4	34,7	14,9	14,2
Pr	7,309	0,98	1,05	6,8	3,2	2,6	2,4	3,3	4,7	2,1	2,0
Nd	34,99	4,42	5,42	29,5	14,9	11,5	10,3	14,7	21,2	10,3	9,2
Sm	9,377	1,41	1,85	6,6	3,7	2,7	2,3	3,3	4,7	2,9	2,4
Eu	1,076	0,71	0,72	1,6	1,2	0,88	0,76	1,0	1,4	1,1	0,82
Gd	8,931	1,38	1,95	6,7	4,0	3,1	2,5	3,4	4,5	3,8	2,9
Tb	1,268	0,23	0,34	0,91	0,54	0,44	0,33	0,46	0,54	0,57	0,42
Dy	6,970	1,52	2,18	5,3	3,2	2,8	2,0	2,8	3,0	3,8	2,6
Ho	1,420	0,34	0,45	1,1	0,65	0,57	0,41	0,56	0,57	0,79	0,53
Er	3,668	0,85	1,17	3,0	1,8	1,6	1,2	1,6	1,5	2,3	1,5
Tm	0,556	0,11	0,17	0,40	0,25	0,23	0,16	0,22	0,20	0,33	0,21
Yb	3,677	0,74	1,01	2,6	1,6	1,5	1,1	1,4	1,3	2,2	1,5
Lu	0,570	0,11	0,16	0,39	0,23	0,23	0,15	0,20	0,19	0,29	0,22
Hf	1,385	0,51	0,67	0,81	2,0	1,1	1,1	1,0	1,6	1,5	1,6
Ta	2,522	0,10	0,12	0,52	0,16	0,35	0,10	0,19	0,26	0,41	0,15
W	н/о	0,22	0,18	0,63	0,33	0,88	0,29	0,44	0,55	0,44	0,96
Pb	81,22	9,98	6,05	11,2	19,8	7,1	19,9	9,1	10,2	21,8	5,8
Th	7,574	0,44	0,51	5,2	1,4	0,86	2,8	3,2	1,7	1,1	0,76
U	2,167	0,14	0,14	0,94	0,45	0,23	0,52	0,61	0,39	0,23	0,34
(La/Yb) _N	3,64	2,65	1,91	6,04	4,44	4,07	5,48	5,69	8,72	2,0	2,92
Eu/Eu*	0,36	1,56	1,16	0,74	0,95	0,93	0,97	0,91	0,93	1,01	0,95

Элементы	12/ 80/12	13/ 81/12	14/ 78/12	15/ 79/12	16/ 143/12	17/ 76/12	18/ 77/12	19/ 44/12	20/ 32/12	21/ 8/34
Li	19,9	23,8	20,9	19,1	20,1	15,3	19,2	15,8	12,5	5,5
Be	1,08	0,932	0,85	0,97	1,3	0,461	1,0	1,0	0,75	0,41
Sc	21,8	24,2	36,3	39,4	23,1	27,9	17,1	25,5	32,9	37,4
V	146	161	162	328	30,3	179	166	239	328	838
Cr	50,8	64	4,8	46,6	5,5	298	10,9	4,6	21,8	30,6
Co	21,3	27,6	17,9	33,0	6,8	38,1	20,9	21,0	26,1	45,2
Ni	22	39,8	6,4	16,6	10,9	120	11,0	6,7	14,6	14,6
Cu	53,2	76,9	28,4	101	21,6	20,9	36,3	60,2	98,0	360
Zn	87,9	69,3	103	99,3	97,5	122	111	97,3	97,4	133
As	н/о	н/о	1,0	< ПО	< ПО	н/о	3,9	1,1	0,89	< ПО
Rb	28,9	49,8	29,8	27,7	51,3	32,1	57,8	35,2	11,2	5,8
Sr	479	484	504	468	84,8	373	511	569	528	591
Y	23,6	13,8	25,6	23,0	42,6	13,4	15,9	24,1	22,2	9,2
Zr	91,3	63,3	56,5	63,4	189	38,8	58,0	91,0	67,2	28,8
Nb	5,55	2,4	2,3	4,5	6,7	2,29	3,2	4,2	2,4	1,5
Mo	0,757	0,561	0,51	0,63	1,1	0,454	1,0	0,41	0,37	0,56
Ag	н/о	н/о	0,071	0,12	0,12	н/о	0,091	< ПО	0,039	0,22
Sn*	н/о	н/о	1,0	1,3	1,6	н/о	0,91	1,4	1,3	0,49
Sb	0,264	0,286	0,37	0,28	0,45	1,42	0,86	0,15	0,22	0,23
Cs	1,02	1,26	2,2	2,3	1,3	4,96	3,0	1,1	0,44	0,50
Ba	363	496	185	173	223	97,4	454	414	223	101
La	20,6	13,6	6,6	10,2	19,0	6,42	12,3	11,2	8,4	3,6
Ce	39,2	26,3	16,2	23,9	46,8	14,6	26,9	26,1	20,4	8,5
Pr	5	3,53	2,3	3,2	6,1	2,05	3,2	3,6	2,9	1,2
Nd	21,2	15,1	11,2	14,9	27,9	9,75	13,5	17,3	14,1	6,0
Sm	4,91	3,36	3,1	3,7	7,0	2,43	3,0	4,2	3,6	1,7
Eu	1,46	1,07	1,2	1,3	1,9	0,89	0,90	1,4	1,4	0,68
Gd	3,95	2,72	4,1	4,4	7,8	2,2	3,1	4,8	4,3	1,9
Tb	0,773	0,479	0,63	0,62	1,2	0,453	0,44	0,66	0,60	0,29
Dy	4,27	2,68	4,0	3,9	7,8	2,61	2,6	4,0	3,7	1,8
Ho	0,83	0,523	0,87	0,79	1,6	0,525	0,54	0,81	0,77	0,35
Er	2,42	1,41	2,5	2,2	4,8	1,34	1,5	2,3	2,2	1,1
Tm	0,428	0,243	0,36	0,31	0,68	0,259	0,22	0,33	0,30	0,15
Yb	2,73	1,57	2,4	2,1	4,6	1,66	1,5	2,1	2,1	0,97
Lu	0,392	0,214	0,34	0,28	0,68	0,221	0,19	0,32	0,29	0,14
Hf	2,43	1,53	2,0	2,17	5,2	1,09	1,7	2,9	2,3	0,95
Ta	0,496	0,209	0,19	0,34	0,46	0,192	0,26	0,58	0,17	0,10
W	0,45	0,274	0,46	0,45	0,93	0,763	1,2	0,49	0,30	0,14
Pb	9,62	5,28	6,3	6,6	18,3	6,39	5,3	5,4	6,5	4,5
Th	3,71	3,87	1,2	1,7	4,4	0,518	3,1	3,4	1,1	0,52
U	0,903	0,958	0,29	0,39	1,1	0,168	0,65	0,70	0,35	0,18
(La/Yb) _N	5,4	6,2	2,0	3,48	2,96	2,7	5,9	3,83	2,87	2,66
Eu/Eu*	1,0	1,08	1,03	0,99	0,79	1,18	0,90	0,95	1,09	1,16

Элементы	22/ 47/12	23/ 70/12	24/ 71/12	25/ 38/12	26/ 10/258	27/ 141/12	28/ 8/15	29/ 10/32	30/ 10/206a	31/ 10/206
Li	9,1	18,6	3,3	20,2	н/о	48,6	3,6	9,4	2,5	3,5
Be	1,1	0,488	0,375	0,905	н/о	0,74	3,1	1,6	0,11	0,13
Sc	9,5	27	32,5	32,7	39,98	41,2	1,8	27,9	101,3	73,1
V	53,5	188	244	219	н/о	507	5,1	275	1674	1283
Cr	12,0	370	12,1	254	н/о	46,9	26,9	56,9	421	298
Co	8,7	44,1	29,7	38,6	н/о	36,6	1,8	28,1	85,0	72,3
Ni	5,6	178	13	127	н/о	20,9	17,1	28,8	43,8	36,9
Cu	9,9	66,4	64,9	53,9	н/о	63,5	35,7	50,9	57,1	45,5
Zn	46,0	86,5	112	199	н/о	300	24,7	100	216	174
As	< ПО	н/о	н/о	н/о	н/о	11,8	0,3	1,2	< ПО	0,12
Rb	40,4	1,53	3,34	1,11	53,32	28,9	123	17,8	2,1	7,2
Sr	315	487	672	414	259,3	395	66,0	552	38,4	212
Y	21,0	15,7	27,8	17,4	26,51	20,0	32,2	30,6	13,0	9,3
Zr	123	59,2	12,2	61,7	79,15	54,5	114	22,2	18,1	13,6
Nb	4,3	3,1	4,08	3,63	9,399	3,0	6,6	6,5	0,5	0,5
Mo	0,70	0,517	0,527	0,274	н/о	0,63	1,9	0,83	0,58	0,66
Ag	< ПО	н/о	н/о	н/о	н/о	0,079	< ПО	0,052	0,036	0,033
Sn*	0,91	н/о	н/о	н/о	н/о	1,4	1,6	1,6	0,83	0,64
Sb	0,35	0,356	0,275	0,241	н/о	0,69	0,49	0,36	0,068	0,06
Cs	2,0	0,262	0,558	0,553	2,792	1,1	1,1	1,5	0,14	0,59
Ba	618	132	130	36,5	153,4	300	330	291	14,4	42,3
La	16,1	7,97	13,9	12,8	22,77	10,5	20,1	33,2	1,6	2,0
Ce	35,2	18	33,8	26,4	46,86	24,3	47,5	68,9	4,3	4,9
Pr	4,0	2,59	5,22	3,79	6,526	3,1	5,7	8,5	0,72	0,73
Nd	16,4	12,4	27,8	17,3	29,72	13,9	22,4	34,4	4,1	3,8
Sm	3,5	3	6,74	3,82	7,848	3,3	4,9	7,0	1,5	1,2
Eu	0,84	1,07	2,22	1,34	1,919	0,94	0,42	1,6	0,48	0,43
Gd	3,5	2,65	5,64	3,47	7,801	3,7	4,7	6,9	2,3	1,8
Tb	0,57	0,512	1,05	0,583	1,285	0,54	0,78	0,92	0,36	0,27
Dy	3,4	2,89	5,8	3,38	7,654	3,3	5,1	5,4	2,4	1,7
Ho	0,70	0,606	1,06	0,666	1,412	0,69	1,1	1,1	0,50	0,35
Er	2,3	1,56	2,72	1,74	3,818	2,0	3,5	2,9	1,4	1,0
Tm	0,34	0,282	0,414	0,292	0,539	0,28	0,55	0,41	0,19	0,14
Yb	2,37	1,68	2,49	1,93	2,920	1,9	3,9	2,6	1,2	0,89
Lu	0,35	0,248	0,32	0,259	0,437	0,27	0,56	0,36	0,18	0,13
Hf	3,9	1,41	0,462	1,5	2,445	1,8	6,4	0,88	0,73	0,54
Ta	0,37	0,395	0,417	0,292	3,599	0,22	0,94	0,44	0,045	0,055
W	0,27	0,213	0,331	0,482	н/о	0,54	1,9	0,78	0,63	0,65
Pb	11,6	3,11	3,63	4,46	12,48	14,8	11,9	8,3	2,7	3,5
Th	8,5	0,489	0,397	2,8	2,662	2,0	23,8	5,2	0,31	0,16
U	2,0	0,154	0,14	0,654	1,784	0,35	5,4	0,99	0,60	0,27
(La/Yb) _N	4,87	3,4	4,0	4,76	5,59	3,96	3,70	9,16	0,96	1,61
Eu/Eu*	0,73	1,16	1,10	1,12	0,75	0,82	0,27	0,70	0,79	0,90

Примечания. 1. В образце 10/93 элементы V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Mo и Sn (значения выделены жирным шрифтом) определены методом количественного спектрального анализа в ИГМР НАН Украины.

2. < ПО — ниже предела обнаружения; н/о — элемент не определялся.

Координаты точек опробования и элементы залегания даек

№ п/п	№ образца	Координаты точек опробования (система координат WGS-84)	Элементы залегания даек
1	10/93	S65°10,734'; W64°29,455'	Полукруглая, угол падения (пад.) 70°
2	8/59	S65°12,201'; W64°19,130'	Аз. пад. ЮЗ 235°, угол 55°
3	8/66	Там же	Аз. пад. ЮЗ 240°, угол 70°
4	101/12	S65°09,964'; W64°09,130'	Аз. пад. ЮЗ 265°, угол 75°
5	102/12	Там же	Аз. пад. С 360°, угол 60°
6	103/12;	Там же	Аз. пад. ЮЗ 265°, угол 60°
7	109/12	S65°10,683'; W64°08,771'	Аз. пад. СВ 25°, угол 65°
8	110/12;	S65°09,964'; W64°09,130'	Аз. пр. СВ 60°, угол 90°
9	8/57	S65°10,496'; W64°08,268'	Аз. пад. ЮВ 115°, угол 82°
10	43/12	S65°14,523'; W64°15,127'	Аз. пад. ЮЗ 270°, угол 75°
11	8/25	S65°14,503'; W64°18,101'	Аз. пад. СВ 50°, угол 70°
12	80/12	S65°14,870'; W64°16,049'	Аз. пад. СЗ 285°, угол 80°
13	81/12	S65°14,905'; W64°15,901'	Аз. пр. СВ 30, угол 90°
14	78/12	S65°14,905'; W64°15,886'	Аз. пад. З 270°, угол 75°
15	79/12	S65°14,872'; W64°15,995'	Аз. пад. ЮЗ. 230°, угол 70°
16	143/12	S65°14,887'; W64°15,807'	Аз. пад. СВ 20°, угол 85°
17	76/12	S65°10,026'; W64°05,201'	Аз. пад. ЮЗ 255°, угол 82°
18	77/12	S65°10,035'; W 64°05,243'	Аз. пад. СВ 20°, угол 80°
19	44/12	S65°12,217'; W 64°04,568'	Аз. пад. ЮВ 100°, угол 75°
20	32/12	S65°16,464'; W64°06,762'	Аз. пр. СВ 40°, угол 90°
21	8/34	S65°16,154'; W64°07,037'	Аз. пад. СВ 60°, угол 90°
22	47/12	S65°16,406'; W64°07,638'	Аз. пад. ЮВ 145°, угол 85°
23	70/12	S65°16,428'; W64°07,595'	Аз. пад. СЗ 280°, угол 85°
24	71/12	S65°16,441'; W64°07,588'	Аз. пад. СВ 40°, угол 70°
25	38/12	S65°13,430'; W64°12,187'	Аз. пад. СВ 70°, угол 78°
26	10/258	S65°09,691'; W64°04,907'	Аз. пад. ЮЗ 277°, угол 55°
27	141/12	S65°08,288'; W64°00,283'	—
28	8/15	S65°10,504'; W64°08,261'	Аз. пад. ЮВ 140°, угол 60°
29	10/32	S65°12,201'; W64°19,130'	Аз. пад. ЮЗ 260°, угол 80°
30	10/206а	S65°12,205'; W64°19,197'	Аз. пр. СВ 40°, угол 90°
31	10/206	S65°12,201'; W64°19,130'	Аз. пр. СВ 60°, угол 90°

Приложение

Краткое петрографическое описание дайковых пород островов архипелага Арджентайн и прилегающей части Антарктического полуострова

Образец 8/15. Гранит-аплит (аплит)

Минеральный состав: микроклин-пертит — 60–65 %; плагиоклаз — 5–10 %; кварц — 30–35 %; эпидот, сфен, рудный минерал — редкие зерна. Полевые шпаты пелитизированы в разной степени. Структура паналлотриоморфнозернистая, мелкозернистая (0,1–1,0 мм).

Образец 8/25. Базальт дайковый (анамезит), палеогипный

Минеральный состав: плагиоклаз — 50 % (во вкрапленниках — 5 %, в основной массе — 45 %); клинопироксен — 15–20 %; боулингит (или биотит?) — 35–40 %; рудный минерал — 1–2 %. Структура породы порфировая; во вкрапленниках плагиоклаз в виде зональных кристаллов размером 1–3 мм, а также в виде сростков величиной до 4 мм. Структура основной массы микрофитовая; промежутки между микролитами плагиоклаза выполнены криптоточечуйчатыми минералами типа бурого боулингита или биотита (?), которые образовались, вероятно, при разложении вулканического стекла или при замещении ортопироксена.

Примечание: в породе присутствуют редкие инородные включения: а) удлинённой формы «обломки», отличающиеся по структуре от основной массы породы (более крупнозернистые кристаллы

плаггиоклаза), б) тоже удлиненные «обломки», сложенные изотропной массой с очень мелкими микролитами плаггиоклаза. Эти включения могли быть захвачены из вмещающих пород.

Образец 8/57. Амфиболитизированный долерит

Минеральный состав: амфибол бледноокрашенный (актинолит или уралит) — 65–70 % с реликтами клинопироксена — до 5 %. Структура породы бластопорфировая: порфиробласты амфибола величиной 1–3 мм (55 % от объема породы) находятся в микрзернистой массе такого же амфибола и других вторичных продуктов. Порфиробласты имеют столбчатую или таблитчатую форму и часто содержат реликты пироксена. Во вмещающей массе амфибол в виде субпризматических кристаллов величиной 0,12–0,5 мм. Между микрокристаллами амфибола вмещающей массы находятся агрегаты игольчатого актинолита с примесью серицита и, иногда, плаггиоклаза (возможно, эти агрегаты образовались при замещении плаггиоклаза). В породе содержится до 3 % лейкоксена в смеси с рудным минералом и сфеном (псевдоморфозы замещения первичных титансодержащих рудных минералов). Структура породы порфиробластическая с нематобластовой структурой вмещающей массы. Порода образовалась, вероятно, при автометаморфизме дайкового долерита.

Образец 8/59. Габбродолерит, частично амфиболитизированный (габбродиабаз)

От классических габбро отличается наличием офитовой структуры. Минеральный состав: плаггиоклаз (лабрадор № 55) — 35–40 %. Образует таблитчатые и призматические кристаллы, размером 0,4–3,0 мм. Клинопироксен — 35 %. Образует зерна неправильной формы (иногда таблитчатой формы) размером 0,8–3,0 мм. Часть зерен имеет пойкилитовое строение за счет включений кристаллов плаггиоклаза. В разной степени подвержен амфиболитизации. Бурая роговая обманка обычно образует каемки и мелкие включения в пироксене. Бледно-зеленый амфибол (актинолит?, уралит?) замещает отдельные кристаллы пироксена (или их часть), образуя псевдоморфозы выполнения, и составляет 5–10 % объема породы. Биотит коричневый, в шлифе его количество составляет доли %. Он встречается в виде каемок вокруг зерен рудного минерала. Рудный минерал образует выделения неправильной (до ветвистой) формы размером 0,5–4,0 мм. Его содержание достигает 20–25 %. Структура породы офитовая.

Образец 8/66. Габбродолерит, частично амфиболитизированный (габбродиабаз)

Аналогичен образцу 8/59, но содержит больше пироксена. Минеральный состав: плаггиоклаз — 30–40 %, образует таблитчатые и призматические кристаллы величиной 0,6–4,0 мм. Клинопироксен бесцветный в шлифе, образует зерна неправильной, реже субтаблитчатой формы, размером 0,5–4,0 мм; нередко пойкилитовые за счет включений кристаллов плаггиоклаза. Содержание клинопироксена в породе достигает 45–50 %. Бурая роговая обманка (вторичная) наблюдается в виде каемок вокруг зерен пироксена и многочисленных мелких включений в нем. Амфибол бледно-зеленый до бесцветного (актинолит, тремолит?) местами полностью замещает отдельные кристаллы пироксена, образуя псевдоморфозы выполнения. Кроме того, он широко распространен в виде выделений вдоль спайности пироксена. Содержание данного вторичного амфибола более 10 %. Рудный минерал (10–25 %) представлен зернами (и, вероятно, сростками) неправильной до ветвистой формы. Размер выделений 0,4–3,0 мм. В участках интенсивного замещения пироксена амфиболом присутствует микрзернистая вкрапленность гистерогенного магнетита. Биотит коричневый (доли %), местами наблюдается в контакте с рудными минералами. Структура породы офитовая.

Образец 10/32. Спессартит

Минеральный состав: плаггиоклаз (андезин № 45) — 45–50 %; роговая обманка — 50 %; биотит — 1–2 %; апатит — редкие зерна; рудный минерал — 5 %. Плаггиоклаз — удлиненные призматические кристаллы. Во вкрапленниках размером 0,8–4,0 мм (20–30 %) объема породы. В основной массе величина кристаллов 0,05–0,2 мм. Роговая обманка представлена зернами гипидиоморфной и неправильной формы величиной 0,04–0,2 мм. Структура порфировая с гипидиоморфнозернистой структурой основной массы.

Образец 10/93. Биотит-амфибол-кварцевая порода

Это крупнозернистая порода темно-серого цвета с порфировидной текстурой. Порфировидная структура обусловлена присутствием вкрапленников биотита размером до 5×5 мм, которые находятся в среднезернистой массе амфибол-кварцевого состава. Минеральный состав: клинопироксен — 5–7 %; амфибол — 40 %; полевоы шпат — 20–25 %; биотит 30 %; рудные минералы — 2–3 %; апатит до 1 %; циркон — единичные зерна. Среди амфибола выделяются роговая обманка и куммингтонит. Среди клинопироксена выделяются неизмененные хорошо сохранившиеся кристаллы и замещенные амфиболом. Полевой шпат замещается вторичными продуктами. Апатит присутствует в виде включений в роговой обманке и кварце.

10/258. Туфогенно-обломочная порода (туффит?)

Порода состоит из обломков кристаллов плаггиоклаза, кварца и почти полностью разложенных обломков вулканической породы, первоначально, вероятно, существенно стекловатой. Размер обломков псаммитовый (0,2–1,0 мм). Форма обломков плаггиоклаза и кварца разнообразная, чаще неправильная, угловатая, иногда оплавленная. Обломки вулкаников также неправильной формы или овальные. Границы их чаще нечеткие. Они почти полностью замещены слюдястым минералом, крипточешуйчатым, слабо

окрашенным и плеохроирующим (биотит, флогопит, фенгит?) (необходим рентген или термика). Нередко содержат включения микрокристаллов (0,03–0,15 мм) плагиоклаза призматической формы (исходная микропорфиновая структура). Обломки измененных вулканитов из-за нечетких очертаний как бы заполняют промежутки между зернами плагиоклаза и кварца, создавая впечатление цемента. Структура породы псаммитовая (туфовая).

Образец 10/206. Керсангит

Минеральный состав: плагиоклаз — 60–65 %; биотит — 30–35 %; роговая обманка — 5 %; рудный минерал — 3–5 %; апатит 1–2 %. Плагиоклаз в виде мелких кристаллов (до 0,08–0,3 мм) слагает в смеси с биотитом (0,07–0,15 мм) основную массу породы. Кроме того, плагиоклаз встречается в виде фенокристаллов (величиной 0,4–2,0 мм), составляющих до 3 % объема породы. Роговая обманка образует вкрапленники размером 0,5–2,5 мм таблитчатой, иногда листоватой формы. Составляет не более 5 % объема породы. Апатит в виде игольчатых кристаллов размером 0,025–0,07 мм равномерно распределен в породе, составляет 1–2 % объема породы. Рудный минерал образует зерна 0,07–0,1 мм. Структура породы порфировая, основная масса гипидиоморфнозернистая.

Образец 32/12. Андезитобазальт миндалекаменный

Порода состоит из основной массы и миндалин. Миндалины составляют 30–35 % объема породы. Форма их овальная, реже неправильная, удлиненная. Подавляющее число миндалин сложены хлоритом (иногда с примесью кварца, эпидота), реже кварцем, эпидотом. Размер миндалин 0,2–1,0 мм. Основная масса породы состоит из микролитов (призматических кристаллов) плагиоклаза величиной 0,05–0,35 мм, в смеси с которыми находятся хлорит, эпидот, рудные минералы, криптозернистые сфеноподобные (?) агрегаты. Текстура породы миндалекаменная, структура основной ткани призматически-зернистая, близкая к интерсергальной.

Образец 45/12. Базальт дайковый палеотипный (анамезит)

Минеральный состав: плагиоклаз — 60–70 % (лейсты размером 0,2–0,6 мм); клинопироксен — 15–20 % (агрегаты между кристаллами плагиоклаза, реже таблитчатые кристаллы); лейкоксенизованный минерал — 5 % (титано-магнетит или ильменит); хлорит мелкочешуйчатый, вторичный по плагиоклазу, иногда гнезда в промежутках между кристаллами плагиоклаза; эпидот ~ 3–5 % (в составе основной массы породы); кальцит ~ 2–3 % (в прожилках, реже в основной массе). Структура микрофитовая.

Образец 46/12. Базальт (или андезитобазальт) дайковый

Минеральный состав: плагиоклаз — 65–70 % (лейсты размером 0,1–0,5 мм с обильными включениями криптозернистого, не поддающегося диагностике под микроскопом вторичного минерала); пироксен (?) ~ 10–15 % (в виде микро- и криптозернистых агрегатов и зерен между кристаллами плагиоклаза); хлорит ~ 10–15 % (в промежутках между лейстами плагиоклаза; вторичный, вероятно по вулканическому стеклу); эпидот ~ до 3–5 % (слагает редкие миндалины, размер которых до 0,4 мм); рудный минерал — до 10 % (равномерно распределен в породе; имеет часто квадратные сечения). Структура породы пилотаксовая.

Образец 47/12. Гранодиорит-порфир, частично грейзенизированный

Минеральный состав: плагиоклаз — 60–70 %; кварц — 15 %; кальцит — 15–20 %; хлорит — 10–15 %; рудный минерал ~ 3 %; гидрослюда развита по плагиоклазу; сфен — ед. зерна. Плагиоклаз образует непрерывный ряд таблитчатых и субтаблитчатых кристаллов размером от 0,2 до 2,0 мм. В значительной степени замещен безцветной слюдой (гидрослюдой) в виде очень мелких чешуек, пластинок, иногда розеток радиально-лучистого строения. Кальцит — зерна и агрегаты, замещающие отдельные участки породы, величиной 0,3–1,5 мм. Хлорит образует псевдоморфозы замещения по первичным роговой обманке и биотиту. Структура апогипидиоморфнозернистая сериальная. Проявление процесса грейзенизации — поисковый признак на золото.

Образец 70/12. Базальт палагонитизированный (палеотипный)

Минеральный состав: плагиоклаз (40–45 %). Образует микролиты размером (длиной) 0,08×0,3 мм, при толщине кристаллов 0,01–0,05 мм и редкие микровкрапленники субтаблитчатой формы, величиной до 0,8×1,0 мм. Палагонит (50–55 %) двупреломляющий бурый (до коричневого) — заполняет промежутки (интерстиции) между микролитами плагиоклаза. Образовался в результате замещения вулканического стекла и, отчасти, микрофенокристаллов темноцветных минералов (вероятно, в основном оливина). Представляет собой смесь глинистых минералов: каолинита, монтмориллонита и других. В породе присутствуют единичные миндалины овальной или линзовидной формы, размером 0,5–1,5 мм, заполненные каолинитом. Рудный минерал (до 5 %) образует равномерно распределенную в породе вкрапленность зерен размером 0,01–0,05 мм. Структура породы апоинтерсергальная.

Образец 71/12. Габбродолерит лейкократовый палеотипный (амфиболитизированный)

Минеральный состав: плагиоклаз (60 %) образует таблитчатые, субтаблитчатые и призматические кристаллы размером 0,5×2,5 мм. Клинопироксен (2–3 %) встречается преимущественно в виде реликтов во вторичной амфиболовой массе. Амфибол (30–35 %) бледно-зеленый в шлифе. Слагает псевдоморфозы выполнения по пироксену в виде волокнистых агрегатов (актинолит?, уралит?). Рудный минерал (5–10 %) образует зерна неправильной формы величиной 0,05×0,5 мм. Апатит (до 1 %)

образует призматические кристаллы, включенные в плагиоклаз, размером от 0,01 до 0,5 мм. Структура породы апоофитовая.

Образец 76/12. Метабазит апобазальтовый

Порода подверглась интенсивным вторичным изменениям. О первичной вулканической ее природе свидетельствуют только сохранившиеся в той или иной степени микролиты плагиоклаза. Под микроскопом в шлифе наблюдаются микролиты плагиоклаза (участками), хлорит, бледно-зеленый амфибол, эпидот, гидрослюды (?) в виде крипточешуйчатых агрегатов, рудные минералы, лейкоксен и, вероятно, другие вторичные минералы. Структура породы лепидонематобластическая.

Образец 77/12. Андезитовый порфирит измененный (палеотипный), дайковый

Минеральный состав: фенокристаллы плагиоклаза размером 0,5–2,5 мм слагают 20–30 % объема породы. Форма фенокристаллов субтаблитчатая (гипидиоморфная), неправильная, иногда идиоморфная таблитчатая. Основная масса также включает кристаллы плагиоклаза, но более мелкие (0,05–0,5 мм) столбчатой формы, распределенные в криптозернистой изотропной массе, представляющей собой, вероятно, девитрифицированное вулканическое стекло. Вкрапленники плагиоклаза в разной степени замещены буроватым биотитоподобным минералом с примесью крипточешуйчатого серицита и более поздним плагиоклазом, в связи с чем проявляют пятнистое блочковое строение.

В состав основной массы породы помимо плагиоклаза и изотропного вещества входят рудные минералы с размером зерен от 0,01 до 0,5 мм, буроватый биотит, местами хлорит, реликты амфибола, серицит. Структура породы порфировая, структура основной массы микропорфировая.

Образец 78/12. Андезитобазальт дайковый

Минеральный состав: плагиоклаз — 60–70 % (лейсты величиной 0,2–0,4 мм, очень тонкие); пироксен — 30–35 % (зерна и агрегаты величиной 0,2–0,5 мм); лейкоксенизированный титаносодержащий минерал (титаномагнетит?) — 5 % — зерна размером 0,04–0,08 мм; эпидотовые и кварц-эпидотовые миндалины величиной 1,0–2,0 мм (редкие); хлорит — примесь в промежутках между лейстами плагиоклаза. Структура породы микроофитовая.

Образец 79/12. Базальт измененный (палеотипный) дайковый

Минеральный состав: плагиоклаз — 50 % (образует лейсты величиной 0,1–0,5 мм); пироксен — 10–15 % (зерна и агрегаты размером 0,1–0,4 мм); амфибол — 20–25 % (вторичный типа уралита с размером псевдоморфоз 0,2–0,3 мм); хлорит местами — 5 %; рудные минералы — 10 % (зерна 0,015–0,1 мм). Структура микроофитовая. Вероятно, в неизменном виде базальт был двупироксеновый, один из пироксенов заместился уралитовым (?) амфиболом.

