

Вестник Российского фонда фундаментальных исследований

№ 3–4 (107–108) июль–декабрь 2020 года

Основан в 1994 году

Зарегистрирован Комитетом РФ по печати, рег. № 012620 от 03.06.1994

Сетевая версия зарегистрирована Роскомнадзором, рег. № ФС77-61404 от 10.04.2015

Учредитель

Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Российский фонд фундаментальных исследований»

Главный редактор В.Я. Панченко,
заместители главного редактора В.В. Квардаков и В.Н. Фридлянов

Редакционная коллегия:

В.П. Анаников, В.Б. Бетелин, К.Е. Дегтярев, И.Л. Еременко,
В.П. Кандидов, П.К. Кашкаров, В.П. Матвеев, Е.И. Моисеев,
А.С. Сигов, В.А. Ткачук, Р.В. Петров, И.Б. Федоров, Д.Р. Хохлов

Редакция:

Е.Б. Дубкова, И.А. Мосичева

Адрес редакции:

119334, г. Москва, Ленинский проспект, 32а

Тел.: (499) 995-16-05

e-mail: pressa@rfbr.ru



Russian Foundation for Basic Research Journal

N 3–4 (107–108) July–December 2020

Founded in 1994

Registered by the Committee of the Russian Federation for Printed Media, 012620 of 03.06.1994 (print)

Registered by the Roskomnadzor FS77-61404 of 10.04.2015 (online)

The Founder

Federal State Institution

“Russian Foundation for Basic Research”

Editor-in-Chief V. Panchenko,

Deputy chief editors V. Kvardakov and V. Fridlyanov

Editorial Board:

V. Ananikov, V. Betelin, K. Degtyarev, I. Eremenko,
V. Kandidov, P. Kashkarov, V. Matveenko, E. Moiseev,
A. Sigov, V. Tkachuk, R. Petrov, I. Fedorov, D. Khokhlov

Editorial Staff:

E. Dubkova, I. Mosicheva

Editorial Address:

32a, Leninskiy Ave., Moscow, 119334, Russia

Tel.: (499) 995-16-05

e-mail: pressa@rfbr.ru

«Вестник РФФИ»

№ 3–4 (107–108) июль–декабрь 2020

КОЛОНКА ТЕМАТИЧЕСКОГО РЕДАКТОРА

О редакторе тематического блока, академике, докторе географических наук Г.Г. Матишове	6
Аннотация к тематическому блоку	10
<i>Г.Г. Матишов</i>	

ТЕМАТИЧЕСКИЙ БЛОК:
АНТАРКТИДА И АРКТИКА: ПОЛЯРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Современные тенденции в исследовании Северного Ледовитого океана (климат, промысловая океанология, радиоактивность)	15
<i>Г.Г. Матишов</i>	
Исследование динамики и морфометрии ледников и айсбергов и прикладное использование полученных результатов при освоении углеводородных месторождений на континентальном шельфе Российской Арктики	21
<i>И.В. Бузин, А.Ф. Глазовский, Р.И. Май, Е.У. Миронов, А.В. Нестеров, А.К. Наумов, Ю.П. Гудошников</i>	
Периферийная инновационная система и ее место в процессе освоения ресурсов российской Арктики.	38
<i>А.Н. Пилясов, Е.С. Путилова</i>	
ФГБУ «ААНИИ». Геофизические исследования в высоких широтах.	60
<i>А.С. Калишин, Н.Ф. Благовещенская, О.А. Трошичев, А.В. Франк-Каменецкий</i>	
Шестьдесят лет исследований в Центральной Антарктиде.	79
<i>В.М. Котляков</i>	
Российские экспедиции XIX века в Южном океане и их научное значение	90
<i>С.А. Добролюбов</i>	
Основные результаты исследований Арктического и антарктического НИИ Росгидромета в Антарктике	99
<i>А.А. Екайкин, Н.Н. Антипов, Д.Ю. Большаков, С.Р. Веркулич, Б.В. Иванов, А.В. Клепиков, В.Я. Липенков, А.С. Макаров, В.Ф. Радионов, И.В. Федорова, И.Е. Фролов</i>	
Поток Антарктической донной воды в абиссальных каналах Атлантики.	119
<i>Е.Г. Морозов</i>	

"RFBR JOURNAL"

№ 3–4 (107–108) July–December 2020

THEMED ISSUE EDITOR COLUMN

About the Editor of the Themed Section RAS Academician, Doctor of Geographical Sciences G.G. Matishov	6
Abstract of the Themed Section	10
<i>G.G. Matishov</i>	

THEMED SECTION: ANTARCTICA AND ARCTIC: POLAR RESEARCH

Current Trends in the Study of the Arctic Ocean (Climate, Fishery Oceanology, Radioactivity)	15
<i>G.G. Matishov</i>	
Study of Dynamics and Morphometry of Glaciers and Icebergs and Application of the Results for the Development of the Hydrocarbon Deposits on the Continental Shelf of the Russian Arctic	21
<i>I.V. Buzin, A.F. Glazovsky, R.I. May, E.U. Mironov, A.V. Nesterov, A.K. Naumov, Yu.P. Gudoshnikov</i>	
Peripheral Innovation System and Its Place in the Development of the Russian Arctic Resources	38
<i>A.N. Pilyasov, E.S. Putilova</i>	
AARI. Geophysical Investigations at High Latitudes	60
<i>A.S. Kalishin, N.F. Blagoveshchenskaya, O.A. Troshichev, A.V. Frank-Kamenetsky</i>	
Sixty Years of Research in Central Antarctica	79
<i>V.M. Kotlyakov</i>	
Russian Expeditions of the 19 th Century in the Southern Ocean and Their Scientific Significance	90
<i>S.A. Dobrolyubov</i>	
The Main Results of Roshydromet's Arctic and Antarctic Research Institute Investigations in Antarctica	99
<i>A.A. Ekaykin, N.N. Antipov, D.Yu. Bolshiyarov, S.R. Verkulich, B.V. Ivanov, A.V. Klepikov, V.Ya. Lipenkov, A.S. Makarov, V.F. Radionov, I.V. Fedorova, I.E. Frolov</i>	
Antarctic Bottom Water Flow in the Abyssal Channels of the Atlantic	119
<i>E.G. Morozov</i>	



О редакторе тематического блока, академике, докторе географических наук Геннадии Григорьевиче Матишове



- *Научный руководитель Федерального исследовательского центра «Южный научный центр РАН», Мурманского морского биологического института РАН*
- *Руководитель секции океанологии, физики атмосферы и географии Отделения наук о Земле Российской академии наук*
- *Член Президиума Российской академии наук*
- *Главный редактор журналов: «Наука юга России», «Экология. Экономика. Информатика. Серия: Геоинформационные технологии и космический мониторинг»*
- *Член редакционных коллегий журналов по тематике выпуска: «Проблемы Арктики и Антарктики», «Доклады Российской академии наук. Науки о Земле», «Известия Российской академии наук. Серия географическая», «Арктика: экология и экономика», «Морской гидрофизический журнал»*

Государственные награды, звания и премии

- *Орден Дружбы (2016)*

- *Scientific Director of FRC “Southern Scientific Center”, RAS, and Murmansk Marine Biological Institute, RAS*
- *Head of the RAS Section of Oceanology, Physics of Atmosphere, and Geography of the Department of Earth Sciences*
- *Member of the Presidium of the Russian Academy of Sciences*
- *Editor-in-Chief of the scientific journals: “Nauka Yuga Rossii [Science in the South Russia]”, and “Ecology. Economy. Informatics. Series: Geo-Information Technologies and Space Monitoring”*
- *Member of the editorial boards of journals related to the thematic issue: “Problems of the Arctic and the Antarctic”, “Doklady Earth Sciences”, “Regional Research of Russia”, “Arctic: Ecology and Economy”, “Physical Oceanography”*

Honours and awards

- *Order of the Friendship (2016)*

- Орден «За заслуги перед Ростовской областью» (2014)
- Почетная грамота Администрации Президента Российской Федерации (2014)
- Благодарность Председателя Совета Федерации Федерального Собрания Российской Федерации (2013)
- Орден «За заслуги перед Отечеством» IV степени (2010)
- Орден «За морские заслуги» (2004)
- Орден Почета (1999)
- Орден «Знак Почета» (1986)

Профессиональные награды и премии

- Премия РАН им. С.О. Макарова за цикл работ «Использование морских млекопитающих в служебных целях» (2017)
- Золотая медаль им. Литке Русского географического общества (2015)
- Медаль «За морские заслуги в Арктике» (2014)
- Нагрудный знак «Почетный полярник» (2010)
- Премия РАН им. О.Ю. Шмидта за цикл работ по теме «Палеогеография, экология, биология и океанография арктических морей» (2007)
- Премия Правительства России в области науки и техники за разработку, научное обоснование и внедрение прогрессивных технологий для создания эколого-геологических основ природопользования Западно-Арктического шельфа России (2005)
- Юбилейная медаль «300 лет Российскому Флоту» (1996)

- State Prize of Order “Order «For Merits for Rostov Region»” (2014)
- The Russian Federation Presidential Administration Certificate of Honour (2014)
- The Letter of Gratitude from the Chairman of the Federation Council of the Federal Assembly of the Russian Federation (2013)
- Order “For Merit for the Motherland”, 4th Class (2010)
- Order “For Maritime Services” (2004)
- Order of Honour of the Russian Federation (1999)
- Order of the Badge of Honour (1986)

Professional Honours and awards

- S.O. Makarov Prize of RAS for a series of works on Marine Mammals Training and Management (2017)
- F.P. Litke Golden Medal of the Russian Geographical Society (2015)
- Medal “For Maritime Services in the Arctic” (2014)
- Badge “Honorary Polar Explorer” (2010)
- O.Yu. Shmidt Prize of RAS for a series of works on the Paleogeography, Ecology, Biology, and Oceanography of the Arctic Seas (2007)
- The Government of the Russian Federation Prize in the sphere of Science and Technologies for the development, scientific justification, and introduction of progressive technologies for the development of ecological-geological grounds of nature exploitation on the Western Arctic shelf of Russia (2005)
- Medal “300 Years of the Russian Navy” (1996)

Геннадий Григорьевич Матишов родился 1 января 1945 года в пос. Преображение на берегу бухты Преображение Приморского края в семье военнослужащих. В 1967 г. окончил Ростовский го-

сударственный университет (РГУ) по специальности «географ-геоморфолог». В студенческие годы он был учеником одного из ведущих советских ученых в области геоморфологии Мирового океана – профессора Дмитрия Геннадьевича Панова. В 1967 г. Г.Г. Матишов поступил в заочную

избран руководителем Секции океанологии, физики атмосферы и географии Отделения наук о Земле РАН.

Благодаря высокому авторитету, академик Г.Г. Матишов входит в состав целого ряда государственных и научных координационных, межведомственных и экспертных советов.

About the Editor of the Themed Section RAS Academician, Doctor of Geographic Sciences Gennady Grigoryevich Matishov

Gennady Grigoryevich Matishov was born on January 1st, 1945, in the settlement of Preobrazhenie on the coast of the Preobrazhenie Bay in Primorsky Krai (Maritime Territory) of the USSR in the military family. In 1967, he graduated as a geographer-geomorphologist from Rostov State University in Rostov-on-Don. Being a student, he was taught by one of the leading Soviet researchers on the World Ocean geomorphology – Professor Dmitry Gennadyevich Panov. In 1967, G.G. Matishov entered the PhD-School of Rostov State University. After doing his military service, he worked at Nikolai Knipovich Polar Research Institute of Marine Fisheries and Oceanography (PINRO) as a junior researcher of the Laboratory of the Sea Geology. In January 1973, he successfully defended his PhD Thesis on the geomorphology of the continental slope of the Norwegian-Greenland Basin and the North-Western Atlantic. From 1973 to 1979, G.G. Matishov headed the Marine Geology Laboratory of PINRO.

In December 1980, he defended his second doctor's thesis at the Lomonosov Moscow State University on the glacial and periglacial relief of the ocean bed, related to the paleo-oceanology issues, the issues of marine biogeography and oceanic fisheries. In June 1981, G.G. Matishov was appointed as Director of Murmansk Marine Biological Institute (MMBI) of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences.

Under the leadership of G.G. Matishov, MMBI has become one of the leading centres of basic and applied

studies in the Arctic. The institute conducts integrated studies of ecosystems of the Western Arctic seas and coastal areas, and implemented a series of important developments, which have been successfully applied to maritime economic activities, as well as to solve defense tasks. Among them, the ecological accompaniment of large oil and gas projects on the Arctic shelf, biotechnologies of protection of marine environment from anthropogenic pollution, methods to train and manage marine mammals to ensure the safety of marine constructions and underwater operations may be noted.

These research results were acknowledged by the academic milieu, and Gennady Matishov was elected as Corresponding Member RAS in 1990 and as full RAS Academician in 1997.

G. Matishov's research activities focus on marine sciences and practices, including the development of biotechnical systems, radiation monitoring, theory of marine ecosystem analysis, studying the underwater topography and hydrography. He developed a principally new concept of marine exogenic processes during the glaciation period; developed an original model of the Quaternary glaciation in the Barents-Kara Seas Region. G. Matishov contributed greatly to the development of climatology and bio-oceanology, particularly to the study of fish productivity and current status of the Arctic and southern European Russian seas, development of prognostic models of evolution of the polar and arid ecosystems; creation of the "large marine ecosystems" theory, which considers the natural processes as the entity of marine environment and biota and takes into account the combination of external climatic and anthropogenic impacts. His research results were published as numerous books and papers in influential and highly rated scientific journals.

In the second half of the 1990s, innovative activities on data archiving and preservation (quality control technology, unification of storage formats, etc.) were initiated and headed by G.G. Matishov. An information technology was developed, which was the basis for the formation of an integrated oceanological (meteorological, hydrological, hydro-chemical, hydro-biological, ichthyologic, or-

Тематика номера вызвала большой отклик среди специалистов. В редакцию поступило количество публикаций, превышающее размер одного выпуска, поэтому было принято решение посвятить данной проблематике два номера журнала.

В текущий выпуск вошли восемь обобщающих статей, подготовленных по данным многолетних наблюдений как в Арктике, так и в Антарктиде ведущими учеными Арктического и антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ), Мурманского морского биологического института (ММБИ РАН), Южного научно-го центра (ЮНЦ РАН), Института океанологии (ИО РАН), Института географии (ИГ РАН), Московского и Санкт-Петербургского государственных университетов (МГУ и СПбГУ) и др.

Блок, посвященный исследованиям в Арктике, открывает статья академика Г.Г. Матишова «Современные тенденции в исследовании Северного Ледовитого океана (климат, промысловая океанология, радиоактивность)», в которой рассмотрены состояние и перспективы исследований Северного Ледовитого океана в контексте климатических изменений. Для достижения целей, поставленных Морской доктриной Российской Федерации и Стратегией развития Арктической зоны России, необходима оптимизация фундаментальных и прикладных исследований в Арктике. В статье особое внимание уделено работам члена-корреспондента РАН Д.Г. Матишова по направлению «радиационная экологическая океанология».

Вопросы распространения айсбергов в морях Российской Арктики и их влияния на осуществление проектов освоения шельфа рассмотрены к. г. н. И.В. Бузиным и его коллегами в статье «Исследование динамики и морфометрии ледников и айсбергов и приклад-

ное использование полученных результатов при освоении углеводородных месторождений на континентальном шельфе Российской Арктики». Приведены оценки основных морфометрических параметров айсбергов, показано существующее различие между айсбергами, образовавшимися от ледников Земли Франца-Иосифа / Северной Земли и Новой Земли. Рассмотрен результат моделирования ситуации 2002–2003 гг. в Баренцевом море (вынос большого количества айсбергов в центральную часть моря на акваторию перспективного месторождения углеводородов). Приведен пример расчета айсберговой опасности Карского моря с помощью моделирования генерации айсбергов методом Монте-Карло с последующим численным моделированием их пространственного распределения.

В статье профессора д. г. н. А.Н. Пилясова и Е.С. Путиловой дано понятие периферийной инновационной системы в контексте процесса освоения природных ресурсов Арктики. На примере анализа патентной активности ПАО «НОВАТЭК» и ПАО «ГМК "Норильский никель"» продемонстрированы различия арктических компаний в стратегиях добывания нового знания. Пики патентной активности, как правило, предваряют развертывание проектов нового ресурсного освоения Арктики. Важнейшим институциональным противоречием в работе периферийной инновационной системы и во всем процессе хозяйственного освоения ресурсов Арктики является несоответствие унифицированных федеральных норм и правил специфичным условиям Арктики.

Среди представленных материалов – обзор ведущего сотрудника ААНИИ к. т. н. А.С. Калишина с соавторами «ФГБУ "ААНИИ"». Геофизические исследования в высоких широтах», представляющий результаты геофизических исследований, полученные специалистами ААНИИ как в Арктике, так и в Антарктике. Результаты базируются на оперативных данных наземных наблюдений и направлены на изучение механизмов солнечно-земных связей и искусственного воздействия мощного КВ-радиоизлучения на ионосферную плазму с целью снижения негативных последствий эффектов космической погоды на среду обитания человека.

Блок, посвященный исследованиям в Антарктиде, открывает статья академика В.М. Котлякова «Шестьдесят лет исследований в Центральной Антарктиде». Как следует из названия, в работе кратко описаны история исследований на станции «Восток», в том числе открытие подледного озера в районе станции. Усилиями трех стран (России, Франции и США) были выполнены ком-



of information about hydrological parameters of near-water layer of atmosphere and sea surface layer for a long while, have almost been stopped.

The changes in hydrological and ice conditions are of utmost importance for the Arctic Ocean seas and coast, as marine ecosystems' health and life, their bio-resources' potential, shipping along the Northern Sea Route, availability of oil and gas shelf resources and economic efficiency of their exploitation and development depend on these changes. Nowadays, the ice cover conditions over vast territories are assessed being almost entirely based on satellite observations, which are not always specific, especially in the coastal areas.

The Arctic is a concentration point of geopolitical, defence, economic, and research interests of both the Arctic states and countries without borders in the Arctic and outside the Arctic Region. These aspects are extremely important for Russia, which is the largest Arctic state and which has jurisdiction over more than 70% of the Arctic shelf. Nowadays, a more qualitative analysis and expert assessment of accumulated materials and data are required.

When working on the thematic issue of "RFBR Journal" ("Russian Foundation for Basic Research Journal"), we had two specific goals in mind. The first one is to attract attention of scientists and public to the problems of the Arctic and the Antarctic, and the second one was and is to indicate the priority position of the Russian scientists within several research directions in the high-latitude areas.

The theme of the journal issue caused fast, vivid and intense reaction and respond of the specialists. The number of papers submitted to the editorial board and office for publication has exceeded the size of the issue; that is why we made the decision to publish two thematic issues of the journal focusing on the considered problems.

The current issue introduced to the readers' perusal contains eight review papers, based on data of long-term observations both in the Arctic and the Antarctic, by the leading researchers from the Arctic and Antarctic Research Institute (AARI), RAS Murmansk Marine Biological Institute (MMBI RAS), RAS Southern Scientific Centre (SSC RAS), RAS Institute of Geography (IG RAS), RAS Institute of Oceanology (IO RAS), Moscow State University (MSU), St. Petersburg State University (SPbSU), etc.

The opening paper of the section on the Arctic studies is the "Current Trends in the Study of the Arctic Ocean (Climate, Fishery Oceanology, Radioactivity)" by Academician G.G. Matishov, who considers the state and prospects of the Arctic Ocean studies in the context of climatic changes. To reach the goals set by the Maritime Doctrine of the Russian Federation and the Strategy of Development of the Arctic Zone of the Russian Federation, it is necessary to optimize the basic and applied research in the Arctic. Particular attention in the paper is paid to the works on radiation ecological oceanology by RAS Corresponding Member D.G. Matishov.