Образец 80/12. Андезитобазальт пропилитизированный

(т.е. эпидотизированный и хлоритизированный)

Минеральный состав: плагиоклаз (30–40 %) сохранился только в виде микролитов размером 0,08×0,3 мм в составе основной массы породы. Эпидот (25–30 %). Эпидотизации подвержены фенокристаллы и частично микролиты плагиоклаза. Кроме того, эпидот входит в состав прожилков и гнезд. Хлорит (35–40 %) является составной частью основной массы породы, заполняя промежутки между микролитами плагиоклаза и зернами эпидота. Представляет собой продукт замещения вулканического стекла и темноцветных минералов, проявляясь иногда в виде явных псевдоморфоз по первичному цветному минералу, размером до 2 мм.

Кварц (до 3–5 %) обнаруживается в основной массе породы в виде зерен изометричной или неправильной формы величиной 0,02×0,3 мм.

Кальцит (1–2 %) образует зерна неправильной формы величиной 0,2–0,5 мм.

Рудный минерал (2–3 %) зерна размером 0,025–0,25 мм. Структура породы бластопорфировая с бластоинтерсертальной структурой основной массы.

Образец 81/12. Трахибазальт

В шлифе наблюдается значительно измененная вулканическая порода, состоящая из малочисленных вкрапленников и основной массы. Во вкрапленниках трещиноватые таблитчатые формы кристаллов плагиоклаза, размером 0,5×5 мм и более редкие, замещенные бледно-зеленым амфиболом и гидрослюдой (?) вкрапленники первоначального цветного минерала (до 4 мм). По трещинам в фенокристаллах плагиоклаза развит эпидот. Основная масса породы сложена микролитами плагиоклаза величиной 0,12×0,15 мм, хлоритом, эпидотом, слабо окрашенным амфиболом, гидрослюдой (?) и рудным минералом. Хлорит присутствует в промежутках (интерстициях) между микролитами плагиоклаза и, вероятно, образовался при замещении первичного вулканического стекла. Амфибол и гидрослюда (?) образовались, очевидно, при замещении темноцветных минералов. Эпидот, вероятно, выборочно замещал более основной плагиоклаз в основной массе. Структура породы порфировая, структура основной массы апоинтерсертальная.

Образец 83/12. Туффит кристалловитрокластический

В породе преобладают (90 %) обломки стекловатой основной массы вулканических пород преимущественно псефитового размера (0,5–1,5 мм). Форма обломков разнообразная: от сплюснутых,

изогнутых — до преобладающих овальных (возможно, частично окатанных и переотложенных). Редко наблюдаются частицы каплевидной формы и обломки, содержащие включения микролитов плагиоклаза. Степень девитрификации различная: от едва различимых под микроскопом двупреломляющих «чешуек» до почти полного замещения обломков слюдой (?) или глинистыми минералами. Встречаются также редкие обломки с фельзитовой структурой и кварцита. Наряду с рассмотренными обломками в породе отмечаются обломки кристаллов кварца, полевых шпатов (2–3 %), агрегата бурого биотита и хлорита. У кварца наиболее четко проявлена пирокластическая природа, т.к. форма зерен хорошо сохранилась: она остроугольная, чеблевидная, с рваными краями и т.д. Иногда встречаются идеально окатанные зерна кварца, свидетельствующие о переотложенности материала. Кристаллы плагиоклаза таблитчатые, а обломки кристаллов также нередко остроугольные.

Образец 101/12. Долерит пироксен-плагиоклазовый порфиновый

Минеральный состав: плагиоклаз — 50–60 %; клинопироксен — 35–40 %; биотит — 2–3 %; рудный минерал — 2–3 %. Плагиоклаз образует удлиненной формы вкрапленники — до 30 % объема породы, величиной 2–5 мм. В основной массе гипидиоморфные кристаллы размером 0,2–0,8 мм. Клинопироксен — зерна и агрегаты размером 0,08–1,2 мм. Биотит — местами (неравномерно) скопления, реже отдельные пластинки и чешуйки 0,08–0,2 мм. Рудный минерал — мелкие зерна (0,015–0,2 мм), более или менее равномерно распределенные в породе. Структура породы порфировая, структура основной массы офитовая.

Образец 102/12. Базальт дайковый

Минеральный состав: плагиоклаз — 45–50 % (образует лейсты величиной 0,08–0,4 мм); пироксен — 40–45 % (зерна и агрегаты размером 0,08–0,4 мм в промежутках между кристаллами плагиоклаза); зеленое вулканическое стекло (?) ~ 5 %; рудный минерал — 10 % (зерна и сростки величиной 0,012–0,06 мм). Структура породы микроофитовая.

Образец 103/12. Амфиболит

(вероятно, интенсивно амфиболитизированный мелкозернистый долерит-анаменит)

Минеральный состав: амфибол — до 90 % (актинолит или уралит в виде удлиненных или шестоватых кристаллов величиной 0,1–0,5 мм); плагиоклаз — 3–5 % (реликты среди амфиболовой массы размером 0,01–0,2 мм); биотит (или флогопит) — 1–2 %; рудный минерал — 2–3 %. Структура породы нематобластическая.

Образец 109/12. Амфиболит

(интенсивно амфиболитизированный порфиновый долерит или базальт)

Порода сложена преимущественно вторичным амфиболом (актинолитом или уралитом), реликтами плагиоклаза и редкими реликтами пироксена. Амфибол образует зерна и удлиненные кристаллы величиной 0,08–0,2 мм в виде псевдоморфоз по первичным фенокристаллам пироксена до 0,8–1,2 мм (бластопорфиновые субтаблитчатые кристаллы в поперечном разрезе).

Минеральный состав: амфибол — 70–75 %; плагиоклаз сохранился в виде редких лейст и единичных частично измененных фенокристаллов величиной до 2 мм в количестве — 10–20 %; рудный минерал образует зерна размером 0,04–0,12 мм в количестве ~ 3–5 %, равномерно распределен в породе. Структура породы бластопорфировая (изначально порфировая), структура вмещающей массы (грано) — нематобластическая (изначально, вероятно, офитовая).

Образец 110/12. Базальт амфиболитизированный (палеотипный), дайковый

Минеральный состав: плагиоклаз — 50–55 % (образует тонкие лейсты величиной 0,1–0,4 мм); амфибол — 45–50 % (актинолит или уралитовая роговая обманка) кристаллы-псевдоморфозы, вероятно, по пироксену, размером 0,08–0,2 мм; биотит — местами образует скопления, но в общем объеме породы его мало (до 2–3 % или меньше); кварц — редкие выделения между лейстами плагиоклаза или очень редкие миндалины и прожилки; рудный минерал — зерна величиной 0,01–0,08 мм или, местами, симплектитоподобные сростания с плагиоклазом. Структура породы бластопорфировая или даже бластоинтерсерральная.

Образец 141/12. Базальт амфиболитизированный (палеотипный)

Он сложен очень тонкими лейстами плагиоклаза (~ 50 % объема породы) размером 0,1–0,3 мм и вторичным амфиболом (актинолитом или уралитом) с размером кристаллов 0,02–0,15 мм, заместившими первичные цветные минералы. В породе присутствует до 7 % рудного минерала, нередко лейкокренизированного. Структура породы бластоинтерсерральная (или микроофитовая).

Образец 143/12. Дацит дайковый

Порода сложена преимущественно (до 70–80 % объема) тонкими кристаллами (лейстами) плагиоклаза размером ~ 0,08–0,3 мм, в промежутках между которыми находится вулканическое стекло. Содержание рудных минералов до 5–7 %, среди которых выделяются две разновидности: первичный рудный минерал, равномерно распределенный в породе в виде мелких (0,01–0,03 мм) зерен, и более поздний пирит в составе миндалиноподобных гнезд величиной до 2 мм кварц-пиритового, кварц-карбонат-пиритового состава, кварц-эпидот-хлорит-пиритовых и др. Зерна рудных минералов достигают размера 0,2–2,0 мм. Структура породы гиалопилитовая (андезитовая).

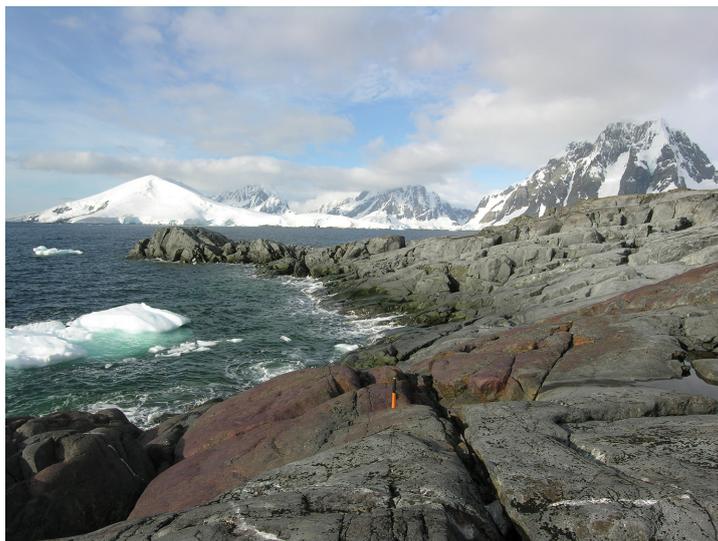


Рис. 2. Северо-западная часть о. Питерман. Дайка габбродиабазы в интрузии габброидов андского комплекса (аз. пад. ЮВ 235–240°, угол 55–70°). В обнажении выделяется по наличию гидроокислов железа на поверхности породы. Представляет собой Fe-Ti кумулат из остаточной магмы интрузии габбро андского комплекса

Fig. 2. North-western part of Pieterman island. Dyke of gabbrodiabase in the intrusion of gabbroids of the Andean complex (falling azimuth SE 235–240°, angle 55–70°). In the outcrop, it is distinguished by the presence of iron hydroxides on the surface of the rock. They represent Fe-Ti cumulate from the residual magma of the intrusion of the gabbro-Andean complex

Согласно полевым наблюдениям на обнажениях о. Питерман, наиболее ранними дайками, прорывающими габброиды андского комплекса, являются дайки габбродиабазов мощностью до 8 м (обр. 8/59, 8/66) (аз. пад. ЮВ 235–240°, угол 55–70°) (рис. 1, 2). Эти дайки прорываются дайкой спессартита (обр. 10/32) (мощность 0,5 м) (аз. пад. ЮЗ 260°, угол 80°) и дайкой андезитов (аз. пад. ЮВ 115°, угол 80°).

В 30 м южнее этого обнажения в зоне контакта интрузии гранодиоритов андского комплекса с интрузией габброидов наблюдается скопление даек нескольких простираний и разного состава, приуроченных, вероятно, к ослабленной зоне контакта.

Зона контакта интрузии гранодиоритов с интрузией габброидов имеет субширотное простирание. В габбро, вблизи контакта с гранодиоритами, наблюдается дайка меланократовых габбро (обр. 101/12), мощностью 0,6 м (аз. пад. ЮЗ 265°, угол 75°). Эта дайка прорывается жильными телами гранодиоритов андского комплекса.

Дайки базальтов (обр. 102/12), мощностью 1,2 м (аз. пад. С 360°, угол 60°), и дайка амфиболита (обр. 103/12), мощностью 0,25 м (аз. пад. Ю 180°, угол 55°), прорывают дайки габбродиабазов и жилы гранодиоритов андского комплекса (рис. 1).

В 400 м южнее мыса Туксен в сильно трещиноватых габброидах, местами превращенных в катаклазиты, наблюдаются дайки гранодиорит-порфиров, которые ориентированы ортогонально друг к другу. Они, вероятно, генетически связаны с интрузией гранодиоритов андского комплекса. Опробована дайка гранодиорит-порфира, частично грейзенизированного (обр. 47/12), мощностью до 1,0 м, прорывающая габброиды андского комплекса (аз. пад. ЮВ 145°, угол 85°).

Дайка гранодиорит-порфира прорывается дайкой долерита черного цвета (обр. 70/12), мощностью 0,25 м (аз. пад. СЗ 280°, угол 85°).

В северо-западной части о. Ноб архипелага островов Анаграмм изучена прерывистая дайка габбро (обр. 10/206а) (аз. прост. СВ 40°, угол 90°), мощностью 0,3 м, прорывающая габброиды андского комплекса. Она внедрялась в еще не закристаллизованную магму габброидов. На этом же участке опробована дайка керсантитов (обр. 10-106), мощностью 20 м (аз. прост. СВ 60°, угол 90°) в габброидах андского комплекса. На других участках — пересечения даек разных простираний в интрузиях габброидов андского комплекса не наблюдались.

В юго-западной части мыса Туксен опробована дайка сильно деформированных, трещиноватых м/з габбро (мощность 3 м), прорывающая светло-серые габбро андского комплекса, с апофизами во вмещающие породы (аз. пад. СВ 40°, угол 70°), обр. 71/12.

На мысе Туксен, склон в сторону залива Ваддингтон, опробована дайка долеритов (мощность 0,25 м), которая прорывает габбро андского комплекса, (аз. пр. СВ 60°, угол 90°), обр. 8/34.

Гранитоиды и диориты андского комплекса образовались позднее габброидов. Согласно полевым наблюдениям в обнажениях на о. Питерман, наиболее ранней дайкой, прорывающей гранодиориты андского комплекса, является дайка аплита (обр. 8/15) мощностью 0,8 м (аз. пад ЮВ 140°, угол 60°). Эта дайка, вероятно, генетически связана с интрузией гранодиоритов (рис. 1).

В юго-западной части острова Питерман дайка аплита прорывается дайкой амфибололита (вероятно, интенсивно амфиболлизированного порфирированного долерита или базальта) (обр. 109/12), мощностью 2 м (аз. пад. ЮЗ 215°, угол 85°).

Гранодиориты андского комплекса также прорываются дайками базальтов и андезитобазальтов северо-западного и северо-восточного простираний.



Рис. 3. Дайка биотит-амфибол-кварцевой породы в интрузии гранодиоритов андского комплекса (обр. 10/93)

Fig. 3. Dyke of biotite-amphibole-quartz rock in intrusion of the granodiorite of the Andean complex (sample 10/93)

Дайки базальтов и андезитовых порфиритов северо-западного простирания, прорывающие гранодиориты и гранодиориты андского комплекса, опробованы в обнажениях контрфорса Дусеберг Антарктического полуострова (обр. 76/12 и 77/12 соответственно) и на о. Барханы (обр. 8/25).

Дайки долеритов амфиболлизированных и андезитобазальтов северо-восточного простирания в гранодиоритах опробованы в юго-восточной части о. Питерман (обр. 8/57) и мысе Муут (обр. 44/12) (рис. 1).

На небольшом острове в архипелаге островов Роки, возле заброшенного британского маяка, в гранодиоритах встречена полуокруглая дайка биотит-амфибол-кварцевой породы (обр. 10/93), мощностью до 0,5 м, (угол пад. около 70°) (рис. 1, 3).

По результатам полевых наблюдений нами определена следующая последовательность формирования даек (от ранних к поздним): 1) дайки дацитов и, вероятно, базальтов и андезитобазальтов в вулканитах вулканической группы АП северо-западного простирания; 2) дайки габбродиабазов (Fe-Ti кумулаты) в интрузиях габброидов андского комплекса северо-западного простирания; 3) дайки спессартита северо-западного простирания, прорывающие дайки габбродиабазов; 4) дайки аплитов северо-восточного простирания, прорывающие гранодиориты андского комплекса; 5) дайки базальтов, андезитобазальтов и андезитов преимущественно северо-восточного и, в меньшем количестве, — северо-западного простираний. Установлено, что дайки северо-восточного простирания прорывают дайки северо-западного простирания.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПЕТРОХИМИЧЕСКИХ И ГЕОХИМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ДАЙКОВЫХ ПОРОД

Петрохимическая характеристика

На диаграмме TAS преобладающее количество фигуративных точек дайковых пород островов архипелага Арджентайн прилегающей части Антарктического полуострова попадают в поле известково-щелочных пород, за исключением трахибазальтов (обр. 81/12),

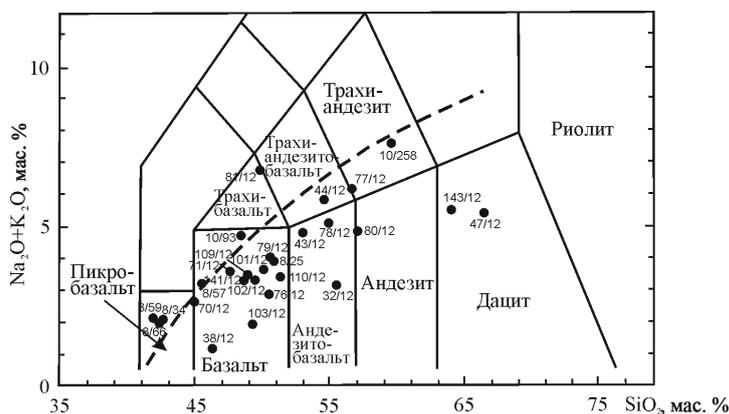


Рис. 4. Диаграмма TAS ($\text{SiO}_2 - (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$) для дайковых пород островов архипелага Арджентайн и прилегающей части Антарктического полуострова. Штриховая линия разделяет поля щелочных и известково-щелочных пород

Fig. 4. The TAS diagram ($\text{SiO}_2 - (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$) for the dike rocks of the Argentine Islands and the adjacent part of the Antarctic Peninsula. The dashed line separate the fields of alkaline and calc-alkaline rocks

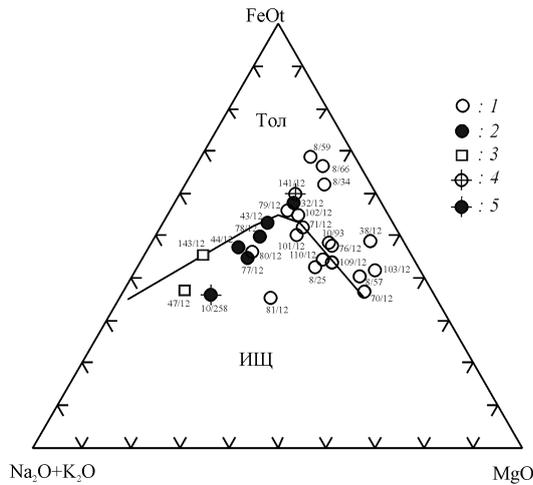


Рис. 5. Диаграмма AFM для дайковых пород островов архипелага Арджентайн и прилегающей части Антарктического полуострова: 1 — основные породы; 2 — породы среднего состава; 3 — породы кислого состава. Вулканиды вулканической группы АП: 4 — базальты амфиболизированные (141/12); 5 — туффиты среднего состава (10/258).

Fig. 5. The AFM diagram for the dike rocks of the Argentine Islands and the adjacent part of the Antarctic Peninsula: 1 — basic rocks; 2 — rocks of medium composition; 3 — rocks of acid composition. Vulcanites of the AP volcanic group: 4 — basalts amphibolized (smp. 141/12); 5 — tuffites of medium composition (smp. 10/258).

долеритов (обр. 8/34), Fe-Ti кумулатов — габбродиабазов (обр. 8/59, 8/66) и биотит-амфибол-кварцевой породы (обр. 10/93), которые находятся в поле щелочных пород (рис. 4).

Дайковые породы основного состава не кумулятивного генезиса (SiO_2 — 42,64–52,99 %) по сумме щелочей (1,20–3,93 %; в трахибазальтах — 6,75 %) и их соотношению — $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ (0,87–17) относятся к нормальному ряду, натриевой и калиево-натриевой петрохимических серий (табл. 1). На диаграмме AFM точки даек этих базитов попадают в поля толеитовой и известково-щелочной серий (рис. 5).

Большая часть дайковых пород среднего состава относится к известково-щелочной серии, одна точка (обр. 32/12) относится к толеитовой серии (рис. 5).

Дайки пород кислого состава попадают в поле известково-щелочной серии (рис. 5).

Приведенные для сравнения базальты амфиболизированные верхнеюрской вулканической группы (обр. 141/12) на диаграмме AFM попадают в поле железистых толеитов, а туффиты среднего состава (обр. 10/258) — в поле известково-щелочной серии.

Дайки базитов. Среди даек базитов выделяется два генетических типа. Дайки базитов, образовавшиеся из остаточной магмы интрузий габбро (Fe-Ti кумулаты), и дайки базитов, образовавшиеся в результате частичного плавления мантийного субстрата.

Дайки Fe-Ti кумулатов

К этому типу относятся дайки габбродиабазов на о. Питерман (обр. 8/59, 8/66) (рис. 6), габбро и керсантиты о. Ноб (обр. 10/206а, 10-206), образовавшиеся из остаточной магмы интрузий габбро. Они отличаются повышенными содержаниями — V (до 1674 ppm), Cr (до 421 ppm), Cu (до 360 ppm), Zn (до 216 ppm) и Co (до 85,0 ppm) (табл. 2). На мультиэлементной диаграмме выделяются глубокие



Рис. 6. Дайковый габбродиабаз (обр. 8/59, 8/66). Отличается повышенным содержанием V (до 1674 ppm), Cr (до 421 ppm), Cu (до 360 ppm) и Zn (до 216 ppm). Выветренная порода покрыта бурными пленками гидроокислов железа

Fig. 6. Dyke gabbrodiabase (samples 8/59, 8/66). It has an elevated content of V (up to 1674 ppm), Cr (up to 421 ppm), Cu (up to 360 ppm) and Zn (up to 216 ppm). The weathered rock is covered with brown iron hydroxide films

отрицательные аномалии Nb и Zr и позитивные Sr, Eu и Ti (рис. 4). Положительные аномалии Eu, Sr, Ti (рис. 7) указывают на кумуляцию плагиоклаза и рудных минералов в промежуточной магматической камере. РЗЭ слабо дифференцированные — $(La/Yb)_N = 0,96-3,64$ (табл. 2). В них наблюдаются как позитивные, так и отрицательные европиевые аномалии — $Eu/Eu^* = 0,36-1,56$ (табл. 2).

К этому же типу относится дайка биотит-амфибол-кварцевой породы (обр. 10/93) (обнажение на небольшом острове в архипелаге островов Роки (S 65° 10,734';

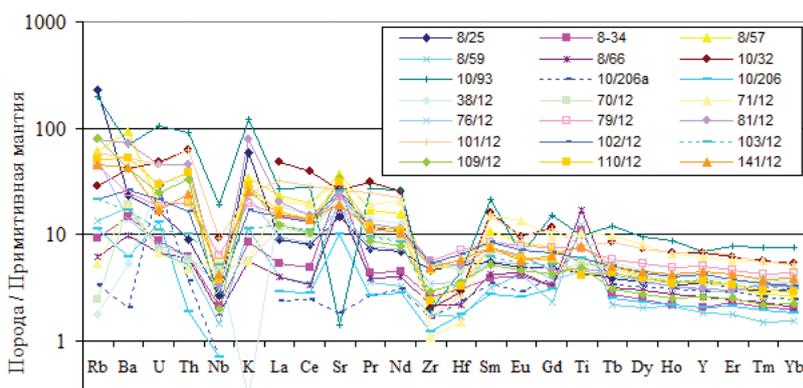


Рис. 7. Мультиэлементная диаграмма для дайковых пород основного состава. Нормировано на примитивную мантию [12]

Fig. 7. The Multielement diagram for dikes of basic composition. It is normalized to primitive mantle [12]

W 064° 29,455') (рис. 1, 3). Она прорывает интрузию гранодиоритов. Эта дайка внедрялась в еще не полностью закристаллизовавшиеся гранодиориты. По химическому составу она соответствует основной породе (табл. 1). Эта порода характеризуется отрицательной европиевой аномалией — $Eu/Eu^* = 0,36$ (табл. 2). В ней повышенное содержание V (800 ppm), Cr (100 ppm), Ni (100 ppm), Cu (450 ppm), Zn (200 ppm), Pb (81,2 ppm) и Sc (54,5 ppm) (табл. 2). Циркон из этой биотит-амфибол-кварцевой породы идентичен циркону из гранодиоритов. Она образовалась, вероятно, из остаточной магмы интрузии гранодиоритов.

Дайки базитов, выплавленные из мантийного субстрата

Среди дайковых пород, выплавленных из мантийного субстрата, выделяются высокомагнезиальные и низкомагнезиальные разности.

Дайки высокомагнезиальных базитов с наиболее высоким содержанием MgO (10,56–11,56 %) установлены в ЮВ и СЗ частях о. Питерман — обр. 8/57 и 103/12 (рис. 1, 3) соответственно (табл. 1). На диаграмме AFM они попадают в поле толеитовой серии (рис. 5). На мультиэлементной диаграмме выделяются отрицательные аномалии Nb, Zr, Ti и положительные — Pb и Sr (рис. 7). P3Э дифференцированные — $(La/Yb)_N = 4,07–8,72$ (табл. 2). Они характеризуются высокими содержаниями Cr (до 618 ppm) и Ni (до 324 ppm) (табл. 2).

Дайки низкомагнезиальных базитов, исключая кумулятивные разности, с содержанием магния — MgO (4,06–6,44 %) (табл. 1) на диаграмме AFM попадают как в поле толеитовой, так и известково-щелочной серий (рис. 5). P3Э дифференцированные — $(La/Yb)_N = 2,66–8,72$ (табл. 2). На мультиэлементной диаграмме выделяются отрицательные аномалии Nb, Zr, Ti и положительные аномалии Pb и Sr (рис. 7).

Дайки пород среднего состава на диаграмме TAS разделяются на известково-щелочные андезиты и андезито-базальты и щелочные трахиандезиты и трахиандезито-базальты (табл. 1, рис. 2). На диаграмме AFM в поле толеитовой серии попадают трахиандезитобазальты (обр. 32/12), остальные — в поле известково-щелочной серии (рис. 5).

P3Э слабо дифференцированные $(La/Yb)_N = 2,0–5,90$ (табл. 2). На спайдер-диаграмме в них выделяются отрицательные аномалии — Nb, Zr, Ti и положительные — K, Sr, Pb (рис. 8). Содержания рудных элементов не превышают — V (328 ppm), Cu (100 ppm) и Zn (111 ppm).

Дайки пород кислого состава

Дайка дацита (обр. 143/12) мощностью до 1,3 м, прорывает андезитовые порфириты вулканической группы АП (о. Винтер, (S65°14, 887'; W64°15,807') (рис. 1). Аз. пад. СВ 20°, угол падения 85°. На мультиэлементной диаграмме выделяются отрицательные аномалии Nb, Sr, Ti и положительные K и Pb (рис. 8). P3Э слабо дифференцированные — $(La/Yb)_N = 2,96$, выделяется отрицательная европиевая аномалия $Eu/Eu^* = 0,79$ (табл. 2). Отличаются высоким содержанием Y (42,6 ppm).

Дайка аплитов (обр. 8/15) мощностью до 1,0 м, прорывает гранодиориты андского комплекса (о. Питерман, в 70 м к северу от бывшей Аргентинской базы) (рис. 1). Аз. пад. ЮВ 140°, угол 60°. Эта дайка, вероятно, генетически связана с гранодиоритами андского комплекса. На мультиэлементной диаграмме выделяются отрицательные аномалии Nb, Sr, Zr, Eu и положительные — Th, U, K, Pb (рис. 8). P3Э слабо дифференцированные — $(La/Yb)_N = 3,7$, выделяется отрицательная европиевая аномалия — $Eu/Eu^* = 0,27$ (табл. 2). В этой дайковой породе обнаружено повышенное содержание Th (23,4 ppm), а также следы Mo (1,9 ppm) и W (1,9 ppm) (табл. 2).

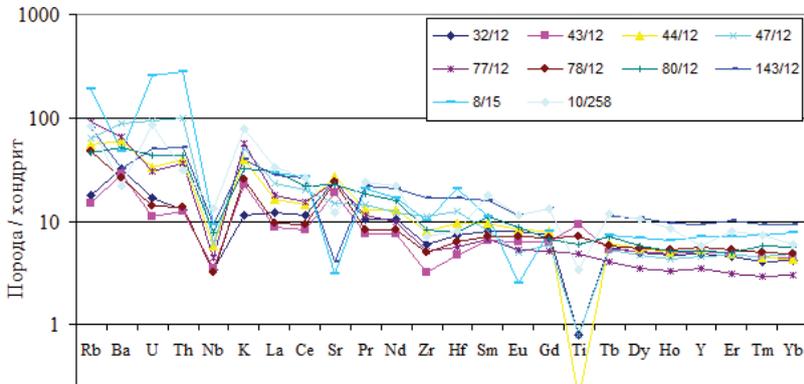


Рис. 8. Мультиэлементная диаграмма для дайковых пород среднего и кислого составов. Нормировано на примитивную мантию [12]

Fig. 8. Multielement diagram for dyke rocks of medium and acidic compositions. It is normalized to primitive mantle [12]

Дайка гранодиорит-порфира, частично грейзенизированного (обр. 47/12) мощностью до 1,0 м прорывает габброиды андского комплекса (в 400 м южнее мыса Туксен) (аз. пад. ЮВ 145°, угол 85°) (рис. 1). На мультиэлементной диаграмме выделяются отрицательные аномалии Nb и Ti и положительные Th, U, K, Pb (рис. 8). РЗЭ слабо дифференцированные — $(La/Yb)_N = 4,87$, выделяется отрицательная европиевая аномалия — $Eu/Eu^ = 0,73$ (табл. 2). Проявление процесса грейзенизации обычно рассматривается как поисковый признак на золото.*

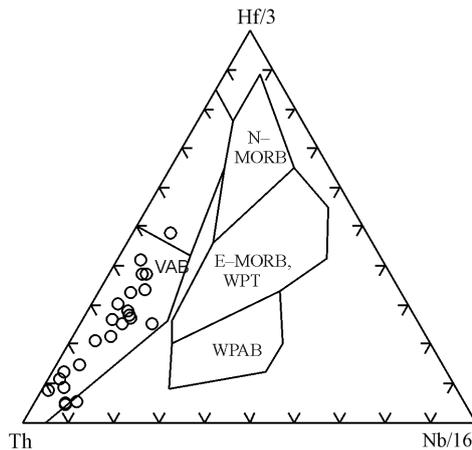


Рис. 9. Дискриминационная диаграмма Hf/3 – Th – Nb/16 [10] для дайковых пород основного и среднего состава. N – MORB: N — тип базальтов срединноокеанических хребтов; E – MORB: E — тип базальтов срединно-океанических хребтов; VAB — островодужные базальты; WPAB — внутриплитные щелочные базальты; WPT — внутриплитные толеиты

Fig. 9. The discriminatory diagram Hf/3–Th–Nb/16 [10] for dikes of basic and medium composition. N – MORB: N — type basalts of mid-ocean ridges; E – MORB: E — type of basalts of mid-oceanic ridges; VAB — island arc basalts; WPAB — intraplate alkaline basalts; WPT — Inplate tholeiites

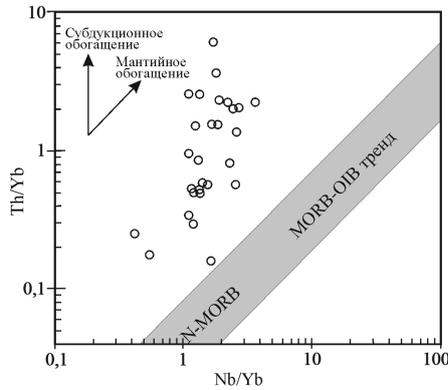


Рис. 10. Диаграмма Th/Yb – Nb/Yb для дайковых пород. Тренд N – MORB – MORB – OIB по [11]
 Fig. 10. The Th/Yb – Nb/Yb diagram for dikes rocks. Trend N – MORB – MORB – OIB after [11]

Согласно полученным геохимическим данным среди «постандских» дайковых пород выделяется два генетических типа. Ранние дайки базитов в интрузиях габброидов и, вероятно, аплитов в гранодиоритах андского комплекса формировались из остаточных магм этих интрузий. Более поздние дайки выплавлялись в результате частичного плавления мантийного субстрата под воздействием плюмов. Их образование связано, вероятно, с периодами активизации, обусловленными формированием островной дуги.

На тектономагматической дискриминационной диаграмме Hf/3 – Th – Nb/16 [10] точки дайковых пород основного и среднего состава попадают в поле базальтов деструктивных континентальных окраин (рис. 9). На диаграмме Nb/Yb – Th/Yb [11] фигуративные точки дайковых пород лежат выше мантийной последовательности пород, что указывает на их существенную контаминацию — Th и Nb (рис. 10).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Определена возрастная последовательность формирования даек в породах вулканической группы АП и интрузиях габброидов и гранитоидов андского комплекса на островах архипелага Арджентайн и прилегающей части Антарктического полуострова.

Ранние дайки дацитов и, вероятно, базальтов и андезитобазальтов в породах вулканогенной группы АП и дайки габбродиабазов в габброидах андского комплекса имеют субмеридиональное и северо-западное простирание. После внедрения гранитоидов андского комплекса формируются дайки преимущественно субширотного и северо-восточного простираний и, в меньшем количестве, дайки северо-западного простирания.

Ранние дайки в габброидах андского комплекса представляют собой Fe-Ti кумулаты, а в интрузиях гранодиоритов — они представлены аплитами, которые образовались, вероятно, из остаточной магмы этих интрузий. Более поздние дайки формировались, вероятно, за счет плавления метасоматизированного мантийного источника на умеренных глубинах под воздействием плюмов. К примитивным (исходным) расплавам, вероятно, близок состав высокомагнезиальных дайковых пород. Продуктов глубинных мантийных (плюмовых) источников в выборке отобранных образцов не обнаружено. Дайковые породы этого района по геохимическим характеристикам соответствуют зрелым островодужным образованиям известково-щелочного ряда.

Благодарности. Автор благодарит руководство НАНЦ Украины за представленную возможность выполнить полевые исследования на УАС «Вернадский». Работа выполнена в рамках Государственной целевой научно-технической программы Украины в Антарктике на 2011–2020 годы.

Acknowledgments. The author thanks the leadership of the National Science Center of Ukraine for the presented the opportunity to carry out field research on the Ukrainian Antarctic station “Academician Vernadsky”. The work was carried out within the framework of the State Target Scientific and Technical research program of Ukraine in Antarctica for 2011–2020 years.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Storey B.C., Garrett S.W. Crustal growth of the Antarctic Peninsula by accretion, magmatism and extension // *Geol. Mag.* 1985. V. 122. P. 5–14.
2. Larter R.D., Barker P.F. Effects of ridge crest-trench interaction on Antarctic-Phoenix spreading: Forces on a young subducting plate // *J. Geophys. Res.* 1991. V. 96 (B12). P. 19583–19607.
3. Yegorova T., Bakhmutov V., Janik T., Grad M. Joint geophysical and petrological models for the lithosphere structure of the Antarctic Peninsula continental margin // *Geophys. J. Int.* 2011. V. 184. P. 90–110.
4. Бахмутов В.Г. Геологический обзор архипелага Аргентинские острова и прилегающей территории Антарктического полуострова // *Бюлл. Укр. Антаркт. центра.* 1998. Вып. 2. С. 77–84.
5. Грикуров Г.Э. Геология Антарктического полуострова. М.: Наука, 1973. 120 с.
6. Curtis R. The petrology of the Graham Coast, Graham Coast, Land // *British Antarct. Surv. Sci. Rep.* 1966. № 50. P. 3–51.
7. Elliot D.H. The petrology of the Argentine Islands // *British Antarct. Surv. Sci. Rep.* 1964. № 41. P. 1–31.
8. Pankhurst R.J., Riley T.R., Fanning C.M., Kelley S.P. Episodic Silicic Volcanism in Patagonia and the Antarctic Peninsula: Chronology of Magmatism Associated with the Break-up of Gondwana // *Journ. of Petrology.* 2000. V. 41. № 5. P. 605–625.
9. Бахмутов В.Г., Гладкоhub Д.П., Шпыра В.В. Возрастная позиция, геодинамическая специфика и палеомагнетизм интрузивных комплексов западного побережья Антарктического полуострова // *Геофиз. журн.* 2013. Т. 35. № 3. С. 3–30.

REFERENCES

1. Storey B.C., Garrett S.W. Crustal growth of the Antarctic Peninsula by accretion, magmatism and extension. *Geol. Mag.* 1985, 122: 5–14.
2. Larter R.D., Barker P.F. Effects of ridge crest-trench interaction on Antarctic-Phoenix spreading: Forces on a young subducting plate. *J. Geophys. Res.* 1991, 96 (B12): 19583–19607.
3. Yegorova T., Bakhmutov V., Janik T., Grad M. Joint geophysical and petrological models for the lithosphere structure of the Antarctic Peninsula continental margin. *Geophys. J. Int.* 2011, 184: 90–110.
4. Bakhmutov V.G. Geological survey of the archipelago of the Argentine Islands and the adjacent territory of the Antarctic Peninsula. *Bull. Ukr. Antarkt. tsentra.* Bulletin of the Ukrainian Antarctic Center. 1998, 2: 77–84. [In Russian].
5. Griukurov G.E. *Geologiya Antarkticheskogo poluoostrova.* Geology of the Antarctic Peninsula. Moscow: Nauka, 1973: 120 p. [In Russian].
6. Curtis R. The petrology of the Graham Coast, Graham Coast, Land. *British Antarct. Surv. Sci. Rep.* 1966, 50: 3–51.
7. Elliot D.H. The petrology of the Argentine Islands. *British Antarct. Surv. Sci. Rep.* 1964, 41: 1–31.
8. Pankhurst R.J., Riley T.R., Fanning C.M., Kelley S.P. Episodic Silicic Volcanism in Patagonia and the Antarctic Peninsula: Chronology of Magmatism Associated with the Break-up of Gondwana. *Journ. of Petrology.* 2000, 41, 5: 605–625.
9. Bakhmutov V.G., Gladkochub D.P., Shpyra V.V. Age position, geodynamic specifics and paleomagnetism of intrusive complexes of the western coast of the Antarctic Peninsula. *Geofiz. zhurn.* Geophysic. journal. 2013, 35, 3: 3–30. [In Russian].

10. *Wood D.A.* The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary Volcanic Province // *Earth and Planetary Science Letters*. 1980. V. 50. P. 11–30.

11. *Pearce J.A., Peate D.W.* Tectonic implication of the composition of volcanic arc magmas // *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. 1995. V. 23. P. 251–285.

12. *Sun S.S., McDonough W.F.* Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes // *Magmatism in the Ocean Basins / Saunders A.D., Norry M.J. (eds). Geological Society. Special Publication. Cambridge University Press, 1989. № 42. P. 313–345.*

10. *Wood, D.A.* The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary Volcanic Province. *Earth and Planetary Science Letters*. 1980, 50: 11–30.

11. *Pearce J.A., Peate D.W.* Tectonic implication of the composition of volcanic arc magmas. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. 1995, 23: 251–285.

12. *Sun S.S., McDonough W.F.* Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Magmatism in the Ocean Basins. Saunders A.D., Norry M.J. (eds). Geological Society. Special Publication. Cambridge University Press, 1989, 42: 313–345.*

ЭКОЛОГИЯ. БИОЦЕНОЛОГИЯ. БИОГЕОГРАФИЯ

УДК (574.583+591.524.12) (268.45)

DOI: 10.30758/0555-2648-2018-64-3-294-310

ШИРОТНЫЕ ВАРИАЦИИ СТРУКТУРЫ СООБЩЕСТВ И ПРОДУКТИВНОСТИ ЗООПЛАНКТОНА В БАРЕНЦЕВОМ МОРЕ (ЛЕТО 2013 г.)

В.Г. ДВОРЕЦКИЙ*, А.Г. ДВОРЕЦКИЙ

ФГБУН «Мурманский морской биологический институт Кольского научного центра РАН»,
Мурманск, Россия

*vdvoretский@mmbi.info

LATITUDINAL VARIATIONS OF ZOOPLANKTON COMMUNITY STRUCTURE AND PRODUCTIVITY IN THE BARENTS SEA (SUMMER 2013)

V.G. DVORETSKY*, A.G. DVORETSKY

Murmansk Marine Biological Institute Kola Science Centre of Russian Academy of Sciences,
Murmansk, Russia

*vdvoretский@mmbi.info

Received May, 07, 2018

Accepted August, 16, 2018

Keywords: Barents sea, biomass, stock, zooplankton.

Summary

The Barents Sea is regarded as one of the world's most unique regions with its high summer productivity. However, there were a few studies dealing with estimation of daily secondary production in the Barents Sea. The aim of the present study was to conduct an investigation of the pelagic mesozooplankton assemblage in the Barents Sea, to calculate daily production levels of mesozooplankton and to analyze the relationship between the community structure and environmental drivers.

Structure of zooplankton communities was investigated within the main water masses of the Barents Sea in the summer 2013 (June–July). *Calanus finmarchicus* presented as copepodites IV–V dominated in terms of the total zooplankton abundance and biomass in Murmansk Coastal Water and Atlantic Water. Spring phase of zooplankton succession cycle was found in Arctic Water where Copepoda nauplii were the most abundant and *Calanus glacialis* dominated by zooplankton biomass. Zooplankton of the Barents Sea Water had features of spring and summer phases of zooplankton succession cycle. Spatial variations in the zooplankton distribution were associated with hydrological conditions and phytoplankton density. Maximum of the mean zooplankton biomass was registered in Atlantic Water (30,7 mg dry mass/m³) while the minimum was found in Barents Sea Water (5,4 mg dry mass/m³).

Citation: Dvoretский V.G., Dvoretский A.G. Latitudinal variations of zooplankton community structure and productivity in the Barents sea (summer 2013). Problemy Arktiki i Antarktiki. Arctic and Antarctic Research. 2018, 64 (3): 294–310. [In Russian]. doi: 10.30758/0555-2648-2018-64-3-294-310

Calculated daily production of zooplankton ranged from 0,01 to 1,57 mg dry mass/m³ per day. Total zooplankton stock for the study area of 281 000 km² was estimated to be > 740 000 t of dry mass. The obtained values of zooplankton biomass and stock were considerably lower than in previous years, which are probably connected with higher predator pressure — grazing of zooplankton by capelin and other predators as well as with possible climatic influence.

Поступила 7 мая 2018 г.

Принята к печати 16 августа 2018 г.

Ключевые слова: Баренцево море, биомасса, запас, зоопланктон.

Исследована структура зоопланктона в пределах основных водных масс Баренцева моря. В мурманской прибрежной и атлантической водной массах по численности и биомассе зоопланктона доминировал *Calanus finmarchicus*. В арктической водной массе преобладали науплии копепод, основу биомассы составлял *Calanus glacialis*. Пространственные вариации распределения зоопланктона были связаны с гидрологическими факторами и концентрацией фитопланктона. Наибольшая средняя биомасса отмечена в атлантических водах, наименьшая — в баренцевоморских. Общий запас зоопланктона для исследованной акватории площадью 281 тыс. км² составил более 740 тыс. т сухой массы. Биомасса, продукция и запас зоопланктона были существенно ниже, чем в предшествующие годы, что, скорее всего, связано с более высоким прессом мойвы и других хищников, также возможным влиянием климатических факторов.

ВВЕДЕНИЕ

Зоопланктон – важный компонент трофических цепей пелагиали арктических морей [1, 2], его роль состоит в передаче аккумулированной первичными продуцентами энергии на последующие трофические уровни [3]. В Баренцевом море зоопланктон составляет основу кормовой базы личинок, молоди, а также пелагических и донных рыб [4–6]. Изучение состава и количественного распределения планктона позволяет оценить степень обеспеченности рыб пищей и прогнозировать возможный вылов.

Состав, численность и биомасса зоопланктона подвержены существенным сезонным и межгодовым вариациям, которые обусловлены климатическими флуктуациями, особенностями гидрологического режима и интенсивностью промысла [7–10]. В пространственном масштабе также зарегистрирована сильная изменчивость зоопланктонных сообществ, связанная с пространственной гетерогенностью факторов внешней среды, среди которых важнейшую роль играют концентрация кормовых объектов (фитопланктон), температура, соленость и пресс хищников [1–3, 11].

Зоопланктон арктических морей изучается на протяжении длительного периода времени, и к настоящему времени накоплен значительный материал о составе, структуре сообществ и биологии массовых видов, краткий обзор исследований приведен в работе [1]. Начиная с конца 1990-х гг. в Баренцевом море отмечены процессы потепления, которые регистрируются вплоть до настоящего времени [12]. На протяжении этого периода отмечали флуктуации температуры воды, солености, количества планктона, а также запаса промысловых видов рыб [13].

Для выявления реакции зоопланктона на пространственно-временные изменения внешних факторов необходимо проведение мониторинговых исследований, охватывающих периоды с разными климатическими и кормовыми условиями. В последние годы летне-осенние съемки планктона регулярно проводятся на акватории Баренцева моря, например, учеными ПИНРО и Института морских исследований (Норвегия) [14–17].

Однако стоит отметить, что оценок потенциальной продукции зоопланктона в Баренцевом море немного, в основном в работах приводятся сведения по численности и биомассе зоопланктона. Получение расчетных величин продукции зоопланктона для вод различного происхождения в широтном градиенте не только позволяет более адекватно оценить их реальную продуктивность, но и дает возможность прогнозировать запас кормовых объектов для конечных потребителей, включая промысловые виды рыб.

Цель нашей работы состояла в изучении особенностей широтных колебаний продукционных характеристик и пространственного распределения зоопланктона в Баренцевом море в летний период 2013 г., а также в оценке влияния факторов среды на количественные показатели основных групп зоопланктона. В результате нашего исследования были получены расчетные показатели суточной продукции зоопланктона для обширной акватории, на которой представлены различные типы водных масс, что дает возможность сопоставления их продукционного потенциала в летний сезон.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Пробы планктона были отобраны в ходе рейса НИС «Дальние Зеленцы» в Баренцевом море с 1 июня по 23 июля 2013 г. Исследованиями была охвачена обширная акватория, включающая южные, центральные и северные районы (рис. 1). Для регистрации вертикальных профилей температуры воды и солености использовали гидрологический зонд SEACAT SBE 19plus фирмы SEA-BIRD ELECTRONICS (США).

Отбор и последующая обработка проб фитопланктона проводились в соответствии со стандартными методами. Пробы воды отбирались батометром по трем горизонтам, выбранным в зависимости от плотностной структуры водного столба.

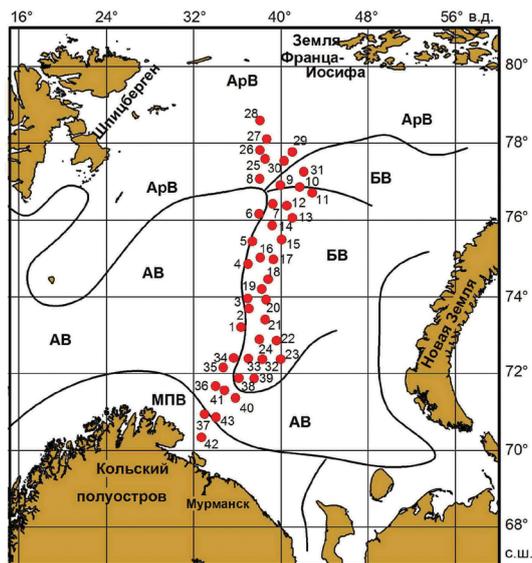


Рис. 1. Расположение станций отбора проб зоопланктона в Баренцевом море летом 2013 г. Водные массы: МПВ — мурманская прибрежная, АВ — атлантическая, БВ — баренцевоморская, АрВ — арктическая

Fig. 1. Location of zooplankton sampling stations in the Barents Sea in summer 2013. Water masses: МПВ — Murmansk Coastal Water, АВ — Atlantic Water, БВ — Barents Sea Water, АрВ — Arctic Water

Пробы фиксированного объема концентрировались методом обратной фильтрации и фиксировались формалином. Расчет численности проводился по стандартной методике. Биомасса вычислялась по таблицам средних клеточных весов. Детальное описание перечисленных методик приведено в работе П.Р. Макаревича [18].

Для отбора зоопланктона применяли сеть Джели (площадь входного отверстия 0,1 м², размер ячее фильтрующего полотна 170 мкм). Отбор проб проводили в слое от дна до поверхности. Всего отобрано 43 пробы.

Обработку проб осуществляли на берегу в лабораторных условиях по стандартным методикам при помощи стереоскопического микроскопа МБС-10 [19]. Сырую биомассу отдельных видов и суммарную биомассу рассчитывали при помощи номограмм, а также используя таблицы весов морских гидробионтов и размерно-весовые зависимости [20–23]. Сырую биомассу переводили в сухую с учетом переводных коэффициентов. Подробное описание методик обработки материала, а также расчет потенциальной суточной продукции зоопланктона приведены в наших более ранних работах [24, 25].

Суточные величины продукции (мг сухой массы/м³ в сутки) ювенильных стадий копепод рассчитывали по уравнению:

$$P = B \cdot g, \quad (1)$$

где B — углеродная биомасса (мг/м³); g — скорость роста (сут⁻¹). Для веслоногих рачков этот показатель вычисляли по уравнению [26]:

$$\lg(g) = -1,259 + 0,0345 \cdot T - 0,128 \cdot \lg(w_{ic}), \quad (2)$$

где T — средняя температура воды в слое облова; w_{ic} — средняя углеродная масса (мкг экз⁻¹). Для взрослых стадий g соответствует удельной генеративной продукции (SEP). Эти данные для массовых копепод (*Calanus*, *Pseudocalanus*, *Oithona*, *Metridia*, *Temora*, *Centropages*) были взяты из литературных источников [27–29]. Поскольку скорость обмена сильно зависит от температуры воды, величина SEP была умножена на коэффициент Q_{10} , который для копепод равен:

$$Q_{10} = a^{0,1(T_2 - T_1)}, \quad (3)$$

где T_2 — средняя температура воды в слое облова; T_1 — температура, при которой было определено значение удельной генеративной продукции; a — коэффициент, который равен 1,59 или 1,43 для видов, откладывающих яйца в воду или формирующих яйцевые мешки соответственно [30]. Указанные поправки пригодны для широкого диапазона температур (от -2,3 до +29,4 °C), поэтому они могут применяться и для арктических копепод. Продукцию прочих ракообразных вычисляли по формуле [31]:

$$P = \left(0,0746 \cdot W^{0,8} \cdot 0,8 - \frac{0,125 \cdot W^{0,759} \cdot 4,86 \cdot 24}{500} \right) \cdot N \cdot 2,25^{0,1(T-20)} \cdot 1000, \quad (4)$$

где $0,0746 \cdot W^{0,8}$ — суточный рацион в г сырой массы; W — индивидуальная сырая масса организма (г); $(0,125 \cdot W^{0,759} \cdot 4,86 \cdot 24)/500$ — величина обмена; 4,86 — оксикалорийный коэффициент; T — средняя температура воды в слое облова; N — численность (экз./м³). Полученную величину переводили в единицы сухой массы [32]. Продукцию аппендикулярных, щетинкочелюстных, птеропод, медуз, гребневиков и личинок донных животных рассчитывали по уравнению (1) с учетом коэффициента Q , который принимали равным $2,25^{0,1(T_2 - T_1)}$ [33]. Информация по значениям g была получена из опубликованных ранее источников [26, 34–36].

Распределение зоопланктона рассматривали в связи с локализацией водных масс исследуемого района. В качестве основных водных масс выделялись мурманская прибрежная (температура 1–9 °С, соленость 33,8–34,7 ‰), атлантическая (температура > 3 °С, соленость > 35,0 ‰), баренцевоморская (температура –1,5...+9 °С, соленость 34,5–35,0 ‰) и арктическая (температура < 0 °С, соленость 32,0–34,8 ‰) [37].

Для расчета показателей биологического разнообразия зоопланктонных сообществ использовали индексы Шеннона и выравненность Пиелу. Наличие связи между внешними факторами (широта, долгота, температура воды, соленость, численность и биомасса фитопланктона) и количественными показателями зоопланктона (численность и биомасса) выявляли при помощи процедуры *Bio-Env* в программе *Primer 5.0* (разработчик *PRIMER-E Ltd., Plymouth, United Kingdom*). Суть этого анализа состоит в поиске факторов, которые наилучшим образом объясняют вариацию количества зоопланктона. Сравнение сообществ зоопланктона разных водных масс проводили при помощи однофакторного анализа рангов; статистически значимым считали уровень при $p < 0,05$. Расчет запаса зоопланктона проведен при помощи ГИС КартМастер (разработчик ВНИРО) по методу автоматического кригинга. Указанная программа может быть применена для расчетов запаса промысловых донных организмов, рыб, а также планктона. Сущность методики состоит в поиске функции, которая наилучшим образом описывает распределение исследуемого параметра по измеренным точкам. В случае планктонных съемок — это значения биомассы под единицей площади. В программе задаются интервалы параметра, далее происходит расчет запаса для каждого интервала, после чего идет суммирование запаса по всем просчитанным интервалам. Средние величины представлены с ошибкой среднего.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Характеристика гидрологических условий и распределения фитопланктона. Во время периода работ лед на исследованной акватории отсутствовал. На станциях отмечена термическая стратификация, пикноклин залегал на глубине 20–30 м в пределах атлантической и мурманской прибрежной водных масс и на глубине 40–60 м в пределах баренцевоморской и арктической водных масс. Поверхностная температура варьировала от –0,3 до 11,6 °С, понижаясь с юга на север (табл. 1). Придонная температура колебалась от –1,6 °С до 4,3 °С. Наибольшие значения солености (> 35,0 ‰) регистрировали в центральной части исследованной акватории в слое глубже 60 м. Наименьшие значения солености отмечены в поверхностном 20-метровом слое на юге и на севере. Максимальная концентрация фитопланктона отмечена на северных станциях арктической и баренцевоморской водных масс, минимальная численность и биомасса зарегистрированы в мурманских прибрежных водах (табл. 1).

Зоопланктон мурманской прибрежной водной массы. Всего обнаружено 36 таксономических групп, из них 25 были определены до видового уровня. Общая численность зоопланктона варьировала от 143 до 875 экз./м³ (рис. 2), в среднем составляя 446±220 экз./м³ (табл. 2). По численности доминировали копеподы (табл. 2), на долю которых приходилось 99,2–99,7 %. Массовыми видами были *Calanus finmarchicus* (48 %), *Oithona similis* (19 %) и *Microcalanus* spp. (10 %). Суммарная биомасса колебалась от 15,8 до 31,1 мг сухой массы/м³ (рис. 3) при средней величине 25,0±4,7 мг сухой массы/м³. По биомассе лидирующее положение занимали веслоногие ракообразные

Средние значения гидрологических показателей и концентрации фитопланктона в Баренцевом море летом 2013 г.

Показатель	МПВ	АВ	БВ	АрВ
$T_{\text{ср.}}$	$4,9 \pm 0,2$	$4,4 \pm 0,4$	$0,8 \pm 0,2$	$-0,4 \pm 0,1$
$S_{\text{ср.}}$	$34,56 \pm 0,08$	$34,87 \pm 0,05$	$34,94 \pm 0,02$	$34,6 \pm 0,01$
$T_{\text{пов.}}$	$10,7 \pm 0,2$	$10,0 \pm 0,5$	$3,3 \pm 0,5$	$1,0 \pm 0,1$
$S_{\text{пов.}}$	$34,38 \pm 0,31$	$34,68 \pm 0,26$	$35,31 \pm 0,12$	$35,40 \pm 0,20$
$T_{\text{дно}}$	$4,3 \pm 0,2$	$2,5 \pm 0,7$	$0,1 \pm 0,1$	$0,4 \pm 0,2$
$S_{\text{дно}}$	$34,80 \pm 0,04$	$34,99 \pm 0,01$	$34,97 \pm 0,01$	$34,9 \pm 0,01$
$N_{\text{пов.}}$	$4,6 \pm 2,0$	$54,7 \pm 17,5$	$83,4 \pm 36,4$	$75,3 \pm 24,5$
$N_{\text{пикн.}}$	$3,3 \pm 2,7$	$16,0 \pm 5,1$	$98,7 \pm 34,6$	$46,8 \pm 13,9$
$N_{\text{дно}}$	$0,2 \pm 0,1$	$0,6 \pm 0,1$	$201,4 \pm 72,0$	$34,7 \pm 8,3$
$N_{\text{ср.}}$	$2,7 \pm 1,2$	$23,8 \pm 6,3$	$127,8 \pm 37,4$	$52,2 \pm 10,8$
$B_{\text{пов.}}$	$19,6 \pm 3,2$	$178,2 \pm 50,9$	$221,0 \pm 31,0$	$83,4 \pm 16,1$
$B_{\text{пикн.}}$	$20,0 \pm 6,6$	$176,8 \pm 97,6$	$225,5 \pm 49,2$	$141,3 \pm 36,3$
$B_{\text{дно}}$	$15,1 \pm 15,0$	$2,6 \pm 0,8$	$195,4 \pm 116,7$	$232,7 \pm 81,3$
$B_{\text{ср.}}$	$18,2 \pm 3,8$	$119,2 \pm 36,4$	$214,0 \pm 54,5$	$152,4 \pm 23,2$

Примечание. T — температура ($^{\circ}\text{C}$), S — соленость ($\%$), N — численность фитопланктона (тыс. кл./л), B — биомасса (сырая) фитопланктона (мкг/л). Величины показателей: ср. — средняя, пов. — поверхностный слой, дно — придонный горизонт, пикн. — слой скачка плотности. Водные массы: МПВ — мурманская прибрежная, АВ — атлантическая, БВ — баренцевоморская, АрВ — арктическая.

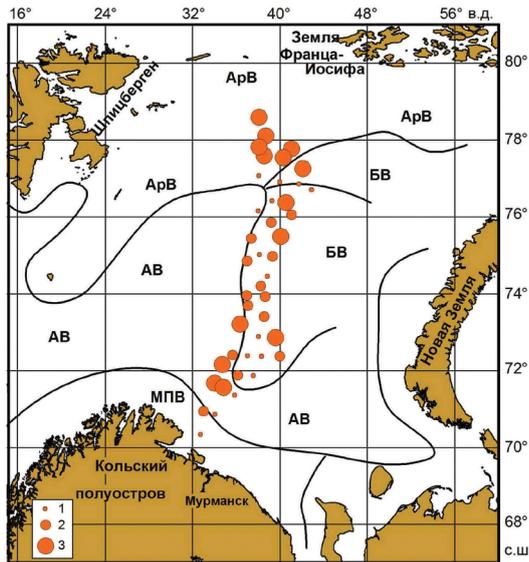


Рис. 2. Распределение численности зоопланктона (экз./ м^3) в Баренцевом море летом 2013 г.
 1 — < 400 , 2 — $400\text{--}900$, 3 — > 900

Fig. 2. Distribution of zooplankton abundance (individuals/ m^3) in the Barents Sea in summer 2013.
 1 — < 400 , 2 — $400\text{--}900$, 3 — > 900

Средние значения численности (экз./м³), биомассы (мг сухой массы/м³) и суточной продукции (мг сухой массы/м³ в сутки) зоопланктона в Баренцевом море летом 2013 г.

Группа	Водная масса				Достоверные отличия <i>p</i> < 0,05
	МПВ	АВ	БВ	АрВ	
Численность					
Копеподы	346	762	425	1062	МПВ–АрВ, АВ–БВ, БВ–АрВ
Птероподы	0,17	0,04	0,06	0,56	АВ–АрВ, БВ–АрВ
Эвфаузииды	1	2	17	10	
Гиперииды	–	0,01	0,01	0,18	АВ–АрВ, БВ–АрВ
Аппендикулярии	1	1	74	65	АВ–БВ, АВ–АрВ
Щетинкочелюстные	0,4	4,1	1,0	0,3	АВ–АрВ
Прочие	99	82	26	9	АВ–АрВ
Сумма	446	851	544	1147	
Биомасса					
Копеподы	24,08	29,43	4,56	14,99	МПВ–БВ, АВ–БВ, БВ–АрВ
Птероподы	0,040	0,002	0,019	0,045	АВ–АрВ, БВ–АрВ
Эвфаузииды	0,566	0,334	0,151	0,079	
Гиперииды	–	0,003	0,001	0,094	АВ–АрВ, БВ–АрВ
Аппендикулярии	0,0005	0,0001	0,0836	0,2445	МПВ–АрВ, АВ–БВ, АВ–АрВ
Щетинкочелюстные	0,063	0,438	0,192	0,159	
Прочие	0,275	0,436	0,434	0,162	
Сумма	25,02	30,64	5,44	15,77	МПВ–БВ, АВ–БВ, БВ–АрВ
Суточная продукция					
Копеподы	0,592	0,794	0,181	0,313	МПВ–БВ
Птероподы	0,0010	0,0001	0,0003	0,0005	БВ–АрВ
Эвфаузииды	0,008	0,007	0,003	0,001	
Гиперииды	–	0,00007	0,00001	0,00121	АВ–АрВ, БВ–АрВ
Аппендикулярии	0,00013	0,00002	0,01102	0,03139	МПВ–АрВ, АВ–БВ, АВ–АрВ
Щетинкочелюстные	0,006	0,039	0,012	0,007	АВ–БВ
Прочие	0,031	0,034	0,028	0,012	
Сумма	0,638	0,875	0,236	0,367	МПВ–БВ, АВ–БВ, БВ–АрВ

Примечание. Усл. обозначения см. табл. 1.