PhD in Geography I.V. Buzin and his colleagues consider the issues related to icebergs distribution in the Russian Arctic seas and their impact on the implementation of shelf development projects in their paper "Study of Dynamics and Morphometry of Glaciers and Icebergs and Application of the Results for the Development of the Hydrocarbon Deposits on the Continental Shelf of the Russian Arctic". Assessments of icebergs' main morphometric parameters are given; existing difference between the icebergs originated from the glaciers of the Franz Josef Land / Severnaya Zemlya and the Novaya Zemlya is indicated. The results of modelling of the situation of 2002–2003 in the Barents Sea (transportation-inflow of a large amount of icebergs to the central part of the sea to the water area of a promising hydrocarbon deposits field) are considered. An example is given of calculating the iceberg hazards in the Kara Sea applying the Monte Carlo simulation of icebergs generation with subsequent numerical modelling of their spatial distribution.

The paper by Professor, Doctor of Technical Sciences A.N. Pilyasov and E.S. Putilova gives the notion of peripheral innovative system in the context of exploitation process of the Arctic natural resources. Analyzing the case of the PJSC "NOVATEK" and PJSC "GMK Norilskiy Nikel" (MMC "Norilsk Nickel") patent activities, the authors demonstrate the differences the arctic companies have when it comes to the strategies of new knowledge obtaining. The peaks of patent activity, as a rule, precede the initiation and



implementation of projects focusing on the new stage of the Arctic resources' development and exploitation. The most significant institutional contradiction in the functioning of the peripheral innovative system and the entire process of economic development of the Arctic resources is the inconsistency between the unified federal norms, standards, and regulations and the specific Arctic conditions.

Among the presented materials is a review by the leading researcher of the AARI, PhD in Engineering Sciences A.S. Kalishin *et al.* "AARI. Geophysical Investigations at High Latitudes", that introduces the results of geophysical studies, obtained by the AARI specialists in both the Arctic and the Antarctic. The results based on operational data of on-land observations aim at studying the mechanisms of solar-terrestrial links and artificial impact of powerful short-wave radiation on the ionospheric plasma to minimize the negative consequences of space weather effects and hazards on the human environment.

The opening paper of the section focusing on the Antarctic studies is by RAS Academician V.M. Kotlyakov entitled "Sixty Years of Research in Central Antarctica". As suggested by its name, the paper briefly describes the history of studies at Vostok Research Station, including the discovery of the sub-glacial lake in the area of the station. Integrated studies of the ice core sample were performed thanks to the efforts of three countries (Russia, France, and the USA) and unique information was obtained saying that the climate over the last 420 thousand years experienced constant fluctuations, which amplitude was within the ranges of stable boundaries of climatic variability. The paper also contains information about the current state of the Antarctic glacial cover.

In his paper "Russian Expeditions of the 19th Century in the Southern Ocean and Their Scientific Significance", RAS Corresponding Member S.A. Dobrolyubov considers the main research results of oceanographic studies within the Russian circumnavigation of the world – expeditions of the 19th century by Krusenstern and Lisiansky, Bellingshausen and Lazarev, Kotzebue and Lenz, and Makarov in the high latitude areas of the Southern Hemisphere. The instruments and technologies of measurements, applied for the first time in the world's research practices, are discussed. The author studies the evolution of views on the formation of ocean waters' meridional circulation based on the various published sources – from the works by Lenz and Makarov to the ones of our days.

The paper "The Main Results of Roshydromet's Arctic and Antarctic Research Institute Investigations in Antarctica" by AARI leading researcher, PhD in Engineering Sciences A.A. Ekaykin *et al.* contains a brief review of results of paleogeographic, glaciological, hydrological, climatic, meteorological, and oceanological studies implemented by the Arctic and Antarctic Research Institute of the Russian Hydrometeorological Service from the late 1950s to the present. Oceanological studies in the Southern Ocean seas resulted in obtaining sufficient and complete materials on the characteristics and structure of water masses on the shelf and continental slope as the reflection of the Antarctic bottom waters' formation processes. The assessments of their inter-annual variability, significant for the study of causes of current (observed) climatic changes, have been made as well.

The last but not the least paper of the thematic issue of the "RFBR Journal" is by IO RAS senior researcher, Doctor of Physics and Mathematics E.G. Morozov, and focuses on the studying of the Antarctic bottom water flows in and through the abyssal channels of the Atlantic. The generally high speeds and transfers characterize these flows. The bottom water is formed in the Weddell Sea and slowly spreads to the north, reaching the latitudes of Europe and filling several abyssal basins on its distribution way. The Discovery Gap is the terminal point area of the AABW distribution (AABW is considered as waters with the potential temperature values being lower than 2 °C).

The authors of the papers published in the current thematic issue of "RFBR Journal" represent the leading national scientific schools of the Arctic and the Antarctic research. Do hope that the materials presented in the thematic issue would interest a wide range of readers.

Современные тенденции в исследовании Северного Ледовитого океана (климат, промысловая океанология, радиоактивность)*

Г.Г. Матишов

Рассмотрены состояние и перспективы исследований Северного Ледовитого океана в контексте климатических изменений. Климатические и экологические сценарии на ближайшие десятилетия неоднозначны. Для морей и побережий Северного Ледовитого океана приоритетное значение имеют изменения гидрологических и ледовых условий, от которых зависят жизнедеятельность морских экосистем, их биоресурсный потенциал, условия навигации по Севморпути. Для достижения целей, поставленных Морской доктриной Российской Федерации и Стратегией развития Арктической зоны Российской Федерации, необходима оптимизация фундаментальных и прикладных исследований в Арктике.

Ключевые слова: климат, мониторинг, прогнозирование, радиоэкология, опасные явления.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-05-60249).

С начала 1960-х гг. в СССР, совместно с покорением космоса, началась грандиозная эпоха освоения рыбопромысловым и атомным флотом Мирового океана. Новые географические знания были необходимы для подводного плавания, поиска рыбы и тралового лова в океане, для ориентации при бурении и сейсмопрофилировании шельфа, добычи минеральных и биологических ресурсов Мирового океана. Именно в тот период советская и российская океанология начала стремительно набирать огромный массив данных, который мы и сейчас используем и анализируем в своих работах. В 1960-е – 1970-е гг. автором статьи, еще молодым специалистом, была подготовлена крупномасштабная (на 200 листах) батиметрическая карта северной части Мирового океана – от Азорских островов до Земли Франца-Иосифа. В своей работе я ушел от линейной экстраполяции данных эхолотирования дна и предложил новый метод геоморфологического дешифрования реальных (первичных) записей эхолота. Это позволило по-новому подойти

к проблеме эволюции Арктики в голоцене. В итоге родилась оригинальная концепция оледенения арктического морского шельфа [1–5] и было открыто явление океанического перигляциала с системой абиссальных каналов, по которым в результате таяния глыб материкового льда толщиной 2–4 км текли мощные мутьевые потоки, которые растекались густой «речной» сетью по материковому склону и далее выходили на абиссальные океанические равнины. Наша работа привела к кардинальному пересмотру этого явления как по времени действия, так и по его масштабу. Были даны новые оценки процессов осадконакопления, переработки и трансформации терригенного материала, что позволило уточнить время образования крупных элементов рельефа морского дна Мирового океана [1–5]. Созданная концепция позволила подчеркнуть значение рельефа морского дна для океанического рыболовства и дать практические рекомендации для рыбопромысловых судов [6].

С палеоклиматом ледниковых эпох связано происхождение глобальной циркуляции холодных вод на дне Мирового океана. О силе таких течений свидетельствуют абиссальные осадочные хребты высотой до 600 м, возникшие на глубинах 3–8 км. В океане и сейчас вокруг Антарктиды формируется глобальный поток холодных вод. Эта распресненная талая вода, растекающаяся по подводным каналам, и является индикатором океанического перигляциала. Отмечу, что моделей оледенения много, но суть одна: климат цикличен, глобальные потепления и похолодания повторяются. Это аксиома.



МАТИШОВ

Геннадий Григорьевич

академик, профессор,
научный руководитель «Федерального исследовательского центра Южный научный центр РАН»,
научный руководитель Мурманского морского биологического института РАН

Качество прогнозов погоды и климата прямо зависит от трех составляющих: сети первичных наблюдений, баз данных, математических моделей. В любых случаях фундаментом оперативной океанологии должен быть анализ базы данных за 100–200 лет и более. Завершаться работа должна оценкой ранее сделанных прогнозов. Это оградит нас от безответственных выводов. Сегодня предсказать изменчивость окружающей среды нереально. Крайне малая сеть метеостанций за Полярным кругом ведет к преобладанию умозрительных кабинетных расчетов и прогнозов. Но экономике нужны ориентиры, климатические шаблоны и временные циклы. В настоящее время существует объединенная база гидрометеоданных NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration – Национальное управление океанических и атмосферных исследований, США), где собраны мировые наблюдения, в том числе российские: Мурманского морского биологического института (ММБИ РАН), Южного научного центра (ЮНЦ РАН), Института океанологии (ИО РАН), Морского гидрофизического института (МГИ РАН), Арктического и антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ) и других научных организаций [7]. Необходимо ее пополнять и опираться на эти данные при моделировании и прогнозах. Как правило, анализ баз данных опирается на компьютерные технологии и специальные программы. По большому счету это верно. Но суть процессов кроется в деталях, понять которые может только опытный океанолог.

Много неизведанных явлений для подводного плавания и для военно-морской связи таят внутренние волны. Надо изучать предвестники плохой погоды и возможные индикаторы внутрисезонной аномальной погоды и климата. Айсберги – типичное явление Северного Ледовитого и Южного океана. Их дрейф слабо изучен. Уже более 100 лет обращает на себя внимание распространение айсбергов за пределами своих обычных границ.

Морской лед – один из важнейших индикаторов климата. В 1878 г. А.Э. Норденшельд на судне «Вега» прошел за лето от Стокгольма до Берингова пролива. И А.Э. Норденшельд, и челюскинцы, и многие другие проходили вдоль берегов Сибири в безледных условиях потепления. Сейчас стало ясно, что в Арктике три магистральных типа дрейфа морского льда. Это открытие специалисты ААНИИ сделали на базе 40-летнего ряда спутниковых зимних наблюдений с 1978 по 2019 г. Теперь важно реконструировать влияния разных перестроек полей дрейфа на межгодовые вариации ледовитости в Северном Ледовитом океане.

В начале XXI века, как и в 30-е годы XX века, в Арктике наблюдались потепление и масштабная деградация льда. В сентябре 2012 г. площадь льда в Северном Ледовитом океане сократилась до минимума за сто лет.

Эта фаза обусловлена мощной адвекцией тепла из Атлантики. Этот факт породил пропаганду о скором таянии арктических льдов. Однако в эти же годы экстремальные морозы и площади льда охватили южные моря России. В 2005–2008 гг., 2012–2013 гг. на Азовском и Каспийском морях возникли торосы и стамухи, типичные для Карского и Печерского морей. В 2012 г. впервые за 30 лет замерзли акватории порта в Махачкале, северная часть Черного моря и даже часть Средиземного моря (каналы Венеции). В Азовском море из-за торосов застряло во льдах до 100 судов, МЧС России проводило масштабную спасательную операцию.

Мы не поймем климат Арктики, если наряду с Северной Атлантикой не будем анализировать глобальные процессы в Сибири, Канаде, Беринговом море, Европе и на юге России. Важно понять взаимодействие морозных антициклонов с океаном зимой. Современная океанология и климатология обязаны обратить внимание на приоритеты науки и техники в интересах мореплавания по Севморпути (от Ямала до Чукотки). На эти задачи нас нацеливают государственные стратегии и национальные проекты.

Морская геология как часть океанологии становится фундаментальной наукой только тогда, когда ориентируется на глубоководное бурение. Более плодотворный метод решения задач современного климата заключается в анализе климатов прошлых геологических эпох, то есть палеоклимата, природные условия которого могли быть похожими на предполагаемую обстановку будущего. К сожалению, в нашем отечестве глубоководных буровых судов нет, а сейсмопрофилирование дна, даже самое модное, дает неполную картину.

Еще одна перспектива современной океанологии – поиск морских биоресурсов, как это делают Япония, Норвегия и даже внутриконтинентальная Польша в водах Южного океана у кромки льдов Антарктиды [8]. Сегодня в мировом улове криль составляет 9 млн тонн, а потенциальные

запасы – порядка 1 млрд тонн. Россия в этом процессе освоения запасов криля занимает скромное место – менее 1% добычи.

Важно и дальше проводить оценку радиоактивного состояния морских вод России. С конца 1980-х годов коллективы нескольких научных организаций целенаправленно работали в местах базирования атомного флота, на старом ядерном полигоне в губе Черной, в месте гибели АПЛ «Курск» и «Комсомолец», а также на Азовском и Черном морях. Наши исследования показали, что в настоящее время содержание цезия и стронция в водах российской Арктики находится на минимальном уровне за всю историю инструментальных наблюдений [9–10].

В исследовании радиоактивности Арктики важно помнить о вкладе всех ученых – и живых, и ушедших из жизни. Мне хотелось бы несколько слов сказать о работах члена-корреспондента РАН Д.Г. Матишова. Его первые исследования были направлены на определение уровней загрязнения цезием и стронцием морской воды и донных отложений в различных районах Баренцева, Карского и Северного морей. Было выявлено, что наибольшие концентрации радионуклидов приурочены к местам испытаний атомного оружия, базам атомного военного флота, а также к западной границе Баренцева моря [11–17]. Другой вектор исследования Д.Г. Матишова был связан с определением радиоактивных элементов в биоте. И если ранее российские и зарубежные исследователи основное внимание уделяли только высшим звеньям арктической экосистемы (рыбам, птицам, морским млекопитающим), то Д.Г. Матишов первым обратил внимание на особенности накопления радиоэлементов в первичном и вторичном звене морской экосистемы (бентосе, планктоне, мелких промысловых рыбах). Конечно, указанные исследования увязывались с исследованиями уровней загрязнения и в высших звеньях экосистемы

[18]. Именно такой подход позволил снять большую часть вопросов, связанных с переносом и накоплением радиоактивных элементов по арктическим пищевым цепям, ранее казавшихся неясными и туманными. Опыт, полученный на Севере, был успешно применен в южных морях России; в фокус исследований попало Азовское море, во многом сходное с Кольским заливом (похожая организация эстуарной экосистемы) [19–20], но обойденное вниманием специалистов со времен Чернобыльской катастрофы. В конце 1980-х – начале 1990-х гг. основные радиоэкологические исследования проводились в северо-западной части Черного моря, которая является своеобразным эстуарием крупнейших рек Европы – Днепра и Дуная [21].

Указанные работы в северных и южных морях позволили Д.Г. Матишову сформировать обширную базу данных по содержанию ^{137}Cs и ^{90}Sr в морской среде и биоте. «Скучные» цифровые данные были визуализированы с помощью ГИС-методов и атласных технологий, были построены многочисленные карты и математические модели, позволяющие понять пространственное распределение радиоэлементов в морской среде и биоте.

Концепция, разработанная Д.Г. Матишовым, продолжает совершенствоваться. Так, недавно был проведен сравнительный анализ многолетней динамики содержания и спектра техногенных радионуклидов в донных отложениях арктического шельфа [22–23]. По архивным и современным данным оценено радиоактивное загрязнение губ и заливов арктических морей, показан низкий современный уровень удельной активности ^{137}Cs и ^{90}Sr в поверхностном слое донных отложений. Максимальное накопление изотопов наблюдалось в глубоководных частях желобов, где в составе осадков преобладает глинистая фракция. Выявлено, что в 2012–2018 гг. радиоактивность осадков побережья была выше, чем в открытых районах Баренцева моря, где региональные отличия несущественны. Наиболее загрязнены расположенные близко к источникам загрязнения заливы Кольский (губа Пала, район ФГУП «Атомфлот») и Мотовский (губы Западная Лица, Андреева) в Баренцевом море и Енисейский залив в Карском море. В губах южной части Баренцева моря ^{137}Cs содержится в концентрации 1.5–3.0 Бк/кг; ^{90}Sr – 0.6–1.9 Бк/кг. В ледовитых фьордах Шпицбергена, где наблюдается разгрузка талых ледниковых вод и сход айсбергов, концентрация ^{137}Cs возрастает до 3.0–6.5 Бк/кг, а ^{90}Sr составляет 2.6–3.0 Бк/кг. Доказано, что перенос атмосферных радионуклидов, накопленных многолетним морским льдом в «ядерную» эпоху, может являться вторичным источником загрязнения моря. Определено, что значительное снижение уровня радиационной загрязненности донных отложений в Баренцево-Карском регионе в XXI веке и сглажива-

ние пространственных градиентов концентрации техногенных радионуклидов не снимает вопросов современных исследований в связи с изменениями факторов загрязнения и возрастающим интересом к освоению арктических экосистем.

Показано, что основу спектра техногенных радионуклидов в водах арктических морей составляют изотопы ^{137}Cs и ^{90}Sr [23]. Охарактеризованы особенности формирования фона этих радионуклидов в Баренцево-Карском морском регионе. По данным исследований 2017–2018 гг. выявлено, что в губах Мурманского побережья (Ивановская, Териберская, Зеленецкая, Ярнышная, Порччиха) и Кольского залива (губы Тоня, Белокаменная, районы мысов Ретинский, Мишуково, Абрам) концентрации ^{137}Cs соответствовали уровню загрязненности вод прибрежного течения Баренцева моря и варьировали от 1.3 до 2.5 Бк/м³. В восточной части Баренцева моря – в районе Центральной впадины, Западно-Новоземельского, Гусиного, Новоземельского желобов, Северо-Восточного плато содержание ^{137}Cs в воде не превышало 1–2 Бк/м³. Концентрация ^{90}Sr в водах Баренцева моря составляла 0.4–3.7 Бк/м³. В Карском море наиболее загрязнены изотопами ^{137}Cs и ^{90}Sr поверхностные воды прибрежной зоны южной и юго-западной частей (по сравнению с северной частью). Выявлено, что в современный период характерен низкий уровень загрязнения воды, рыб, водорослей-макрофитов и донных беспозвоночных Баренцева моря. Наблюдается стабильное уменьшение концентраций техногенных изотопов ^{137}Cs и ^{90}Sr по сравнению с периодом максимального загрязнения

в 1960–1970-е гг. до минимально возможных в ядерную эпоху [9, 24].

Хотелось бы отметить, что, как только мы ослабим указанные работы по экологическому радиационному мониторингу арктических акваторий России, наши западные «партнеры» могут сразу же выдвинуть политические обвинения и многомиллиардные финансовые претензии.

В современных геополитических реалиях Российской академии наук в лице Секции океанологии Отделения наук о Земле РАН предстоит нацелить свой опыт и знания на исследование акватории арктических льдов, зоны дрейфа айсбергов, на Арктический и Азово-Черноморско-Средиземноморский бассейны.

В августе 2017 г. в походе на атомном ледоколе «50 лет Победы» я лично убедился, что от Северного полюса на тысячи километров сплошные торосы [25–26]. Необходимо читать наших русских и советских классиков – тех, кто работал в Арктике, Антарктиде и южных морях. Важно не сбивать с толку органы власти неверными прогнозами и рекомендациями. А к изучению Мирового океана следует подходить как к Гидрокосмосу.

Литература

1. Г.Г. Матишов
Океанология, 1975, 15(6), 1057
2. Г.Г. Матишов
Океанология, 1976, 16(2), 315.
3. Г.Г. Матишов
Доклады Академии наук СССР, 1977, 232(1), 184.
4. Г.Г. Матишов
Океанология, 1977, 17(3), 490.
5. Г.Г. Матишов
Геоморфология, 1977, №2, 91.
6. Г.Г. Матишов, В.Д. Рвачев
Геоморфология, 1975, №1, 28.
7. Атлас климатических изменений в больших морских экосистемах Северного полушария (1878–2013), под общ. ред. Г. Г. Матишова, РФ, Ростов-на-Дону, ЮНЦ РАН, 2014, 255 с.
8. Г.Г. Матишов, К.Д. Матишов, Е.Э. Кириллова
Вестник РАН, 2019, 89(5), 509.
DOI: 10.31857/S0869-5873895509-512.
9. Г.Г. Матишов, Г.В. Ильин, И.С. Усягина, Д.А. Валуйская, Е.Э. Кириллова
Доклады РАН. Сер. Науки о Земле, 2020, 494(1), 71.
DOI: 10.31857/S2686739720090133.
10. Г.Г. Матишов, Н.Е. Касаткина, И.С. Усягина
Доклады Академии наук, 2019, 485(1), 93.
DOI: 10.31857/S0869-5652485193-98.
11. G.G. Matishov, D.G. Matishov, A.A. Namjatov, J. Carroll, S. Dahle
J. Environ. Radioactiv., 2000, 48(1), 5.
DOI: 10.1016/S0265-931X(99)00049-1.
12. G.G. Matishov, D.G. Matishov, A.A. Namjatov, J. Smith, J. Carroll, S. Dahle
Environ. Sci. Technol., 2002, 36(9), 1919.
DOI: 10.1021/es0112487.
13. Д.Г. Матишов, Г.Г. Матишов, К. Риссанен
Доклады Академии наук, 1996, 351(4), 571.
14. Д.Г. Матишов, Г.Г. Матишов
Доклады Академии наук, 2002, 383(5), 14.
15. Д.Г. Матишов, И.С. Усягина, Н.Е. Касаткина, Е.В. Павельская
Доклады Академии наук, 2007, 413(5), 683.
16. Д.Г. Матишов, Г.Г. Матишов
Доклады Академии наук, 1998, 363(5), 673.
17. Д.Г. Матишов, Г.Г. Матишов, Н.Е. Касаткина, И.С. Усягина
Доклады Академии наук, 2004, 396(3), 394.

18. *Д.Г. Матишов, Г.Г. Матишов*
Радиационная экологическая океанология, РФ, Апатиты, Изд. КНЦ РАН, 2001, 417 с.
19. *Современные информационные и биологические технологии в освоении ресурсов шельфовых морей*, под ред. Г.Г. Матишова, РФ, Москва, Наука, 2005, 340 с.
20. *D.G. Matishov, G.G. Matishov*
Radioecology in Northern European Seas, FRG, Berlin, Springer, 2004, 258 pp. DOI: 10.1007/978-3-662-09658-1.
21. *Г.Г. Поликарпов, В.Н. Егоров*
Морская динамическая радиохомеоэкология, СССР, Москва, Энергоатомиздат, 1986, 176 с.
22. *Г.Г. Матишов, Г.В. Ильин, И.С. Усягина, Е.Э. Кириллова*
Наука Юга России, 2019, 15(4), 24.
23. *Г.Г. Матишов, Г.В. Ильин, И.С. Усягина, Е.Э. Кириллова*
Наука Юга России, 2019, 15(3), 12.
24. *Г.Г. Матишов, Н.Е. Касаткина, И.С. Усягина*
Доклады Академии наук, 2019, 485(1), 93.
DOI: 10.31857/S0869-5652485193-98.
25. *Г.Г. Матишов*
Природа, 2018, 11, 54.
26. *Г.Г. Матишов, А.В. Клещенков, Е.Э. Кириллова*
Известия РАН. Сер. географическая, 2019, 5, 131.
DOI: 10.31857/S2587-556620195131-140.

English

Current Trends in the Study of the Arctic Ocean (Climate, Fishery Oceanology, Radioactivity)*

Gennady G. Matishov

Academician, Professor,
Scientific Director of "Federal Research Centre
The Southern Scientific Centre of RAS",
41 Chekhov Ave., Rostov-on-Don, 344006, Russia
Scientific Director of Murmansk Marine Biological Institute, RAS
17 Vladimirskaia Str., Murmansk, 183010, Russia
matishov_ssc-ras@ssc-ras.ru

Abstract

The state and prospects of research of the Arctic Ocean in the context of climate change have been considered. A general conclusion is made concerning the ambiguity of climatic and environmental scenarios in the coming decades. Changes in hydrological and ice conditions are a matter of priority for the seas and coasts of the Arctic Ocean, because these changes determine the vital activity of marine ecosystems, their bioresources potential, and navigation conditions along the Northern Sea Route. The fundamental and applied Arctic researches optimization will be crucial to the achievement of the goals determined by the Marine Doctrine of the Russian Federation and Development Strategy of the Arctic Zone of Russia.

Keywords: climate, monitoring, forecasting, radioecology, dangerous phenomena.

*The work was financially supported by RFBR (project 18-05-60249).

References

1. **G.G. Matishov**
Oceanology, 1975, 15(6), 1057
2. **G.G. Matishov**
Oceanology, 1976, 16(2), 315.
3. **G.G. Matishov**
Transactions (Doklady) of the Russian Academy of Sciences. Earth Science Sections, 1977, 232(1), 184.
4. **G.G. Matishov**
Oceanology, 1977, 17(3), 490.
5. **G.G. Matishov**
Geomorphology, 1977, №2, 91 (in Russian).
6. **G.G. Matishov, V.D. Rvachev**
Geomorphology, 1975, №1, 28 (in Russian).
7. *Atlas of Climatic Changes in Large Marine Ecosystems of the Northern Hemisphere (1878-2013)* [Atlas klimaticheskikh izmeneniy v bolshikh morskikh ekosistemakh Severnogo polusharia (1878-2013)],
Ed. G.G. Matishov, RE, Rostov-on-Don, SSC RAS, 2014, 255 p. (in Russian).
8. **G.G. Matishov, E.E. Kirillova, K.D. Matishov**
Herald of the RAS, 2019, 89(2), 196.
DOI: 10.1134/S1019331619020126.
9. **G.G. Matishov, V.G. Ilyin, I.S. Usyagina, D.A. Valuyskaya, E.E. Kirillova**
Doklady Earth Sci., 2020, 494(1), 730,
DOI: 10.1134/S1028334X20090135.
10. **G.G. Matishov, N.E. Kasatkina, I.S. Usyagina**
Doklady Akademii Nauk, 2019, 485(1), 288.
DOI: 10.1134/S1028334X19030073.
11. **G.G. Matishov, D.G. Matishov, A.A. Namjatov, J. Carroll, S. Dahle**
J. Environ. Radioactiv., 2000, 48(1), 5.
DOI: 10.1016/S0265-931X(99)00049-1.

12. **G.G. Matishov, D.G. Matishov, A.A. Namjatov, J. Smith, J. Carroll, S. Dahle**
Environ. Sci. Technol., 2002, **36**(9), 1919.
DOI: 10.1021/es0112487.
13. **D.G. Matishov, G.G. Matishov, K. Rissanen**
Doklady Akademii Nauk, 1996, **351**(4), 571 (in Russian).
14. **D.G. Matishov, G.G. Matishov**
Doklady Akademii Nauk, 2002, **384**(4), 418.
15. **D.G. Matishov, I.S. Usyagina, N.E. Kasatkina, E.V. Pavelskaya**
Doklady Akademii Nauk, **413** (3), 448.
DOI: 10.1134/S1028334X07030294.
16. **D.G. Matishov, G.G. Matishov**
Doklady Akademii Nauk, 1998, **363**(5), 673 (in Russian).
17. **D.G. Matishov, G.G. Matishov, N.E. Kasatkina, I.S. Usyagina**
Doklady Akademii Nauk, 2004, **396**(4), 560 (in Russian).
18. **D.G. Matishov, G.G. Matishov**
Radiation Ecological Oceanology [Radiacionnaya ekologicheskaya okeanologiya], RF, Apatity, KSC RAS Publ. House, 2001, 417 p. (in Russian).
19. *Modern Information and Biological Technologies in the Development of Shelf Seas Resources* [Sovremennye informacionnye i biologicheskie tekhnologii v osvoenii resursov shelfovykh morey], Ed. G.G. Matishov, RF, Moscow, Nauka, 2005, 340 pp. (in Russian).
20. **D.G. Matishov, G.G. Matishov**
Radioecology in Northern European Seas, FRG, Berlin, Springer, 2004, 258 pp. DOI: 10.1007/978-3-662-09658-1.
21. **G.G. Polikarpov, V.N. Egorov**
Marine Dynamic Radiochemoecology [Morskaya dinamicheskaya radiokhemoekologia], USSR, Moscow, Energoatomizdat, 1986, 176 pp. (in Russian).
22. **G.G. Matishov, V.G. Ilyin, I.S. Usyagina, E.E. Kirillova**
Nauka Yuga Rossii [Science in the South Russia], 2019, **15**(4), 24 (in Russian). DOI: 10.7868/S25001640190404.
23. **G.G. Matishov, V.G. Ilyin, I.S. Usyagina, E.E. Kirillova**
Nauka Yuga Rossii [Science in the South Russia], 2019, **15**(3), 12 (in Russian). DOI: 10.7868/S25000640190302.
24. **G.G. Matishov, N.E. Kasatkina, I.S. Usyagina**
Doklady Earth Sci., 2019, **485**(1), 288.
DOI: 10.1134/S1028334X19030073.
25. **G.G. Matishov**
Nature [Priroda], 2018, **11**, 70 (in Russian).
DOI: 10.31857/S0032874X0002326-7.
26. **G.G. Matishov, A.V. Kleshchenkov, E.E. Kirillova**
Regional Research of Russia [Izvestiya Rossiiskaya Akademii Nauk, Ser. Geograficheskaya], 2019, **5**, 131 (in Russian).
DOI: 10.31857/S2587-556620195131-140.

Исследование динамики и морфометрии ледников и айсбергов и прикладное использование полученных результатов при освоении углеводородных месторождений на континентальном шельфе Российской Арктики*

И.В. Бузин, А.Ф. Глазовский, Р.И. Май, Е.У. Миронов, А.В. Нестеров, А.К. Наумов, Ю.П. Гудошников

Рассматриваются современные методы оценки динамики и продуктивности выводных ледников; приведены оценки айсбергового стока для архипелагов Новая Земля, Земля Франца-Иосифа, Северная Земля. Описаны методы исследований айсбергов, рассмотрены вопросы их распространения в морях Российской Арктики и влияния на осуществление проектов освоения шельфа. Приведены оценки основных морфометрических параметров айсбергов, показано существующее различие между айсбергами, образовавшимися от ледников Земли Франца-Иосифа/Северной Земли и Новой Земли. Рассмотрен результат моделирования ситуации в ледовый сезон 2002/03 г. в Баренцевом море (вынос большого количества айсбергов в центральную часть моря на акваторию перспективного месторождения углеводородов). Приведен пример расчета айсберговой опасности Карского моря с помощью моделирования генерации айсбергов методом Монте-Карло с последующим численным моделированием их пространственного распределения.

Ключевые слова: ледники, айсберги, арктический шельф, распространение, моделирование.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты №№ 05-05-64732, 16-35-00333, 17-55-80107 и 18-0560109).

Введение

Для проектирования гидротехнических сооружений, предназначенных для добычи углеводородов в суровых климатических условиях Арктического шельфа, необходимо сначала определить нормативные значения ледовых нагрузок на эти инженерные сооружения. Поэтому необходимы сбор

и анализ информации о морфометрических характеристиках ледяных образований (торосов и айсбергов), физико-механических свойствах ровного и вострошенного (деформированного) льда, сведений о динамике ледяных полей и айсбергов. Айсберги могут наблюдаться в большинстве районов морей Западной Арктики, и встреча с ними является одной из наиболее серьезных угроз для различных стадий освоения



БУЗИН
Игорь Владимирович
Арктический и антарктический
научно-исследовательский
институт



ГЛАЗОВСКИЙ
Андрей Федорович
Институт географии РАН



МАЙ
Руслан Игоревич
Арктический и антарктический
научно-исследовательский
институт



МИРОНОВ
Евгений Уарович
Арктический и антарктический
научно-исследовательский
институт



НЕСТЕРОВ
Александр Валерьевич
Арктический и антарктический
научно-исследовательский
институт



НАУМОВ
Алексей Кирович
Арктический и антарктический
научно-исследовательский
институт



ГУДОШНИКОВ
Юрий Петрович
Арктический и антарктический
научно-исследовательский
институт

шельфа (сейсмических съемок, разведочного бурения, эксплуатации гидротехнических сооружений).

Для оценки ареала распространения айсбергов, статистического анализа параметров их дрейфа, верификации математических моделей дрейфа необходимы сведения об айсбергопродуктивности ледников, морфометрических параметрах айсбергов в различных районах, траекториях их перемещений. Некоторые из перечисленных вопросов находятся в центре внимания исследований в рамках проекта РФФИ № 18-05-60109 «Формирование и эволюция опасных ледовых явлений и ледяных образований в Арктике при современных изменениях климата» и ряда специализированных исследований айсберговой тематики, выполненных в последние годы.

Методы исследований, динамика ледников и оценка их айсбергопродуктивности

Больше половины ледников на архипелагах Российской Арктики и Шпицбергена достигают моря и продуцируют айсберги. Интенсивность и объем поступления айсбергов и их размеры непосредственно зависят от сочетания трех групп взаимосвязанных факторов, а именно:

1. скорости движения ледников и их стабильность, сезонные и/или многолетние изменения этих скоростей;
2. положение фронтов ледников в море и их изменения, а также форма поверхности самих ледниковых языков;
3. форма залива/фьорда/подледниковой долины, рельеф их дна и прилегающей акватории.

Следовательно, надежная оценка айсбергопродуктивности ледников определяется полнотой, достоверностью и актуальностью сведений об этих факторах. Добыча таких знаний опирается на развитие современных методов и технологий, позволяющих получать достаточно однородные по качеству массовые данные.

Для определения скоростей движения ледников используют как наземные полевые методы (GPS, замедленная фотосъемка, геодезия и метод псевдопараллакса, повторная дальномерная/лазерная съемка), так и дистанционные космические методы (отслеживание смещения элементов поверхности ледника по разновременным оптическим или радиолокационным изображениям, спутниковая радиолокационная интерферометрия) [1].

Наш опыт показывает, что для массовых измерений скоростей в целом предпочтительнее дистанционные методы, поскольку они не требуют расхода физических ресурсов, рабочий процесс автоматизирован и позволяет оперативно определить скорость движе-

ния ледника в труднодоступных местах. Плотность измерений скорости с их использованием гораздо выше, а это значит, что отображение поля распределения скоростей ближе к реальности. Погодные условия и темное время суток/года препятствуют определению скоростей только по оптическим, но не радарным изображениям.

Для правильной оценки айсберговой продуктивности важно знать скорости движения ледников в их фронтальной части как в холодный, так и в теплый периоды года, так как, по нашим данным, летом они могут быть выше более чем в два раза, особенно возрастая к концу теплого периода. Скорости могут иметь не только сезонный ход, но и в целом более продолжительный многолетний тренд, который требует регулярного мониторинга. Более того, некоторые ледники являются динамически неустойчивыми, то есть иногда они резко ускоряются, что сопровождается подвижкой больших масс льда в море (как, например, в западной части купола Вавилова на Северной Земле (СЗ) или бассейне № 4 на Северо-Восточной Земле Шпицбергена). Такие подвижки практически невозможно заблаговременно предсказать, но можно оперативно отслеживать их зарождение и развитие по космическим изображениям, где они проявляются в возникновении и усилении аномалий поля скоростей, развитии зон трещин и активном продвижении фронта.

При неизменном положении ледникового фронта весь поток льда, поступающий к нему, равен расходу льда в море. Но в настоящее время подавляющее число ледников на архипелагах Арктики отстывает. Поэтому, вследствие сокращения площади ледников в их фронтальных частях, происходят дополнительные потери льда в море, которые составляют, по нашим оценкам, от 30% до 70% от общих потерь льда в море, тем самым являясь важным компонентом в формировании айсбергового стока. Поэтому, чтобы правильно оцени-

вать реальные объемы айсбергообразования, необходимо с помощью космических изображений следить за сезонными и многолетними изменениями положения фронта ледников, заканчивающихся в море.

Сведения о форме поверхности ледников важны в двух отношениях. Во-первых, для крутопадающих сильно трещиноватых ледников характерно образование большого количества мелких айсбергов и айсблоков, тогда как пологие плоские и широкие ледниковые лопасти обычно производят самые крупные айсберги, примером чему служит ледник Знаменитый на Земле Франца-Иосифа (ЗФИ). Крайним предельным случаем являются плавучие языки и шельфовые ледники, которые, обламываясь, производят айсберги особо крупных размеров. Новейшим примером этому служит обширное разрушение шельфового ледника Матусевича на Северной Земле в конце первой декады августа 2020 г., приведшее к образованию айсберга объемом около 0.4 км^3 (площадью более 10 км^2 и толщиной не менее 40 м). Во-вторых, сведения о высоте поверхности ледников, дополненные сведениями об их толщине, необходимы для оценки глубины ложа ледников относительно уровня моря.

Для расчета объемов льда, сбрасываемого ледником в море, надо знать, кроме скорости потока льда во фронтальной части, площадь его сечения на поперечном створе у фронта, то есть необходимы сведения о толщине льда. В самом первом приближении эту толщину можно косвенно оценить, если есть данные батиметрии перед фронтом. Кроме того, есть модельные способы расчета этой толщины по данным о топографии поверхности ледника, которые сейчас обеспечиваются современными цифровыми моделями рельефа (ЦМР) высокого разрешения (наподобие ArcticDEM), но дающие зачастую очень грубые оценки. Самым достоверным методом, как показывает наш многолетний опыт, служит воздушное зондирование

ледников с помощью радиолокаторов, работающих на частотах $20\text{--}40 \text{ МГц}$. Эти данные позволяют с высокой точностью оценить не только поперечное сечение ледников во фронтальной части, но и форму ложа ледниковой долины выше по течению. Зная ее форму не только в плане (сужения и расширения), но и по глубине (поднятия и переуглубления), можно прогнозировать на длительный период вариации выброса айсбергов и отступления ледников – с замедлением (на участках сужения и/или поднятия) и ускорением (на участках расширения и/или переуглубления) при их сокращении. По данным о толщине льда и глубине ложа оценивается общий потенциал айсбергообразования ледника в большом временном масштабе; рассчитываются размеры и положение участков ледника, достигших или близких к состоянию гидростатического всплывания; оцениваются максимально возможные при этих условиях размеры айсбергов и их осадка. Так, например, с учетом морфологии ложа ледника Вершинского на Новой Земле нами сделан вывод, что, при сохранении современных темпов отступления его фронта, он в ближайшие 30 лет будет формировать айсберги с осадкой до 100 м ; затем темпы производства несколько снизятся, но при расширении бухты отёла в сторону западной ветви через $60\text{--}75$ лет снова возрастут. При этом вновь увеличится осадка айсбергов, а фронт, производящий их, станет шире.

Средняя скорость айсбергопродуктивности ледников, исследованных нами в течение ряда экспедиций с помощью воздушной радиолокации в российской Арктике, оценивается как:

- $2.05 \text{ км}^3/\text{год}$ на Новой Земле (12 ледников), в том числе $0.51 \text{ км}^3/\text{год}$ на восточном побережье (4 ледника) и $1.54 \text{ км}^3/\text{год}$ на западном побережье (8 ледников);
- $1.66 \text{ км}^3/\text{год}$ на Земле Франца-Иосифа (11 ледников);
- $3.07 \text{ км}^3/\text{год}$ на Северной Земле (8 ледников без учета разрушения шельфового ледника Матусевича).

Отступление ледников приводит к тому, что оно составляет заметную долю в айсбергопродуктивности: 28% на Новой Земле (32% восточное побережье и 26% западное побережье), 27% на Земле Франца-Иосифа и 24% на Северной Земле [2].

Наша оценка годовой айсбергопродуктивности выходных ледников в российской Арктике в объеме около 7 км^3 льда в год является минимальной, потому что в ней использованы только данные прямых радиолокационных измерений толщины льда на 31 леднике. В их число входит менее четверти ледников, производящих айсберги на Новой Земле и Северной Земле, и даже менее – на Земле Франца-Иосифа. Но простое увеличение нашей оценки пропорционально количеству или площади всех ледников, произво-

дящих айсберги, не даст правильной общей оценки. Вклад изученных ледников в сделанную оценку очень неодинаков. Около 60% вычисленных нами потерь обеспечивают всего лишь 6 ледников из 31 изученных. Это ледники №7, 8 (купол Академии Наук) и ледник Исследователей на Северной Земле, ледники Иностранцева и Вершинского на Новой Земле, ледник Знаменитый на Земле Франца-Иосифа (1.04, 0.63, 0.76, 0.71, 0.3, и 0.69 км³/год соответственно).

Методы исследований айсбергов

В настоящее время существуют следующие основные методы исследования айсбергов:

1. *Визуальные наблюдения* с судов и ледоколов – определяются координаты айсберга, их количество, форма, линейные размеры и высота айсбергов. При этом используются как судовые навигационные приборы, так и лазерные дальнометры и тахеометры.