(табл. 2), среди которых преобладал *C. finmarchicus* (91 %). Суточная продукция зоопланктона составляла 0,398–0,788 (0,641±0,123) мг сухой массы/м³ (табл. 2). Среднее значение индекса Шеннона составило 2,40±0,35, выравненности Пиелу — 0,51±0,07. Применение процедуры *Bio-Env* показало, что наибольшую корреляцию (*r* = 0,550) с численностью представителей зоопланктона демонстрировали температура воды в поверхностном слое и биомасса фитопланктона в придонном слое. Это связано с тем, что на станциях мурманских прибрежных вод биомасса фитопланктона была примерно одинаковой во всей водной толще (табл. 1).

Зоопланктон атлантической водной массы. Всего выявлена 41 таксономическая группа, из них — 29 видового уровня. Суммарная численность зоопланктона колебалась от 43 до 1759 экз./м³ (рис. 2), в среднем составляя 851±241 экз./м³ (табл. 2). По численности доминировали веслоногие ракообразные (табл. 2), на

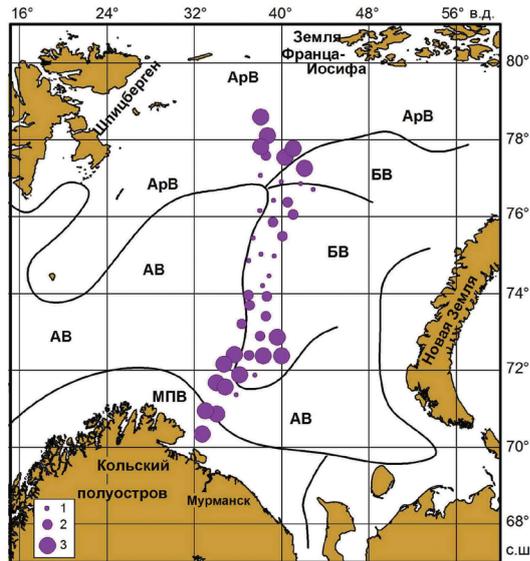


Рис. 3. Распределение биомассы зоопланктона (мг сухой массы/м³) в Баренцевом море летом 2013 г.

1 — < 5, 2 — 5–10, 3 — > 10

Fig. 3. Distribution of zooplankton biomass (mg dry mass/m³) in the Barents Sea in summer 2013.

1 — < 5, 2 — 5–10, 3 — > 10

долю которых приходилось 97,8–99,7 %. Массовыми представителями сообщества были те же виды, что и в мурманских прибрежных водах, однако их вклад в общее обилие отличался: *Calanus finmarchicus* составлял 34 %, *Oithona similis* — 27 %, *Microcalanus* spp. — 13 %. Суммарная биомасса изменялась в диапазоне от 0,8 до 52,8 мг сухой массы/м³ (рис. 3), в среднем составляя 30,6±7,6 мг сухой массы/м³. По биомассе ведущую роль играли копеподы (табл. 2), среди них доминировали *C. finmarchicus* (76 %) и *C. glacialis* (11 %). Продукция зоопланктона колебалась от 0,025 до 1,568 мг сухой массы/м³ в сутки. Средняя величина была в 1,4 раза выше, чем в мурманских прибрежных водах (табл. 2). Среднее значение индекса Шеннона составило 2,76±0,11, выравненности Пиелу — 0,60±0,02. Вариации численности зоопланктона были тесно скоррелированы с географическим положением станций, придонной соленостью, концентрацией фитопланктона в поверхностном и придонном слоях (*Bio-Env*-анализ, $r = 0,882$).

Зоопланктон баренцевоморской водной массы. Всего выявлено 57 таксономических групп, из них — 37 видового уровня. Общая численность зоопланктона варьировала между 33 до 1425 экз./м³ (рис. 2), в среднем составляя 544±68 экз./м³ (табл. 2). По численности преобладали веслоногие ракообразные (табл. 2), на долю которых приходилось 44,7–99,7 %, в роли субдоминантов выступали аппендикулярии (табл. 2). Массовыми представителями сообщества были *Oithona similis* (33 %), науплии Copepoda (17 %), *Fritillaria borealis* (12 %) и *Pseudocalanus* spp. (11 %). Совокупная биомасса колебалась в диапазоне 0,2–19,8 мг сухой массы/м³ (рис. 3) при средней величине 5,4±1,0 мг сухой массы/м³. По биомассе лидирующее положение занимали копеподы (табл. 2), среди которых преобладали представители

рода *Calanus* (43 %), науплии Copepoda (15 %) и *Metridia longa* (10 %). Суточная продукция изменялась в интервале 0,010–1,043 мг сухой массы/м³, при этом средняя величина была минимальной среди всех рассматриваемых типов водных масс (табл. 2). Среднее значение индекса Шеннона составило 2,81±0,05, выравненности Пиелу — 0,62±0,01. Пространственная изменчивость численности зоопланктонных организмов наилучшим образом объяснялась вариациями поверхностной температуры, а также средними значениями обилия и биомассы фитопланктона (*Bio-Env*-анализ, $r = 0,684$).

Зоопланктон арктической водной массы. Всего обнаружено 39 таксономических групп, из них — 27 видового уровня. Суммарная численность зоопланктона изменялась в интервале 913–1611 экз./м³ (рис. 2), при средней величине 1138±105 экз./м³ (табл. 2). По численности доминировали веслоногие ракообразные (табл. 2), на долю которых приходилось 83,5–98,3 %. Массовыми представителями сообщества были науплии копепод (56 %), *Oithona similis* (17 %) и *Pseudocalanus* spp. (12 %). Общая биомасса варьировала от 9,6 до 23,1 мг сухой массы/м³ (рис. 3), в среднем составляя 15,8±1,5 мг сухой массы/м³. По биомассе доминировали веслоногие ракообразные (табл. 2), при этом наибольший вклад отмечен для *Calanus glacialis* (38 %) и науплий Copepoda (34 %). Средняя продукция зоопланктона была выше, чем в баренцевоморских водах (табл. 2), варьируя от 0,205 до 0,510 мг сухой массы/м³ в сутки. Среднее значение индекса Шеннона составило 2,20±0,15, выравненности Пиелу — 0,45±0,03. Наиболее высокая корреляция обилия зоопланктона была отмечена с тремя переменными — широтой, придонной соленостью и численность фитопланктона в поверхностном слое (*Bio-Env*-анализ, $r = 0,591$).

Сопоставление зоопланктона разных водных масс. Сравнение численности, биомассы и продукции отдельных групп зоопланктона показало, что в ряде случаев наблюдаются различия (табл. 2), наиболее выраженные при сравнении водных масс южной и северной частей района исследования. По общей численности зоопланктона значимых различий не выявлено (табл. 2), тогда как по биомассе и суточной продукции прослеживались отличия для величин, отмеченных в баренцевоморских водах, при сопоставлении с другими водными массами (табл. 2). Основные закономерности в распределении зоопланктона состояли в увеличении обилия с юга на север. Для отдельных групп зоопланктона выявлены следующие тенденции: в мурманских прибрежных водах общая численность копепод была минимальной, тогда как в арктических — максимальной. Наибольшие значения обилия эвфаузиид и аппендикулярий были выявлены в баренцевоморских водах. Для биомассы и продукции зоопланктона картина распределения была иной: в случае копепод максимум регистрировали в атлантических водах, эвфаузиид — в мурманских прибрежных водах, гипериид и аппендикулярий — в арктических.

Распределение запаса зоопланктона. Высокие концентрации зоопланктона были приурочены к юго-западной части исследуемой акватории, где средняя биомасса достигала 6–8 г сухой массы/м² (табл. 3), что эквивалентно 180–280 мг сырой массы/м³. Между 74 и 77° с.ш. отмечена низкая интегральная биомасса — менее 2 г сухой массы/м² (менее 80 мг сырой массы/м³). В северной части района исследований концентрация была выше, достигая 2 г сухой массы/м² (около 100 мг сырой массы/м³). Общая величина запаса зоопланктона превышала для всей ис-

следованной акватории (площадь 281 тыс. км²) 740 тыс. т сухой массы, что соответствовало примерно 4 млн т. сырой массы.

ОБСУЖДЕНИЕ

С конца 1990-х гг. в Арктике регистрируются процессы потепления, что вызвало повышение температуры воды в Баренцевом море [38]. Аномально теплым был 2006 г., затем произошло некоторое снижение температуры воды. По своим гидрологическим характеристикам 2013 г. также можно отнести к категории аномально теплых лет [12, 39]. Сравнение со среднемноголетними показателями, рассчитанными для периода 1952–2001 гг. [38], подтвердило, что в 2013 г. в поверхностном слое температура воды была выше, чем в умеренные и холодные годы, что свидетельствовало об интенсивном притоке теплых атлантических вод в Баренцево море.

Сезонная динамика фитопланктона в Баренцевом море существенно зависит от типа водной массы и географического положения. Так, в субарктических прибрежных (мурманская прибрежная водная масса) и шельфовых (атлантическая водная масса) экосистемах вспышка численности и биомассы микроводорослей отмечается в весенний период (до 1–2 млн кл/л и до 1–3 г/м³), после чего к июню–июлю концентрация фитопланктона существенно снижается [40]. В северных и центральных районах моря (арктическая и баренцевоморская водные массы) первый максимум фитопланктона также отмечается весной, но позднее, цветение приурочено к прикромочным зонам. Показатели биомассы фитопланктона, отмеченные в июне–июле 2013 г. в целом были выше величин, которые обычно характерны для летней фазы сбалансированного развития фитопланктона (20–100 мкг/л) [40], что свидетельствовало о благоприятных кормовых условиях для зоопланктона.

Характерной особенностью зоопланктонных сообществ южной части Баренцева моря является преобладание бореальных видов, которые поступают из Северной Атлантики с водами Нордкапского течения [1, 10]. Наибольший вклад в биомассу зоопланктона вносит веслоногий рачок *Calanus finmarchicus* [3, 4, 8, 25]. Наши исследования также показали доминирование указанного вида в общей биомассе. По численности, как правило, преобладает мелкая копепода *Oithona similis*, однако ее обилие достигает максимума ближе к середине летнего периода [29]. В баренцевоморских водах в более или менее равной степени представлены бореальные и арктические виды, тогда как в холодных водах на севере моря доминируют арктические виды, в частности *Calanus glacialis* [1, 10, 11, 41], что подтвердило и наше исследование.

Видовое разнообразие складывается из абсолютного числа видов (видового богатства) и выравненности видов по обилию [42]. Разнообразие сообщества тем выше, чем больше видов оно в себя включает и чем более выравнены эти виды количественно. Наиболее широко используется индекс Шеннона, который измеряет разнообразие сообщества в среднем на одну особь. Индекс Пиелу (мера выравненности) представляет собой отношение фактического разнообразия к теоретически максимально возможному при данном числе видов [43]. Таким образом, чем выше оба показателя, тем выше количество видов в сообществе и тем ближе их количества друг к другу. В арктических морях сообщества, как правило, отличаются невысокими значениями индекса Шеннона и выравненности, поскольку доминируют не более 2–3 видов, а доля остальных представителей невелика [1, 3, 9, 25].

Разнообразие зоопланктонных сообществ, которое оценивали при помощи индекса Шеннона, в 2013 г. в целом было несколько выше, чем отмечено ранее в летний период (медианные значения 1,68 в арктических водах, 1,76 в атлантических и 2,05 в арктических) [25]. Подобное различие может быть связано с разницей во времени отбора проб: в представленной работе исследованиями было охвачено начало летнего сезона, тогда как более ранние оценки [25] были получены в основном для конца лета (август–сентябрь). Известно, что ранняя сукцессионная фаза зоопланктона отличается большим видовым богатством и разнообразием за счет присутствия меропланктона, а ближе к середине и концу лета отмечается снижение индекса Шеннона [1].

Вместе с тем стоит отметить, что сообщества арктических и атлантических вод отличались по доле науплиев и молоди копепод: на севере вклад ювенильных стадий веслоногих рачков в общую численность был существенно выше, чем на юге. Полученные результаты свидетельствуют о том, что указанные сообщества находились на разных стадиях сукцессионного цикла — весенней (в арктических водах) и летней (мурманские прибрежные и атлантические воды). Для баренцево-морских вод было характерно переходное состояние. Подобная закономерность в широтном изменении состава зоопланктона была отмечена ранее [3, 4, 10], она связана с пространственной изменчивостью природных условий Баренцева моря [25].

Суммарная средняя численность и биомасса зоопланктона в летний период на юге моря достигают нескольких тысяч экз./м³ и 200–600 мг сырой массы/м³, при этом в атлантической водной массе концентрация зоопланктона обычно выше. Сопоставление наших величин (127–158 мг сырой массы/м³) показывает, что в целом количество зоопланктона в 2013 г. было существенно ниже, чем отмечено ранее для центральных районов Баренцева моря [41, 44]. Сходная картина отмечена и для других водных масс. В частности, в арктических водах средняя биомасса летом в теплые годы составляет до 800–1300 мг сырой массы/м³ [11, 24]. В нашей работе средняя биомасса равнялась 80 мг сырой массы/м³ в арктических водах и 34 мг сырой массы/м³ в баренцево-морских водах. В августе–октябре 2013 г. интегральная биомасса зоопланктона в южных районах Баренцева моря была сопоставимой с нашими данными для июня–июля (3–8 г сухой массы/м², в среднем 5 г сухой массы/м²), составляя 2–6 г сухой массы/м², а на севере концентрации были еще выше, в некоторых районах превышая 10 г сухой массы/м² [41]. В целом, по нашим оценкам интегральная биомасса в арктических водах варьировала от 1 до 11 г сухой массы/м² при средней величине 7 г сухой массы/м². Подобные сезонные отличия во многом связаны с сукцессией зоопланктона. На севере пик биомассы наступает позднее, и в августе состояние сообщества там часто характеризуется как весеннее [10, 25].

Как и в более ранний период, основу биомассы в конце лета — начале осени составляли копеподы, на долю которых в среднем приходилось более 60 % общей биомассы зоопланктона. При этом в арктических водах по биомассе превалировал *Calanus glacialis*, а в прибрежных и атлантических водах — *C. finmarchicus* [45]. В целом биомасса планктона была ниже, что, вероятно, можно связать с более холодными условиями предыдущего года.

Факторы внешней среды оказывают выраженное влияние на колебания зоопланктонных сообществ Баренцева моря [10]. В пространственном масштабе

важную роль играют гидрологические условия и доступность кормовых ресурсов. Действительно, при помощи *BioEnv*-анализа мы выявили, что распределение зоопланктона было тесно связано с океанологическими факторами и концентрацией фитопланктона.

Межгодовые колебания зоопланктона Баренцева моря во многом связаны с климатическими флуктуациями [1, 9]. Ранее было показано, что повышение температуры воды положительно сказывается на количественных показателях зоопланктона — в теплые годы суммарная биомасса зоопланктона значительно выше, чем в холодные [7, 9, 13]. С учетом этого можно было ожидать высокий уровень биомассы и запаса зоопланктона и в 2013 г., чего, однако, не наблюдалось. Скорее всего, низкие показатели мезозоопланктона обусловлены прессом со стороны хищников, основными из которых являются рыбы-планктофаги и молодь прочих рыб. Для макропланктона (эвфаузииды, гиперииды, гребневики) также важно хищничество взрослых донных рыб (треска, пикша) и промысловых рыб. Основной потребитель зоопланктона средней размерной фракции (в основном копепод) в Баренцевом море — это мойва. Начиная с 2005–2007 гг. произошло резкое увеличение запаса мойвы до уровня 3,5–3,9 млн т, при этом очередное поколение 2012 г. было рекордным по численности после 1999 г. [39]. С учетом приведенных данных можно предположить, что основной причиной резкого уменьшения количества зоопланктона стало его выедание рыбами, что согласуется с результатами более ранних исследований [4, 10, 11].

Снижение биомассы зоопланктона сказалось и на его продукции. Так, по нашим оценкам, в теплые 2006–2007 гг. в южной части Баренцева моря в летний период (июль–август) средняя суточная продукция составляла 1,258 мг сухой массы/м³ [24], а в 2008 г. — 3,589 мг сухой массы/м³ [25], что примерно в 2–6 раз выше, чем летом 2013 г. Что касается арктических вод, то в 2013 г. суточная продукция была примерно в 10 раз ниже, чем в 2006–2007 гг. [24]. На наш взгляд, это связано с двумя основными причинами. Во-первых, отличались сроки сбора материала. В 2006–2007 гг. зоопланктон отбирали в августе, когда сообщество было более зрелым, доля старших копеподитов была существенно выше, чем в июне 2013 г. Во-вторых, 2006 г. относился к категории аномально теплых, что ускоряло развитие зоопланктона и вело к увеличению общей продукции.

ВЫВОДЫ

Сообщества зоопланктона мурманской прибрежной и атлантической водных масс Баренцева моря летом 2013 г. отличались высокими показателями разнообразия. Выявлены широтные отличия по количественным показателям основных групп зоопланктона, которые наиболее четко были выражены для биомассы и суточной продукции копепод. Пространственные вариации зоопланктона были тесно связаны с гидрологическими факторами (температура воды и соленость), а также с концентрацией фитопланктона. Наибольшие значения продуктивности отмечены в пределах атлантической водной массы, минимальные в баренцевоморских водах. Общая биомасса и суточная продукция зоопланктона были существенно ниже по сравнению с более ранними исследованиями, что было связано с более холодными условиями 2013 г. и более высоким потенциальным прессом со стороны основных потребителей планктона.

Благодарности. Работа поддержана Российским научным фондом (проект № 17-14-01268).

Acknowledgments. The study was supported by the Russian Science Foundation (project № 17-14-01268).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тимофеев С.Ф. Экология морского зоопланктона. Мурманск: Изд-во МГПИ, 2000. 216 с.
2. Raymont J.E.G. Plankton and productivity of the Oceans. V. 2. Zooplankton. Oxford: Pergamon Press, 1983. 824 p.
3. Богоров В.Г. Планктон Мирового океана. М.: Наука, 1974. 320 с.
4. Орлова Э.Л., Бойцов В.Д., Ушаков Н.Г. Условия летнего нагула и роста мойвы Баренцева моря. Мурманск: Изд-во ПИНРО, 2004. 198 с.
5. Карамушко О.В., Карамушко Л.И. Питание и биоэнергетика основных промысловых рыб Баренцева моря на разных этапах онтогенеза. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 1995. 220 с.
6. Dalpadado D., Bogstad B., Eriksen E., Rey L. Distribution and diet of 0-group cod (*Gadus morhua*) and haddock (*Melanogrammus aeglefinus*) in the Barents Sea in relation to food availability and temperature // *Polar Biology*. 2009. V. 32. P. 1583–1596. doi: 10.1007/s00300-009-0657-7
7. Dalpadado P., Ingvaldsen R., Hassel A. Zooplankton biomass variation in relation to climatic conditions in the Barents Sea // *Polar Biology*. 2003. V. 26. P. 233–241.
8. Falk-Petersen S., Timofeev S., Pavlov V., Sargent J.R. Climate variability and possible effects on arctic food chains: The role of *Calanus* // *Arctic Alpine Ecosystems and People in a Changing Environment*. Berlin: Springer Verlag, 2007. P. 147–166.
9. Dvoretzky V.G., Dvoretzky A.G. Epiplankton in the Barents sea: Summer variations of mesozooplankton biomass, community structure and diversity // *Continental Shelf Research*. 2013. V. 52. P. 1–11. doi: 10.1016/j.csr.2012.10.017
10. Orlova E.L., Dalpadado P., Knutsen T., Nesterova V.N., Prokopchuk I.P. Zooplankton // *The Barents Sea ecosystem: Russian-Norwegian cooperation in science and management*.

REFERENCES

1. Timofeev S.F. *Ekologiya morskogo zooplanktona*. Ecology of Marine Zooplankton. Murmansk: MGPI Press, 2000: 216 p. [In Russian].
2. Raymont J.E.G. Plankton and productivity of the Oceans. V. 2. Zooplankton. Oxford: Pergamon Press, 1983: 824 p.
3. Bogorov V.G. *Plankton Mirovogo okeana*. Plankton of the World Ocean. Moscow: Nauka, 1974: 320 p. [In Russian].
4. Orlova E.L., Boitsov V.D., Ushakov N.G. *Usloviia letnego nagula i rosta moivy Barentseva moria*. Conditions of summer feeding and growth of the Barents Sea capelin. Murmansk: PINRO Press, 2004: 198 p. [In Russian].
5. Karamushko O.V., Karamushko L.I. *Pitanie i bioenergetika osnovnykh promyslovykh ryb Barentseva morya na raznykh etapah ontogeneza*. Feeding and bioenergetics of common commercial fish of the Baernts Sea at different onthogenetic stages. Apatity: KSC RAS Press, 1995: 220 p. [In Russian].
6. Dalpadado D., Bogstad B., Eriksen E., Rey L. Distribution and diet of 0-group cod (*Gadus morhua*) and haddock (*Melanogrammus aeglefinus*) in the Barents Sea in relation to food availability and temperature. *Polar Biology*. 2009, 32: 1583–1596. doi: 10.1007/s00300-009-0657-7
7. Dalpadado P., Ingvaldsen R., Hassel A. Zooplankton biomass variation in relation to climatic conditions in the Barents Sea. *Polar Biology*. 2003, 26: 233–241.
8. Falk-Petersen S., Timofeev S., Pavlov V., Sargent J.R. Climate variability and possible effects on arctic food chains: The role of *Calanus*. *Arctic Alpine Ecosystems and People in a Changing Environment*. Berlin: Springer Verlag, 2007: 147–166.
9. Dvoretzky V.G., Dvoretzky A.G. Epiplankton in the Barents sea: Summer variations of mesozooplankton biomass, community structure and diversity. *Continental Shelf Research*. 2013, 52: 1–11. doi: 10.1016/j.csr.2012.10.017
10. Orlova E.L., Dalpadado P., Knutsen T., Nesterova V.N., Prokopchuk I.P. Zooplankton. *The Barents Sea ecosystem: Russian-Norwegian*

- Trondheim: Tapir Academic Press, 2011. P. 91–119.
11. Orlova E.L., Boitsov V.D., Dolgov A.V., Rudneva, G.B., Nesterova V.N. The relationship between plankton, capelin, and cod under different temperature conditions // ICES Journal of Marine Science. 2005. V. 62. P. 1281–1292.
 12. Karsakov A.L., Ingvaldsen R.B., Trofimov A.G., Titov O.V. Abiotic components // IMR/PINRO update of the “Joint Norwegian-Russian environmental status report on the Barents Sea Ecosystem” giving the current situation for climate, phytoplankton, zooplankton, fish, and fisheries during 2012–13. IMR/PINRO Joint Report Series 2014(1). 2014. P. 9–21.
 13. Dalpadado P., Arrigo K.R., Hjøllo S.S., Rey F., Ingvaldsen R.B., Sperfeld E., van Dijken G.L., Stige L.C., Olsen A., Ottersen G. Productivity in the Barents Sea — response to recent climate variability // PLoS ONE. 2014. V. 9 (5): e95273. doi:10.1371/journal.pone.0095273
 14. Anon. Survey report from the joint Norwegian/Russian ecosystem survey in the Barents Sea August–October 2008 volume 1. IMR/PINRO Joint Report Series, No. 1/2009, 2009. 103 p.
 15. Anon. Survey report from the joint Norwegian/Russian ecosystem survey in the Barents Sea August–October 2009 (adopted vol.). IMR/PINRO Joint Report Series, No. 2/2010, 2010. 118 p.
 16. Anon. Survey report from the joint Norwegian/Russian ecosystem survey in the Barents Sea August–October 2011. IMR/PINRO Joint Report Series. No. 4/2011, 2011. 118 p.
 17. Prokhorova T. (Ed.). Survey report from the joint Norwegian/Russian ecosystem survey in the Barents Sea and adjacent waters, August–October 2013. IMR/PINRO Joint Report Series, No. 4/2013, 2013. 131 p.
 18. Макаревич П.П. Планктонные альгоценозы эстуарных экосистем. Баренцево, Карское и Азовское моря. М.: Наука, 2007. 224 с.
 19. Инструкция по сбору и обработке планктона. М.: Изд. ВНИРО, 1971. 82 с.
 20. Численко Л.Л. Номограммы для определения веса водных организмов по размерам и форме тела. Л.: Наука, 1968. 106 с.
 21. Mumm N. On the summer distribution of mesozooplankton in the Nansen Basin, Arctic Ocean// cooperation in science and management. Trondheim: Tapir Academic Press, 2011: 91–119.
 11. Orlova E.L., Boitsov V.D., Dolgov A.V., Rudneva, G.B., Nesterova V.N. The relationship between plankton, capelin, and cod under different temperature conditions. ICES Journal of Marine Science. 2005, 62: 1281–1292.
 12. Karsakov A.L., Ingvaldsen R.B., Trofimov A.G., Titov O.V. Abiotic components. IMR/PINRO update of the “Joint Norwegian-Russian environmental status report on the Barents Sea Ecosystem” giving the current situation for climate, phytoplankton, zooplankton, fish, and fisheries during 2012–13. IMR/PINRO Joint Report Series 2014(1). 2014: 9–21.
 13. Dalpadado P., Arrigo K.R., Hjøllo S.S., Rey F., Ingvaldsen R.B., Sperfeld E., van Dijken G.L., Stige L.C., Olsen A., Ottersen G. Productivity in the Barents Sea — response to recent climate variability. PLoS ONE. 2014, 9 (5): e95273. doi: 10.1371/journal.pone.0095273
 14. Anon. Survey report from the joint Norwegian/Russian ecosystem survey in the Barents Sea August–October 2008 volume 1. IMR/PINRO Joint Report Series, 2009, 1: 103 p.
 15. Anon. Survey report from the joint Norwegian/Russian ecosystem survey in the Barents Sea August–October 2009 (adopted vol.). IMR/PINRO Joint Report Series, 2010, 2: 118 p.
 16. Anon. Survey report from the joint Norwegian/Russian ecosystem survey in the Barents Sea August–October 2011. IMR/PINRO Joint Report Series, 2011, 3: 118 p.
 17. Prokhorova T. (Ed.). Survey report from the joint Norwegian/Russian ecosystem survey in the Barents Sea and adjacent waters, August–October 2013. IMR/PINRO Joint Report Series, 2013, 4: 131 p.
 18. Makarevich P.R. *Planktonnye al'gocenozy ehstuarnykh ehkosistem. Barentsevo, Karskoe i Azovskoe moray.* Planktonic algalocenoses of estuarial ecosystems. The Barents, Kara and Azov Seas. Moscow: Nauka, 2007: 224 p. [In Russian].
 19. *Instruktsiia po sboru i obrabotke planktona.* Instruction on collection and processing of plankton. Moscow: VNIRO, 1971: 82 p. [In Russian].
 20. Chislenko L.L. *Nomogrammy dlya opredeleniya vesa vodnykh organizmov po razmeram i forme tela.* Nomogrammes to determine weights of aquatic organisms based on the size and form of their bodies (marine mesobenthos and plankton). Leningrad: Nauka, 1968: 106 p. [In Russian].

- Reports on Polar Research. 1991. V. 92. P. 1–146.
22. Richter C. Regional and seasonal variability in the vertical distribution of mesozooplankton in the Greenland Sea // Reports on Polar Research 1994. V. 154. P. 1–90.
23. Hanssen H. Mesozooplankton of the Laptev Sea and the adjacent eastern Nansen Basin—distribution and community structure in late summer // Reports on Polar Research. 1997. V. 229. P. 1–131.
24. Дворецкий В.Г. Продукция кормового зоопланктона в Баренцевом море в летний период // Изв. ТИНРО. 2012. Т. 168. С. 169–183.
25. Дворецкий В.Г., Дворецкий А.Г. Экология зоопланктонных сообществ Баренцева моря и сопредельных вод. СПб.: Реноме, 2015. 736 с.
26. Hirst A.G., Roff J.C. Lampitt R.S. A synthesis of growth rates in marine epipelagic invertebrate zooplankton // Advances in Marine Biology. 2003. V. 44. P. 1–142. doi: 10.1016/S0065-2881(03)44002-9
27. Halsband-Lenk C., Hirche H.J., Carlotti F. Temperature impact on reproduction and development of congener copepod populations // Journal of Experimental Marine Biology and Ecology. 2002. V. 271. P. 121–153.
28. Hopcroft R.R., Clarke C., Byrd A.G., Pinchuk A.I. The paradox of *Metridia* spp. egg production rates: a new technique and measurements from the coastal Gulf of Alaska // Marine Ecology Progress Series. 2005. V. 286. P. 193–201. doi: 10.3354/meps286193
29. Дворецкий В.Г., Дворецкий А.Г. Биология и роль *Oithona similis* в зоопланктоне морей Арктики. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2011. 349 с.
30. Hirst A.G., Bunker A.J. Growth of marine planktonic copepods: global rates and patterns in relation to chlorophyll a, temperature, and body weight // Limnology and Oceanography. 2003. V. 48. P. 1988–2010.
31. Primakov I.M., Berger V.Ya. Production of planktonic crustaceans in the White Sea // Russian Journal of Marine Biology. 2007. V. 33. P. 305–310. doi: 10.1134/S1063074007050057
32. Harris R.P., Wiebe P.H., Lenz J., Skjoldal H.R., Huntley M. (Eds.) ICES Zooplankton Methodology Manual. London & San Diego: Academic Press, 2000. 648 p.
21. Mumm N. On the summer distribution of mesozooplankton in the Nansen Basin, Arctic Ocean. Reports on Polar Research. 1991, 92: 1–146.
22. Richter C. Regional and seasonal variability in the vertical distribution of mesozooplankton in the Greenland Sea. Reports on Polar Research. 1994, 154: 1–90.
23. Hanssen H. Mesozooplankton of the Laptev Sea and the adjacent eastern Nansen Basin—distribution and community structure in late summer. Reports on Polar Research. 1997. 229: 1–131.
24. Dvoretzky V.G. Zooplankton production in the Barents Sea in summer. Izvestiia TINRO. 2012, 168: 169–183. [In Russian].
25. Dvoretzky V.G., Dvoretzky A.G. *Ekologiya zooplanktonnykh soobshchestv Barentseva moria i sopredel'nykh vod*. Ecology of zooplankton communities in the Barents Sea and adjacent waters. St. Petersburg: Renome, 2015: 736 p. [In Russian].
26. Hirst A.G., Roff J.C. Lampitt R.S. A synthesis of growth rates in marine epipelagic invertebrate zooplankton. Advances in Marine Biology. 2003, 44: 1–142. doi: 10.1016/S0065-2881(03)44002-9
27. Halsband-Lenk C., Hirche H.J., Carlotti F. Temperature impact on reproduction and development of congener copepod populations. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology. 2002, 271: 121–153.
28. Hopcroft R.R., Clarke C., Byrd A.G., Pinchuk A.I. The paradox of *Metridia* spp. egg production rates: a new technique and measurements from the coastal Gulf of Alaska. Marine Ecology Progress Series. 2005, 286: 193–201. doi: 10.3354/meps286193
29. Dvoretzky V.G., Dvoretzky A.G. *Biologiya i rol' Oithona similis v zooplanktone morei Arktiki*. Biology and role of *Oithona similis* in zooplankton of Arctic seas. Apatity: KSC RAS Press, 2011: 349 p. [In Russian].
30. Hirst A.G., Bunker A.J. Growth of marine planktonic copepods: global rates and patterns in relation to chlorophyll a, temperature, and body weight. Limnology and Oceanography. 2003, 48: 1988–2010.
31. Primakov I.M., Berger V.Ya. Production of planktonic crustaceans in the White Sea. Russian Journal of Marine Biology. 2007, 33: 305–310. doi: 10.1134/S1063074007050057
32. Harris R.P., Wiebe P.H., Lenz J., Skjoldal H.R., Huntley M. (Eds.) ICES Zooplankton Methodology Manual. London & San Diego: Academic Press, 2000: 648 p.