2. *Дистанционное зондирование ледяных образований из космоса* – на основе снимков высокого разрешения оптического диапазона или радиолокационных определяются координаты айсбергов, их количество и линейные размеры. Обнаружение айсбергов с помощью спутниковых радиолокаторов (РЛ) основано на том, что обратный РЛ-сигнал от айсберга, как правило, выше, чем интенсивность обратного рассеивания от водной поверхности и ледяного покрова.

3. *Аэрофотосъемка айсбергов с вертолета или беспилотного летательного аппарата* – дает точное фотографическое изображение с высокой детализацией рельефа верхней (надводной) поверхности айсбергов. Последующая фотограмметрическая обработка изображений позволяет получать данные о линейных размерах и высоте зафиксированных объектов. Метод дает возможность охватить большую площадь исследуемой акватории в сравнительно короткие сроки. Использование аэрофотосъемки позволяет с большой точностью получать трехмерные модели надводной части отснятых объектов.

4. *Определение формы и глубины килей айсбергов с помощью гидролокаторов кругового обзора (или многолучевого эхолота)*. Применение этих комплексов позволяет получать морфометрические характеристики объектов, находящихся в зоне действия акустического поля, создаваемого антенной комплекса. Данные гидролокаторной съемки нижней поверхности айсбергов дают возможность определить максимальные значения осадки килей (подводной части айсберга) на всей площади сканирования, а также форму килей айсберга.

5. *Определение характеристик дрейфа айсбергов* – используются автономные радиомаяки различных спутниковых систем (Inmarsat-C, ARGOS,

Iridium, «Гонец»), оснащенные модулем глобальной навигационной системы GPS. Траектория движения ледяного объекта с установленным радиомаяком определяется по результатам измерения координат встроенным приемником GPS (а также на базе эффекта Доплера) с последующей передачей результатов определения местоположения через спутниковую систему.

6. *Измерение температуры льда айсберга с помощью забуриваемых термокос*. Исследования айсбергов [3] показывают, что значения температуры льда в слоях ниже слоя ее сезонных колебаний достаточно точно отражают ход среднегодовых значений температуры в ледниках различных арктических архипелагов, что позволяет со значительной долей уверенности определять, где именно образовался тот или иной айсберг. Знание температуры айсбергового льда позволяет оценить «запас холода» и время существования этого опасного ледяного образования в морских условиях, оно необходимо в современных моделях дрейфа и эволюции айсбергов [4].

Говоря о методах исследований айсбергов, отметим, что комбинация аэрофотосъемки и гидролокаторной съемки дает наиболее полную информацию о размерах верхней (надводной) и нижней (подводной) частей айсберга, что позволяет оценить его общий объем и массу. К сожалению, вследствие объективных трудностей одновременного выполнения этих видов работ такие наблюдения редки.

Ареал распространения айсбергов

Распространение айсбергов в морях Российской Арктики неравномерно, и районы, где они наиболее часто встречаются, тяготеют к выводным ледникам айсбергопродуцирующих архипелагов (ЗФИ, Новая Земля, Северная Земля), поэтому с удалением от них повторяемость встречи с айсбергами уменьшается. Плотность распределения айс-

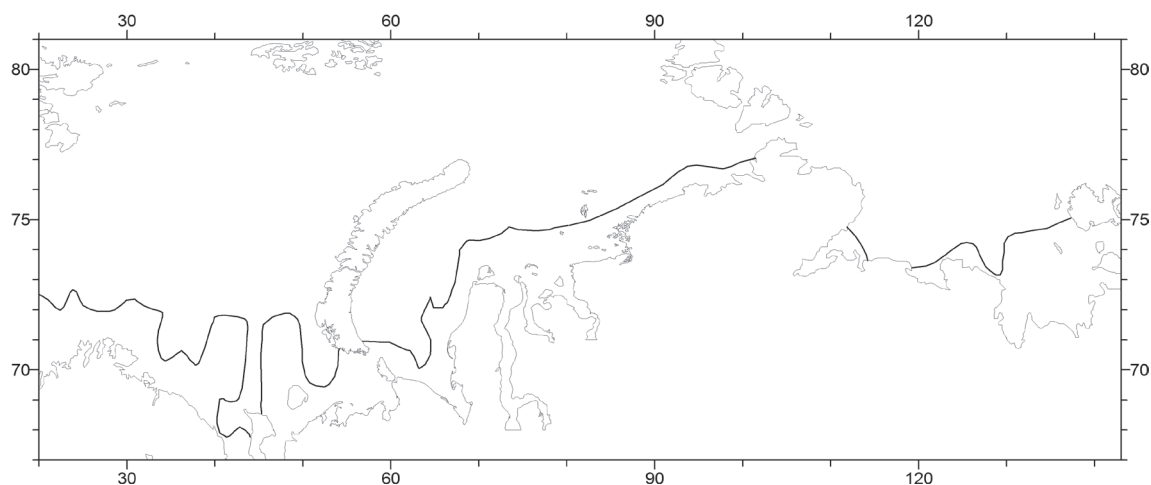


Рис. 1. Южная граница распространения айсбергов в морях Российской Арктики [6].

бергов по акватории арктических морей имеет выраженную сезонную зависимость – зимой айсберги встречаются относительно недалеко от источника их образования, а летом распространяются на акватории моря, свободные ото льда.

Исторические данные о распространении айсбергов в российской Арктике получены в основном на материалах авиационных ледовых разведок с 1928 по 1991 г. [5], имевших определенную географическую привязку и дискретность, поэтому они не могут дать полностью объективную оценку распространения айсбергов. Тем не менее, учитывая многолетний характер наблюдений, эти данные, дополненные современной информацией, дают общее представление о возможном характере распространения айсбергов и их повторяемости (рис. 1).

Как видно из рис. 1, границы распространения айсбергов ($\geq 1\%$ повторяемость встречи с айсбергом в течение года) простираются далеко на юг от мест их зарождения, достигая местами побережья материка. Для двух морей (Баренцева и Карского) известны задокументированные случаи фиксации айсбергов у материкового берега (побережье Мурмана в 1929 г., Байдарацкая губа в 2006 г.; подробнее см. [7–8]). Таким образом, на большей части акватории российских арктических морей существует ненулевая вероятность встречи с айсбергом (и внештатной ситуации, вызванной такой встречей).

Айсберги представляют значительную опасность для любых морских операций (проведения геолого-разведочных работ, добычи углеводородов с надводных сооружений). Повреждение или даже разрушение айсбергом стационарной платформы и ее коммуникаций (стоимостью в сотни миллионов долларов) приведет к огромным экономическим убыткам, возможен также значительный урон окружающей среде. В случае использования нестационарной платформы и других плавучих сооружений (FPSO, FPU), способных в критических ситуациях покинуть места своей эксплуатации, ущерб будет определяться прерыванием добычи углеводородов на срок отвода платформы на безопасное расстояние и последующим восстановлением производственного цикла [9].

В мае 2003 г. в центральной части Баренцева моря экспедицией ФГБУ «Арктический и антарктический

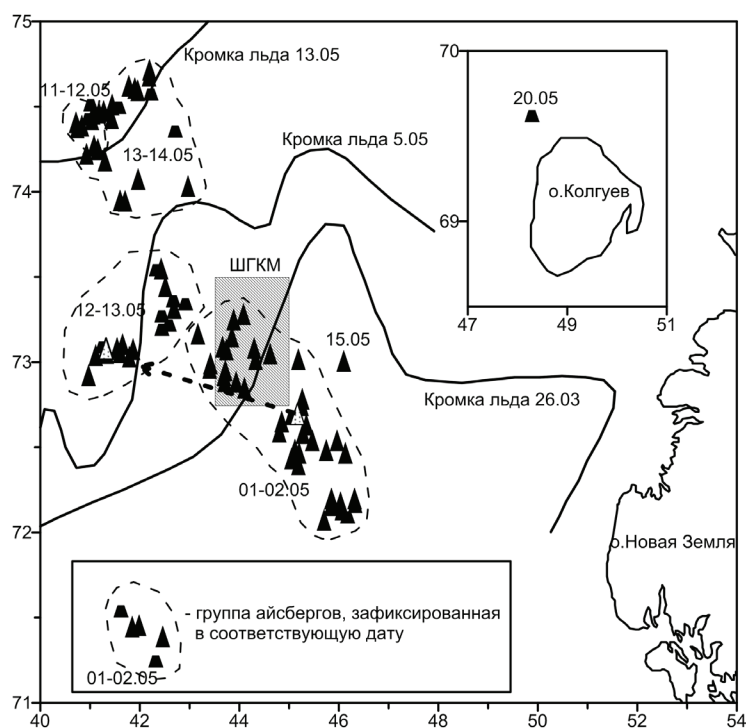


Рис. 2. Местоположение в районе ШГКМ айсбергов, зафиксированных в мае 2003 г. [10].

научно-исследовательский институт» (ААНИИ), проводящей работы по изучению ледового и гидрометеорологического режима акватории планируемого к освоению Штокмановского газоконденсатного месторождения (ШГКМ), было обнаружено большое количество айсбергов [10], что является редким природным явлением (рис. 2).

Проведенное вслед за этим исследование случаев максимального распространения айсбергов в Баренцевом море [9] позволяет предположить, что подобные явления обуславливаются достаточно редкими синоптическими процессами, выражающимися в сильных и долговременных воздушных переносах с северной и северо-восточной составляющими.

«Аномалия 2003 г.» послужила своего рода «спусковым крючком» к изучению айсбергов российской Арктики и их возможного влияния на реализацию шельфовых арктических проектов. Все последовавшие за 2003 г. экспедиции в рамках проекта обустройства ШГКМ имели в программе работ блок изучения айсбергов и ледников, что позволило собрать уникальный для нашей страны материал. Сбор данных о ледниках и айсбергах проводился также в период Международного Полярного Года (2007/08) в рамках выполнявшегося проекта «Образование, динамика и разрушение айсбергов в Западном секторе Российской Арктики» [11]. Программы исследований лицензионных участков Арктического шельфа, разработанные и осуществленные ФГБУ «ААНИИ» в интересах ПАО «Роснефть» в 2012–2019 гг., также имели мощную компоненту, направленную на изучение айсбергов и порождающих их ледников (см., например, [12]).

Можно отметить, что учет данных 2003 г. изменил оценки повторяемости появления айсбергов в районе ШГКМ в три раза [13]. Увеличение вероятности столкновения айсберга с добывающей платформой привело к переработке концепции проекта (TLP/SPAR) в пользу варианта ледостойкого технологического добывающего судна (FPU) [14–15], что серьезно усложнило проект и повлияло на его дальнейшую реализацию.

Морфометрия айсбергов

Между морфометрическими параметрами айсберга и ледником, его породившим, существуют определенные зависимости, впервые описанные Дж. Даудсвеллом на примере ледников архипелага Шпицберген [16]. В наиболее общем виде эти закономерности таковы: самые крупные столообразные айсберги (несколько сотен метров в поперечнике) порождаются шельфовыми ледниками и ледяными куполами (число таких айсбергов, как

правило, невелико). Расположенные во фьордах выводные ледники продуцируют айсберги меньших размеров и зачастую неправильной формы. Активные ледники производят большое количество айсбергов малых размеров и неправильной формы; количество айсбергов от малоактивных ледников меньше, но их размеры могут быть большими, чем от активных. Ледники, подверженные сёрджам, в короткий период фазы сёрджа производят очень большое количество малых айсбергов (менее 50 м в длину) неправильной формы.

Систематизация и обобщения, сделанные Даудсвеллом для ледников Шпицбергена, представляются чрезвычайно важными для понимания морфометрических особенностей образующихся айсбергов и могут быть применимы ко всем источникам айсбергов Евразийской Арктики [9]. Эти обобщения хорошо согласуются с различными описаниями айсбергов, выполненными в разное время у Шпицбергена, ЗФИ и Новой Земли [17–18]. Согласно визуальным наблюдениям, выполненным в 2000–2010 гг., выводные ледники заливов Русская Гавань и Иностранцева (в северной части Новой Земли), имеющие сильную трещиноватость фронта, образуют умеренное количество малых и средних айсбергов неправильной формы. Для ледяных куполов ЗФИ и Северной Земли характерно образование столообразных айсбергов [19–20].

Опубликованные оценки [19–20] дают следующие средние/максимальные размеры длины и ширины айсбергов для северо-восточной части Баренцева моря (архипелаги ЗФИ, Новая Земля) и моря Лаптевых (архипелаг Северная Земля): 140/526 м и 77/210 м (Баренцево море) и 311/616 м и 179/360 м (море Лаптевых), соответственно. По данным экспедиционных наблюдений 2014 г. средняя длина айсбергов у Новой Земли и Северной Земли составляет 49/301 м, а ширина –

Таблица 1. Статистические характеристики длины (м) айсберга, измеренные в экспедициях ААНИИ в 2012–2017 гг. [22].

Статистические параметры		Районы исследований			
		Все районы	Новая Земля	Северная Земля и ЗФИ	
				Нестолообразные	Столообразные
Среднее		121	61	93	205
Среднее квадратическое отклонение		95	36	53	109
Квантиль (с вероятностью P)	$p=0.05$	22	12	30	63
	$p=0.25$	56	34	55	121
	$p=0.50$	90	57	79	177
	$p=0.75$	157	80	120	280
	$p=0.95$	344	118	198	410

30/133 м соответственно [21]. Анализ собранного массива данных аэрофотосъемки айсбергов, выполненной в экспедиционных исследованиях ФГБУ «ААНИИ» в интересах ПАО «НК РОСНЕФТЬ» в 2012–2017 гг., полностью подтверждает описанную выше закономерность [22]. Анализ плановых размеров (длины) айсбергов для выборок из разных районов демонстрирует существенные различия этой характеристики для нестолообразных и столообразных айсбергов Новой Земли, ЗФИ и СЗ (таблица 1).

Как видно из таблицы 1, средняя длина нестолообразных айсбергов района Новой Земли составляет 61 м, что примерно в 1.5 раза меньше айсбергов аналогичной формы для районов ЗФИ и СЗ и более чем в 3.3 раза меньше столообразных айсбергов из этих районов. Эта зависимость выдерживается и для 5% наиболее крупных айсбергов ($p=0.05$) – соотношения составляют примерно 1.7 и 3.5 (то есть 198:118 и 410:118). На основании вышеуказанного можно вполне обоснованно утверждать, что форма и размер айсбергов, порожденных выводными ледниками Новой Земли, коренным образом отличаются от формы и размеров айсбергов, образовавшихся на архипелагах Земля Франца-Иосифа и Северная Земля.

Моделирование режимных характеристик пространственного распределения айсбергов

Моделирование дрейфа айсбергов в Баренцевом море

Обнаружение большого количества айсбергов в центральной части Баренцева моря весной 2003 г. поставило вопрос об их происхождении. Учитывая значительное количество среди них крупных столообразных, местом их образования с большой вероятностью можно считать ЗФИ. Для проверки этого предположения в лаборатории «Арктик-шельф» (ФГБУ «ААНИИ») был проведен модельный эксперимент по расчету дрейфа айсбергов в ледовый сезон 2002/03 г. Использовалась трехмерная гидродинамическая модель [23] с подключенным к ней блоком перемещения айсбергов как автономных объектов без обратной связи. Горизонтальный шаг модели составлял 7.5 миль. При проведении модельных расчетов в качестве формы айсбергов была выбрана призма с эллиптическим основанием. Модельный эксперимент проводился для 10 айсбергов с массой от 9.6 до 8 150.5 тыс. тонн, массы выбирались случайным образом на основе эмпирического распределения масс айсбергов в Баренцевом море [24]. Начальной точкой выброса айсбергов являлась область в окрестностях Земли Вильчека (ЗФИ), ледники которого являются продуцентами крупных столообразных айсбергов, наиболее опасных для планируемых гидротехнических сооружений. Координаты данной точки: 79.72184° с. ш., 53.36120° в. д. Исходя из предпосылки о времени выброса, датированной окончанием летнего периода, за точку начального отсчета выбрано 1 сентября 2002 г. Общая продолжительность расчетов – 8 месяцев (01.09.2002–30.05.2003 гг.). Траектории движения айсбергов по результатам модельных расчетов приведены на рис. 3.

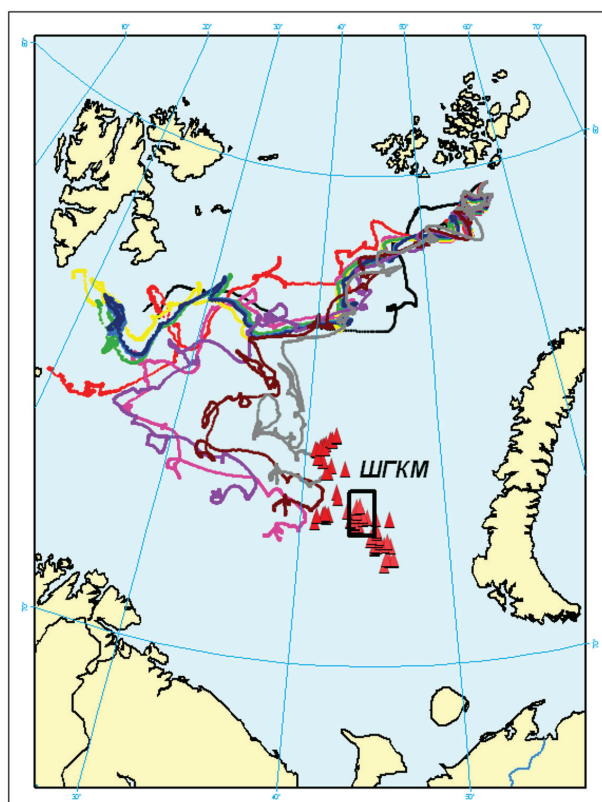


Рис. 3. Траектории движения айсбергов по результатам модельных расчетов за период сентябрь 2002 – май 2003 г. (значками изображено реальное положение айсбергов в мае 2003 г.) [24].

Проведенные модельные расчеты показали, что дрейф крупных айсбергов, образовавшихся от ледников ЗФИ, в сентябре 2002 г. – мае 2003 г. происходил преимущественно в юго-западном и южном направлениях и существовали все предпосылки к проникновению данных объектов в район ШГКМ. Данный пример хорошо демонстрирует применение средств математического моделирования для решения важной практической задачи – оценки возможности проникновения айсбергов на акваторию шельфового месторождения.

Моделирование айсберговой опасности Карского моря

Одна из задач проекта «Формирование и эволюция опасных ледовых явлений и ледяных образований в Арктике при современных изменениях климата» (проект РФФИ № 18–05–60109 «Арктика») заключалась в оценке пространственного распределения айсбергов и оценке вероятности встречи с айсбергами на основе численного моделирования. Для решения этой задачи была создана численная модель генерации, распространения и разрушения айсбергов. В основе модели дрейфа айсберга лежит уравнение (1):

$$M \frac{du}{dt} = F_{A_{||}} + F_{A_{\perp}} + F_W + F_I + F_R + F_L + F_C, \quad (1)$$

где M – масса айсберга, u – скорость дрейфа айсберга, $F_{A_{||}}$ – сила тангенциального воздействия ветра,

$F_{A_{\perp}}$ – сила нормального воздействия ветра, F_W – сила воздействия течений и сопротивление воды, F_I – сила воздействия морского льда, F_R – сила волнового воздействия, F_L – сила, обусловленная наклоном уровня моря, F_C – сила Кориолиса.

Для расчета в модели движения айсберга необходимо знать площади лобового сопротивления ($S_{A_{\perp}}$) и площадь горизонтального сечения (площади айсберга по ватерлинии) надводной части айсберга ($S_{A_{||}}$); для силы сопротивления воды – площадь поперечного (вертикального) сечения подводной части айсберга (S_W). Для сил, обусловленных воздействием ледяного покрова и ветрового волнения, площади рассчитываются в зависимости от линейных размеров айсберга и толщины льда (h_I) или высоты волны (h_R) (2):

$$S_I = 0.5 \cdot (L + W) \cdot h_I, \quad (2)$$

$$S_R = 0.5 \cdot (L + W) \cdot h_R,$$

где L – длина айсберга, W – ширина айсберга.

И, наконец, на дрейф айсберга накладываются ограничения в зависимости от глубины моря и осадки айсберга (D). Таким образом, для выполнения прогностического или диагностического расчета дрейфа айсберга необходимо знать массу айсберга (M) и следующие его геометрические параметры: $L, W, D, S_{A_{\perp}}, S_{A_{||}}, S_W$.

Специальное исследование по нахождению регрессионных соотношений между параметрами айсбергов описано в работе [22]. Предиктором в этих эмпирических зависимостях служит длина айсберга – параметр, который наиболее просто измерить по обзорным спутниковым снимкам, инструментальным и визуальным судовым или авиационным наблюдениям. Значения коэффициентов регрессионных соотношений, а также оценка качества зависимостей (коэффициент детерминации R^2 и среднеквадратическая ошибка σ_e), выявленных для айсбергов Карского моря, приведены в таблице 2.

Таблица 2. Параметры регрессионного уравнения $Y=kL^n$, связывающие длину (L) с массой и геометрическими параметрами новоземельских айсбергов Карского моря (по работе [22]).

Параметры уравнения	Параметры айсберга					
	Ширина W	Масса M	Осадка D	Площадь вертикального сечения надводной части $S_{A\perp}$	Площадь по ватерлинии $S_{A\parallel}$	Площадь вертикального сечения подводной части $S_{W\perp}$
Степень, n	1	3	1	2	2	2
Регрессионный коэффициент, k	0.6400	$0.1975 \times \rho^*$	0.5200	0.04720	0.3828	0.3652
Коэффициент детерминации, R^2	0.81	0.71	0.37	0.68	0.85	0.76
Среднеквадратическая ошибка, σ_e	11	75480	19	125	5590	1562

*Плотность айсберга.

Так как регрессионные соотношения, представленные в таблице 2, определялись методом наименьших квадратов, то ошибки аппроксимации имеют нормальное распределение. Следовательно, математическим ожиданием будет восстановленное по регрессионному уравнению значение параметра айсберга, а разброс значений параметров относительно среднего будет определяться величиной среднеквадратической ошибки регрессионного уравнения (σ_e). Исходя из этого, в модели реализован расчет геометрических параметров по формуле (3):

$$Y = k \times L^n + U(p) \cdot \sigma_e \cdot \sqrt{L/\bar{L}} \quad (3)$$

где $U(p)$ – квантиль стандартного нормального распределения для вероятности p , вероятность p воспроизводится генератором случайных чисел в диапазоне от 0 до 1, σ_e – среднеквадратическая ошибка регрессионного уравнения, \bar{L} – средняя длина айсберга ($\bar{L}=61$ м [22]). Очевидно, что при длине айсберга, близкой к нулю, среднее и среднеквадратическое отклонение всех параметров айсберга также должны стремиться к нулю. Множитель $\sqrt{L/\bar{L}}$ в уравнении (3) позволяет сымитировать отмеченные в [22] изменения разброса параме-

тров айсберга от регрессионного значения в зависимости от длины айсберга. Вероятность p в уравнении (3) определяется для каждого параметра отдельно, что позволяет для айсбергов одинаковой длины получить набор всевозможных комбинаций массы и геометрических параметров. Такой же подход был использован в работе [25] для расчета погрешности модельного расчета траектории движения отдельного айсберга.

Если осадка моделируемого объекта превышает глубину моря в данной точке модели, то скорость айсберга, ортогональная критической изобате, приравнивается к нулю, и дрейф останавливается до тех пор, пока равнодействующая вынуждающих сил не позволит айсбергу переместиться в точку, где его осадка будет меньше глубины. После этого айсберг снова включается в дрейф.

В данной модели используется учет разрушения айсберга под воздействием волновой эрозии и бокового таяния, которые, по оценкам [26], описывают более 75% от возможных потерь объема айсберга. По формулам, приведенным в [26], раз в сутки рассчитывается изменение длины айсберга за счет разрушения. Полученное изменение вычитается из длины айсберга, и по измененному значению длины происходит перерасчет всех параметров по формуле (3).

Описанная модель дрейфа айсбергов реализована на языке программирования в виде отдельных модулей, которые можно подключить к данным любых атмосферных и океанских реанализов или же интегрировать их в различные модели океана. Модель может работать как в прогностическом, так и в диагностическом режиме. Для исследования режимных характеристик дрейфа айсбергов целесообразно использовать доступные данные атмо-

сферного и океанского реанализов. Ветер задавался по данным атмосферного реанализа погоды ERA-5 (<https://www.ecmwf.int>), созданного Европейским центром среднесрочных прогнозов погоды ECMWF. Параметры океана и ледяного покрова брались из реанализа Северного Ледовитого океана TOPAZ (<http://marine.copernicus.eu>), созданного Центром экологического и дистанционного зондирования имени Фритьофа Нансена (NERSC). Так как в данных TOPAZ отсутствуют приливы, в модель добавлен расчет приливных течений и уровня по гармоническим постоянным восьми основных волн прилива, взятых из модели AOTIM-5 [27].

Расчет режимных характеристик дрейфа айсберга проводился следующим образом: в начале модельного расчета для каждой точки генерации айсбергов по известному закону распределения длины айсбергов генератором случайных чисел рассчитывается длина моделируемого айсберга. По полученной длине айсберга при помощи регрессионных соотношений по формуле (3) воссоздаются масса и все геометрические параметры айсберга. Моделируемый айсберг «передвигается» в модели под действием вынуждающих сил либо до тех пор, пока он не выйдет за пределы расчетной области модели, либо пока его длина за счет таяния и волновой эрозии не уменьшится до 16 м и айсберг не перейдет в категорию обломков. При этом для каждого ледника рассчитывается время между отёлами как отношение объема сгенерированного айсберга и продуктивности ледника: $t = \frac{M}{A_p \cdot \rho}$, где A_p – айсберговая продуктивность, выраженная в $\text{м}^3/\text{с}$. Следующий айсберг в точке ледника появится

после того, как время, отсчитываемое от последней генерации айсберга, превысит значение T . То есть мы пренебрегаем потерями льда у ледника при обрушении айсберга или при формировании кусков или обломков – весь лед, который имеется в леднике, уходит за время T на формирование одного айсберга без погрешностей и потерь.

Так как закон распределения длины айсберга возле каждого ледника неизвестен, то воспользуемся статистической информацией об айсбергах Карского моря и сделаем допущение, что такая же статистическая закономерность характеризует и только что отколовшиеся от ледника айсберги. В работе [22] эмпирическая функция распределения длины новоземельских айсбергов Карского моря была аппроксимирована распределением Вейбулла с параметрами $\lambda=68$ (коэффициент масштаба) и $k=1.76$ (коэффициент формы).

Для расчета режимных характеристик распределения дрейфа созданная модель была реализована в течение четырех лет (2016–2020). В качестве точек генерации были выбраны координаты трех выводных ледников на северо-восточном побережье Новой Земли:

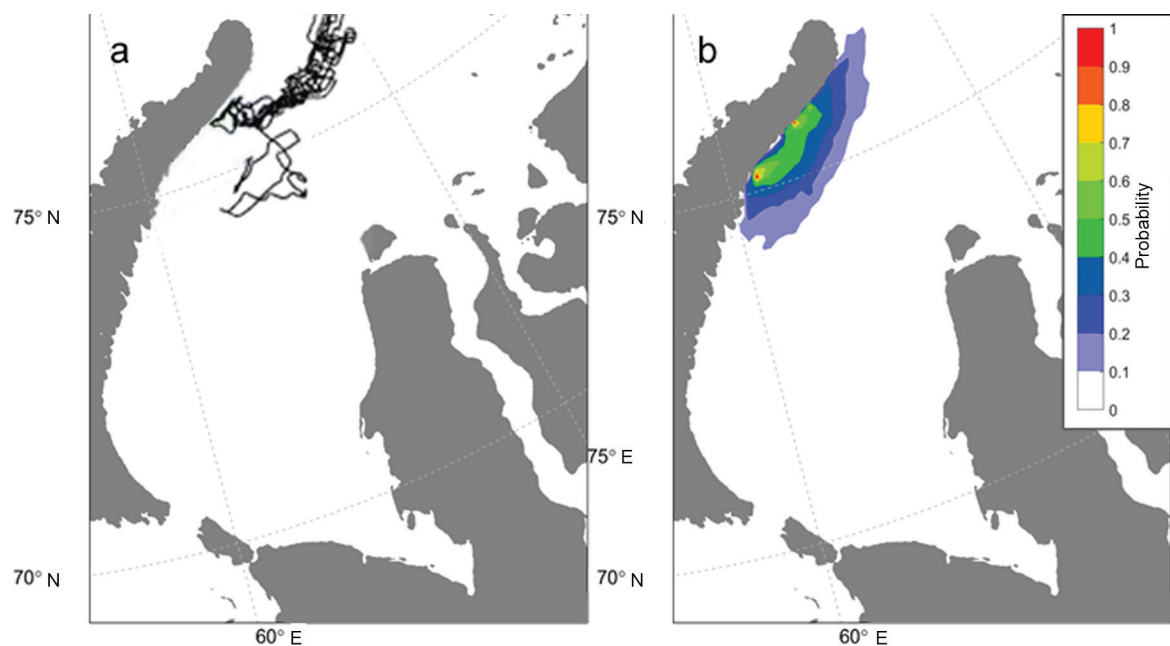


Рис. 4. Примеры модельных расчетов дрейфа айсбергов: а – траектории дрейфа айсбергов, сгенерированных ледником Вершинского с 13.04.2016 по 31.12.2016, б – оценка вероятности встречи с айсбергами, отколовшимися от ледников Розе, Вершинского и Рожественского.

ледники Розе (76.05° с. ш.; 67.00° в. д.), Вершинского (75.72° с. ш.; 65.00° в. д.) и Рождественского (75.77° с. ш.; 65.50° в. д.), для которых известны оценки продуктивности: 0.040, 0.124 и $0.013 \text{ км}^3/\text{год}$, соответственно [28].

В ходе реализации модели происходит запись траектории дрейфа каждого айсберга с часовой дискретностью. На *рис. 4а* приведены примеры траекторий дрейфа айсбергов.

Анализ траекторий и скоростей моделируемого дрейфа показал, что изменчивость скоростей дрейфа превалирует над скоростью среднемесячного переноса айсбергов. В этой части акватории Карского моря средний перенос айсбергов происходит преимущественно в северо-восточном направлении. Такие результаты моделирования совпадают с оценками генерального направления дрейфа, сделанными в работе [29].

После выполнения расчета ежечасные координаты сортировались в ячейки сеточной области с пространственным шагом 12.5 км , по этим данным оценивалось суммарное время нахождения айсбергов в каждой ячейке сеточной области. Айсберговая опасность (вероятность встречи с айсбергом) определялась как отношение суммарного времени нахождения айсбергов в каждой ячейке сеточной области модели к общему времени реализации модели. Полученные таким образом оценки вероятности встречи с айсбергом представлены на *рис. 4б*. Максимальные значения вероятности отмечаются в точках двух выводных ледников, ледяной сток которых содержит максимальные значения: ледники Розе (0.98) и Вершинского (0.96). У ледника Рождественского вероятность появления айсберга составила 0.59. Области с высокой вероятностью встречи с айсбергами располагаются вдоль побережья Новой Земли (у самого побережья вероятность превышает 0.4), при этом заметна вытянутость таких областей в направлении на северо-восток, что также свидетельствует о генеральном выносе айсбергов в этом направлении.

На данный момент не для всех ледников известны оценки продуктивности айсбергов, поэтому полученные значения айсберговой опасности представляются несколько заниженными. Отсутствие информации о продуктивности ледников до некоторой степени можно восполнить с помощью метода оценки айсберговой опасности через расчет по модели условной вероятности, предложенного в работе [30]. В этом методе прописывается условие, что в модели в точке генерации всегда присутствует айсберг, то есть если силы выносят айсберг из начальной ячейки, то на его месте помещается новый. При таком расчете в точке ледника условная вероятность встречи айсберга всегда равна единице. С удалением от начальной точки этот показатель уменьшается, а его пространственное распределение обуславливается режимом гидрометеорологических условий. Полученное распределение условной вероятности умножается на вероятность появления айсберга в точке генерации, а затем поля полных вероятностей суммируются. Слабое место этого метода – необходимость оценок вероятности появления айсберга в районе ледника.

Возможно, что комбинация расчетов айсберговой опасности по продуктивности ледников и через условную вероятность позволит нивелировать недостатки обоих методов.

Предложенный алгоритм расчета айсберговой опасности основан на расчете скорости генерации айсбергов и их параметров методом Монте-Карло и последующем численном моделировании дрейфа и разрушения айсбергов. Метод был апробирован для условий юго-западной части Карского моря, но может быть применен для других акваторий.

Выводы:

1. Айсберги представляют значительную опасность для любых морских операций на российском арктическом шельфе и могут серьезно влиять на реализацию проектов по добыче углеводородов здесь. Анализ исторических источников и результаты современных исследований свидетельствуют о том, что айсберги выводных ледников архипелага Новая Земля существенно отличаются формой и размерами от айсбергов архипелагов Земля Франца-Иосифа и Северная Земля, что обуславливается в основном типами существующих там ледников.

2. Для оценки айсбергообразования ледников Новой Земли, Северной Земли и Земли Франца-Иосифа были использованы новые данные о толщине льда и подледном рельефе, полученные в результате воздушных радиолокационных съемок на этих архипелагах. Также для этого привлекались данные об изменениях фронтов этих ледников, полученные нами на основе

космических изображений, и данные о поверхностных скоростях движения ледников, полученные по космическим изображениям и GPS-измерениям. В результате использования этих данных и расчетов, выполненных по приведенной выше схеме, установлено, что фронтальная абляция изученного 31 ледника составляет: $-2.0 \text{ км}^3/\text{год}$ на Новой Земле (12 ледников); $-1.9 \text{ км}^3/\text{год}$ на Земле Франца-Иосифа (11 ледников); $-3.2 \text{ км}^3/\text{год}$ на Северной Земле (8 ледников).

3. Современные методы исследований позволяют собрать значительное количество информации о динамике наземного оледенения, айсбергообразовании, морфометрических характеристиках айсбергов и параметрах их дрейфа. Для оценки динамики наземного оледенения и айсбергообразования перспективным комплексом методов служит: воздушное зондирование ледников с помощью видеоимпульсных радиолокаторов, работающих на частотах 20–40 МГц; идентификация положения фронтов выводных ледников по космическим изображениям и их дешифрирование в ручном или полуавтоматическом режиме; определение скоростей движения поверхности ледников посредством распознавания положения одинаковых элементов на разновременных космических изображениях с шагом по времени от нескольких дней до года и более. Отработка технологии дистанционного мониторинга ледников открывает широкие возможности для наблюдения за процессами, влияющими на образование айсбергов вблизи районов размещения объектов нефтегазовой инфраструктуры на морском шельфе.

4. Наиболее подробная информация об общем объеме и массе отдельного айсберга достигается пу-

тем сочетания аэрофотосъемки и гидролокационной съемки. Установка на айсберги радиомаяков с функцией GPS позволяет получать сведения о параметрах индивидуального дрейфа этих опасных ледяных образований. Контроль потенциально возможного распространения айсбергов может быть осуществлен с помощью регулярного спутникового радиолокационного мониторинга.

5. Развитие методов математического моделирования позволяет в настоящее время достаточно успешно оценивать перемещение отдельных айсбергов в диагностическом и прогностическом режиме. Выявленные закономерности между линейными размерами и остальными геометрическими параметрами и массой айсбергов позволяют учесть в модели региональные особенности айсбергов морей Российской Арктики. Моделирование методом Монте-Карло генерации айсбергов и последующее численное моделирование пространственного распределения и разрушения айсбергов позволяют восполнить недостаток наблюдений за айсбергами при оценках айсберговой опасности и режимных характеристик дрейфа айсбергов.

Литература

1. О.Я. Сочнев, К.А. Корнишин, П.А. Тарасов, А.Л. Сальман, А.Ф. Глазовский, И.И. Лаврентьев, Я.О. Ефимов, Т.Э. Мамедов *Нефтяное хозяйство*, 2018, № 10(1140), 92. DOI: 10.24887/0028-2448-2018-10-92-97.
2. A. Glazovsky, N. Elagina, E. Vasilenko, I. Lavrentiev *IASC Workshop on the dynamics and mass budget of Arctic glaciers & proglacial marine ecosystems (Austria, Oberurgl, 22-24 January, 2018)*, 2018, pp. 19-21.
3. S. Løset *J. Geophys. Res.*, 98(C6), 1993, 10001. DOI: 10.1029/93JC00138.
4. I. Kubat, M. Sayed, S.B. Savage, T. Carrieres, G. Crocker *В Proc. 17th Int. Offshore and Polar Eng. Conf. (Portugal, Lisbon, 1-6 July, 2007)*, 2004, p. 652.
5. V. Abramov *Atlas of Arctic Icebergs, USA, NJ, Paramus, Backbone Publ. Comp.*, 1996, 70 pp.
6. *Опасные ледовые явления для судоходства в Арктике*, под ред. Е.У. Миронова, РФ, С.-Пб., Изд. ААНИИ, 2010, 320 с.
7. В.Ю. Визе *Известия Гос. Гидрологич. Инст.*, 1930, 29, 77.
8. А.В. Марченко, С.А. Огородов, А.С. Цвезинский, А.С. Шестов *В Тр. 9-й Межд. конф. и выставки по освоению ресурсов нефти и газа Российской Арктики и континентального шельфа стран СНГ (RAO/CIS Offshore 2009) (РФ, С.-Петербург, 15-18 сентября, 2009)*, в 2 тт., т. 1, РФ, С.-Петербург, Химиздат, 2009, с. 91–96.
9. И.В. Бузин *Дис. канд. геогр. наук, ААНИИ, РФ, С.-Пб.*, 2008 г., 202 с.
10. А.К. Наумов, Г.К. Зубакин, Ю.П. Гудошников, И.В. Бузин, А.А. Скутин *В Тр. 6-й Межд. конф. и выставки по освоению ресурсов нефти и газа Российской Арктики и континентального шельфа стран СНГ (RAO-03/CIS Offshore 2003) (РФ, С.-Петербург, 16-19 сентября, 2003)*, РФ, С.-Петербург, 2003, с. 337-342.
11. А.И. Данилов, В.Г. Дмитриев, В.А. Мартыщенко *В Тр. 9-й Межд. конф. и выставки по освоению ресурсов нефти и газа Российской Арктики и континентального шельфа стран СНГ (RAO/CIS Offshore 2009) (РФ, С.-Петербург, 15-18 сентября, 2009)*, в 2 тт., т. 1, РФ, С.-Петербург, Химиздат, 2009, с. 8–11.