33. Алимов А.Ф. Введение в продукционную биологию. Л.: Гидрометеоздат, 1989. 152 с.
34. Conover R.J., Lalli C.M. Feeding and growth in *Clione limacina* (Phipps), a pteropod mollusc // Journal of Experimental Marine Biology and Ecology. 1972. V. 9. P. 279–302. doi: 10.1016/0022-0981(72)90038-X
35. Kotori M. Life cycle and growth rate of the chaetognath *Parasagitta elegans* in the northern North Pacific Ocean // Plankton Biology and Ecology. 1999. V. 46. P. 153–158.
36. Tomita M., Ikeda T., Shiga N. Production of *Oikopleura longicaudata* in Toyama Bay, southern Japan Sea // Journal of Plankton Research. 1999. V. 21. P. 2421–2430. doi: 10.1093/plankt/21.12.2421
37. Ожигин В.К., Ившин В.А. Водные массы Баренцева моря. Мурманск: Изд-во ПИНРО, 1999. 48 с.
38. Climatic atlas of the Arctic Seas 2004: Part I. Database of the Barents, Kara, Laptev, and White Seas — Oceanography and Marine Biology. NOAA Atlas NESDIS 58. Washington: U.S. Government Printing Office, 2004. 148 p.
39. Состояние биологических сырьевых ресурсов Баренцева моря и Северной Атлантики в 2014 г. Мурманск: Изд-во ПИНРО, 2014. 110 с.
40. Дружкова Е.И. Биопродуктивность и фитопланктонные сообщества Баренцева, Белого и Карского морей // Комплексные исследования больших морских экосистем России. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2011. С. 116–154.
41. Orlova E., Knutsen T., Dalpadado P., Nesterova V., Prokopchuk I. Zooplankton // IMR/PINRO update of the Joint Norwegian-Russian environmental status report on the Barents Sea Ecosystem giving the current situation for climate, phytoplankton, zooplankton, fish, and fisheries during 2012–13. IMR/PINRO Joint Report Series 2014(1). 2014. P. 23–35.
42. Magurran A. Measuring biological diversity. Malden, Oxford: Blackwell Science, 2004. 256 p.
43. Pielou E.C. The measurement of diversity in different types of biological collections // Journal of Theoretical Biology. 1966. V. 13. P. 131–144.
44. Arashkevich E.G., Wassmann P., Pasternak A., Wexels Riser C. Seasonal and spatial changes in biomass, structure, and development progress of
33. Alimov A.F. Vvedeniye v produktionnuyu biologiyu. Introduction to production biology. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1989: 152 p. [In Russian].
34. Conover R.J., Lalli C.M. Feeding and growth in *Clione limacina* (Phipps), a pteropod mollusk. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology. 1972, 9: 279–302. doi: 10.1016/0022-0981(72)90038-X
35. Kotori M. Life cycle and growth rate of the chaetognath *Parasagitta elegans* in the northern North Pacific Ocean. Plankton Biology and Ecology. 1999, 46: 153–158.
36. Tomita M., Ikeda T., Shiga N. Production of *Oikopleura longicaudata* in Toyama Bay, southern Japan Sea. Journal of Plankton Research. 1999, 21: 2421–2430. doi: 10.1093/plankt/21.12.2421
37. Ozhigin V.K., Ivshin V.A. Vodnye massy Barentseva moria. Water masses of the Barents Sea. Murmansk: PINRO Press, 1999: 48 p. [In Russian].
38. Climatic atlas of the Arctic Seas 2004: Part I. Database of the Barents, Kara, Laptev, and White Seas — Oceanography and Marine Biology. NOAA Atlas NESDIS 58. Washington: U.S. Government Printing Office, 2004: 148 p.
39. Sostoianie biologicheskikh syr'evykh resursov Barentseva moria i Severnoi Atlantiki v 2014 g. Status of biological and feedstock resources in the Barents Sea and Northern Atlantic in 2014. Murmansk: PINRO Press, 2014: 110 p. [In Russian].
40. Druzhkova E.I. Bioproduktivnost' i fitoplanktonnye soobshchestva Barentseva, Belogo i Kara moryei // Kompleksnyye issledovaniya bol'shikh morskikh ekosistem Rossii. Complex investigations of Large Marine Ecosystems in Russia. Apatity: KSC RAS Press, 2011: 116–154. [In Russian].
41. Orlova E., Knutsen T., Dalpadado P., Nesterova V., Prokopchuk I. Zooplankton. IMR/PINRO update of the Joint Norwegian-Russian environmental status report on the Barents Sea Ecosystem giving the current situation for climate, phytoplankton, zooplankton, fish, and fisheries during 2012–13. IMR/PINRO Joint Report Series 2014(1). 2014: 23–35.
42. Magurran A. Measuring biological diversity. Malden, Oxford: Blackwell Science, 2004: 256 p.
43. Pielou E.C. The measurement of diversity in different types of biological collections. Journal of Theoretical Biology. 1966, 13: 131–144.
44. Arashkevich E.G., Wassmann P., Pasternak A., Wexels Riser C. Seasonal and spatial changes in biomass, structure, and development progress of

the zooplankton community in the Barents Sea // Journal of Marine Systems. 2002. V. 38. P. 125–145. doi: 10.1016/S0924-7963(02)00173-2

45. Second Interim Report of the Working Group on the Integrated Assessments of the Barents Sea (WGIBAR), 1–4 June 2015, Kirkenes, Norway. ICES CM 2015/SSGIEA:04. 2015. 102 p.

the zooplankton community in the Barents Sea, Journal of Marine Systems. 2002, 38: 125–145. doi: 10.1016/S0924-7963(02)00173-2

45. Second Interim Report of the Working Group on the Integrated Assessments of the Barents Sea (WGIBAR), 1–4 June 2015, Kirkenes, Norway. ICES CM 2015/SSGIEA:04. 2015: 102 p.

УДК 574.58:546.49-121(98)

DOI: 10.30758/0555-2648-2018-64-3-311-325

РТУТЬ В КОМПОНЕНТАХ ЭКОСИСТЕМЫ ЗАЛИВОВ ЗАПАДНОГО ШПИЦБЕРГЕНА В ЛЕТНИЙ ПЕРИОД 2017 ГОДА

Н.В. ЛЕБЕДЕВА^{1*}, [Н.Н. ФАТЕЕВ²], А.Л. НИКУЛИНА², О.Л. ЗИМИНА¹, Е.А. ГАРБУЛЬ¹

¹ — Мурманский морской биологический институт КНЦ РАН, г. Мурманск, Россия

² — ГИЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

*lebedeva@ssc-ras.ru

MERCURY IN COMPONENTS OF ECOSYSTEMS OF WESTERN SPITSBERGEN FIJORD IN SUMMER, 2017

N.V. LEBEDEVA^{1*}, [N.N. FATEEV²], A.L. NIKULINA², O.L. ZIMINA¹, E.A. GARBUL¹

¹ — Murmansk Marine Biological Institute KSC of RAS, Murmansk, Russia

² — State Scientific Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia

*lebedeva@ssc-ras.ru

Received June, 15, 2018

Accepted August, 29, 2018

Keywords: benthos, Billefjord, bottom sediments, Grönfjord, Isfjord, marine water, mercury, summer period, Western Spitsbergen.

Summary

The total content of mercury was studied in marine water, sediments and benthic organisms in Billefjord, Isfjord and Gronfjord (Western Spitsbergen) in 2017. The samples were collected between 21 and 24 of July 2017 on-board RV “Dalnie Zelentsy” of Murmansk Marine Biological Institute. Total mercury content was measured at chemical-analytical laboratory of the Russian Scientific Center on Spitsbergen in Barentsburg.

Total mercury concentration in the water did not exceed 10 ng/l in all fjords. In the surface sediments the highest concentrations of total mercury were found in Isfjord (median 55 ng/g d.w.) while the Billefjord sediments were characterised by the lowest concentrations (median 10.4 ng/g d.w.). This fact might reflect the differences in water circulation and therefore sediment accumulation peculiarities.

Total mercury data were obtained for benthic organisms of various feeding modes. Generally mercury levels were comparatively low (median 12.2 ng/g w.w.), however the highest concentrations were measured in the benthic fauna of Isfjord, specifically in polychaetes *Maldania sarsi* (max.

Citation: Lebedeva N.V., Fateev N.N., Nikulina A.L., Zimina O.L., Garbul E.A. Mercury in components of ecosystems of Western Spitsbergen fjord in summer, 2017. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2018, 64, 3: 311–325. [In Russian]. doi: 10.30758/0555-2648-2018-64-3-311-325

49.2 ng/g w.w.). Mercury accumulation in benthic organisms predominantly depended on their trophic level in the ecosystem and location in the fjord: benthic detritus feeders accumulate more mercury (median 25.0 ng/g w.w.).

Поступила 15 июня 2018 г.

Принята к печати 29 августа 2018 г.

Ключевые слова: бентос, Билле-фьорд, Грён-фьорд, донные отложения, Ис-фьорд, летний период, морская вода, ртуть, Западный Шпицберген.

Выполнено исследование содержания ртути в воде, донных отложениях и бентосных организмах в заливах Билле-фьорд, Ис-фьорд и Грён-фьорд (арх. Шпицберген) в июле 2017 г. Содержание ртути во всех образцах (вода, донные отложения и биологические объекты) определяли в химико-аналитической лаборатории Российского научного центра в пос. Баренцбург на арх. Шпицберген. Концентрация ртути в водах заливов Билле-фьорд, Ис-фьорд и Грён-фьорд была менее 10 нг/л. В поверхностном слое донных отложений самые высокие валовые концентрации ртути были отмечены в Ис-фьорде, а наименьшие в Билле-фьорде. Аккумуляция ртути в гидробионтах было связано с их трофическим уровнем в экосистеме и локализацией во фьордах. Ртуть в большей степени аккумулялировали бентосные организмы детритофаги-грунтоеды.

ВВЕДЕНИЕ

Ртуть и ее соединения являются опасными экологическими токсикантами [1, 2]. На формировании уровней содержания ртути в природной среде Арктики существенно сказываются отходы промышленных объектов и трансграничный атмосферный перенос токсиканта [3–6]. Изучению миграции ртути и ее соединений посвящено достаточно много исследований в этом полярном регионе [7–13]. Показано, что морские организмы способны аккумулялировать соединения ртути в органах и тканях [10, 14–23]. Ртуть — один из немногих тяжелых металлов, который накапливается по пищевой цепи от фитопланктона до морских млекопитающих [24]. Ключевым фактором, определяющим концентрацию ртути в биоте, является концентрация метилированной формы ртути в среде, которая контролируется относительной эффективностью процессов метилирования и деметилирования [25]. К высшим звеньям морских трофических цепей (рыбам, птицам, морским млекопитающим, человеку) токсические металлы могут поступать от бентосных организмов, входящих в состав пищевых цепей морской экосистемы [8, 18, 26].

В последние годы внимание уделяется не только загрязняющим веществам, поступающим в Арктику из других районов Земли [27], но и локальным источникам загрязнений [28]. Интересным модельным объектом может быть арх. Шпицберген, где представлены различные виды антропогенного влияния на природные экосистемы: угледобывающие шахты, поселки с развитой инфраструктурой, в том числе теплоэлектростанции на угольном топливе, свалки и полигоны, растущие потоки туристов и грузов. Все это формирует на арх. Шпицберген локальные источники загрязнения [28]. В связи с этим интерес представляет изучение содержания ртути в компонентах морских экосистем заливов, расположенных близко к поселкам. Ис-фьорд — крупный залив, в систему которого входят более мелководные и меньшие по площади заливы Билле-фьорд и Грён-фьорд. Здесь расположены крупные поселки архипелага: Лонгйир-бюен, Баренцбург и Пирамида (в настоящее время законсервирован).

Таким образом, исследование содержания ртути в различных компонентах арктических экосистем, анализ источников и путей их миграции представляет важную задачу, решение которой будет способствовать выработке рекомендаций с целью минимизации последствий загрязнения ртутью для экосистем Шпицбергена и населения архипелага. Как показали наши исследования в заливе Грён-фьорд в апреле

2016 г., валовая концентрация ртути нарастала в живых организмах с возрастанием трофического уровня, тогда как в прибрежных морских водах содержание элемента было ниже уровня определения [29].

Цель данной публикации — анализ содержания ртути в воде, донных отложениях и бентосе в заливах Билле-фьорд, Ис-фьорд и Грэн-фьорд (арх. Шпицберген) в летний период 2017 г.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

В данной работе представлены результаты совместных исследований Мурманского морского биологического института (ММБИ) и Арктического и антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ) по изучению миграции экологических токсикантов в экосистемах заливов Шпицбергена.

Отбор проб природной воды, донных отложений и бентосных организмов был выполнен на арх. Шпицберген 21–24 июля 2017 г. с борта научно-исследовательского судна (НИС) «Дальние Зеленцы» специалистами ММБИ и ААНИИ. Расположение станций представлено на рис. 1.



Рис. 1. Карта-схема точек отбора проб в заливах Билле-фьорд, Ис-фьорд и Грэн-фьорд 21–24 июля 2017 г., рейс НИС «Дальние Зеленцы».

Красные точки — станции отбора проб воды, донных отложений и бентоса; синие точки — станции отбора проб воды

Fig. 1. Location of sampling stations in the Billefjord, Isfjord and Grønfjord, July 21–24, 2017, the cruise of RV “Dalnie Zelentsy”.

Red dots mark stations where water, bottom sediments and benthos were sampled; blue dots mark only water sampling

Отобрано и проанализировано 39 проб воды; 12 проб донных отложений из заливов Билле-фьорд, Ис-фьорд и Грён-фьорд. По две пробы воды были отобраны с поверхностного, придонного горизонтов, а также из толщи воды на каждой станции. Донные отложения отбирались из поверхностного слоя (0–5 см) во время отбора бентоса с глубин от 86 (ст. 67) до 240 м (ст. 68), в среднем с глубины 166 ± 2 м. Пробы бентоса отбирали из дночерпателя Ван Вина, размывая морской водой грунт на решетке промывочного стола. Выбирали крупных животных, формируя образцы в таком количестве повторностей, сколько было необходимо для набора достаточного количества материала. Определение бентосных организмов выполнено О.Л. Зиминой. Видовую принадлежность полихет определяли по И.А. Жиркову [30], моллюсков, иглокожих сипункулид и др. по Н.С. Гаевской [31].

Содержание ртути во всех образцах воды, донных отложений и морских гидробионтов определяли в химико-аналитической лаборатории Российского научного центра в пос. Баренцбург на арх. Шпицберген (РНЦШ). Пробы морской воды были предварительно законсервированы путем добавления 1 мл концентрированной азотной кислоты и 1 мл раствора перманганата калия на каждые 200 мл образца. Образцы не концентрировались, ртуть в виде паров измеряли напрямую.

Осадки на пяти станциях в заливах Ис-фьорд и Грён-фьорд представляли собой алевриты с незначительным количеством мелкого песка, легкие глинистые осадки характеризовали станцию 51 в заливе Билле-фьорд. Для определения концентрации ртути в донных отложениях образец высушивали до воздушно-сухого состояния и выделяли просеиванием фракцию размером менее 0,25 мм, затем осадки перетирали до однородного состояния. Для извлечения ртути из образца применялся метод прямого пиролиза.

Животных предварительно просушивали фильтровальной бумагой и взвешивали на аналитических весах фирмы AND с погрешностью не более 0,002 г. Отобранные организмы разных видов замораживали при -20 °С. Для мелких организмов были составлены совокупные пробы (2–40 экз.); проба была представлена одной особью для крупных организмов. Отобранные особи моллюсков отличались малыми размерами, организмы целиком вместе с раковиной по одному или несколько помещались в пиролизатор ртутного анализатора. Организмы малых размеров, не превышающих размеры лодочки пиролизатора, помещали в пиролизатор полностью, не растирая. Крупные организмы гомогенизировали перед измерением и анализировали в повторностях. Мелкие биологические объекты, в том числе моллюсков, предварительно гомогенизировали при естественной влажности и анализировали целиком, не подвергая предварительной химической обработке. При установленной температурной программе [29] сжигание организмов происходило полностью, и вся содержащаяся в организме ртуть переходила в газообразное состояние. В процессе исследований было отобрано и проанализировано 89 проб (одиночных и объединенных) биологических объектов из заливов Билле-фьорд, Ис-фьорд и Грён-фьорд.

Использованный метод измерения валовой концентрации ртути основан на атомизации элемента в пиролизаторе приставки ПИРО-915+ с последующей транспортировкой полученных паров ртути в аналитическую кювету и определением ее концентрации на анализаторе ртути РА-915М методом беспламенной атомной абсорбции. Подробнее методика описана нами ранее [29]. Каждую пробу анализировали минимум в двух повторностях. Предел обнаружения общей ртути составлял

10 нг/л в морской воде, 5 нг/г сух. веса в донных отложениях и 2,5 нг/г сыр. веса в биологических объектах.

В статистическом анализе данных использовали параметрические (дисперсионный анализ ANOVA) и непараметрические (коэффициент корреляции Спирмена r_s и χ^2) методы в зависимости от характера выборочных распределений. Если эмпирическое распределение не соответствовало нормальному, значения преобразовывали путем логарифмирования ($\text{Log}10$) для того, чтобы применить параметрические критерии для проверки статистических гипотез. Для распределений, не соответствующих нормальному закону, приводили значения медианы (Me) в качестве показателя центральной тенденции. Для визуализации особенностей распределения ртути в организмах с разной пищевой специализацией на разных станциях заливов использована двухмерная проекция на основе бикубической интерполяции трехмерных распределений [32].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Ртуть в воде и донных отложениях. Валовые концентрации ртути во всех пробах морской воды были ниже предела обнаружения прибора, т.е. менее 10 нг/л.

Величины валовых концентраций ртути в донных отложениях варьировали на разных станциях исследуемых заливов от 10,4 (ст. 51) до 55,0 (ст. 61) (Me : 44,3 нг/г сух. в.). Наименьшие концентрации ртути отмечены в Билле-фьорде, самые высокие — в Ис-фьорде (рис. 2)

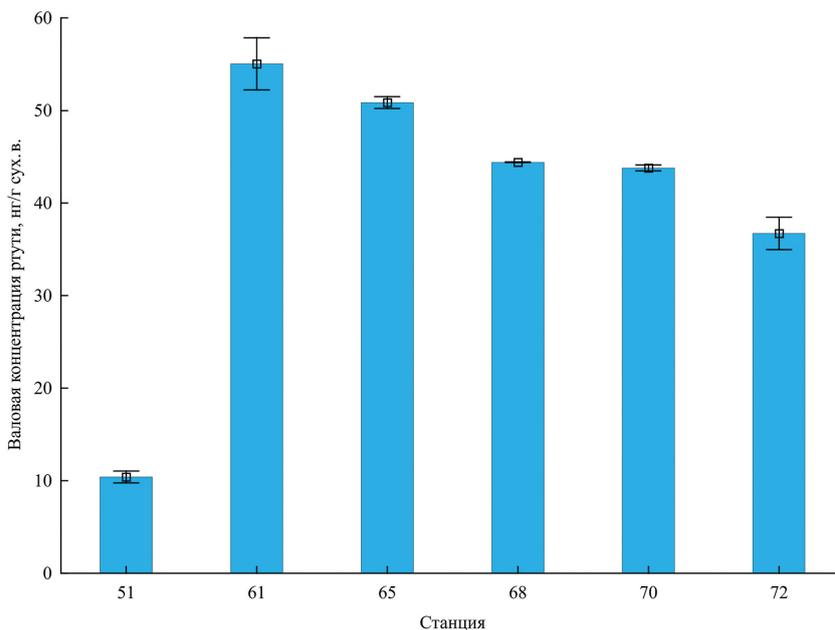


Рис. 2. Медианные концентрации валового содержания ртути в поверхностном слое донных отложений на разных станциях в заливах Западного Шпицбергена в июле 2017 г.

Отрезки — размах величин (минимум — максимум)

Fig. 2. Medians of total mercury concentrations in the surface layer of sediment at different stations in the fiords of Western Spitsbergen in July 2017.

The segments are range (minimum — maximum)

Абсолютные величины концентрации ртути, преобразованные путем логарифмирования на разных станциях и в заливах, варьировали достоверно ($ANOVA: df = 5; F = 127,2; P = 0,0001$). Важнейшими факторами, определяющими поверхностное накопление ртути в донных отложениях Арктического бассейна, являются низкие скорости осадконакопления и смещения осадка, что обуславливает даже при незначительном поступлении этого элемента кумулятивный эффект [33]. Известно также, что гранулометрический состав донных отложений — определяющий фактор накопления многих тяжелых металлов, которые обогащают наиболее тонкодисперсные фракции донных осадков [34]. Самая низкая концентрация ртути была отмечена в донных отложениях Билле-фьорда, несмотря на то, что на этой станции преобладала глинистая, мелкодисперсная фракция. На станциях Ис- и Грэн-фьордов валовое содержание ртути было существенно выше, хотя здесь в донных отложениях присутствовал мелкий песок (см. рис. 2).

Достоверная корреляция между валовой концентрацией ртути в поверхностном слое донных отложений и глубиной в исследованных заливах отсутствовала ($r_s = 0,27; P > 0,05$).

Ртуть в гидробионтах. Данные о содержании ртути в бентосных организмах представлены в таблице. Валовые концентрации ртути в морских беспозвоночных в целом на разных станциях трех заливов варьировали недостоверно ($\chi^2 = 12,5; df = 6; P = 0,0512$).

Анализ разных видов представителей бентосного сообщества показал, что валовые концентрации ртути у полихеты *Maldane sarsi*, детритофага-грунтоеда, варьировали в Ис-фьорде и Грэн-фьорде незначительно ($\chi^2 = 8,0; df = 5; P = 0,1562$), так же как у офиуры *Ophiura sarsii*, собирающего детритофага, в Ис-фьорде ($\chi^2 = 2,9; df = 2; P = 0,2326$). Распределения содержания ртути в моллюсках *Ciliatocardium ciliatum*, сестонофагах-фильтраторах, и полихетах *Pectinaria hyperborea*, собирающих

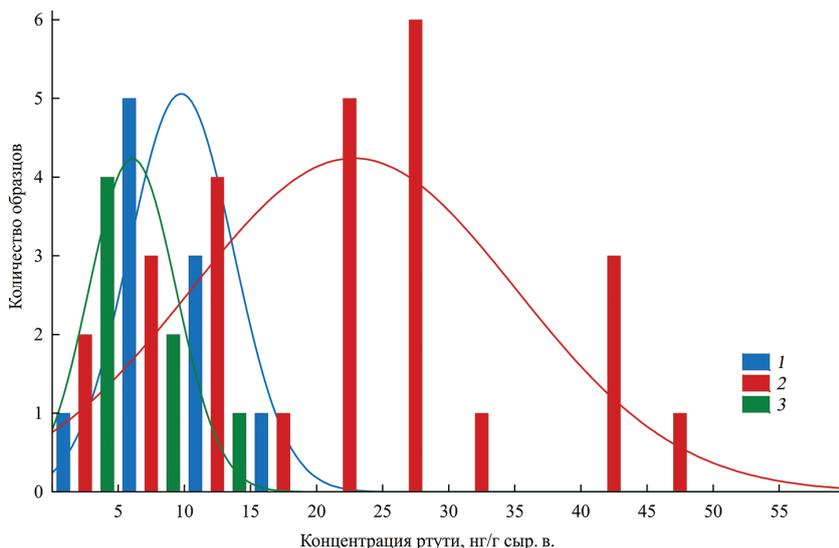


Рис. 3. Распределение валовых концентраций ртути (нг/г сыр. в.) в моллюсках (1), полихетах (2) и офиурах (3) на разных станциях в заливах Западного Шпицбергена в июле 2017 г.

Fig. 3. Distribution of total mercury concentrations (ng/g w.w.) in mollusks (1), polychaetes (2) and ophiuroids (3) at different stations in the fiords of Western Spitsbergen in July 2017

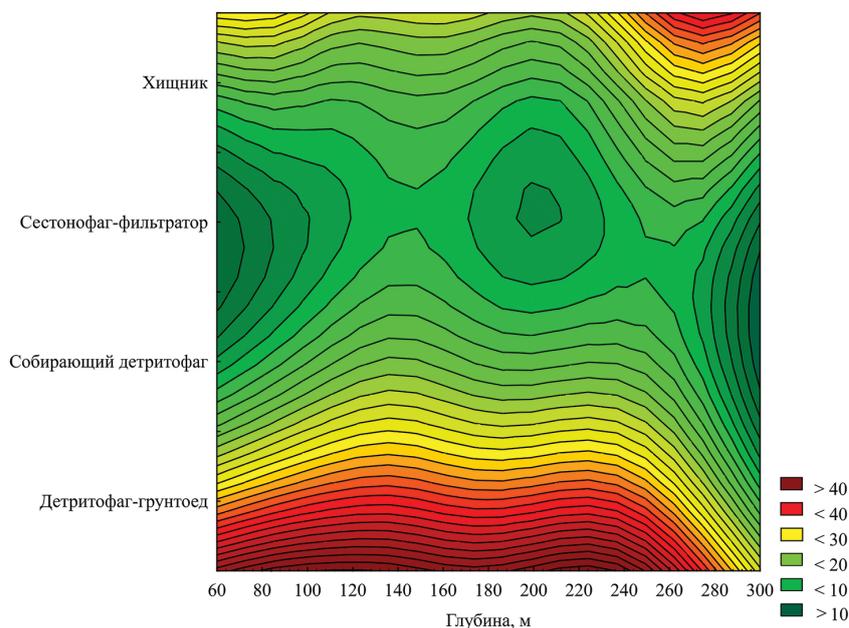


Рис. 4. 2D-контурная проекция трехмерной поверхности (X–Y–Z) преобразованного [по 32] валового содержания ртути в зависимости от трофической группы бентосных организмов и глубины их обитания в заливах Западного Шпицбергена в июле 2017 г. Легенда — уровни концентрации ртути (нг/г сыр. в.)

Fig. 4. 2D-contour projection of 3D surface (X–Y–Z) of transformed total mercury content [by 32] as function of trophic group of benthic organisms and depth of their habitat in the fjords of Western Spitsbergen in July 2017. Legend — levels of mercury concentration (ng/g w.w)

детритофагах, достоверно различались в заливах Ис-фьорд и Грён-фьорд (для обоих видов: $\chi^2 = 4,0$; $df = 1$; $P = 0,0455$). В бентосных организмах Грён-фьорда концентрации были самыми высокими (ст. 72). Распределения концентраций ртути достоверно различались у моллюсков, полихет и офиур ($\chi^2 = 16,1$; $df = 2$; $P = 0,0003$). Полихеты накапливали в своем теле самые высокие концентрации этого металла (рис. 3).

На всех изученных станциях ртуть в большей степени аккумулировали виды детритофаги-грунтоеды; наименьшие концентрации отмечены у сестонофагов-фильтраторов ($\chi^2 = 9,5$; $df = 3$; $P = 0,0234$) (рис. 4).

Сравнение локализации донных осадков и бентосных организмов с максимальными концентрациями ртути показывает, что самым высоким валовым содержанием этого металла характеризовались и донные осадки, и организмы, обитающие на дне Ис-фьорда (ст. 61). Это видно из сопоставления данных таблицы и рис. 1 (карта-схема отбора проб). Двухмерная проекция преобразованных значений валового содержания ртути в зависимости от глубины станции и пищевой специализации бентосных организмов показывает, что ртуть в большей степени аккумулировали детритофаги-грунтоеды практически на всем диапазоне глубин в изученных фьордах. Эти организмы пропускают мягкий грунт через пищеварительный тракт, усваивая таким образом пищу. Относительно высокие валовые концентрации ртути накапливали хищные

Валовое содержание ртути в бентосных организмах (нг/г сыр. в.) на станциях в Билле-фьорде, Ис-фьорде и Грэн-фьорде в июле 2017 г.