12. «Кара-зима-2015» стала самой масштабной арктической экспедицией в мире за последние 20 лет, Управление информационной политики ОАО «НК «Роснефть», 16.06.2015. (<https://www.rosneft.ru/press/news/item/174202/>).
13. А.К. Наумов
Труды ААНИИ, 2004, 449, 140.
14. С.Л. Карлинский, А.А. Малютин, В.А. Чернецов
В Тр. 10-й Межд. конф. и выставки по освоению ресурсов нефти и газа Российской Арктики и континентального шельфа стран СНГ (RAO/CIS Offshore 2011) (РФ, С.-Петербург, 13–16 сентября, 2011), РФ, С.-Петербург, 2011, с. 456–461.
15. Морской добычный комплекс.
(<http://www.shtokman.ru/project/about/offshore/>).
16. J.A. Dowdeswell
J. Glaciol., 1989, 35(120), 224.
DOI: 10.3189/S002214300000455X.
17. Н.Н. Зубов
Льды Арктики, СССР, Москва, Изд. Главсевморпути, 1945, 350 с.
18. K.S. Sandford
Geograph. J., 1955, 121, 164. DOI: 10.2307/1791701.
19. И.В. Бuzин, А.Ф. Глазовский, Ю.П. Гудошников, А.И. Данилов, Н.Е. Дмитриев, Г.К. Зубакин, Н.В. Кубышкин, А.К. Наумов, А.В. Нестеров, А.А. Скутин, Е.А. Скутина, С.И. Шибакин.
Проблемы Арктики и Антарктики, 2008, №1(78), 66.
20. И.А. Бычкова, В.Г. Смирнов
Лёд и Снег, 59(3), 2019, 377.
DOI: 10.15356/2076-6734-2019-3-411.
21. Атлас гидрометеорологических и ледовых условий морей российской Арктики: обобщение фондовых материалов и результаты экспедиционных исследований ООО «АНПЦ» в 2012–2014 гг., РФ, Москва, Нефтяное хозяйство, 2015, 128 с.
22. R.I. May, R.B. Guzenko, Y.U. Mironov, A.K. Naumov, A.A. Skutin, E.A. Skutina, D.I. Sobotuk, G.A. Zamarin, K.A. Kornishin, Ya.O. Efimov, T.E. Mamedov
IJOPE, 2019, 29(4), 375. DOI: 10.17736/ijope.2019.jc770.
23. I.V. Polyakov, I.Yu. Kulakov, S.A. Kolesov, N.Eu. Dmitriev, R.S. Pritchard, D. Driver, A.K. Naumov
J. Mech. Arct. Eng., 1998, 120(2), 77. DOI: 10.1115/1.2829527.
24. N.Ye. Dmitriev, A.V. Nesterov
B Proc. of the 17th Int. Offshore and Polar Eng. Conf. (ISOPE-2007) (Portugal, Lisbon, July 1-6, 2007), USA, CA, Cupertino, ISOPE Publ., 2007, pp. 633–638.
25. K. Allison, G. Crocker, H. Tran, T. Carrieres
Cold Regions Sci. Tech., 2014, 108, 1.
DOI: 10.1016/j.coldregions.2014.08.007.
26. S.B. Savage
B *Geomorphological Fluid Mechanics, Ser. Lecture Notes in Physics*, Eds N.J. Balmforth, A. Provenzale, 2001, 582, pp. 279–318.
DOI: 10.1007/3-540-45670-8_12.
27. L. Padman, S. Erofeeva
Geophys. Res. Lett., 2004, 31(2), L02303.
DOI: 10.1029/2003GL019003.
28. P.A. Tarasov, K.A. Kornishin, I.I. Lavrentiev, T.E. Mamedov, A.F. Glazovsky, E.S. Bagorian, Ya.O. Efimov, I.V. Buzin, P.A. Salman
B Proc. of the Twenty-ninth (2019) International Ocean and Polar Engineering Conference (USA, Hawaii, Honolulu, 16-21 June, 2019), USA, CA, Cupertino, ISOPE Publ., 2019, pp. 671–678.
29. I.V. Buzin, A.V. Nesterov, Yu.P. Gudoshnikov, A.A. Pashali, K.A. Kornishin, Ya.O. Efimov, D.S. Stragnikov
IJOPE, 2019, 29(4), 391. DOI:10.17736/ijope.2019.jc772.
30. A. Tiugaleva, R. Guzenko, S. Klyachkin, R. May
B Proc. 19th Int. Multidisc. Sci. GeoConf. "SGEM 2019" (Bulgaria, Albena, 30 June – 6 July, 2019), Bulgaria, Sofia, 2019, pp. 977–984.
DOI: 10.5593/sgem2019/1.2/S06.124.

English

Study of Dynamics and Morphometry of Glaciers and Icebergs and Application of the Results for the Development of the Hydrocarbon Deposits on the Continental Shelf of the Russian Arctic*

Igor V. Buzin

Arctic and Antarctic Research Institute
38 Bering Str., St. Petersburg, 199397,
Russia
buzin@aari.ru

Andrey F. Glazovsky

Institute of Geography, RAS
29 Staromonetny, Moscow, 119017,
Russia
glazovsky@igras.ru

Ruslan I. May

Arctic and Antarctic Research Institute
38 Bering Str., St. Petersburg, 199397,
Russia
may@aari.ru

Yevgeny U. Mironov

Arctic and Antarctic Research Institute
38 Bering Str., St. Petersburg, 199397,
Russia
mir@aari.ru

Alexander V. Nesterov

Arctic and Antarctic Research Institute
38 Bering Str., St. Petersburg, 199397,
Russia
nest@aari.ru

Alexei K. Naumov

Arctic and Antarctic Research
Institute
38 Bering Str., St. Petersburg,
199397, Russia
nmv_alex@rambler.ru

Yury P. Gudoshnikov

Arctic and Antarctic Research Institute
38 Bering Str., St. Petersburg, 199397,
Russia
gup@aari.ru

Abstract

The article is dealing with the main results of glacier and icebergs studies performed in the Russian Arctic and their practical applications. The modern methods of the dynamics estimation and iceberg productivity of the Arctic tidewater glaciers are described, as well as the iceberg production rate for Novaya Zemlya, Franz-Josef Land and Severnaya Zemlya archipelagoes. The methods of icebergs surveys are discussed, and the problems of iceberg distribution in the Russian Arctic seas and impact on the development of the major oil and gas offshore projects are described. The estimations of the main morphometric parameters of icebergs are given, the difference between icebergs from Franz-Josef Land/Severnaya Zemlya Land archipelagoes and Novaya Zemlya is demonstrated. The result of iceberg drift modelling for the 2002/03 ice season (the flux of icebergs to the central part of the Barents Sea, to the water area of the promising hydrocarbon deposit) is demonstrated. An example of iceberg threat calculation for the Kara Sea with the help of modelling of generation of icebergs by the Monte-Carlo method and further numerical simulations of their spatial distribution is given.

Keywords: glaciers, icebergs, Arctic Shelf, distribution, modelling.

*The work was financially supported by RFBR (projects 05-05-64732, 16-35-00333, 17-55-80107 and 18-0560109).

Images & Tables

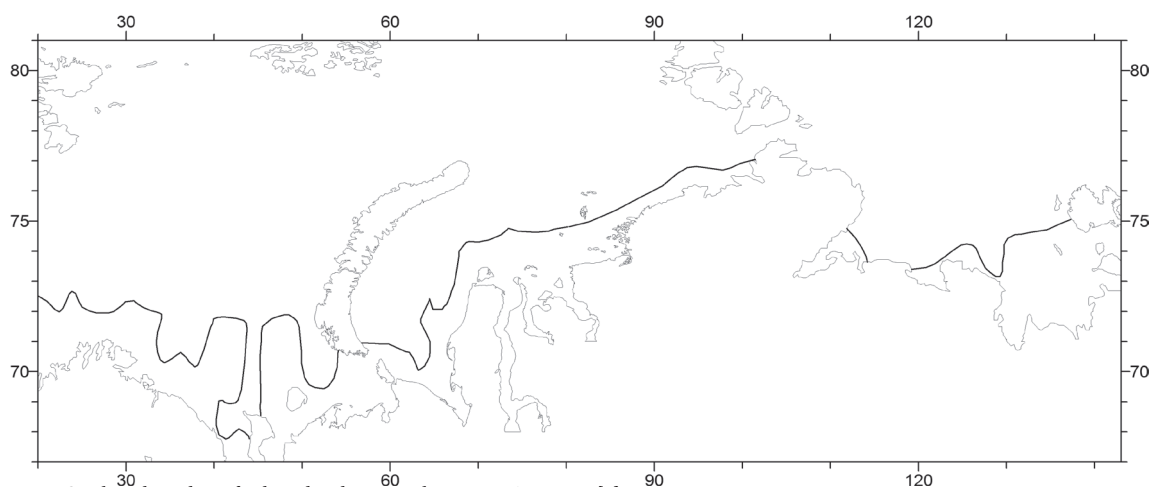


Fig. 1. Southern boundary of iceberg distribution in the Russian Arctic seas [6].

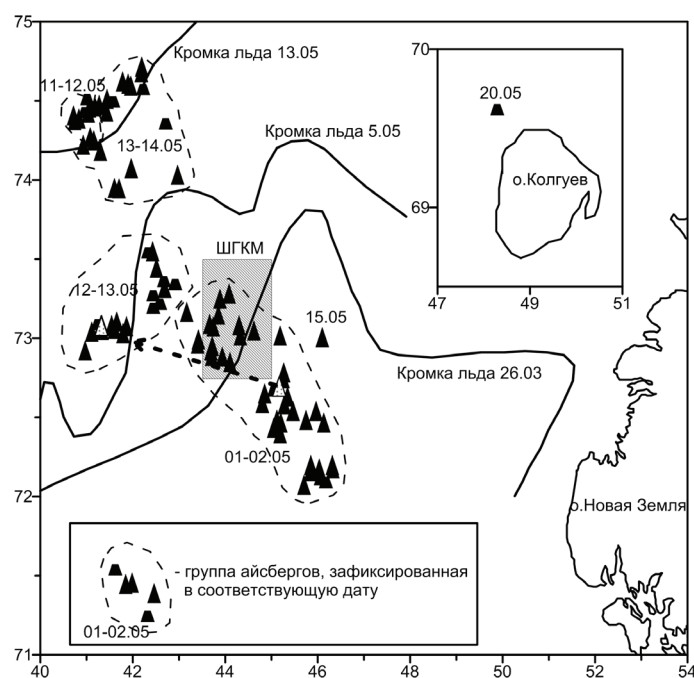


Fig. 2. Position of icebergs in area of Shtokman Gas Condensate Field in May, 2003 [10].

Table 1. Statistical characteristics of the iceberg length (m) according to the data of AARI's expeditions in 2012–2017 [22].

Statistic indexes		All regions	Arch. Novaya Zemlya	Arch. Severnaya Zemlya and the Franz-Josef Land	
				Non-tabular	Tabular
Mean		121	61	93	205
Standard deviation		95	36	53	109
Quantile (with probability P)	$p=0.05$	22	12	30	63
	$p=0.25$	56	34	55	121
	$p=0.50$	90	57	79	177
	$p=0.75$	157	80	120	280
	$p=0.95$	344	118	198	410

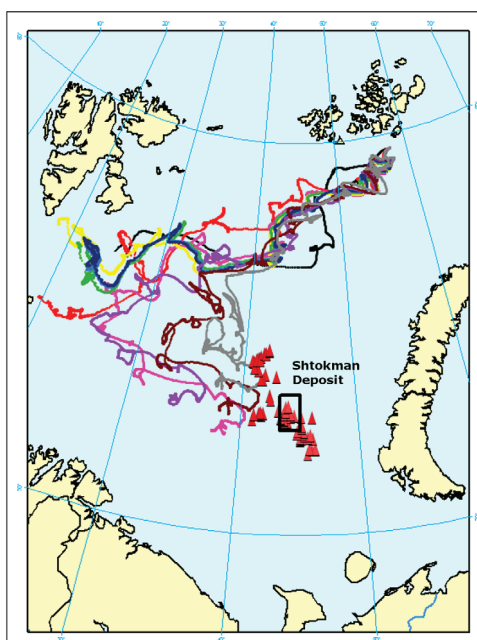


Fig. 3. Iceberg drift trajectories according to numerical simulations for the period of September 2002 – May 2003 (triangles mark the real positions of icebergs in May 2003) [24].

Table 2. Parameters of regression $Y=kL^n$, linking the length (L) with the mass and geometrical parameters of the Novaya Zemlya icebergs in the Kara Sea (according to [22]).

Equation parameters	Iceberg parameters					
	Width W	Mass M	Draft D	Area of the vertical cross-section of the above-water part $S_{A\perp}$	Area on the waterline area $S_{A\parallel}$	Area of the vertical cross-section of the under-water part S_W
Power, n	1	3	1	2	2	2
Regression coefficient, k	0.6400	$0.1975 \times \rho^*$	0.5200	0.04720	0.3828	0.3652
Determination coefficient, R^2	0.81	0.71	0.37	0.68	0.85	0.76
Root mean square error, σ_e	11	75480	19	125	5590	1562

* Iceberg ice density.

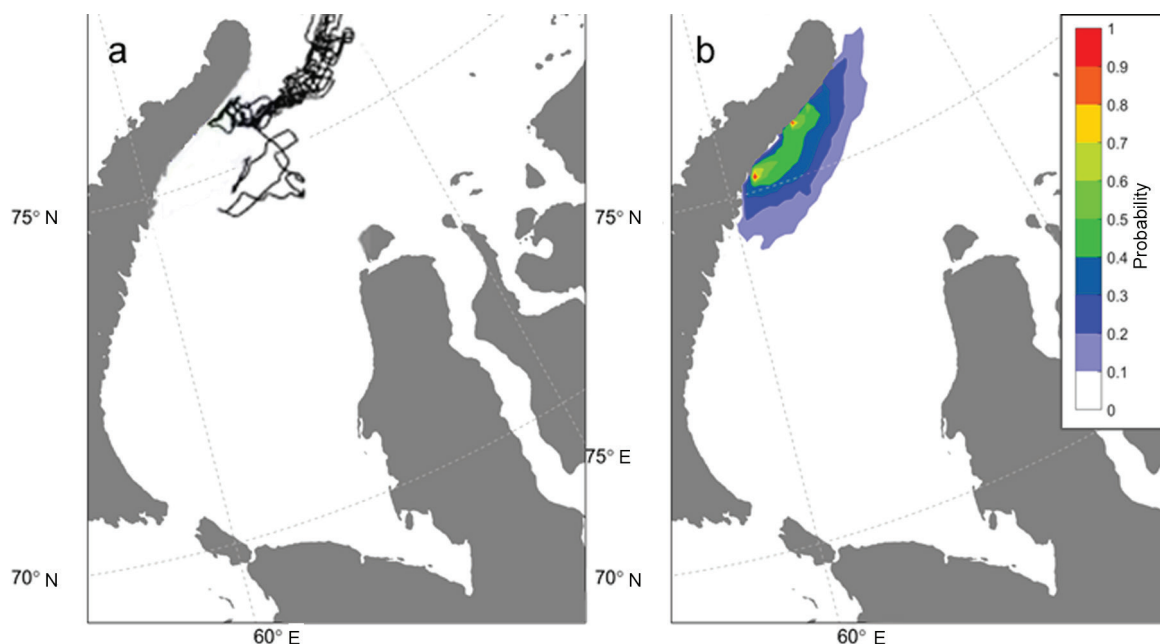


Fig. 4. Examples of simulations of the icebergs drift: a – trajectories of icebergs generated at Vershynsky glacier in the period 13 Apr. 2016 – 31 Dec. 2016; b – estimation of probability of encountering the icebergs calved from glaciers Roze, Vershynsky and Rozhdestvensky.

References

- O.Ya. Sochnev, K.A. Kornishin, P.A. Tarasov, A.L. Salman, A.F. Glazovsky, I.I. Lavrentiev, Ya.O. Efimov, T.E. Mamedov Oil Industry [Neftyanoe Khozyaystvo], 2018, № 10(1140), 92 (in Russian). DOI: 10.24887/0028-2448-2018-10-92-97.
- A. Glazovsky, N. Elagina, E. Vasilenko, I. Lavrentiev In Proc. IASC Workshop on the dynamics and mass budget of Arctic glaciers & proglacial marine ecosystems (Austria, Obergurgl, 22-24 January, 2018), 2018, pp. 19–21.
- S. Loset J. Geophys. Res., 98(C6), 1993, 10001. DOI: 10.1029/93JC00138.
- I. Kubat, M. Sayed, S.B. Savage, T. Carrieres, G. Crocker In Proc. 17th Int. Offshore and Polar Eng. Conf. (Portugal, Lisbon, 1-6 July, 2007), 2004, p. 652.
- V. Abramov Atlas of Arctic Icebergs, USA, NJ, Paramus, Backbone Publ. Comp., 1996, 70 pp.
- Ice Phenomena Threatening Arctic Shipping [Opasnyye ledovyye yavleniya dlya sudokhodstva v Arktike], Ed. E.U. Mironov, RF, St. Petersburg, AARI Publ., 2010, 320 pp. (in Russian).
- V.Yu. Vieze Izvestia Gos. Gidrolog. Inst. [Letters of the State Hydrological Institute], 1930, 29, 77 pp. (in Russian).
- A.V. Marchenko, S.A. Ogorodov, A.S. Tsvetsinskiy, A.S. Shestov In Proc. Int. Conf. RAO/CIS Offshore 2009 (RF, Snt. Petersburg, 15–18 September, 2009), in 2 Vols, Vol. 1, RF, Snt. Petersburg, Khimizdat, 2009, pp. 91–96 (in Russian).
- I.V. Buzin PhD Thes. (Geography) [Dissertation for the degree of a Candidate of Geographic Sciences], AARI, RF, Snt. Petersburg, 2008, 202 pp. (in Russian).
- A.K. Naumov, G.K. Zubakin, Yu.P. Gudoshnikov, I.V. Buzin, A.A. Skutin In Proc. Int. Conf. RAO-03/CIS Offshore 2003 (RF, Snt. Petersburg, 16–19 September, 2003), RF, Snt. Petersburg, 2003, pp. 337–342 (in Russian).
- A.I. Danilov, V.G. Dmitriev, V.A. Martyshchenko In Proc. Int. Conf. RAO/CIS Offshore 2009 (RF, Snt. Petersburg, 15–18 September, 2009), in 2 Vols, Vol. 1, RF, Snt. Petersburg, Khimizdat, 2009, pp. 8–11 (in Russian).
- Kara-Winter-2015 has become the largest arctic expedition in the world in recent 20 years, Rosneft Information Division 16.06.2015. (<https://www.rosneft.ru/press/news/item/174202/>).
- A.K. Naumov AARI Proc. [Trudy AANII], 2004, 449, 140 (in Russian).
- S.L. Karlinsky, A.A. Malyutin, V.A. Chernetsov In Proc. Int. Conf. RAO/CIS Offshore 2011 (RF, Snt. Petersburg, 13–16 September, 2011), RF, Snt. Petersburg, 2011, pp. 456–461 (in Russian).
- Offshore Facilities. (<http://www.shtokman.ru/en/project/about/offshore/>) (in Russian).
- J.A. Dowdeswell J. Glaciol., 1989, 35(120), 224. DOI: 10.3189/S00221430000455X.
- N.N. Zubov Arctic Ice, USSR, Moscow, Glavsevmorput Publ. House, 1945, 350 pp. (in Russian).
- K.S. Sandford Geograph. J., 1955, 121, 164. DOI: 10.2307/1791701.
- I.V. Buzin, A.F. Glazovsky, Yu.P. Gudoshnikov, A.I. Danilov, N.E. Dmitriev, G.K. Zubakin, N.V. Kubyshev, A.K. Naumov, A.V. Nesterov, A.A. Skutin, E.A. Skutina, S.I. Shibakin Arctic and Antarctic Research [Problemy Arktiki i Antarktiki], №1(78), 66 (in Russian).
- I.A. Bychkova, V.G. Smirnov Ice and Snow, 2019, 59(3), 377 (in Russian). DOI: 10.15356/2076-6734-2019-3-411.
- Atlas of Hydrometeorological and Ice Conditions of Russian Arctic Seas: Summary of Archived Materials and Results of the Field Surveys of LLC “APSC” in 2012–2014 [Atlas gidrometeorologicheskikh i ledovykh usloviy morey rossiyskoy Arktiki: obobshcheniye fondovykh materialov i rezultaty

- ekspeditsionnykh issledovaniy OOO "ANPTS" v 2012–2014 gg.], RF, Moscow, Oil Industry Publ., 2015, 128 pp. (in Russian).
22. **R.I. May, R.B. Guzenko, Y.U. Mironov, A.K. Naumov, A.A. Skutin, E.A. Skutina, D.I. Sobotuk, G.A. Zamarin, K.A. Kornishin, Ya.O. Efimov, T.E. Mamedov**
IJOPE, 2019, **29**(4), 375. DOI: 10.17736/ijope.2019.jc770.
23. **I.V. Polyakov, I.Yu. Kulakov, S.A. Kolesov, N.Eu. Dmitriev, R.S. Pritchard, D. Driver, A.K. Naumov**
J. Mech. Arct. Eng., 1998, **120**(2), 77. DOI: 10.1115/1.2829527.
24. **N.Ye. Dmitriev, A.V. Nesterov**
In *Proc. of the 17th Int. Offshore and Polar Eng. Conf. (ISOPE-2007)* (Portugal, Lisbon, July 1–6, 2007), USA, CA, Cupertino, ISOPE Publ., 2007, pp. 633–638.
25. **K. Allison, G. Crocker, H. Tran, T. Carrieres**
Cold Regions Sci. Tech., 2014, **108**, 1.
DOI: 10.1016/j.coldregions.2014.08.007.
26. **S.B. Savage**
In *Geomorphological Fluid Mechanics, Ser. Lecture Notes in Physics*, Eds N.J. Balmforth, A. Provenzale, 2001, **582**, pp. 279–318.
DOI: 10.1007/3-540-45670-8_12.
27. **L. Padman, S. Erofeeva**
Geophys. Res. Lett., 2004, **31**(2), L02303.
DOI: 10.1029/2003GL019003.
28. **P.A. Tarasov, K.A. Kornishin, I.I. Lavrentiev, T.E. Mamedov, A.F. Glazovsky, E.S. Bagorian, Ya.O. Efimov, I.V. Buzin, P.A. Salman**
In *Proc. of the Twenty-ninth (2019) International Ocean and Polar Engineering Conference (USA, Hawaii, Honolulu, 16–21 June, 2019)*, USA, CA, Cupertino, ISOPE Publ., 2019, pp. 671–678.
29. **I.V. Buzin, A.V. Nesterov, Yu.P. Gudoshnikov, A.A. Pashali, K.A. Kornishin, Ya.O. Efimov, D.S. Stragnikov**
IJOPE, 2019, **29**(4), 391. DOI:10.17736/ijope.2019.jc772.
30. **A. Tiugaleva, R. Guzenko, S. Klyachkin, R. May**
In *Proc. 19th Int. Multidisc. Sci. GeoConf. «SGEM 2019»* (Bulgaria, Albena, 30 June – 6 July, 2019), Bulgaria, Sofia, 2019, pp. 977–984.
DOI: 10.5593/sgem2019/1.2/S06.124.

Периферийная инновационная система и ее место в процессе освоения ресурсов российской Арктики*

А.Н. Пилясов, Е.С. Путилова

Феномен периферийной инновационной системы рассмотрен в контексте процесса освоения природных ресурсов Арктики. Его ключевым актором выступают ресурсные корпорации России. На примере анализа патентной активности ПАО «НОВАТЭК» и ПАО «ГМК «Норильский никель»» продемонстрированы различия арктических компаний в стратегиях добывания нового знания. Пики патентной активности, как правило, предвещают развертывание проектов нового ресурсного освоения Арктики.

Периферийные инновационные системы авторы классифицировали по охвату ареала; по степени влияния ключевого актора; по стадии освоения, к которой они приурочены; по типу ключевого природного ресурса и другим факторам.

Введено понятие коммуникационной проницаемости пространства, которая в Арктике зависит от конфигураций сети расселения, основных транспортных маршрутов, наличия кабеля широкополосной связи и других факторов. Так, максимальную коммуникационную проницаемость в Арктике имеет Мурманская область, минимальную – Чукотский автономный округ.

Показано, что несоответствие унифицированных федеральных норм и правил специфичным условиям Арктики тормозит работу периферийной инновационной системы и весь процесс хозяйственного освоения ресурсов Арктики.

Ключевые слова: периферийная инновационная система, освоение ресурсов Арктики, акторы, сети, институты.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-05-00600).

Введение

Концепция региональной инновационной системы (РИС) появилась в начале 1990 годов – прежде всего усилиями английского ученого Ф. Кука [1], который спроецировал на регион уже несколько лет к тому времени существующую концепцию национальных инновационных систем, разработанную К. Фриманом [2–3], Р. Нельсоном [4] и Б.А. Люндваллом [5]. Ключевая идея РИС-концепции состоит в том, что для развертывающегося в конкретном пространстве инновационного процесса важны не только технологические вопросы, но также пространственный контекст, институциональная среда. Вот почему триада «акторы – сети – институты» стала основной для этой концепции: в ней хорошо прорабатываются вопросы местной «атмосферы», задаваемой конкретными игроками; внешними и внутренними связями и каналами коммуникации, по которым знание поступает в систему и происходит его перераспределение

внутри; институтами, которые концентрируют запасы знания и способствуют его обновлению.

В классических работах по региональным инновационным системам редко выделяют особый тип периферийных инновационных систем. Главное внимание исследователей обращено к инновационному процессу плотно освоенных регионов и крупных городских агломераций, глобальных городов – традиционных центров диверсифицированного креативного сервиса и обрабатывающей промышленности. И это закономерно: основной поток инноваций, патентов, нового знания генерируется именно здесь.



ПИЛЯСОВ
Александр Николаевич
профессор,
генеральный директор АНО «Институт
регионального консалтинга»,
Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова



ПУТИЛОВА
Елена Сергеевна
АНО «Институт регионального
консалтинга»

Однако для России, в которой ресурсодобывающие районы Арктики и Севера составляют большую часть территории страны, исключительно актуален другой исследовательский поворот: сделать объектом изучения не крупные агломерации и зону основного расселения, а транспортно удаленные и климатически дискомфортные, но богатые природными ресурсами территории страны. Обобщение немногочисленных работ по периферийным инновационным системам, появившихся в последние десять лет [6–12], позволяет выявить ключевые особенности инноваций на периферии.

Прежде всего, это малочисленность организаций, в которых сосредоточен потенциал научных и практических знаний. В этих условиях беспрецедентное значение обретает потенциал знаний, накопленных работающей здесь глобальной ресурсной корпорацией – местным филиалом ТНК, – с которой контрактуют местные малые бизнесы [13]. Ресурсные корпорации становятся проводниками новых технологий в удаленные районы, производственных инноваций, определяют в целом технологическую траекторию [14] развития территории своего присутствия.

Реализуемые ими проекты нового ресурсного освоения через процедуры субконтрактинга, плотного взаимодействия с местным малым бизнесом в случае их осуществления способны оказать глубокое воздействие на формирование локальной инновационной системы. Можно сравнить эту роль с ролью университетов и других структур высшего и профессионального образования в центральных районах.

Традиционное деление на фундаментальную и прикладную науку, академические и инженерные инновации, характерное для освоенных районов, здесь, в условиях разреженной периферии с малым разнообразием компетенций, технологий и знания, замещается комплексными инновациями, интегрирующими академическое и опытное, инженерное знание [11].

Внутри периферийных инновационных систем пространственные перетоки знания обычно очень слабые – по простой причине отсутствия здесь разнообразного знания, необходимых компетенций на местных рынках труда. В этих условиях многие работающие в Арктике и на Севере (например, ПАО «ГМК "Норильский никель"», ПАО «Сургутнефтегаз» и др.) ресурсные корпорации вынуждены «интернализировать» различные виды знания, то есть выйти на высокий уровень самообеспеченности по техническому, инженерному, геологическому и другому знанию. Это вызывает у арктических фирм стремление обеспечить стабильность работы своих квалифицированных и компетентных кадров, которые наработали уникальные местные компетенции, и создать собственные исследовательские центры во внешних тыловых и внутренних форпостных базах освоения (например, Санкт-Петербург, Мурманск, Тюмень и др.)

Другая, так же отчетливо проявляющаяся стратегия «добывания» знания ресурсными корпорациями Арктики и Севера – их вхождение в географически широкие сети сотрудничества с внешними отечественными и зарубежными партнерами – носителями уникального знания и компетенций в вопросах разведки природных ресурсов, в том числе на шельфе, в технологиях отработки сложных месторождений и др. Но даже тем ресурсным корпорациям арктической периферии, которые привычно полагаются на свое внутреннее знание, для преодоления инерции колеи и неизбежной интеллектуальной зашоренности критически важно иметь сети внешних партнеров-поставщиков нового знания. Зарубежные исследования показывают, что, при прочих равных условиях, крупные и малые фирмы на периферии более склонны вступать в договорные отношения с дальними (глобальными) партнерами и в целом более склонны к сотрудничеству, чем фирмы в освоенных районах [8]. Таким образом, можно ожидать, что ресурсные корпорации российской Арктики более коммуникационно активны, чем корпорации обрабатывающей промышленности зоны основного расселения России.

Тонкий слой структур, которые вырабатывают новое знание (академические и корпоративные исследовательские и проектные институты, университеты и колледжи, центры переподготовки кадров и др.), закономерно приводит в периферийной инновационной системе к хорошо известным и многократно описанным проблемам. Прежде всего, это информационная зашоренность на уже созданной ресурсной специализации территории, которая приводит к негативным блокировкам развития по заданной траектории, добыче природных ресурсов в уже хорошо известных геологических структурах и ареалах, к робости попыток взломать инерцию и попытаться

выйти на новый цикл ресурсного освоения, с новыми природными ресурсами, в новых геологических структурах и на новых ареалах.

Другая частая проблема связана с внедрением достижений и наработок местной исследовательской подсистемы в более консервативную эксплуатационную подсистему, когда новое знание реально есть, но в силу консервативности и негибкости добычных структур не используется. Ситуация может разрешиться созданием спин-оффов¹ крупных материнских корпоративных структур и стартапов, более готовых к коммерциализации аналитического знания исследовательских подразделений.

Типичными проблемами являются также: отсутствие синергии между немногочисленными несущими знание местными структурами; фрагментация ключевых акторов периферийной инновационной системы; недостаток внутренних перетоков знания и коллективного обучения (исследователи называют этот феномен «коммуникационными провалами» [15]). Нередко это связано с недостаточной «поглощительной способностью» (или инновационной емкостью) главных акторов местной инновационной системы, то есть их неготовностью по уровню образования и квалификации оценить и внедрить предлагаемое новое знание (соединить его с уже существующим и привычным). Проблема разрешается наймом новых квалифицированных и компетентных кадров. Отсутствие синергии акторов для «склеивания» кусочков разного знания в новую целостность может быть следствием и огромных расстояний периферийных ресурсных территорий, которые делают невозможными регулярную личную коммуникацию и обмены знаниями между профессионалами.

Вместо постоянных, стационарных городских и хозяйственных агломераций, характерных для освоенных районов, здесь, в удаленных территориях Арктики и Севера, возникают временные агломерации (например, в виде вахтовых поселений), мобильные хозяйственные ассоциации субъектов экономики. Эти временные концентрации хозяйствующих субъектов, чрезвычайно характерные для Арктики, базируются на эффектах временной близости – понятие, которое в последние годы разрабатывает французская школа теории близости во главе с А. Торре [16], – в формах деловых командировок, периодических конференций, производственных выставок и др.

Малочисленность несущих новое знание организаций сочетается в периферийных инновационных си-

стемах с огромным значением государственных институтов поддержки, активизации инновационного процесса, немногочисленных структур науки, высшего и среднего профессионального образования. Сравнительно роль такой поддержки и таких структур здесь существенно выше, чем в давно освоенных центральных районах.

Объектом наших исследований стала периферийная инновационная система регионов российской Арктики – данный тип впервые был выделен нами как отдельный при проведении общей типологии инновационных систем России [17, с. 58], которая рассматривалась в прочной интеграции с процессом хозяйственного освоения природных ресурсов. В этом заключалось главное отличие нашего подхода от работ зарубежных коллег.

Цель исследования состояла в теоретической концептуализации и эмпирическом обобщении ее главных черт и сущностных характеристик. Эта цель предусматривала решение трех задач: характеристики базового инновационного процесса (инногенеза) в районах российской Арктики в контексте ресурсного освоения; определения ключевых акторов, сетей и институтов периферийной инновационной системы Арктики на конкретных примерах и аналитических материалах; описания двух пространственных форм периферийной инновационной системы – городской и районной.

Феномен периферийной инновационной системы Арктики

Весь процесс хозяйственного освоения и современного существования арктических территорий, тонус их социально-экономического развития связан с вовлечением в оборот природных ресурсов. Ресурсность явля-

¹ Спин-оффы – новые фирмы, создаваемые материнскими компаниями – ресурсными корпорациями Арктики для концентрации интеллектуальных, финансовых и материальных ресурсов на прорывных направлениях и радикальной активизации здесь инновационного процесса.

ется сущностной чертой этих территорий России.

Но это означает, что и периферийная инновационная система здесь неразрывно связана с процессом освоения природных ресурсов. Это особенно верно на этапах пионерного освоения, но и в дальнейшем, по мере старения ресурсной провинции и диверсификации местной экономики (если только не происходит закрытие «неперспективной территории»), эта связь «ресурсы – освоение – инновации» сохраняется, приобретая другие формы. «Нерв» арктической периферийной инновационной системы – продление жизненного цикла ресурсного освоения территории. И на эту сверхзадачу работают поисковые (геологоразведочные), инженерно-технологические (добычные) и институциональные (организационные) инновации.

Сказанное не означает, что инновационный процесс не может развертываться в жилищно-коммунальном хозяйстве городов Арктики, в системах повседневного жизнеобеспечения, продовольственной, энергетической и транспортной безопасности местных сообществ Арктики. Именно в последние десятилетия мы наблюдаем здесь колоссальные прорывы – от снегоходной революции до альтернативной энергетики. Однако именно в ресурсах, в природопользовании инновационный процесс обретает здесь системную целостность. Поскольку вся экономика здесь выстроена вокруг ресурсов и просто создана, состоялась потому, что было начато ресурсное освоение, – логично и местную инновационную систему выстраивать вокруг феномена ресурсного освоения. А уже на ядро ресурсного освоения постепенно накладываются жизнеобеспечивающие и социальные инновации.

Но периферийная инновационная система не просто состыкована с ресурсным освоением – это пространственно-временной феномен, который развивается в смычке с динамикой освоения и истощения ресурсной

провинции. Инновационный процесс чутко реагирует в своей интенсивности (глубине) и диверсификации (пространственной и отраслевой широте), общей напряженности на вызовы каждого «возраста» ресурсной территории. И в этом состоит существенное отличие наших представлений от советского времени, когда инновационный процесс «допускался» в основном лишь на стадии информационного изучения, разведки и поисков в районе нового освоения; по умолчанию предполагалось, что на стадии обустройства, добычи и переработки природного ресурса его уже как бы нет [18]. В самой пионерной стадии ресурсного освоения главными генераторами инноваций выступают предприимчивые люди и фирмы; на стадии подъема и стабилизации добычи – крупные суперорганизации-корпорации; на стадии затухающей добычи – структуры малого бизнеса.

Для изыскательской, разведочной фазы освоения характерны свои институты и структуры инновационной системы (без стартового прорыва в инновационном поиске не будет и последующего освоения). Для стадии пионерного освоения характерно географическое расширение поисковых работ и активное внедрение технических добычных новшеств.

На стадии зрелости обычно напряженность поискового процесса ослабевает. После прорывного геологического открытия интенсивность разведочного поиска и динамики технологического обновления ослабевает. Этот период «инновационной вялости» для территории и ключевых акторов, вовлеченных в процесс недропользования, в зависимости от ситуации может длиться от нескольких лет до десятилетий. Слишком велики открытые запасы и слишком высоко содержание природного компонента в исходной смеси/породе. Требуется время, чтобы их «переварить», и это время неблагоприятно для радикальных производственных инноваций.

Однако потом, под влиянием резкого нарушения баланса погашения и прироста запасов (на стадии истощения или острой конкуренции между акторами внутри инновационной системы территории), инновационный процесс вновь резко радикализуется: возникают фундаментально новые представления о геологическом строении территории и потенциально привлекательных для отработки геологических структурах по возрасту, глубине и среде залегания, принципиально новые технологии добычи природных ресурсов и их транспортировки. Это позволяет, порой на длительное время, отодвинуть неизбежное истощение природных ресурсов территории.

Повторяется прежний цикл: на этапе выхода добычи на новое плато интенсивность инновационной деятельности по площади охвата и революционности используемых технологий и геологических представ-

лений падает. Затем, на этапе спада, опять потребность в инновационном процессе в обеих подсистемах усиливается.

Но нельзя назвать эту фазу прямым повторением предшествующей: во-первых, существенно возрастает потребность в местном знании о природных активах истощенной провинции, становится недостаточно просто общих концептуальных представлений о геологическом строении, требуются детали, настроенные на учет особенностей конкретного добычного объекта (месторождения); во-вторых, инновационный поиск расширяется (демократизируется) по количеству и типу структур, которые его ведут, утрачивается привилегия крупных ресурсных корпораций. Нередко это происходит на фоне радикальной смены самих главных акторов – от крупных компаний к их спин-оффам или неинтегрированным малым и средним добычным предприятиям. В этот период ввиду постепенной диверсификации местной экономики в крупных арктических поселениях главный центр инновационной системы постепенно перемещается от мест промысла, из сферы разведки и поиска, добычных технологий, сюда, в научно-образовательные институты, в сферу транспортного, энергетического и сервисного обустройства. Эти инновации обязательно присутствовали и на этапе пионерного освоения, но тогда они носили зависимый, производный характер, а теперь они автономизируются, концентрируются в прежних крупных базах хозяйственного освоения, приобретают самостоятельный, независимый характер.

На этапе пионерного освоения (гринфилд-проекта) периферийная инновационная система представляет собой одно слитное ядро – генератор комплексных «инноваций освоения», в котором тесно слиты производственные поисковые, инженерные, институциональные и все социально-жизнеобеспечивающие инновации. Затем возникает развилка: если освоение проходит по временной схеме, тогда и инновационная система предельно нестационарна и готова к свертыванию и передислокации на новое место; если же процесс освоения обретает длительность и социально-производственную стационарность, тогда внутри инновационной системы обособляется поисковая и эксплуатационная подсистема.

Дальше инновационная система перерождается от узкоотраслевой, в которой главную роль играют две пересекающихся, взаимодействующих друг с другом подсистемы (выработки нового знания и его использования), до широкой территориальной, в которой существенно более значимы местный социальный контекст и уже обустроенное расселенческое пространство городских агломе-

раций, монопрофильных городов и вахтовых поселений, генерируются не только производственные, но и жизнеобеспечивающие, социальные, управленческие и другие инновации. Постепенно они отрываются от производственного ядра и становятся более независимыми, автономными. Систему начинает связывать в целостность уже не тип ресурса и ресурсного освоения, а место – конкретный город или район. Идет перерождение прежде корпоративной, отраслевой инновационной системы в территориальную, приуроченную к городской агломерации или муниципальному району, которое обязательно сопровождается и территориальной передислокацией центров компетенций – сначала ближе к местам добычи, потом к научно-образовательным центрам – форпостным и тыловым базам освоения. (Таким образом, в зависимости от возраста освоения периферийная инновационная система имеет форму отраслевой или территориальной).

Но одновременно это означает, что феномен территориальной инновационной системы сближается с хорошо описанной ситуацией для давно освоенных территорий мира. Всегда присутствующей в Арктике альтернативой этому эволюционному пути развития инновационной системы является прекращение ее существования в случае отказа от дальнейшего освоения территории.

Внутри типичной периферийной инновационной системы Арктики важнейшую роль играют две взаимодействующие подсистемы: накопления знания о природных ресурсах (в виде двух составляющих общего формализованного знания и местного неявного знания); эксплуатации природных ресурсов. Они находятся в диалектическом противоречии: ввиду эффекта падающей отдачи погашение запасов природных ресурсов при их добыче постоянно угрожает опередить их прирост в ходе геологоразведочных, поисковых работ. Не-

обходимость постоянного балансирования работы двух этих подсистем определяет острую драматургию их взаимодействия.

Два эти блока существенно различаются по природе якорного знания, его локализации (концентрации в пространстве), структурной оболочке, режиму и типу динамики инновационного процесса. Общей закономерностью обеих подсистем является возрастание роли и значения местного знания по мере углубления процесса ресурсного освоения. Процесс локализации и геологического и добычного знания при длительной эксплуатации ресурсной провинции абсолютно закономерен и дает шанс на появление малого бизнеса и в разведке, и в добыче, потому что получать эффект от освоения в масштабе сразу обширных «районных» площадей уже становится невозможным. Другая закономерность связана с тем, что при значительной продолжительности фазы стабилизации или медленного угасания добычи внутри системы возрастает сопротивление любым радикальным поисковым, инженерным или институциональным (оргструктурным) инновациям. Только крайняя, просто отчаянная необходимость вынуждает ключевых акторов системы идти на революционные перемены.

Исследовательская подсистема опирается на аналитическое знание о геологическом строении территории, геологических структурах, их возрасте и пространственном залегании. Эксплуатационная подсистема опирается на синтетическое инженерное знание о технологических основах добычного процесса.