Таксон	ТС	Станции							Общее
		51	61	65	67	68	70	72	
Тип Annelida Класс Polychaeta									
<i>Maldania sarsi</i>	Г	-	45,5 42,5-49,2 (2)	30,6 29,1-32,0 (2)	23,9 23,9-23,3 (2)	41,0 41,2-40,8 (2)	28,5 28,1-28,9 (2)	29,1 28,4-29,7 (2)	29,4 23,3-49,2 (12)
<i>Nephtys</i> sp.	Б	-	-	-	-	-	9,8 8,9-10,5 (2)	-	9,8 8,9-10,5 (2)
<i>Nicomache lumbricalis</i>	Г	-	8,7 8,6-8,7 (2)	-	-	-	-	-	8,7 8,6-8,7 (2)
<i>Ophelina cylindricaudata</i>	Г	-	6,7 4,5-9,9 (4)	-	-	-	-	-	6,7 4,5-9,9 (4)
<i>Pectinaria hyperborea</i>	В	-	-	-	14,8 14,3-15,3 (2)	-	-	21,8 21,8-21,9 (2)	18,5 14,3-21,9 (4)
<i>Pherusa plumosa</i>	Г	-	-	-	-	-	-	23,5 21,9-25,0 (2)	23,5 21,9-25,0 (2)
Terebellidae g.sp.	В	-	-	-	-	-	-	13,0 12,4-13,7 (2)	13,0 12,4-13,7 (2)
Тип Mollusca Класс Bivalvia									
<i>Astarte</i> sp.	А	-	-	-	-	8,5 8,3-8,6 (2)	-	-	8,5 8,3-8,6 (2)
<i>Ciliatocardium ciliatum</i>	А	-	-	-	-	5,2 4,5-5,9 (2)	-	15,1 13,6-16,7 (2)	9,5 4,5-16,7 (4)
<i>Serripes groenlandicus</i>	А	-	-	-	-	12,6 11,9-13,4 (2)	-	-	12,6 11,9-13,4 (2)

Окончание таблицы

Таксон	ТС	Станции							Общее
		51	61	65	67	68	70	72	
<i>Yoldia hyperborea</i>	В	-	-	-	-	-	7,2 6,7-7,6(2)	-	7,2 6,7-7,6(2)
Тип Echinodermata Класс Asterozoidea									
<i>Stenodiscus crispatus</i>	Г	-	25,5 24,9-26,1(2)	-	-	-	-	-	25,5 24,9-26,1(2)
Класс Holothuroidea									
<i>Myriotrochus rinkii</i>	Г	17,5 17,3-17,8(2)	-	-	-	-	-	-	17,5 17,3-17,8(2)
Класс Ophiuroidea									
<i>Ophiosten sericeum</i>	В	9,2 8,9-9,5(2)	-	-	-	-	-	-	9,2 8,9-9,5(2)
<i>Ophiura sarsii</i>	В	-	10,2 (1)	-	3,9 3,7-4,2(2)	3,0 2,9-3,1(2)	-	-	3,65 2,9-10,2(5)
Тип Sipuncula Класс Sipunculidea									
<i>Golfingia margaritacea</i>	Г	-	-	-	4,3 3,8-4,7(2)	-	-	-	4,3 3,8-4,7(2)

Примечание. Трофический статус (ТС): А — сестонофаг-фильтратор; Б — хищник; В — собирающий детритофаг; Г — детритофаг-грунтоед. Верхняя строка в ячейке — медиана; нижняя строка — минимальное и максимальное значения (объем выборки); прочерк — отсутствие данных, поскольку виды отсутствовали в пробах.

представители бентосного сообщества, которые были отмечены лишь на станции в Грён-фьорде и отсутствовали в других пробах. Наши исследования в весенний период в Грён-фьорде показали, что ртуть больше всего аккумулировали не только хищники 1-го и 2-го порядка (некоторые виды моллюсков и рыб), но и детритофаги-грунтоеды, являющиеся срединными звеньями детритных трофических цепей [29], что можно объяснить способом их питания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты данного исследования позволяют охарактеризовать некоторые особенности распределения валовых концентраций ртути в морской экосистеме на прибрежной системе залива Ис-фьорд на арх. Шпицберген. Концентрация ртути в водах заливов Билле-фьорд, Ис-фьорд и Грён-фьорд была менее 10 нг/л, как и в Грён-фьорде весной 2016 г. [29]. При этом предельно допустимая концентрация в природной воде рыбохозяйственного назначения составляет 10 нг/л. В мелкозернистой фракции донных отложений самые высокие валовые концентрации ртути были отмечены в Ис-фьорде (55,0 нг/г сух. в.). Это объясняется высокой адсорбционной способностью пелитовых и алевроито-пелитовых осадков по отношению к тяжелым металлам [33, 34], а также режимом течений, аккумуляции наносов и др. факторами. В целом концентрация ртути в поверхностном слое донных осадков во всех обследованных заливах была достаточно низкой (медианное значение 44,3 нг/г сух. в.). Фактически концентрация ртути не изменилась за 25 лет, если сравнивать с величинами концентраций, зарегистрированных в летний период 1993 г. в Ис-фьорде и Грён-фьорде [35], а именно: 50–60 нг/г сух. в. Содержание ртути в донных осадках было также близко к величинам, отмеченным в Грён-фьорде весной 2016 г. [29].

Как известно [36], особенности аккумуляции загрязняющих веществ в донных отложениях мелководных заливов Шпицбергена зависят не только от уровня их поступления из глобальных и локальных источников, процессов осадконакопления, но и от активности бентосных организмов. Содержание ртути в гидробионтах в исследуемых заливах было относительно низким, достигая самых высоких величин в Ис-фьорде. Распределение гидробионтов бентосного сообщества по валовому содержанию ртути в системе Ис-фьорда в целом подчинялось общей закономерности: ртуть в большей степени накапливали организмы более высоких трофических уровней (детритофаги-грунтоеды и хищники), как это было показано в предыдущих исследованиях в Конгс-фьорде и Грён-фьорде на Шпицбергене [8, 29]. Летом 2017 г. самые высокие концентрации ртути были обнаружены в бентосных организмах детритофагах-грунтоедах, таких как полихеты *Maldania sarsi*, *Pectinaria hyperborea* и *Pherusa plumosa*, тогда как самые низкие были характерны для гидробионтов более низкого трофического уровня, таких как сестонофаги-фильтраторы *Astarte sp.*, *Ciliatocardium ciliatum* и *Serripes groenlandicus*.

Не только в весенний период [29], но и летом концентрация ртути в поверхностном слое донных отложений и гидробионтах, бентосных беспозвоночных, зависела от близости к источникам поступления ртути и гидрологических процессов, происходящих в заливах. Так, относительно высокий уровень накопления ртути отмечен в гидробионтах вблизи пос. Баренцбург (Грён-фьорд, ст. 72), где наблюдали самый высокий уровень локального загрязнения в весенний период [29].

В целом же содержание ртути в воде, донных осадках и бентосных организмах заливов системы Ис-фьорда было относительно низким (менее 10 нг/л, 10–

60 нг/г сух. в. и 3–50 нг/г сыр. в. соответственно), однако за пределами данного исследования осталось изучение концентраций наиболее опасных метилированных форм ртути [7, 37] в бентосных организмах. Это — важное направление будущих исследований, поскольку соединения ртути, накапливаясь в морских организмах, не только оказывают на них негативное влияние, но также снижают ценность морских биоресурсов [10, 18, 26–32].

Как было показано на примере Грэн-фьорда, ртуть, накапливающаяся в среде обитания и гидробионтах, поступает в экосистему весной в большей степени путем трансграничного атмосферного переноса, при этом локальные источники загрязнения играют второстепенную роль [29]. Однако в настоящее время активность человека в Арктике увеличивается и, следовательно, его влияние на уязвимые экосистемы Арктики усиливается. Кроме того, меняется структура его активности в высоких широтах, что позволяет прогнозировать возможное усиление вклада в общее загрязнение Арктики от локальных источников загрязнения. В связи с этим исследование аккумуляции токсических соединений, путей их поступления и миграции по трофическим цепям в перспективе должно быть сфокусировано не только на детализации механизмов их трансформации в экосистеме, но и на выявлении новых локальных источников загрязнения.

Благодарности. Исследование выполнено в рамках темы государственного задания ММБИ «Комплексные исследования экосистем фьордов и морей, омывающих архипелаг Шпицберген». Лабораторные исследования проводились в рамках Межведомственной программы научных исследований и наблюдений на архипелаге Шпицберген в 2017 г.

Acknowledgements. This study was supported by Project of MMBI “Integrated studies of ecosystems of fjords and seas surrounding the Svalbard archipelago”. The analytical work was performed via the Inter-institutional program for research and monitoring on Spitsbergen Archipelago in 2017.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Furness R.W. Heavy metals in the marine environment. CRCPress, Boca Raton, FL, 1990. 262 p.
2. Wiener J.G. Mercury exposed: advances in environmental analysis and ecotoxicology of a highly toxic metal // Environ. Toxicol. Chem. 2013. V. 32. P. 2175–2178. doi:10.1002/etc.2333
3. Dietz R., Outridge P.M., Hobson K.A. Anthropogenic contributions to mercury levels in present-day Arctic animals — a review // Sci. Total Environ. 2009. V. 407 (24). P. 6120–6131. doi:10.1016/j.scitotenv.2009.08.036
4. AMAP Assessment 2011: Mercury in the Arctic. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP). Oslo, 2011. 193 p.
5. AMAP/UNEP, 2013: Technical Background Report for the Global Mercury Assessment 2013.

REFERENCES

1. Furness R.W. Heavy metals in the marine environment. CRCPress, BocaRaton, FL, 1990: 262 p.
2. Wiener J.G. Mercury exposed: advances in environmental analysis and ecotoxicology of a highly toxic metal. Environ. Toxicol. Chem. 2013, 32: 2175–2178. doi:10.1002/etc.2333
3. Dietz R., Outridge P.M., Hobson K.A. Anthropogenic contributions to mercury levels in present-day Arctic animals — a review. Sci. Total Environ. 2009, 407 (24): 6120–6131. doi:10.1016/j.scitotenv.2009.08.036
4. AMAP Assessment 2011: Mercury in the Arctic. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP). Oslo, 2011: 193 p.
5. AMAP/UNEP, 2013: Technical Background Report for the Global Mercury Assessment 2013.

- Arctic Monitoring and Assessment Programme, Oslo, Norway/UNEP Chemicals Branch, Geneva, Switzerland, 2013. 263 p.
6. Obrist D., Agnan Y., Jiskra M., Olson C.L., Colegrove D.P., Hueber J., Moore C.W., Sonke J.E., Helmig D. Tundra uptake of atmospheric elemental mercury drives Arctic mercury pollution // *Nature*. 2017. V. 547. P. 201–204. doi:10.1038/nature22997
7. Campbell L.M., Norstrom R.J., Hobson K.A., Muir D.C., Backus S., Fisk A.T. Mercury and other trace elements in a pelagic Arctic marine food web (Northwater Polynya, Baffin Bay) // *Sci. Total Environ.* 2005. V. 351. P. 247–263. doi:10.1016/j.scitotenv.2005.02.043
8. Jæger I., Hop H., Gabrielsen G.W. Biomagnification of mercury in selected species from an Arctic marine food web in Svalbard // *Sci. Total Environ.* 2009. V. 407 (6). P. 4744–4751. doi:10.1016/j.scitotenv.2009.04.004
9. Rigét F., Braune B., Bignert A., Wilson S., Aars J., Born E., Dam M., Dietz R., Evans M., Evans T., Gamberg M. Temporal trends of Hg in Arctic biota, an update // *Sci. Total Environ.* 2011. V. 409. P. 3520–3526. doi:10.1016/j.scitotenv.2011.05.002
10. Ruus A., Øverjordet I.B., Braaten H.F.V., Evenset A., Christensen G., Heimstad E.S., Gabrielsen G.W., Borgå K. Methylmercury biomagnification in an Arctic pelagic food web // *Environ. Toxicol. Chem.* 2015. V. 34 (11). P. 2636–2643. doi:10.1002/etc.3143
11. Fort J., Grémillet D., Traisnel G., Amélineau F., Bustamante P. Does temporal variation of mercury levels in Arctic seabirds reflect changes in global environmental contamination, or a modification of Arctic marine food web functioning? // *Environmental Pollution*. 2016. V. 211. P. 382–388. doi:10.1016/j.envpol.2015.12.061
12. Pomerleau C., Stern G.A., Pučko M., Foster K.L., Macdonald R.W., Fortier L. Pan-Arctic concentrations of mercury and stable isotope ratios of carbon ($\delta^{13}\text{C}$) and nitrogen ($\delta^{15}\text{N}$) in marine zooplankton // *Sci. Total Environ.* 2016. V. 551. P. 92–100. doi:10.1016/j.scitotenv.2009.04.004
13. Soerensen A.L., Jacob D.J., Schartup A.T., Fisher J.A., Lehnerr I., St Louis V.L., Heimbürger L.-E., Sonke J.E., Krabbenhoft D.P., Sunderland E.M. A mass budget for mercury and methylmercury in the Arctic Ocean // *Arctic Monitoring and Assessment Programme, Oslo, Norway/UNEP Chemicals Branch, Geneva, Switzerland, 2013: 263 p.*
6. Obrist D., Agnan Y., Jiskra M., Olson C.L., Colegrove D.P., Hueber J., Moore C.W., Sonke J.E., Helmig D. Tundra uptake of atmospheric elemental mercury drives Arctic mercury pollution. *Nature*. 2017, 547: 201–204. doi:10.1038/nature22997
7. Campbell L.M., Norstrom R.J., Hobson K.A., Muir D.C., Backus S., Fisk A.T. Mercury and other trace elements in a pelagic Arctic marine food web (Northwater Polynya, Baffin Bay). *Sci. Total Environ.* 2005, 351: 247–263. doi:10.1016/j.scitotenv.2005.02.043
8. Jæger I., Hop H., Gabrielsen G.W. Biomagnification of mercury in selected species from an Arctic marine food web in Svalbard. *Sci. Total Environ.* 2009, 407 (6): 4744–4751. doi:10.1016/j.scitotenv.2009.04.004
9. Rigét F., Braune B., Bignert A., Wilson S., Aars J., Born E., Dam M., Dietz R., Evans M., Evans T., Gamberg M. Temporal trends of Hg in Arctic biota, an update. *Sci. Total Environ.* 2011, 409: 3520–3526. doi:10.1016/j.scitotenv.2011.05.002
10. Ruus A., Øverjordet I.B., Braaten H.F.V., Evenset A., Christensen G., Heimstad E.S., Gabrielsen G.W., Borgå K. Methylmercury biomagnification in an Arctic pelagic food web. *Environ. Toxicol. Chem.* 2015, 34 (11): 2636–2643. doi:10.1002/etc.3143
11. Fort J., Grémillet D., Traisnel G., Amélineau F., Bustamante P. Does temporal variation of mercury levels in Arctic seabirds reflect changes in global environmental contamination, or a modification of Arctic marine food web functioning? *Environmental Pollution*. 2016, 211: 382–388. doi:10.1016/j.envpol.2015.12.061
12. Pomerleau C., Stern G.A., Pučko M., Foster K.L., Macdonald R.W., Fortier L. Pan-Arctic concentrations of mercury and stable isotope ratios of carbon ($\delta^{13}\text{C}$) and nitrogen ($\delta^{15}\text{N}$) in marine zooplankton. *Sci. Total Environ.* 2016, 551: 92–100. doi:10.1016/j.scitotenv.2009.04.004
13. Soerensen A.L., Jacob D.J., Schartup A.T., Fisher J.A., Lehnerr I., St Louis V.L., Heimbürger L.-E., Sonke J.E., Krabbenhoft D.P., Sunderland E.M. A mass budget for mercury and methylmercury in the Arctic Ocean. *Global*

- Global Biogeochemical Cycles. 2016. V. 30 (4). P. 560–575. doi:10.1002/2015GB005280
14. *Alexander V.* The influence of the structure and function of the marine food web on the dynamics of contaminants in Arctic Ocean ecosystems // *Sci. Total Environ.* 1995. V. 161. P. 593–603. doi: 10.1016/0048-9697(95)04394-G
15. Mercury: environmental aspects. Environmental health criteria 86. Geneva: WHO, 1989. 115 p.
16. Methylmercury. Environmental health criteria 101. Geneva: WHO, 1990. 144 p.
17. *Dietz R., Riget F., Johansen P.* Lead, cadmium, mercury and selenium in Greenland marine animals // *Sci. Total Environ.* 1996. V. 186 (1). P. 67–93.
18. *Atwell L., Hobson K.A., Welch H.E.* Biomagnification and bioaccumulation of mercury in an arctic marine food web: insights from stable nitrogen isotope analysis // *Environ. Toxicol. Chem.* 1998. V. 55 (5). P. 1114–1121.
19. *Booth S., Zeller D.* Mercury, food webs, and marine mammals: implications of diet and climate change for human health // *Environmental Health Perspectives.* 2005. V. 113. P. 521–526. doi:10.1289/ehp.7603
20. *Hallanger I.G., Ruus A., Herzke D. Warner N.A., Evenset A., Heimstad E.S., Gabrielsen G.W., Borga K.* Influence of season, location, and feeding strategy on bioaccumulation of halogenated organic contaminants in Arctic marine zooplankton // *Environ. Toxicol. Chem.* 2011. V. 30. P. 77–87. doi: 10.1002/etc.362
21. *Bidleman T.F., Stern G.A., Tomy G.T.* Scavenging amphipods: Sentinels for penetration of mercury and persistent organic chemicals into food webs of the deep Arctic Ocean // *Environ. Sci. Technol.* 2013. V. 47. P. 5553–5561. doi: 10.1021/es304398j
22. *Dietz R., Sonne C., Basu N.* What are the toxicological effects of mercury in Arctic biota? // *Sci. Total Environ.* 2013. V. 443. P. 775–790.
23. *Øverjordet I.B., Altin D., Berg T.* Acute and sub-lethal response to mercury in Arctic and boreal calanoid copepods // *Aquatic Toxicology.* 2014. V. 155. P. 160–165. doi:10.1016/j.aquatox.2014.06.019
24. *Gray J.S.* Biomagnification in marine systems: the perspective of an ecologist // *Marine Pollution Bulletin.* 2002. V. 45 (1–12). P. 46–52. doi:10.1016/S0025-326X(01)00323-X
- Biogeochemical Cycles. 2016, 30 (4): 560–575. doi:10.1002/2015GB005280
14. *Alexander V.* The influence of the structure and function of the marine food web on the dynamics of contaminants in Arctic Ocean ecosystems. *Sci. Total Environ.* 1995, 161: 593–603. doi: 10.1016/0048-9697(95)04394-G
15. Mercury: environmental aspects. Environmental health criteria 86. Geneva: WHO, 1989: 115 p.
16. Methylmercury. Environmental health criteria 101. Geneva: WHO, 1990: 144 p.
17. *Dietz R., Riget F., Johansen P.* Lead, cadmium, mercury and selenium in Greenland marine animals. *Sci. Total Environ.* 1996, 186 (1): 67–93.
18. *Atwell L., Hobson K.A., Welch H.E.* Biomagnification and bioaccumulation of mercury in an arctic marine food web: insights from stable nitrogen isotope analysis. *Environ. Toxicol. Chem.* 1998, 55 (5): 1114–1121.
19. *Booth S., Zeller D.* Mercury, food webs, and marine mammals: implications of diet and climate change for human health. *Environmental Health Perspectives.* 2005, 113: 521–526. doi:10.1289/ehp.7603
20. *Hallanger I.G., Ruus A., Herzke D. Warner N.A., Evenset A., Heimstad E.S., Gabrielsen G.W., Borga K.* Influence of season, location, and feeding strategy on bioaccumulation of halogenated organic contaminants in Arctic marine zooplankton. *Environ. Toxicol. Chem.* 2011, 30: 77–87. doi: 10.1002/etc.362
21. *Bidleman T.F., Stern G.A., Tomy G.T.* Scavenging amphipods: Sentinels for penetration of mercury and persistent organic chemicals into food webs of the deep Arctic Ocean. *Environ. Sci. Technol.* 2013, 47: 5553–5561. doi: 10.1021/es304398j
22. *Dietz R., Sonne C., Basu N.* What are the toxicological effects of mercury in Arctic biota? *Sci. Total Environ.* 2013, 443: 775–790.
23. *Øverjordet I.B., Altin D., Berg T.* Acute and sub-lethal response to mercury in Arctic and boreal calanoid copepods. *Aquatic Toxicology.* 2014, 155: 160–165. doi:10.1016/j.aquatox.2014.06.019
24. *Gray J.S.* Biomagnification in marine systems: the perspective of an ecologist. *Marine Pollution Bulletin.* 2002, 45 (1–12): 46–52. doi:10.1016/S0025-326X(01)00323-X

25. Morel F. M., Kraepiel A. M., Amyot M. The chemical cycle and bioaccumulation of mercury // Annual review of ecology and systematics. 1998. V. 29 (1). P. 543–566. doi:10.1146/annurev.ecolsys.29.1.543
26. Savinova T. N., Gabrielsen G. W., Falk-Petersen S. Chemical pollution in the Arctic and sub-arctic marine ecosystems: an overview of current knowledge // NINA-fagrapport. 1995. № 1. 68 p.
27. Pacyna E.G., Pacyna J., Sundseth K., Munthe J., Kindbom K., Wilson S., Steenhuisen F., Maxson P. Global emission of mercury to the atmosphere from anthropogenic sources in 2005 and projections to 2020 // Atm. Environ. 2010. V. 44. P. 2487–2499. doi:10.1016/j.atmosenv.2009.06.009
28. Granberg M.E., Ask A., Gabrielsen G.W. Local contamination in Svalbard: overview and suggestions for remediation actions. NorskPolarinstitutt, 2017. 49 p.
29. Лебедева Н.В., Зимина О.Л., Фатеев Н.Н., Никулина А.Л., Берченко И.В., Мецержков Н.И. Ртуть в гидробионтах и среде обитания Грөнфьорда (Западный Шпицберген) ранней весной // Геохимия. 2018. № 4. С. 351–362. doi: 10.7868/S0016752518040052
30. Жирков И.А. Полихеты Северного Ледовитого океана. М.: Изд. Янус-К, 2001. 632 с.
31. Гаевская Н.С. (ред.) Определитель фауны и флоры северных морей СССР. М.: Советская наука, 1948. 736 с.
32. Квасов Б.И. Методы изометрической аппроксимации сплайнами. М.: Физматлит, 2006. 360 с.
33. Gobeil C., Macdonald R.W., Smith J.N. Mercury profiles in sediments of the Arctic Ocean basins // Environmental Science & Technology. 1999. V. 33 (23). P. 4194–4198. doi: 10.1021/es990471p
34. Даувальтер В.А. Факторы формирования химического состава донных отложений. Мурманск: Изд-во МГТУ, 2002. 75 с.
35. Holte B., Dahle S., Gulliksen B., Næs K. Some macrofaunal effects of local pollution and glacier-induced sedimentation, with indicative chemical analyses, in the sediments of two Arctic fjords // Polar Biology. 1996. V. 16. P. 549–557. doi: 10.1007/BF02329051
25. Morel F. M., Kraepiel A. M., Amyot M. The chemical cycle and bioaccumulation of mercury. Annual review of ecology and systematics. 1998, 29 (1): 543–566. doi:10.1146/annurev.ecolsys.29.1.543
26. Savinova T. N., Gabrielsen G. W., Falk-Petersen S. Chemical pollution in the Arctic and sub-arctic marine ecosystems: an overview of current knowledge. NINA-fagrapport. 1995, 1: 68 p.
27. Pacyna E.G., Pacyna J., Sundseth K., Munthe J., Kindbom K., Wilson S., Steenhuisen F., Maxson P. Global emission of mercury to the atmosphere from anthropogenic sources in 2005 and projections to 2020. Atm. Environ. 2010, 44: 2487–2499. doi:10.1016/j.atmosenv.2009.06.009
28. Granberg M.E., Ask A., Gabrielsen G.W. Local contamination in Svalbard: overview and suggestions for remediation actions. NorskPolarinstitutt, 2017: 49 p.
29. Lebedeva N.V., Zimina O.L., Fateev N.N., Nikulina A.L., Berchenko I.V., Meshcheryakov N.I. Mercury in hydrobionts and their habitat in Grönfjorden, West Spitsbergen, in Early Springtime. Geochemistry. International. 2018, 5 (4): 332–343. doi: 10.1134/S0016702918040031
30. Zhirkov I.A. Polikhety Severnogo Ledovitogo okeana. Polychaetes of the Arctic Ocean. Moscow: Janus-K, 2001: 632 p. [In Russian].
31. Gaevskaja N.S. (Ed.) *Opredelitel' fauny i flory severnyh morej SSSR*. Key-identifier of fauna and flora of the northern seas of the USSR. Moscow: Soviet science, 1948: 736 p. [In Russian].
32. Kvasov B.I. *Metody izometricheskoj approksimacii splajnami*. Methods of isogeometric approximation by splines. Moscow: Fizmatlit, 2006: 360 p. [In Russian].
33. Gobeil C., Macdonald, R.W., Smith, J.N. Mercury profiles in sediments of the Arctic Ocean basins. Environmental Science & Technology. 1999, 33 (23): 4194–4198. doi: 10.1021/es990471
34. Dauval'ter V.A. *Factory formirovaniya khimicheskogo sostava donnykh otlozheniy*. Factors of formation of the chemical composition of the sediment. Murmansk: MSTU Publ. 2002: 75 p. [In Russian].
35. Holte B., Dahle S., Gulliksen B., Næs K. Some macrofaunal effects of local pollution and glacier-induced sedimentation, with indicative chemical analyses, in the sediments of two Arctic fjords. Polar Biology. 1996, 16: 549–557. doi: 10.1007/BF02329051

36. *Konovalov D., Renaud P.E., Berge J., Voronkov A.Y., Cochrane S.K.J.* Contaminants, benthic communities, and bioturbation: potential for PAH mobilisation in Arctic sediments // *Chemistry and Ecology*. 2010. V. 26 (3). P. 197–208. doi: 10.1080/02757541003789058

37. *Bloom N.S.* On the chemical form of mercury in edible fish and marine invertebrate tissue // *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 1992. V. 49. P. 1010–1017.

36. *Konovalov D., Renaud P.E., Berge J., Voronkov A.Y., Cochrane S.K.J.* Contaminants, benthic communities, and bioturbation: potential for PAH mobilisation in Arctic sediments. *Chemistry and Ecology*. 2010, 26 (3): 197–208. doi: 10.1080/02757541003789058

37. *Bloom N.S.* On the chemical form of mercury in edible fish and marine invertebrate tissue. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 1992, 49: 1010–1017.

УДК 268 261; 472(26)+(99)

DOI: 10.30758/0555-2648-2018-64-3-326-336

**СХОДСТВО И ОТЛИЧИЕ БИОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛИХЕТ В ДОННЫХ СООБЩЕСТВАХ
МЕЛКОВОДНЫХ ЗАЛИВОВ АРКТИКИ И АНТАРКТИКИ**

С.Ю. ГАГАЕВ

*Зоологический институт Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия
sgagaev@zin.ru*

**SIMILARITY AND DIFFERENCE OF BIOENERGY
CHARACTERISTICS OF POLYCHAETES IN BOTTOM
COMMUNITIES IN THE SHALLOW GULFS
OF THE ARCTIC AND ANTARCTIC**

S.Yu. GAGAEV

*Zoological Institute, Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia
sgagaev@zin.ru*

Received July, 12, 2018

Accepted September, 6, 2018

Keywords: assimilation, biomass, Chaun Bay, energetic flow, Nella Fjord, Polychaeta.

Summary

Comparison of energetic flow through bottom communities (on the example of polychaete populations) in the shallow bights the Chaun Bay (East Arctic) and the Fjord Nella (East Antarctic) located in high latitudes of opposite hemispheres of the planet is carried out for the first time. Polychaete worms abundantly and diversely represented in the bottom biocenosis and playing an important role in their life are one of the most suitable for this kind of analysis of the group. The material is collected and processed by common methods. It turned out that the average values of biomass and assimilation are comparable, although their indices are somewhat higher in Chaun Bay than in Nella Fjord, so the mean values of the current energy are 56 ± 25 and 40 ± 13 kcal / m² per year, respectively. In this case, such similarity is mainly due to the duration of the light time due to the location of the bays on similar geographical latitudes. In both cases, it was noted that at lower depths, lower values of the energy flux are inherent in different sections of the gulf, due to freshening and abrasion of the ice,

Citation: *Gagaev S.Yu.* Similarity and difference of bioenergy characteristics of polychaetes in bottom communities in the shallow gulfs of the Arctic and Antarctic *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2018, 64, 3: 326–336. [In Russian]. doi: 10.30758/0555-2648-2018-64-3-326-336

and higher — at great depths, where the conditions are more stable. It has been established that in the Chaun Bay the share of the biomass of suspension feeders is higher on hard bottom in the macrophyte belt, and on the muds occupying the largest areas of the bottom, deposit feeders predominate. In the Nella Fjord, on the contrary, large areas of the bottom are represented by hard substratum and are occupied, respectively, prevalence of suspension feeders, whereas non-large areas with a slight glossiness are used for life in small forms of infauna and which, according to the type of food, refer to deposit feeders. One of the distinguishing features of the assimilation in the considered bays is the tendency of its growth with depth in the Chaun Bay and its relative constancy in the Nella Fjord; the other is the achievement of relatively high values of the energy flux in some parts of the shallow Arctic compared with Antarctica. The differences are apparently explained by the complexity and variability of the water regime in the Chaun Bay and by the greater silting of the bottom, compared to the relatively constant natural conditions of the Nella Fjord, which together determine the features of the functioning of populations of polychaetes, as well as other groups of inhabitants.

The bioenergetic characteristics of bottom communities in the shallow bays of the Arctic and Antarctic have both differences and similarities, and, on the whole, depend on the physico-chemical originality of the areas.

Поступила 12 июля 2018 г.

Принята к печати 6 сентября 2018 г.

Ключевые слова: ассимиляция, биомасса, бухта Нелла, многощетинковые черви, поток энергии, Чаунская губа.

Впервые проведено сравнение биоэнергетических характеристик полихет мелководных водоемов Чаунской губы (Восточная Арктика) и бухты Нелла (Восточная Антарктика), расположенных в высоких широтах противоположных полушарий планеты. Оказалось, что средние значения потока энергии через популяции сопоставимы: 56 ± 25 и 40 ± 13 ккал/м² в год соответственно. Вместе с тем динамика потока энергии в заливах на различных грунтах и глубинах имеет заметные отличия. Различия и сходства между значениями ассимилированной полихетами энергии обусловлены в первую очередь физико-химическими особенностями исследованных водоемов.

ВВЕДЕНИЕ

По мнению ряда исследователей [1, 2 и др.], полихеты (Polychaeta — класс кольчатых червей), или многощетинковые черви, принадлежащие к типу Annelida, доминируют в донных сообществах шельфа и материкового склона и обычно дают 45–50 % общего числа видов и до 80 % общего числа экземпляров. Однако роль многощетинковых червей в функционировании донных сообществ, их энергетический вклад, особенно в высоких широтах, изучены далеко не достаточно [3, 4]. Учитывая их высокое видовое разнообразие, обилие и активное присутствие в жизни фактически всех донных сообществ, изучение популяций полихет может дать более полную картину функционирования этих биоценозов, а также пролить свет на сходства и различия в жизни фаун противоположных полушарий. Изучая полихет Чаунской губы Восточно-Сибирского моря, а затем эту же группу в бухте Нелла, используя единые методы сбора и обработки материала, автор сравнивал условия обитания и функционирования как отдельных организмов, так и популяций многощетинковых червей этих высокоширотных районов полушарий Земли и находил некоторые сходства [4, 5]. В литературе известны попытки проведения сравнений отдельных характеристик как полихет, так и других групп беспозвоночных с противоположных полюсов планеты [6, 7, 8 и др.]. Вместе с тем примеров проведения сравнительного анализа в биоэнергетическом аспекте не обнаружено. Поэтому целью настоящей статьи было сопоставление условий обитания, биомассы и, главным образом, особенностей потока

энергии через популяции многощетинковых червей, одной из самых разнообразных в донных биоценозах группы, мелководных бухт Арктики и Антарктики для ответа на вопросы: каковы сходства и различия биоэнергетических показателей многощетинковых червей и что их обуславливает.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Для сравнения выбраны две бухты, расположенные на сходной географической широте, но в разных полушариях, где в течение продолжительного времени и одинаковыми методами изучался состав полихет и их биоэнергетические характеристики (рис. 1а, б).

Сбор материала в Чаунской губе проводился водолазным количественным методом [9] в августе–сентябре 1986 г. на 12 перпендикулярных к берегу разрезах (см. рис. 1а). Водолазные погружения выполнялись с берега, шлюпки или катера «Вуквол». Макробентос (животные и растения крупнее 1 мм), равномерно распределенный, собирают на твердых грунтах с помощью рамки площадью 0,1 м² и совка, а на мягких грунтах — с помощью водолазного дночерпателя Грузова с площадью 0,05 м², максимально погружая его в грунт. Обычно берут 3 пробы рамкой или 6 проб дночерпателем (по две сдвоенные дночерпательные пробы). Животных и растения, распределенных редко или неравномерно, учитывают рамками с площадью 1 м² и с определенной площади, проплывая вдоль разложенного на дне мерного фала с метровой рейкой и собирая всех редких животных, не попавших в предыдущие рамки 0,1 м² и 1 м². Всего собрано около 1000 проб макробентоса, из них 3/4 водолазным методом. Полихет фиксировали 5 % раствором формалина. Спустя 2–4 недели переводили в 75 % этанол. После таксономической идентификации (все полихеты из Чаунской губы определены автором статьи) материал взвешивали на электронных весах с точностью 0,01 г.

Пробы глубже 20 м до 50 м отбирались дночерпателем Петерсена с площадью захвата 0,025 м², 6–8 повторов на станции.

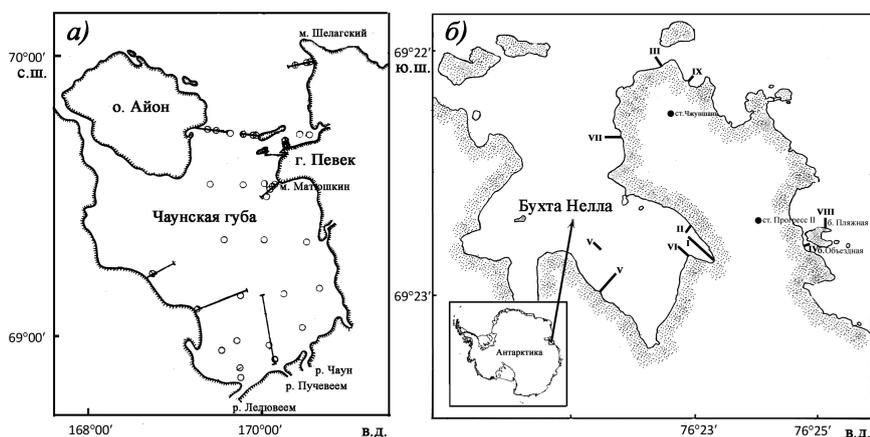


Рис 1. Схема гидробиологических разрезов в Чаунской губе (а) и бухте Нелла (б). Водолазные разрезы обозначены сплошной линией; дночерпательные станции обозначены кружочком

Fig. 1. Scheme of hydrobiological transects in the Chaun Bay (а) and Nella Fjord (б). Diving transects are indicated by a solid line; dredging stations are indicated by a circle

Тем же водолазным методом в течение 52-й и 54-й Российской антарктической экспедиции (РАЭ) (в декабре–марте 2006–2009 гг.) в бухте Нелла залива Прюдс было выполнено 9 перпендикулярных к берегу водолазных разрезов, I–III и V разрезы включали в себя от 3 до 6 станций, IV, VIII, XI — по одной, а VI, VII — две станции (рис. 1б). Большинство водолазных спусков осуществлялось через майну со льда, в диапазоне глубин 2–42 м. Пробы промывали непосредственно в майне через газ с сечением 1 мм². Всего собрано 208 проб макробентоса. Материал определен автором, за исключением сем. Serpulidae Rafinesque, 1815, представители которого были идентифицированы А.В. Ржавским.

При расчете средних плотности поселений и биомасс видовых популяций определялись статистические стандартные отклонения и ошибки средних [10]. Ошибку трат на обмен оценивали через величину ошибок плотности поселений и биомассы популяции, то есть вычисляли ошибки численности и биомассы общепринятым способом, используя их для определения ошибки обозначенного показателя, учитывая, что эти ошибки перекрывают ошибку расчета трат на обмен. Этим же руководствовались при подсчете ошибок средних всех остальных биоэнергетических показателей популяций. Для сравнения средних величин использовались общепринятые в таких случаях статистические методы. В тексте статьи после знака «±» приводятся значения стандартного отклонения.

Вычисление трат на энергетический обмен R производили, исходя из параболической зависимости скорости дыхания от среднего веса особей:

$$R = c\bar{W}^2 \cdot N, \text{ ккал/м}^2 \text{ в год,}$$

где \bar{W} — средняя масса особи поселения, оцененная как частное от деления биомассы (B) на плотность поселения (N); N — плотность поселения; c — коэффициент интенсивности метаболизма; d — коэффициент регрессии.

Коэффициенты c и d взяты из работы А.Н. Голикова с соавторами [11].

Результаты вычислений трат на обмен оценивались за год с учетом изменчивости температуры в данных условиях акватории при среднем $Q_{10} = 2,3$.

Расчет продукции популяций производился по методу С. Мак-Нейла и Д.Г. Лаутона [12], который был модифицирован А.А. Умновым и А.Ф. Алимовым [13] при допущении, что коэффициент эффективности использования ассимилированной пищи на рост (K_2) у большинства беспозвоночных равен 0,2–0,3:

$$P = R/(2,879 \pm 0,046), \text{ ккал/м}^2 \text{ в год.}$$

Ассимилированная энергия, или поток энергии через популяции полихет (A), оценивалась как сумма трат на обмен (R) и продукции (P) за рассматриваемый временной интервал:

$$A = R + P, \text{ ккал/м}^2 \text{ в год.}$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для достижения поставленной цели был проведен сравнительный анализ основных пространственных характеристик и абиотических факторов, оказывающих влияние на существование биоты и на популяции полихет в частности, результаты которого приведены в таблице. Очевидно, что природные условия имеют как сходные в целом и деталях черты, так и существенные различия.

Некоторые природные характеристики Чаунской губы и бухты Нелла

Характеристика	Чаунская губа	Бухта Нелла
Географическая широта	От 68° 31' 5" до 69° 45' с.ш.	От 69° 22' 15" до 69° 23' ю.ш.
Геоморфология	Вход в бухту ограничивают острова	Вход в бухту ограничен островами и айсбергами
Грунт	По мере заглубления: гравий, камни, песок, далее — усиление заиления, ил	Каменно-песчанистое дно с небольшим слоем ила; в юго-восточной части заиление сильнее за счет в основном ветрового сноса грунта с берега
Обследованные глубины	0–50 м	0–42 м
Водные массы	Поверхностная арктическая, видоизмененный за счет летнего прогрева поверхностный слой и эстуарно-арктическая	Антарктическая шельфовая
Соленость, ‰	От 5 до 34 ‰	От 30 до 35 ‰
Придонная температура воды, °С	Зимой: –1,6...–1,8; летом на мелководье — 8–12, глубже — от –0,1 до –1,8°С	Круглый год, даже летом: –1,7...–1,8°С
Течение	Антициклоническое, в южной части залива до 0,5 узла Теплое течение из Тихого океана приносило бореальные виды во время потепления	Антициклоническое. Заметное для водолаза течение отсутствует Виды с севера не проникали в ближайшие 30 млн лет [6]
Толщина льда	Около 2 м	До 2,5 м на западе
Время стояния ледяного покрова	С октября по июнь	Чаще — круглый год
Прозрачность	Свет проникает на глубину 15–20 м.	Свет проникает до 40 м и более
Наличие ветрового перемешивания	В летний период во время южака до 20 м	Перемешивание отсутствует из-за круглогодичного ледового покрова
Источники органических веществ	Макро- и микроводоросли, органика, приносимая реками и ручьями	Макро- и микроводоросли

Обитая на сходных географических широтах у разных полюсов планеты, население этих полужамкнутых водоемов находится под воздействием солнечного света примерно равное по продолжительности время (полярная ночь и полярный день в этих широтах по своей продолжительности равны). Сходным выглядит и геоморфология исследованных районов, а также диапазон обследованных глубин. Однако на этом сходства рассматриваемых природных особенностей районов заканчиваются.

Одним из основных отличий является характер грунтов: преобладание мягких сильно заиленных в Арктике, способствующих развитию организмов инфауны, и песчаных с камнями и низким процентом заиления, благоприятствующих доминированию эпифауны в Антарктике [6 и др.]. Заиление происходит из-за значительного речного стока в северных морях и отсутствия такового в южных. Не менее заметны

отличия в водных массах, присущих двум рассматриваемым полузакрытым водоемам. В Чаунской губе отмечены три водные массы с соответствующими характеристиками, со сложным и весьма переменчивым гидрологическим режимом: поверхностно-арктическая, эстуарно-арктическая и, возможно, видоизмененный, возникающий в результате летнего прогрева поверхностный слой воды, как правило, в районе восточного побережья [14]. В бухте Нелла антарктическая шельфовая вода, характерная для Восточной Антарктики, напротив, обладает стабильными показателями [15]. Чаунская губа значительно отличается от относительно неподвижных вод залива Нелла наличием сильных течений и мощного ветрового перемешивания. Различная продолжительность ледяного покрова и прозрачность вод еще в большей степени увеличивают физико-химическую несхожесть двух водоемов. Восточное побережье Чаунской губы, сравнительно хорошо прогреваемое в летний период, является наиболее благоприятным прибежищем для бореальной фауны, немалая доля которой присуща этому заливу [4]. В западной части бухты условия ближе к условиям открытых участков Северного Ледовитого океана, а южная часть губы подвергается наибольшему влиянию впадающих сюда рек. В бухте Нелла условия относительно равные, лишь в западной части особенно толстый слой льда, снежный покров и тень от обрывистого берега уменьшают интенсивность проникновения солнечного света [16].

На основании перечисленных сходств и отличий следует подчеркнуть относительную сложность и переменчивость водного режима Чаунской губы по сравнению

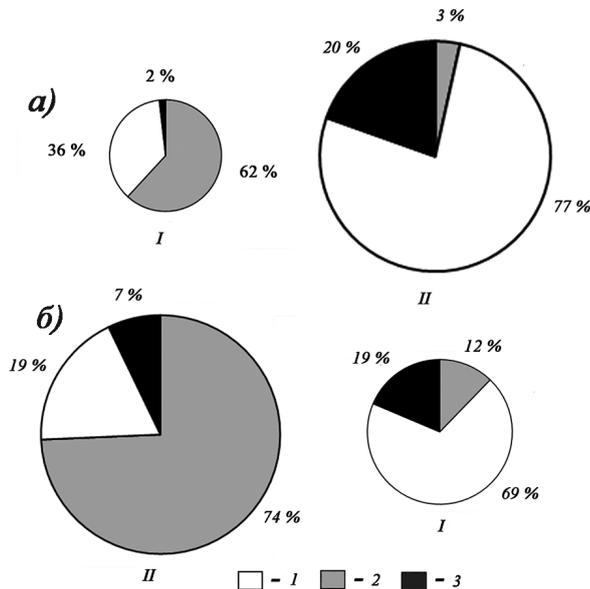


Рис. 2. Доля биомассы в процентах различных трофических групп в Чаунской губе (а), I — на каменистом грунте, II — на илах и бухте Нелла (б), I — на илистом песке, II — с преобладанием каменистого грунта. 1 — детритофаги; 2 — сестонофаги; 3 — плотоядные. Площади диаграмм пропорциональны значениям биомассы

Fig. 2. Part of biomass is in the percent of different trophic groups in the Chaun Bay (a), (I — on stony bottom, II — on silty ground) and Nella Fjord (б), (I — on silty sand, II — with predominance of stony ground). 1 — deposit feeders; 2 — suspension feeders; 3 — carnivorous. The areas of the diagrams are proportional to the values of biomass

с более постоянными природными условиями бухты Нелла, которые совокупно определяют в частности особенности функционирования популяций полихет и в целом — других групп обитателей в соответствующих условиях.

За обозначенный период исследований был собран материал более чем с 70 станций в Чаунской губе и с 25 станций в бухте Нелла. Материал включает 72 и 60 видов полихет соответственно.

Принимая во внимание, что продукционно-деструкционные процессы в популяциях — функция наличной биомассы и ее структуры, была предпринята попытка оценить биомассу в исследуемых бухтах на различных грунтах и ее долю в зависимости от трофической принадлежности (рис. 2а, б). Оказалось, что средние значения биомассы в Чаунской губе и бухте Нелла сопоставимы и составляют 43 ± 19 и 41 ± 9 г/м² соответственно. Не менее интересен и тот факт, что на гравийно-каменистых грунтах в Чаунской губе (на глубинах от 3 до 10 м) и на песчано-илистом дне бухты Нелла (на глубинах от 3 до 11 м и на 42 м) биомасса полихет минимальна: 11 ± 5 и 18 ± 5 г/м² соответственно, что определяется относительной нестабильностью среды, связанной с сезонным распреснением, истирающим воздействием льда и различными размерами представителей трофических группировок полихет, как в Северном, так и в Южном полушариях, доли которых в Чаунской губе и бухте Нелла отличаются. Так, в рассматриваемых условиях Чаунской губы на поясе ламинарий преобладают сестонофаги, представленные в основном видом *Nicolea zostericola* (Ørsted, 1844), а в бухте Нелла на относительно заиленных грунтах обозначенных глубин обычны различные сравнительно мелкие детритофаги. В Чаунской губе глубже 10 м и до предельно обследованных глубин распространены заиленные грунты, создающие, в свою очередь, оптимальные условия для детритофагов, представленных в основном видом *Maldane sarsi* Malmgren, 1865 (средняя биомасса полихет здесь 49 ± 7 г/м²), а в бухте Нелла на жестких грунтах в диапазоне глубин 11–37 м лидируют сестонофаги с доминированием крупных зонтичных червей *Perkinsiana littoralis* (Hartman, 1967) (средняя биомасса полихет составляет 52 ± 11 г/м²). Преобладающая роль эпифауны и трофической группы сестонофагов в Антарктике, а инфауны и доминирующих в ней детритофагов в Арктике отмечалась и ранее [11]. Однако на примере полихет необходимо внести уточнение: в Чаунской губе доля биомассы сестонофагов выше на жестких грунтах в поясе макрофитов, а на илах, занимающих наибольшие площади дна, преобладают детритофаги, в бухте Нелла — напротив, большие участки дна представлены жесткими грунтами и заняты, соответственно, эпифауной с преобладанием сестонофагов, тогда как небольшие участки с незначительным заилением используются для жизни мелкими формами инфауны, которые по типу питания относятся к детритофагам.

Анализ изменения потока энергии в изученных бухтах показывает сходную с биомассой картину (рис. 3а, б). Действительно, средние значения этого биоэнергетического показателя сопоставимы: также несколько выше в Чаунской губе, чем в бухте Нелла, и составляют 56 ± 25 и 40 ± 13 ккал/м² в год соответственно, что в данном случае, вероятно, связано с продолжительностью светового времени из-за положения водоемов на одинаковых в числовом выражении географических широтах, что предполагает относительное равенство условий (в этом аспекте) для фотосинтеза. Кроме того, прослеживается равная тенденция на минимальных глубинах для разных участков водоемов — более низкие значения потока энергии, по причине распреснения и истирающего воздействия льда, и более высокие — на больших глубинах, где условия стабильнее.

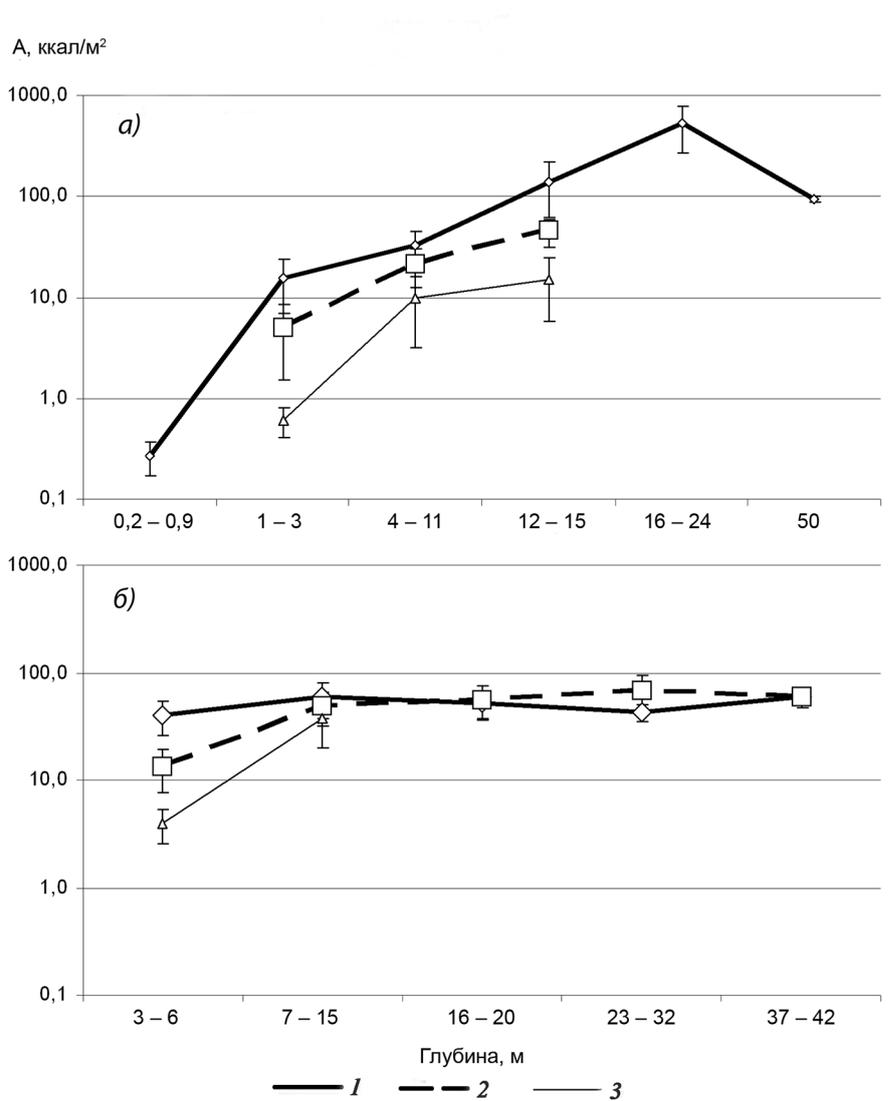


Рис. 3. Изменения потока энергии через популяции полихет на соответствующих глубинах в различных частях Чаунской губы (а): 1 — у восточного; 2 — западного; 3 — южного побережья и бухты Нелла (б): 1 — у восточного; 2 — западного; 3 — с внешней стороны бухты Нелла
 Fig. 3. Changes in the flow of energy through polychaete populations at corresponding depths in different parts of the Chaun Bay (a): 1 — east; 2 — western; 3 — southern coast and Nella Fjord (б): 1 — east; 2 — western; 3 — from the outside of Nella Fjord

Вместе с обозначенными сходствами имеются и существенные различия в потоке энергии обеих бухт в зависимости от глубины (см. рис. 3а, б).

Одна из главных отличительных черт ассимиляции полихет в двух рассматриваемых водоемах — тенденция ее нарастания с глубиной в Чаунской губе и относительное постоянство в бухте Нелла, а также достижение сравнительно высоких

значений потока энергии в отдельных участках мелководной Арктики по сравнению с Антарктикой.

Очевидно, что наименьшее значение потока энергии через популяции полихет — на минимальных глубинах обоих заливов, где негативное влияние опреснения и истирающего воздействия льда на организмы наиболее выражено. Нарастание величины ассимиляции с глубиной происходит в обоих случаях. Однако в Чаунской губе это продолжается приблизительно до 25 м, с некоторым снижением показателя к 50 м, что свидетельствует о сложно меняющемся водном и световом режиме этого арктического водоема. Иная картина в бухте Нелла: достигая средних максимальных значений, ассимиляция остается на этом уровне до предельно обследованных глубин, подтверждая тем самым прямую связь дыхания и продукции с относительным постоянством физико-химических условий в этом диапазоне, т.е. на 7–43 м.

Небезынтересен характер изменения потока энергии через популяции полихет в различных частях заливов. В Чаунской губе у восточного берега, с большим содержанием видов бореального характера, из-за сложившихся благоприятных для них условий, благодаря наибольшему прогреву воды в летний период и притоку органики, поток энергии выше, хотя и недостоверно, нежели у западного побережья, где условия типично арктические [4]. Ассимиляция в Чаунской губе выше и возрастает с глубиной, именно в тех местах и на тех глубинах, где преобладают илы и соответственно виды-детритофаги, что может быть объяснено сосредоточением более значительных запасов органики в грунте. Исследуемая характеристика ощутимо ниже на юге залива, где опресняющее влияние речных вод особенно сильно выражено. В бухте Нелла — иная картина [5]. Наименьшие показатели ассимиляции присущи популяциям, обитающим на глубинах до 6 м с внешней, мористой части, подверженной сильному разрушающему влиянию скребущего льда и опреснению. Поток энергии в популяциях полихет у восточного и западного побережья глубже 7 м, где условия стабильны, весьма схож, на средних и максимально обследованных глубинах ассимиляция находится примерно на одном уровне. Питание доминирующих там видов-сестонофагов обеспечивается в основном растительным и животным сестоном.

Таким образом, биоэнергетические характеристики популяций полихет в условиях мелководных заливов Арктики (Чаунской губы) и Антарктики (бухты Нелла) имеют как различия, так и сходства и в целом зависят от физико-химического своеобразия районов.

Благодарности. Работа выполнена в рамках исследований по государственной теме «Фауна, экология и биогеография беспозвоночных гидросферы» № АААА-А17-117030310207-3.

Acknowledgments. This work was supported by State scientific program “Fauna, ecology and biogeography of water invertebrates” № АААА-А17-117030310207-3.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Blake J.A.* Introduction in the Polychaeta – Taxonomic Atlas of the benthic fauna of the Santa Maria Basin and Western Santa Barbara Channel. Santa Barbara: Santa Barbara Museum of Natural History, 1997. V. 4. P. 37–108.

REFERENCES

1. *Blake J.A.* Introduction in the Polychaeta – Taxonomic Atlas of the benthic fauna of the Santa Maria Basin and Western Santa Barbara Channel. Santa Barbara: Santa Barbara Museum of Natural History, 1997, 4: 37–108.

2. *Жирков И.А.* Полихеты Северного Ледовитого океана. М.: Янус-К, 2001. 632 с.
3. *Аверинцев А.Г.* Фауна многощетинковых червей (Polychaeta) моря Лаптевых // Исследования фауны морей. Л.: Наука, 1990. Т. 37 (45). С. 147–186.
4. *Гагаев С.Ю.* Полихеты Чаунской губы Восточно-Сибирского моря и их роль в ее экосистемах // Исследования фауны морей. 1994. Т. 47 (55). С. 148–173.
5. *Гагаев С.Ю.* Многощетинковые черви (Polychaeta) залива Прюдс (Восточная Антарктика) // Исследования фауны морей. Т. 76 (84). 2017. С. 103–120.
6. *Сиренко Б.И.* Основные отличия макробентоса донных сообществ Арктики и Антарктики на примере сравнения фаун морей Лаптевых и Уэдделла // Биология моря. 2009. Т. 35. № 6. С. 393–400.
7. *Knox C.A., Lowry J.K.* A comparison between the benthos of the Southern Ocean and North Polar Ocean with special reference to the Amphipoda and the Polychaeta // Polar oceans. Calgary: Arctic Inst. of North America, 1977. P. 423–462.
8. *Pabis K., Kedra M., Gromisz S.* Distinct or similar? Soft bottom polychaete diversity in Arctic and Antarctic glacial fjords // Hydrobiologia. 2015. V. 742. P. 279–294.
9. *Голиков А.Н., Скарлато О.А.* Гидробиологические исследования в заливе Посьет с применением водолазной техники // Исследования фауны морей. Л.: Наука, 1965. Т. 3(11). С. 5–21.
10. *Лакин Г.Ф.* Биометрия: Учебное пособие. М.: Высшая школа, 1973. 343 с.
11. *Голиков А.Н., Скарлато О.А., Аверинцев В.Г.* Экосистемы Новосибирского мелководья и некоторые закономерности их распределения и функционирования // Исследования фауны морей. Л.: Наука, 1990. Т. 37 (45). С. 4–79.
12. *McNeil S., Lawton J.H.* Annual production and respiration in animal population // Nature. 1970. V. 225. P. 472–474.
13. *Умнов А.А., Алимов А.Ф.* Соотношение продукции с общим потоком энергии через популяцию // Общие основы изучения водных экосистем. Л.: Наука, 1979. С. 133–139.
2. *Zhirkov I.A.* Polikhety Severnogo Ledovitogo okeana. Polychaete worms of the Arctic Ocean. Moscow: Ianus-K, 2001: 632 p. [In Russian].
3. *Averincev V.G.* The polychaetous (Polychaeta) of the Laptev Sea. *Issledovaniia fauny morei*. Explorations of the Fauna of the Seas. Leningrad: Nauka, 1990, 37 (45): 185–193. [In Russian].
4. *Gagaev S.Yu.* Polychaetes of the Chaun Bay and their role in its ecosystems. *Issledovaniia fauny morei*. Explorations of the fauna of the sea. 1994, 47 (55): 148–173. [In Russian].
5. *Gagaev S.Yu.* Polychaete worms (Polychaeta) of the Prydz Bay (East Antarctic) // *Issledovaniia fauny morei*. Explorations of the fauna of the sea. 2017, 76 (84): 103–119. [In Russian].
6. *Sirenko B.I.* Main differences in macrobenthos and benthic communities of the Arctic and Antarctic, as illustrated by comparison of the Laptev and Weddell seas faunas. *Biologiya moria*. Russian Journal of Marine Biology. 2009, 35, 6: 393–400. [In Russian].
7. *Knox C.A., Lowry J.K.* A comparison between the benthos of the Southern Ocean and North Polar Ocean with special reference to the Amphipoda and the Polychaeta. Polar oceans. Calgary: Arctic Inst. of North America, 1977: 423–462.
8. *Pabis K., Kedra M., Gromisz S.* Distinct or similar? Soft bottom polychaete diversity in Arctic and Antarctic glacial fjords. *Hydrobiologia*. 2015, 742: 279–294.
9. *Golikov A.N., Scarlato O.A.* Hydrobiological researches in the Posjet Bay with the use of diving technique. *Issledovaniia fauny morei*. Explorations of the Fauna of the Seas. Leningrad: Nauka, 1965, 3 (11): 5–21. [In Russian].
10. *Lakin G.F.* *Biometriia. Uchebnoe posobie*. Biometrics. Tutorial. Moscow: Vysshiaia shkola, 1973: 343 p. [In Russian].
11. *Golikov A.N., Scarlato O.A., Averincev V.G.* Ecosystems of the New Siberian shoals, their distribution and functioning. *Issledovaniia fauny morei*. Explorations of the Fauna of the Seas. Leningrad: Nauka, 1990: 37 (45): 4–79. [In Russian].
12. *McNeil S., Lawton J.H.* Annual production and respiration in animal population. *Nature*. 1970, 225: 472–474.
13. *Umnov A.A., Alimov A.F.* Correlation of production with the general energetic flow through a population. *Obshchie osnovy izucheniia vodnykh ekosistem*. Common bases of study in

14. Голиков А.Н., Гагаев С.Ю., Гальцова В.В., Голиков А.А., Дантон К., Менишуткина Т.В., Новиков О.К., Петряшев В.В., Потин В.В., Сиренко Б.И., Шонберг С., Владимиров М.В. Экосистемы Чаунской губы Восточно-Сибирского моря // Исследования фауны морей. 1994. Т. 47 (55). С. 4–111.
15. Клепиков А.В., Антипов Н.Н., Данилов А.И. Российские океанографические исследования в Южном океане в период МПП 2007/08 // Международная научная конференция «Морские исследования полярных областей Земли в Международном полярном году 2007/08». Программа и тезисы докладов. Санкт-Петербург, 2010. С. 30–31.
16. Сиренко Б.И., Гагаев С.Ю., Смирнов И.С. Состав и распределение донных сообществ мелководных участков в заливе Прюдс моря Содружества (Восточная Антарктика) // Исследования фауны морей. 2017. Т. 76 (84). С. 50–83.
- water ecosystems. Leningrad: Nauka, 1979: 133–139. [In Russian].
14. Golikov A.N., Gagaev S.Y., Galtsova V.V., Golikov A.A., Dunton R., Menshutkina T.V., Novikov O.K., Petrjashev V.V., Potin V.V., Sirenko B.I., Schonberg S., Vladimirov M.V. Ecosystems and the flora and fauna of Chaun Bay of the East-Siberian Sea. *Issledovaniia fauny morei*. Exploration of the fauna of the seas. 1994, 47 (55): 4–111. [In Russian].
15. Klepikov A.V., Antipov N.N., Danilov A.I. *Mezhdunarodnaia nauchnaia konferentsiia "Morskie issledovaniia poliarnykh oblastei Zemli v Mezhdunarodnom poliarnom godu 2007/08"*. Russian oceanographic studies in the Antarctic Ocean during the IPY 2007/08. International scientific conferece "Marine researches of the polar regions of Earth during International polar year 2007/08": Program and thesis of reports. St. Petersburg, 2010: 30–31. [In Russian]
16. Sirenko B.I., Gagaev S.Yu., Smirnov I.S. Composition and distribution of the benthic communities from the shoals of the Prydz Bay, the Cooperation Sea (East Antarctic). *Issledovaniia fauny morei*. Exploration of the fauna of the seas. 2017, 76 (84): 50–83. [In Russian].

ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ

УДК 517.956.35

DOI: 10.30758/0555-2648-2018-64-3-337-343

ЧИСЛЕННАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ НАЧАЛЬНО-КРАЕВОЙ ЗАДАЧИ ДЛЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ОДНОМЕРНЫХ УРАВНЕНИЙ ПОРОУПРУГОСТИ ДЛЯ СИСТЕМЫ ВОДА–ЛЕД

П.В. КОРОБОВ

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

pkor@aari.ru

NUMERICAL IMPLEMENTATION OF THE INITIAL-BOUNDARY VALUE PROBLEM FOR NONLINEAR THE ONE-DIMENSIONAL EQUATIONS OF POROELASTICITY FOR THE WATER–ICE SYSTEM

P.V. KOROBOV

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

pkor@aari.ru

Received May, 14, 2018

Accepted August, 6, 2018

Keywords: finite-difference scheme, hyperbolic system, porous media, the coefficient of friction.

Summary

This article is devoted to the problem of propagation of elastic transverse oscillations in a two-phase medium consisting of water and ice (ice impregnated with water). If we consider ice as a kind of porous homogeneous medium with constant partial density, then it becomes possible to apply the problems of the theory of filtration to the water-ice medium. In this paper, we consider one of the possible formulations of the direct problem modeling the propagation of a signal in this medium is considered. The initial-boundary value problem for a one-dimensional nonlinear system of poroelasticity equations is solved by numerical method on the basis of an explicit-difference scheme. A series of numerical calculations for a trial model of the media is presented.

The aim of the paper is to describe the approach to the study of water-ice media using the equations of filtration theory. The object of the study is the propagation of wave oscillations in such media. Such fluctuations can have different nature (seismic, acoustic, etc.). For example, it is of interest to use this approach to model the propagation of sea waves in the ice of the initial stage of ice formation.

Citation: *Korobov P.V.* Numerical implementation of the initial-boundary value problem for nonlinear the one-dimensional equations of poroelasticity for the water-ice system *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2018, 64 (3): 337–343. [In Russian]. doi: 10.30758/0555-2648-2018-64-3-337-343

Ключевые слова: гиперболическая система, коэффициент трения, пористая среда, разностная схема.

Статья посвящена вопросу распространения упругих поперечных колебаний в двухфазной среде, состоящей из воды и льда (лед, пропитанный водой). Если рассматривать лед как некую пористую однородную среду с постоянной парциальной плотностью, то становится возможной постановка задач теории фильтрации для среды вода–лед. В данной работе рассматривается одна из возможных постановок прямой задачи, моделирующей распространение сигнала в этой среде. Численно решена начально-краевая задача для одномерной нелинейной системы уравнений пороупругости на основе явной разностной схемы. Представлена серия численных расчетов для пробной модели сред.

ВВЕДЕНИЕ

Для изучения масштабных процессов, происходящих в различных регионах Арктики и Антарктики, необходимы общие физические модели, описывающие характерные для этих регионов среды.

Данная статья посвящена моделированию распространения поперечных колебаний в мелком рыхлом льду, пропитанном водой, с использованием модели теории фильтрации.

Задачи теории фильтрации возникают при изучении движения однородной жидкости в пористой среде. Под понятием «пористая среда» подразумевается среда, имеющая бесчисленное количество пустот различной величины и формы, образующих «поровое пространство». Каждая такая пора соединена узкими каналами с другими, образуя полностью сообщающуюся между собой сквозными каналами сложную систему отверстий-ячеек. Примерами пористых сред служат несцементированные пески, сцементированные пески, тонкозернистые почвы и т.д. В данной работе в качестве пористой среды рассматриваются не соединенные между собой частицы мелкого рыхлого льда (шуги).

При математическом моделировании процессов теплопереноса в изотропных пористых средах [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7] применяют различные модели, основанные на общих физических законах массы, импульса и энергии в упруго-деформируемой пористой среде. В большинстве работ [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10] в качестве такого закона рассматривают закон Дарси в гидравлическом приближении. В модели Дарси, как правило, влиянием инерционных эффектов на режимы течения и теплопереноса в пористой среде пренебрегают. Однако известно, что в случае интенсивного течения или при наличии высокопористого материала наблюдаются отклонения от линейного закона фильтрации вследствие существенного влияния инерционных эффектов, которые, в частности, приводят к отрыву потока от поверхности твердого скелета.

Теоретически было установлено, что применимость модели Дарси ограничивается малыми значениями модифицированного числа Рейнольдса [4, 6, 11]. В работах В.Н. Доровского и А.Н. Блохина [3, 12] при построении математической модели движения жидкости через упруго-деформируемую пористую среду не предполагается выполнение закона Дарси, а он получен как следствие в одном предельном случае.

Целью данной работы было численное моделирование распространения нелинейных поперечных волн в случае диссипации энергии, обусловленной коэффициентом межкомпонентного трения. Была численно реализована явная разностная схема для данной задачи. Приведены результаты тестовых расчетов.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Распространение поперечных колебаний в пористой среде моделируется следующей начально-краевой задачей для нелинейной системы уравнений пороупругости [13–15]:

$$\rho_s u_{tt} = (\mu(u_x)u_x)_x - \rho_l^2((u-v)\chi(u-v))_t, x \in (0, L), t \in (0, T), \quad (1)$$

$$\rho_l v_t = \rho_l^2(u-v)\chi(u-v), x \in (0, L), t \in (0, T), \quad (2)$$

$$u|_{t=0} = u_0(x), u_t|_{t=0} = u_1(x), x \in (0, L), \quad (3)$$

$$v|_{t=0} = 0, x \in (0, L), \quad (4)$$

$$u_x|_{x=L} = 0, t \in (0, T), \quad (5)$$

$$u|_{x=0} = f(t), t \in (0, T). \quad (6)$$

Здесь u и v — скорости упругого пористого тела с постоянной парциальной плотностью $\rho_s = \rho_s^f(1-d_0)$ и жидкости с постоянной парциальной плотностью $\rho_l = \rho_l^f d_0$ соответственно; d_0 — пористость; $u_t = \partial u / \partial t$, $f: [0, T] \rightarrow R$, $u_0: [0, L] \rightarrow R$, $u_1: [0, L] \rightarrow R$, ρ_s^f, ρ_l^f — физические плотности упругого пористого тела и жидкости соответственно; $\mu(u_x)$ — модуль сдвига упругого пористого тела, трижды непрерывно-дифференцируемая положительная функция; $\chi(u-v)$ — коэффициент межфазного трения, дважды непрерывно-дифференцируемая положительная функция.

Нелинейное волновое уравнение вида (1) (в обратимом приближении, $\chi \equiv 0$) возникает во многих задачах. Например, в случае колебаний струны с упругим коэффициентом, зависящим от деформации. Второе слагаемое правой части уравнения (1) выражает затухание колебаний в результате трения жидкости и твердого тела. Во многих моделях механики пористых сред, учитывающих диссипацию энергии (рассеивание), коэффициент трения (проницаемость) является функцией разности скоростей [1, 2]. Второе уравнение описывает закон сохранения импульса для жидкой фазы среды.

Ранее были доказаны существование и единственность классического решения задачи (1) – (6), найдены оценки устойчивости решения данной задачи [14].

Данная статья посвящена численному решению начально-краевой задачи (1) – (6) для постоянных коэффициентов, соответствующих начальным стадиям ледообразования: плотность воды $\rho_l^f = 1030$ кг/м³, плотность льда $\rho_s^f = 922$ кг/м³, модуль сдвига $\mu = 3 \cdot 10^9$. Построены решения для различных коэффициентов межфазного трения χ и пористости среды d_0 .

РАЗНОСТНАЯ СХЕМА ДЛЯ НЕЛИНЕЙНОЙ СИСТЕМЫ ПОРОУПРУГОСТИ

Для численного решения начально-краевой задачи (1) – (6) мы использовали разностную схему второго порядка точности по t с шагом τ и по x с шагом h аппроксимации для уравнения (1), а для аппроксимации уравнения (2) разностную схему первого порядка точности по t [16, 17]:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\tau^2}(u_j^{i+1} - 2u_j^i + u_j^{i-1}) &= \frac{1}{2h^2\rho_s}((\mu_{j+1}^{i-1} + \mu_j^{i-1})(u_{j+1}^i - u_j^i) - \\ &- (\mu_j^{i-1} + \mu_{j-1}^{i-1})(u_j^i - u_{j-1}^i)) - \frac{1}{\tau\rho_s}\rho_l^2((u_j^i - v_j^i)\chi_j^i - (u_j^{i-1} - v_j^{i-1})\chi_j^{i-1}), \end{aligned} \quad (7)$$

$$v_j^{i+1} = \rho_i \tau (u_j^{i+1} - v_j^{i+1}) \chi_j^i + v_j^i, \quad i = 0 \dots N, \quad j = 0 \dots M. \quad (8)$$

Начальные и граничные условия аппроксимировали с первым порядком точности

$$u_j^0 = 0, \quad \frac{u_j^1 - u_j^0}{\tau} = 0, \quad j = 0 \dots M, \quad (9)$$

$$v_j^0 = 0, \quad j = 0 \dots M, \quad (10)$$

$$u_0^i = f(t), \quad u_M^i = 0, \quad i = 0 \dots N. \quad (11)$$

ЧИСЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Ниже представлены результаты моделирования распространения сигналов во льду, перемешанном с водой.

На рис. 1, 2 приведены графики изменения скорости колебания упругого тела по времени на различных расстояниях от источника для следующих параметров: плотность воды $\rho_f^f = 1030 \text{ кг/м}^3$, плотность льда $\rho_s^f = 922 \text{ кг/м}^3$, модуль сдвига $\mu = 3 \cdot 10^9$.

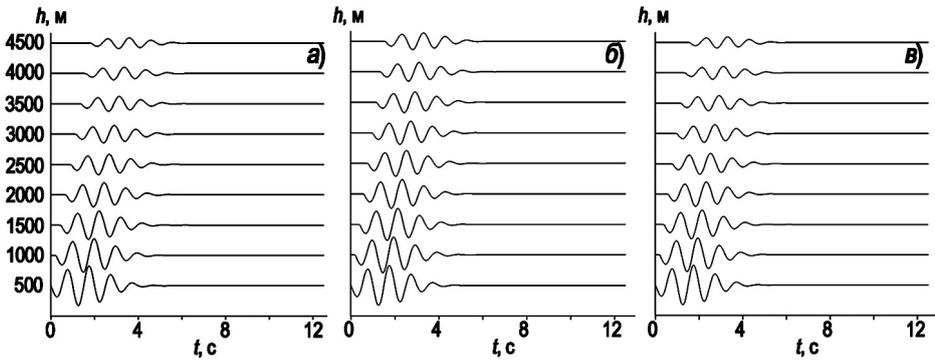


Рис. 1. Распространение сигнала в виде импульса Пузырева в средах с пористостью $d_0 = 0,5$ и различными коэффициентами межфазного трения $\chi = 0,002$ (а), $\chi = 0,003$ (б), $\chi = 0,004$ (в)

Fig. 1. Propagation of the signal in the form of a Puzyrev pulse in media with porosity $d_0 = 0,5$ and various coefficients of interfacial friction $\chi = 0,002$ (a), $\chi = 0,003$ (б), $\chi = 0,004$ (в)

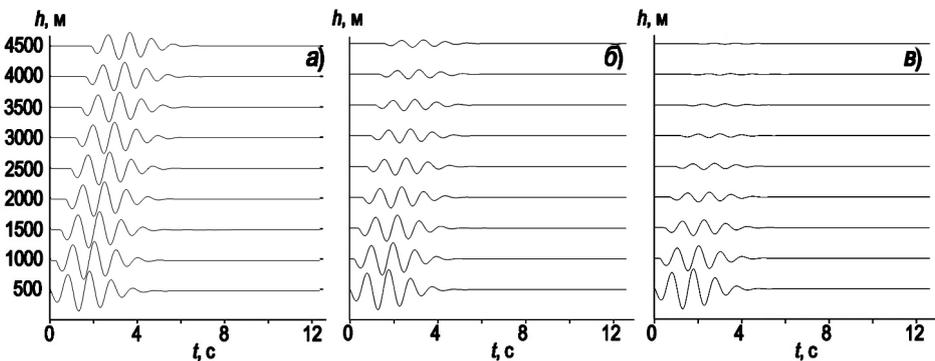


Рис. 2. Распространение сигнала в виде импульса Пузырева в средах с пористостью $d_0 = 0,3$ и различными коэффициентами межфазного трения $\chi = 0,003$ (а), $\chi = 0,01$ (б), $\chi = 0,03$ (в)

Fig. 2. Propagation of the signal in the form of a Puzyrev pulse in media with porosity $d_0 = 0,3$ and various coefficients of interfacial friction $\chi = 0,003$ (a), $\chi = 0,01$ (б), $\chi = 0,03$ (в)

Временной сигнал в источниках был задан в виде импульса Пузырева:

$$f(t) = \exp(-(2\pi f_0(t-t_0)^2)/\gamma^2) \sin(2\pi f_0(t-t_0)), \quad (12)$$

где $\gamma = 4$, $f_0 = 1$ Гц, $t_0 = 1,5$ с.

На графиках видно затухание амплитуд колебаний с увеличением расстояния от источника.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье рассматривался вопрос применимости уравнений теории фильтрации к смешанным средам, состоящим из воды и льда. В зависимости от выбираемых коэффициентов пористости и межфазного трения подбираются параметры среды, соответствующие различным стадиям ледообразования. В численных примерах рассматривались параметры, соответствующие шуге. Пористость — 0,3–0,5. Коэффициент трения получен из формулы для ламинарного потока при $Re < 2300$ (Re — число Рейнольдса): $\chi = 64/Re$, что соответствует значениям $\chi = 0,01–0,04$. Вопрос подбора коэффициентов остается открытым и, вероятно, должен решаться путем получения экспериментальных данных для каждого типа среды. Также стоит отметить, что в общем случае коэффициенты трения и модуль сдвига являются функциями от скоростей упругого тела и жидкости.

Задача может быть распространена на случай трехмерной среды повторением уравнений (1) – (6) для всех компонент векторов скоростей. Модель может быть уточнена путем включения в рассмотрение факторов трехмерной деформации среды.

В уравнениях (1) – (6) жидкость движется вследствие колебания твердого тела. Поэтому, при стремлении коэффициента пористости к нулю, уравнение (1) преобразуется в уравнение колебания упругого тела (льда), однако предельный переход при стремлении коэффициента пористости к единице не приводит к задаче о колебании жидкости. Физическим ограничением для применения данной модели является необходимость выполнения условия соединения друг с другом мелких элементов льда так, чтобы жидкость двигалась по капиллярам, возникающим между частицами льда, а не наоборот — элементы льда плавают в воде. Таким условиям отвечает шуга, которой соответствуют значения коэффициента пористости от 0,3 до 0,5. Корректность задачи сохраняется при переходе к сплошному льду, уравнение (1) преобразуется в уравнение колебания упругого тела.

Результатом данной работы является пример применения теории фильтрации для моделирования распространения волновых колебаний в водно-ледовых средах. С помощью данного подхода возможно моделирование распространения и диссипации волновых процессов (сейсмических, акустических волн и т.п.) в областях припайного льда и льдов начальных стадий ледообразования. Также при некоторых модификациях данной модели возможно ее применение к изучению вопроса распространения колебаний, вызванных морским волнением во льдах начальных стадий ледообразования.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-31-00120.

Acknowledgments. The reported study was funded by RFBR according to the research project No. 18-31-00120.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Френкель Я.И. К теории сейсмических и сейсмoeлектрических явлений во влажной почве // Известия АН СССР. Сер. география и геофизика. 1944. Т. 8. № 4. С. 133–146.
2. Biot M.A. Theory of propagation of elastic waves in fluid-saturated porous solid. I. Low-frequency range // J. Acoustical Society of America. 1956. V. 28. P. 168–178.
3. Доровский В.Н. Континуальная теория фильтрации // Геология и геофизика. 1989. № 7. С. 39–45.
4. Bejan A. Convection heat transfer. New Jersey: John Wiley Sons, 2004. 694 с.
5. Nield D.A., Bejan A. Convection in porous media. New York: Springer, 2006. 640 с.
6. Маскет М. Течение однородных жидкостей в пористой среде. М.; Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2004. 628 с.
7. Шейдеггер А.Э. Физика течения жидкостей через пористые среды. М.; Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2008. 254 с.
8. Alhashash A., Saleh H., Hashim I. Effect of conduction in bottom wall on Benard convection in a porous enclosure with localized heating and lateral cooling // Transport in Porous Media. 2013. V. 96. P. 305–318.
9. Misirlioglu A., Baytas A.C., Pop I. Natural convection inside an inclined wavy enclosure filled with porous medium // Transport in Porous Media. 2006. V. 64. P. 229–246.
10. Saleh H., Hashim I. Conjugate natural convection in a porous enclosure with non-uniform heat generation // Transport in Porous Media. 2012. V. 94. P. 759–774.
11. Bear J. Dynamics of fluids in porous media. Amsterdam: Elsevier, 1972. 764 с.
12. Blokhin A.M., Dorovsky V. N. Mathematical modelling in the theory of multivelocity continuum. New York: Nova Science, 1995. 192 с.
13. Имомназаров Х.Х., Коробов П.В. Одномерная прямая и обратная задача для квазилинейной системы порупругости // Тезисы Международной научной конференции «Методы создания, исследования и идентификации математических моделей». Новосибирск, 2013. С. 38.

REFERENCES

1. Frenkel' Ia.I. To the theory of seismic and seismoelectric phenomena in moist soil. *Izvestiia AN SSSR. Ser. geografiia i geofizika*. Proceedings of the USSR Academy of Sciences. Series geography and geophysics, 1944, 8, 4: 133–146. [In Russian].
2. Biot M.A. Theory of propagation of elastic waves in fluid-saturated porous solid. I. Low-frequency range. *J. Acoustical Society of America*. 1956, 28: 168–178.
3. Dorovskii V.N. The Continuous Theory of Filtration. *Geologiya i geofizika*. Geology and geophysics. 1989, 7: 39–45. [In Russian].
4. Bejan A. Convection heat transfer. New Jersey: John Wiley Sons, 2004: 694 p.
5. Nield D.A., Bejan A. Convection in porous media. New York: Springer, 2006: 640 p.
6. Masket M. *Techenie odnorodnykh zhidkostei v poristoi srede*. Flow of homogeneous fluids in a porous medium. Moscow; Izhevsk: Institute of Computer Science research, 2004: 628 p. [In Russian].
7. Sheidegger A.E. *Fizika techeniia zhidkostei cherez poristye sredy*. Physics of the flow of liquids through porous media. Moscow; Izhevsk: Institute of Computer Science research, 2008: 254 p. [In Russian].
8. Alhashash A., Saleh H., Hashim I. Effect of conduction in bottom wall on Benard convection in a porous enclosure with localized heating and lateral cooling. *Transport in Porous Media*. 2013, 96: 305–318.
9. Misirlioglu A., Baytas A.C., Pop I. Natural convection inside an inclined wavy enclosure filled with porous medium. *Transport in Porous Media*. 2006, 64: 229–246.
10. Saleh H., Hashim I. Conjugate natural convection in a porous enclosure with non-uniform heat generation. *Transport in Porous Media*. 2012, 94: 759–774.
11. Bear J. Dynamics of fluids in porous media. Amsterdam: Elsevier, 1972: 764 p.
12. Blokhin A. M., Dorovsky V. N. Mathematical modelling in the theory of multivelocity continuum. New York: Nova Science, 1995: 192 p.
13. Imomnazarov Kh.Kh., Korobov P.V. *Odnomernaia priamaia i obratnaia zadacha dlia kvazilineinoi sistemy porouprugosti*. One-

14. Имомназаров Х.Х., Имомназаров Ш.Х., Коробов П.В., Холмуродов А.Э. Прямая и обратная задача для нелинейных одномерных уравнений пороупругости // Доклады Академии наук. 2014. Т. 455. № 6. С. 640–642.

15. Имомназаров Х.Х., Коробов П.В. Численное решение одной начально-краевой задачи для нелинейной одномерной системы пороупругости // Тезисы V международной молодежной научной школы-конференции «Теория и численные методы решения обратных и некорректных задач». Новосибирск: Сибирское научное издательство, 2013. С. 41.

16. Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы. М.: Наука, 1989. 432 с.

17. Самарский А.А., Гулин А.В. Устойчивость разностных схем. М.: Наука, 1973. 415 с.

dimensional direct and inverse problem for a quasilinear system of poroelasticity. *Tezisy Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii "Metody sozdaniia, issledovaniia i identifikatsii matematicheskikh modelei"*. Proc. of the International Scientific Conference "Methods for creating, researching and identifying mathematical models". Novosibirsk, 2013: 38. [In Russian].

14. Imomnazarov Kh.Kh., Imomnazarov Sh.Kh., Korobov P.V., Kholmurodov A.E. Direct and inverse problem for nonlinear one-dimensional equations of poroelasticity. *Doklady Akademii Nauk*. Proc. of the Academy of Sciences, 2014, 455, 6: 640–642. [In Russian].

15. Imomnazarov Kh.Kh., Korobov P.V. Chislennoe reshenie odnoi nachal'no-kraevoi zadachi dlia nelineinoi odnomernoi sistemy porouprugosti. Numerical solution of one initial-boundary value problem for a nonlinear one-dimensional system of poroelasticity. *Tezisy V mezhdunarodnoi molodezhnoi nauchnoi shkoly-konferentsii "Teoriia i chislennye metody resheniia obratnykh i nekorrektnykh zadach"*. Proc. of the V international youth scientific school-conference "Theory and numerical methods for solving inverse and ill-posed problems". Novosibirsk: Siberian Scientific Publishing House, 2013: 41. [In Russian].

16. Samarskii A.A., Gulin A.V. Chislennye metody. Numerical methods. Moscow: Science, 1989: 432 p. [In Russian].

17. Samarskii A.A., Gulin A.V. Ustoichivost' raznostnykh skhem. Stability of difference schemes. Moscow: Science, 1973: 415 p. [In Russian].

Уважаемые авторы!

Обращаем ваше внимание на то, что с января 2018 года изменились требования к статьям, направляемым в редакцию журнала для рассмотрения возможности их публикации. Это связано с тем, что перед журналом поставлена задача войти в международную базу цитирования данных *Scopus*. В связи с этим ужесточились требования к содержанию и структуре англоязычных аннотаций к статьям, подписям к рисункам, благодарностям. Очень важные изменения коснулись оформления библиографических описаний. Помимо основного списка литературы необходимо подготовить *References* — список литературы, оформленный по правилам международных баз цитирования. Обращаем Ваше внимание, что оба списка формируются не в алфавитном порядке в соответствии с отечественными нормативными документами, а по мере упоминаний в тексте статьи. Будьте внимательны, ссылки в списках оформляются по-разному. Ссылка на документ с подробным описанием требований к статьям приведена в конце настоящих правил.

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ ЖУРНАЛА «ПРОБЛЕМЫ АРКТИКИ И АНТАРКТИКИ»

Журнал рассматривает для публикации научные статьи по основным направлениям исследований в полярных областях Земли: океанологии, физике атмосферы и гидросферы, метеорологии и климатологии, гидрологии суши и гидрохимии, гляциологии и криологии, геоморфологии и эволюционной географии, ледотехники, геологии и геофизике. Также представляют интерес работы по экологии, биоценологии и биогеографии, социальной географии и социальной антропологии, исследующих изменения в полярных регионах.

В издании публикуются новые результаты научных исследований, а также научные сообщения теоретического, методического, экспериментального и прикладного характера, тематические обзоры (по заказу редакции), критические статьи, очерки по истории полярных исследований и краткие сообщения, посвященные памятным датам (по заказу редакции). Все статьи проходят двойное анонимное рецензирование.

Тексты статей должны быть на русском или английском языке. Автор(ы) статьи должны подтвердить, что эта статья ранее не была опубликована, а также не представлена для рассмотрения и публикации в другом журнале.

Все материалы представляются в редакцию в электронном виде в сопровождении бумажной версии текста, рисунков (см. требования к рисункам) и файла с полными сведениями об авторах: фамилия, имя и отчество (полностью), место работы (полный адрес), ученая степень, должность, адрес электронной почты и телефон одного из авторов для связи. Рекомендуемый объем статей — от 8 до 20 страниц текста (через 1,5 интервала), включая таблицы и список литературы; рисунков не более 6. Текст набирается в формате Microsoft Word. Параметры набора: шрифт Times New Roman, кегль 12, интервал 1,5. Страницы в статье нумеруются. Статьи проходят двойное рецензирование.

Статьи оформляются следующим образом. Сначала дается УДК; затем на русском языке — название статьи, инициалы и фамилии всех авторов (при указании авторов статьи сначала идут инициалы, затем фамилия. Инициалы и фамилия разделяются пробелом), полное название организации(ций), где выполнена работа; электронный адрес автора, ответственного за связь с редакцией. Затем те же сведения приводятся на английском языке: заглавие, авторы, учреждения, второй раз e-mail главного автора. После этого на английском языке пишутся ключевые слова в соответствии с английским алфавитом (не более 10 слов и не более двух слов в сочетаниях) и авторское Summary статьи на 20–25 строк (здесь же для контроля обязательно прилагается перевод Summary на русский язык).

Ключевые слова должны отражать основное содержание статьи, повторять термины из текста статьи и по возможности не повторять термины заглавия; следует помнить, что эти слова должны облегчить поиск статьи средствами информационно-поисковой системы.

Summary должно быть понятно без обращения к самой публикации как независимый от статьи источник информации. Оно должно отвечать следующим критериям: информативности (не содержать общих слов); содержательности (отражать основное содержание статьи: задачи работы, методы, главные результаты исследований); последовательности изложения. Перевод Summary на английский язык должен быть выполнен качественно, с использованием англоязычной специальной терминологии, не быть дословным переводом русскоязычной версии (при необходимости следует также включать пояснения для иностранного читателя, связанные со спецификой исследований).

Далее продолжается информация на русском языке: ключевые слова в соответствии с русским алфавитом (не более 10), краткая аннотация (7–10 строк) (без перевода на английский) — и начинается текст статьи.

Для статьи, представляемой на английском языке, требуются: УДК; перевод на русский язык всей информации, которая дается перед началом статьи в журнале. Кроме того, в конце статьи необходимо привести расширенный русский реферат (1–1,5 стр.), а в подписях к рисункам дать их перевод на русский язык.

Основной текст разбивается на разделы. Обычно это введение, постановка проблемы, методика исследований, результаты исследований, обсуждение результатов, заключение (выводы). В конце статьи можно поместить благодарность лицам, оказавшим помощь в подготовке статьи, и необходимо указать источник финансовой поддержки, способствовавший выполнению этой работы (гранты фондов, программы и т.д.). Благодарности и ссылки на гранты или темы даются на русском, а затем на английском языке (Acknowledgments).

Подписи под рисунками даются к каждому рисунку в соответствии с его расположением в тексте: сначала на русском (Рис. 1. Далее подпись), а потом на английском языке (Fig. 1. Figure caption). В подписях необходимо отделять собственно название рисунка от объяснений к нему (экспликация), которые надо давать с новой строки.

Рисунки и фотографии помещают в отдельных файлах: для растровых изображений в растровых форматах JPEG/TIFF/PSD, и в векторных — CDR (версии X6 и старше) или AI (не допускаются рисунки в формате Word). Разрешение растровых изображений в оттенках серого и RGB-цвет должно быть 300 dpi. Все словесные надписи на рисунках даются только на русском языке. Все условные знаки обозначаются цифрами (курсивом) с обязательной расшифровкой в подрисуночных подписях, где они также обозначаются курсивом. Цифры можно ставить и на линиях графиков. На графиках все шкалы обязательно подписываются и указывается размерность величин.

Таблицы. Для больших таблиц следует использовать альбомную разметку страницы. Таблицы и графы в них должны иметь заголовки, сокращения слов в таблицах не допускаются. Таблицы набираются, как и текст, в формате Word шрифтом 9 пт. Примечания внутри таблицы не даются. Используются сноски ко всей таблице или отдельным ее показателям.

В тексте следует давать ссылки на все рисунки и таблицы. При первой ссылке — рис. 1, табл. 1; при повторных — см. рис. 1, см. табл. 1. Если в тексте дается одна таблица или один рисунок, то ссылки в тексте приводятся следующим образом: при первой ссылке — (таблица), (рисунок); при повторной ссылке — (см. таблицу), (см. рисунок).

Математические обозначения, символы и простые формулы набираются основным шрифтом статьи, сложные формулы — в программе MathType (или в версиях Word до 2007 года включительно). Нумеруются только те формулы, на которые есть ссылки в тексте. Русские и греческие буквы в формулах и тексте, а также химические элементы набираются прямым шрифтом, латинские буквы — курсивом. Аббревиатуры в тексте, кроме общепринятых, не допускаются.

В списке литературы (под заголовком «Список литературы») ссылки на литературу нумеруются последовательно, в соответствии с порядком их первого упоминания в тексте. Приводятся только опубликованные работы. Ссылки по тексту даются в квадратных скобках на номера списка, через запятую с пробелом: [1, 7, 23–27]. Статья должна содержать ссылки на все работы, приведенные в списке литературы. Обращаем внимание на недопустимость включения в список литературы изданий, выпущенных без ISSN- или ISBN-кодов (этим часто грешат сборники материалов конференций (тезисы или доклады)).

Далее прилагается второй список литературы (References). В списке на латинице строго сохраняются те же последовательность и нумерация источников, что и в «традиционном» списке. Ссылки на иностранные источники приводятся в обоих списках литературы.

Статьи, не соответствующие указанным требованиям, рассматриваться не будут. При работе над рукописью редакция по согласованию с автором вправе ее сократить. Автор, подписывая статью и направляя ее в редакцию, тем самым передает авторские права на издание этой статьи журналу «Проблемы Арктики и Антарктики/ Arctic and Antarctic Research».

Редакция извещает авторов о возможной выборочной проверке присланных для публикации статей в системе «Антиплагиат».

Редакционная коллегия не вступает в дискуссии с авторами по поводу принимаемых ею решений.

Более полные сведения по оформлению статьи приведены в документе «Требования к оформлению статей, присылаемых в журнал Проблемы Арктики и Антарктики». Он размещен странице журнала по адресу: http://www.aarj.ru/misc/publicat/req_pub_aanii_.pdf и обязателен для ознакомления при подготовке материалов статьи.

Подписано в печать 19.09.2018
Формат 70×100 1/16
Тираж 200

Печать цифровая
Печ. л. 6,5
Заказ № 2100

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