После первоначального прорыва в форме геологического открытия в первой подсистеме закономерно следует ослабление интенсивности усилий, в то время как именно в это время вторая подсистема обретает ускоренное развитие, масштабно внедряет технологические новшества (чужие и свои). Потом и в ней накапливается «усталость» – радикаль-

ные инновации заменяются постепенными: обе подсистемы инерционно генерируют «рацпредложения» вместо революционных прорывов. Ситуация сохраняется до обвального падения добычи, которое приводит либо к полному переформатированию работы инновационной системы по освоению ключевого ресурса, изменению форм его поиска и добычи, либо к свертыванию процесса хозяйственного освоения.

Два главных блока инновационной системы могут находиться либо внутри одного структурного контура, либо в разных производственных контурах. Это зависит от фазы и модели хозяйственного освоения. В огосударственной советской модели 1930–50-х годов обычно первоначально обе подсистемы находились внутри одной хозяйственной структуры – «суперорганизации освоения» (например, гострест «Дальстрой»). Аналогично и при корпоративном освоении ресурсов Арктики в современный период обе подсистемы находятся вместе внутри контура крупной ресурсной компании. Это обеспечивает инновационному процессу необходимую синергию.

После перехода на ведомственную модель хозяйственного освоения в позднесоветское время (1970–80-е годы) обе подсистемы находились в разных структурных оболочках геологических управлений и добывающих объединений, главков, что, наряду с выгодами специализированности, усиливало конфликтность интересов и укрепляло противоречия при их взаимодействии.

В силу значительной экспедиционной подвижности в накоплении знания о ресурсах новой территории территориальная структура поисковой подсистемы обычно более изменчива, чем эксплуатационной, хотя конкретное соотношение зависит от типа природного ресурса. Например, для россыпного золота высоко нестационарны и поисковая, и добычная территориальные структуры. С другой стороны, для ресурсов рудного золота, алмазов, нефти поисковая территориальная структура центров накопления знания обычно мобильнее территориальной структуры центров компетенций добывающей промышленности. Пространственный ареал поисковой деятельности всегда шире ареала добычной (и сама она мобильнее) просто потому, что многие открытия геологов длительное время не подхватываются горняками.

Закон падающей отдачи от ресурсных месторождений и ранее открытых ресурсных провинций делает с годами балансирование прироста и погашения запасов все более трудным. Поэтому закономерно, что с годами увеличивается нагрузка на подсистему выработки новых знаний, которая должна отвечать на этот вызов. Новые изобретения, технические инновации, инженерные решения, геологические открытия, структурные преобразования призваны оттянуть

неизбежный момент тотального истощения ресурсной провинции и обеспечить мягкое «приземление» акторов на соседнюю фланговую территорию или акваторию или переход к сопряженным природным ресурсам (от газа к конденсату, от золота к полиметаллам и др.). Конкретные возможности (предложение) поисковых, технологических и институциональных инноваций для периферийной инновационной системы зависят от текущего технико-экономического уклада (кирка – лопата, или бульдозер – экскаватор, или цифровая платформа с дистанционным управлением) и ведущих хозяйственных структур и институтов, которые доминируют в экономике (например, интегральные комбинаты, совнархозы, отраслевые ведомства или ресурсные компании).

По мере «углубления» процесса освоения происходит локализация новых ресурсных открытий и участков пионерного обустройства. Возникает несвойственная стартовому пионерному освоению новых обширных пространств Севера и Арктики дихотомия между «гринфилд-» и «браунфилд-проектами» освоения, то есть проектами «с чистого листа» и проектами модернизации ранее созданных добычных и перерабатывающих производственных объектов.

Природа инновационного процесса, тип задействованного знания в каждом виде проектов радикально отличаются. В гринфилд-проекте актуализируется научно-техническое, академическое знание, подчас фундаментальное научное открытие. Таковы, например, переход от разработки месторождений «трубного» газа на полуострове Ямал к СПГ-проектам на севере полуострова Ямал и на Гыдане. Здесь инновационная система присутствует в «узком», производственном смысле, с присущей ей противоречивой диалектикой отношений поисковой и добычной подсистем.

С другой стороны, для проектов модернизации «стародобычных» территорий важнейшим является инженерное, технологическое знание, как совершенствовать прежний производственный процесс. Здесь работают совсем другие эффекты накопления и коммерциализации знания, чем в первом случае: огромную роль играют копирование передового опыта других зарубежных и отечественных производств, рационализаторские предложения работников производственных филиалов компаний, корпоративные и местные центры переподготовки и переобучения кадров в городских форпостных базах освоения. И в целом инновационная система здесь имеет широкий, диверсифицированный характер, приурочена не к отрасли специализации, а к месту дислокации – крупным арктическим и северным научно-образовательным центрам выработки нового знания.

Важнейшим и простым дифференцирующим маркером инновационной системы гринфилд- и бра-

унфилд-проектов является система обновления/воспроизводства кадров: в первом случае, расположенная в ближайших форпостных базах освоения, она предназначена только для вахтовых рабочих и техников, во втором случае, размещенная в крупных тыловых и форпостных базах освоения, – для кадров высшей квалификации (инженеров, геологов, горняков и др.).

Возникает вопрос о границах периферийной инновационной системы, об ареале ее функционирования в районах Арктики и Севера. Это напрямую зависит от реализованной модели процесса хозяйственного освоения. В огосударственной модели пионерного освоения речь идет о крупной по площади районной инновационной системе. Активная координирующая роль государства формирует единый поисковый ареал на обширной территории и сеть инфраструктурно взаимосвязанных добычных объектов. Огосударственная периферийная инновационная система обычно имеет обширный районный контур.

С другой стороны, при корпоративной (усилиями крупных ресурсных компаний) модели хозяйственного освоения контур инновационной системы скромнее, приурочен к области лицензионных участков компании, связанных в единство круглогодичными или сезонными инфраструктурными и коммуникационными системами. Здесь имеет место, как в НАО или ЯНАО, совокупность анклавных локализованных корпоративных нестационарных инновационных систем внутри крупного района нового пионерного освоения, подчас с дублированием поисковых усилий. В исключительных случаях межкорпоративных альянсов возможна и координация инновационных систем компаний.

Есть и промежуточный случай государственно-корпоративного освоения, когда основной груз инфраструктурного обустройства приходится на государство, а вся добычная

деятельность – на корпоративные структуры. В этом случае возможна частичная консолидация инновационных усилий различных акторов на общей государственной транспортной и инновационной инфраструктуре (например, в форме опытного полигона для коллективной отработки навыков экспериментальной добычи из глубоко залегающих нефтеносных пластов). Тогда полуавтономные локальные корпоративные инновационные системы интегрируются в общую районную государственно-корпоративную систему. Обычно такая интеграция осуществляется через стыковку корпоративных добычных подсистем, а не поисковых: поиск компании ведут обособленно.

Актеры периферийной инновационной системы

Закономерно, что ключевые акторы процесса хозяйственного освоения Арктики оказываются и главными игроками периферийной инновационной системы. На протяжении короткого первого периода, как правило, это одиночные предприниматели и малые венчурные фирмы, которые в последующем уступают место крупным компаниям, – они уже на длительный период (во время фаз бурного роста, стабилизации и затем снижения объемов добычи природного ресурса) сохраняют свою гегемонию среди хозяйственных структур, лишь на этапе затухания ресурсной провинции уступая ее вновь малому бизнесу.

Поэтому естественно уделить особое внимание ресурсно-корпоративной структуре территории (тип добываемого ресурса и возраст его освоения, добывающая компания и размещение ее штаб-квартиры и производственных филиалов). В современной российской Арктике можно выделить пять типов районов со своей спецификой взаимодействия территории и компании в процессе ресурсного освоения. Каждый тип формирует свою характерную инновационную систему.

Первый тип: одна крупная ресурсная компания, по сути, содержит обширную корпоративную территорию, то есть единый районный социально-производственный комплекс – структуры добывающей промышленности, транспортные, энергетические, строительные, торговые и другие подразделения. Речь идет о ПАО «ГМК «Норильский никель»» («Норникель») и Норильском промышленном районе. Беспрецедентно для мировой Арктики, что это происходит уже более 80 лет. За десятилетия здесь создана самостоятельная районная корпоративная инновационная система со своими проектными институтами, системой подготовки и переподготовки кадров, центрами уникальных компетенций.

Второй тип: несколько «штаб-квартирных» корпораций соседствуют друг с другом при отработке относительно молодых нефтегазовых активов. Значимость запасов ресурсной провинции подчеркивается присутствием здесь не филиалов, а штаб-квартир крупных нефтегазовых компаний России. В этом случае имеет место сосуществование нескольких лишь слабо взаимодействующих локальных корпоративных инновационных систем, каждая из которых характеризуется своими особенностями и опирается на свой базовый монопрофильный город или район. Речь идет о Ямало-Ненецком автономном округе.

Третий тип: на территории молодой нефтегазовой провинции присутствуют филиалы крупных ресурсных компаний, которые не имеют здесь стационарной опорной базы и все освоение проводят вахтово, мобильно, «летуче». В терминах Энн Маркусен речь идет о «платформе филиалов компаний» [19]. Говорить об инновационной системе в традиционном понимании здесь нельзя, речь идет о вахтовой квазисистеме, которая входит составной частью в «материковые» системы корпораций – «Роснефти», «Лукойла», «Татнефти» и др. Это Ненецкий автономный округ.

Четвертый тип: филиалы крупных ресурсных компаний России ведут отработку проектов на старопромышленных, относительно плотно заселенных территориях Арктики. Здесь возникает противоречие между «филиальностью» статуса акторов освоения и местной инновационной системы и созданными местными научно-образовательными структурами университетов, академических институтов, профессиональных колледжей. В позитивном варианте возможны интеграция локальных систем отдельных компаний в районную инновационную систему и использование общей инновационной, образовательной и инженерной инфраструктуры. Речь идет о горнорудном освоении Мурманской области и углепромышленном освоении бассейна Воркуты Республики Коми.

Пятый тип: островные очаги производственных инноваций, приуроченные к пионерному горнорудному

освоению отдельных ресурсных анклавов Чукотского автономного округа, арктической Якутии, Таймыра и др. Здесь работают филиалы крупных ресурсных компаний, и инновационный процесс сводится к текущим совершенствованиям горной добычи. Он не может опереться ни на местные интеллектуальные базы освоения, ни на созданную инновационную инфраструктуру, центры компетенций. Ситуация похожа на третий тип, но в еще более ослабленном виде: еще меньше наличных элементов инновационной системы, тоньше слой инновационных акторов и институтов.

В российской Арктике есть примеры мощных центров машиностроительной продукции, для которых создано свое научно-техническое обеспечение (например, «Севмашпредприятие», Архангельская область). Мы их не рассматриваем по причинам сходства с «материковыми» инновационными системами. Для нас критерием «арктичности» инновационной системы выступает тот факт, что ключевым актором в ней выступает крупная ресурсная корпорация. В этом состоит особенность современного этапа освоения российской Арктики.

Наша привязка современной инновационной системы арктических территорий к ареалу деятельности ключевых акторов в лице ресурсных корпораций имеет сильные и слабые стороны. К сильным сторонам относится то, что весь инструментальный анализ транснациональных корпораций, выработанный в мировой науке (в том числе знаменитую парадигму «схема контроля активов – размещение – оргструктура» Дж. Даннинга [20]), можно использовать для предметного изучения корпоративной инновационной системы. «Штаб-квартирность», социальная укорененность и ответственность на территории присутствия, отношения с местными субконтракторами, степень децентрализации власти внутри компании и другие хорошо известные и многократно описанные параметры поведения корпорации непосредственно влияют и на характер местного инновационного процесса и корпоративной инновационной системы (прежде всего в выборе главных источников нового знания – изнутри себя или извне?). Слабостью является то, что при этом подходе неизбежно возникает заужение, связанное с недооценкой роли непроизводственных, не связанных с профильной добычной деятельностью инноваций, особенно важных и значимых для старопромышленных территорий Арктики.

Чтобы оценить источники нового знания для классической ресурсной корпорации Арктики (у которой основные производственные активы расположены

в Заполярье), был проведен сравнительный анализ патентной активности ПАО «НОВАТЭК» и ПАО «ГМК «Норильский никель»». Авторов прежде всего интересовал вопрос, опирается ли компания на собственные или заемные источники нового технического знания.

Использовалась база данных Федерального института промышленной собственности ФИПС-Роспатент², которая содержит наиболее полные сведения о российских зарегистрированных патентах и опубликованных заявках, а также российские архивы патентов: по «НОВАТЭК» с 2004 г., по «Норникелю» с 1990 г.

Патентные сведения включают номер патента, даты подачи заявки, регистрации и дату начала отсчета срока действия патента, авторов патента и патентообладателя, описание изобретения, а также список документов, цитированных в отчете о поиске. Информация о документах, цитированных в отчете о поиске, их авторах и правообладателях позволяет определить, на какие источники научных знаний, разработок и технологических решений опираются российские арктические компании-патентообладатели при ведении научно-исследовательских разработок и их применении.

Список цитированных в отчете документов представляет собой ссылки на литературные источники, чаще всего научные публикации по теме разработки, а также отдельные патенты, на основе которых представлена разработка. В числе ссылок на цитированные патенты представлены как российские, так и зарубежные патентные документы. Для проверки головной организации – обладателя патентов, на которые ссылаются заявители, использовался интернет-сервис Google Patents³ – поисковая система, которая индексирует более 87 миллионов патентов и патентных заявок от 17 патентных ведомств, включая Управление США по патен-

² База данных патентного поиска ФИПС URL: <https://www1.fips.ru/iiss/>.

³ Поиск по мировой базе патентов: <https://patents.google.com/>.

там и товарным знакам (USPTO), Европейское патентное ведомство (ЕРО), Национальное управление интеллектуальной собственности Китая (СНРА), Японское патентное ведомство (JPO), Всемирную организацию интеллектуальной собственности (ВОИС), Канадское Управление интеллектуальной собственности (СІРО). Сервис Google Patents позволил определить правообладателя как российских, так и зарубежных патентов, на которые ссылаются в патентных заявках «НОВАТЭК» и «Норникель».

В поиске по патентным заявкам ФИПС, осуществленном для российских арктических компаний, использовалась строка «(73) Патентообладатель», в качестве ключевых слов для запроса были применены полные наименования интересующих компаний-патентообладателей – ПАО «НОВАТЭК» и ПАО «ГМК “Норильский никель”». После исключения дублированной информации осталось 49 патентов «НОВАТЭКа» и 75 патентов «Норникеля».

Для определения источника (географической привязки) нового знания, лежащего в основе представленных патентов, использовалась информация об авторах патента и организации, в которой заняты авторы. В качестве альтернативной методики возможно использование указанного «адреса для переписки» в реферате патента, но он чаще отражает расположение головного офиса компании или научно-технического

департамента компании, отвечающего за организационное обеспечение подачи заявки на патент. Информация об авторах патента позволяла выявить головную организацию – компанию, научный институт или университет, в рамках которых производилась научно-исследовательская работа и запатентованная в результате разработка. В отдельных случаях не удавалось найти информацию о месте занятости автора – изобретателя некоторых патентов. В этом случае использовался адрес для переписки, указанный в реферате патента.

Сравнение патентной активности двух корпораций выявляет факт большей опоры на свою собственную инновационную систему у «Норникеля», чем у «НОВАТЭКа» (табл. 1): второй закупает более четверти патентов у сторонних организаций, первый менее 3% (но при этом «Норникель» имеет больше патентов со ссылками на изобретения других организаций). Прежде всего, это связано с разным возрастом и разной степенью диверсификации производственной системы: «Норникель» за 80 лет существования создал в промышленном районе своего присутствия высоко диверсифицированную социально-экономическую систему, в то время как значительно более молодой НОВАТЭК (25+ лет) опирается на знание старших партнеров в лице «Газпрома» и др.

Сравнительный анализ структуры распределения интенсивности патентной деятельности по годам (рис. 1) выявляет резкую неравномерность у обеих компаний: 55% всех патентов у «НОВАТЭКа» приходится на два «урожайных» года – 2010 и 2012 гг.; 41% всех патентов «Норникеля» приходится на три года – 1993, 2003 и 2006 гг. Обычно ускорение производственной деятельности происходит с небольшим временным лагом, спустя несколько лет после пиков патентной активности.

На фоне общей для двух арктических корпораций тенденции к самообеспечению знанием, которая проявляется в высокой доле собственных патентов, особый интерес представляет географический и ин-

Таблица 1. Сравнительный анализ патентной активности.

Анализируемые параметры патентной активности	ПАО «НОВАТЭК»	ПАО «ГМК “Норильский никель”»
Всего патентов	49	75
Разработаны в компании	34 (69.4%)	50+4 «Институт Гипроникель» (72%)
Разработаны совместно со сторонней организацией	2 (4.1%)	19 (25.3%)
Куплены у сторонних организаций	13 (26.5%)	2 (2.7%)
Без цитирований	15 (30.6%)	11 (14.7%)
С цитированием	34 (69.4%)	64 (85.3%)

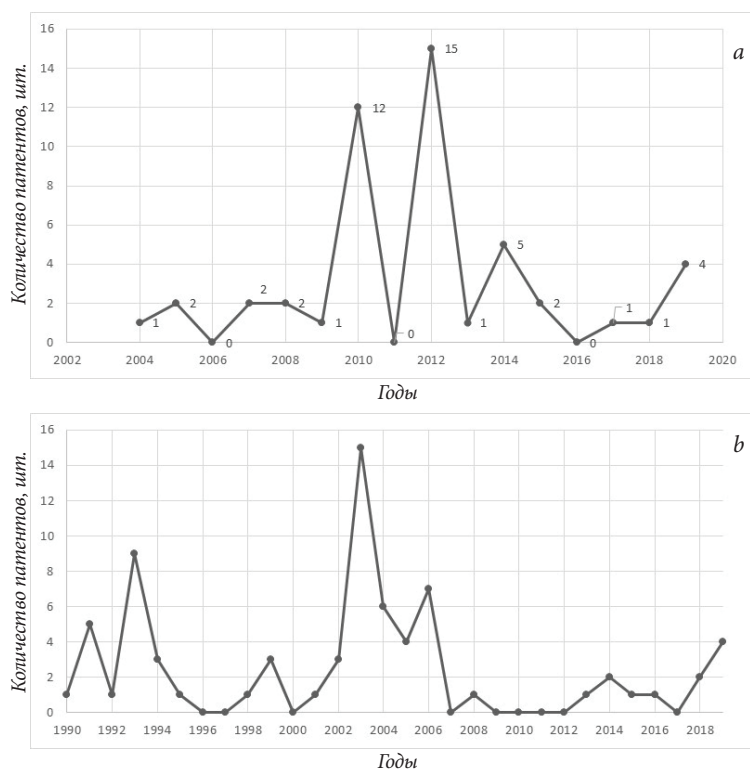


Рис. 1. Патентная активность двух арктических корпораций: а – ПАО «НОВАТЭК», б – ПАО «ГМК «Норильский никель»».

ституциональный анализ ссылок на другие изобретения. У «НОВАТЭКа» основная патентная активность приурочена к стадии переработки и сжижения газа (таблица 2). И для этих же стадий характерна самая обширная география городов и структур, на которые ссылаются изобретатели. В число «часто цитируемых городов» России (по нескольким технологическим стадиям) попадают Москва и Тюмень (их можно признать интеллектуальными тыловыми базами для проектов «НОВАТЭКа»), из иностранных городов – Париж.

В географической структуре патентных ссылок ПАО «ГМК «Норильский никель»» первые строки занимают города, в которых расположены входящие в структуру корпорации проектные институты, филиалы, штаб-квартиры: Москва, Санкт-Петербург, Мончегорск, Красноярск,

Таблица 2. География цитирований и ссылок патентов ПАО «НОВАТЭК» по основным стадиям производственного процесса.

Анализируемые параметры патентной активности	Стадии производственного процесса				
	Добыча газа, подготовка промышленных установок	Переработка попутного и другого газа	Сжижение газа	Транспорт газа	Производственный сервис, управление, СПГ-двигатели и др.
Всего патентов	9	15	11	5	9
Всего городов патентного цитирования	18	19	20	10	6
Количество цитирований в патентах по городам					
Москва	6	8	6	2	2
Тюмень	4	3	1	1	1
Уфа	3	—	2	—	—
Санкт-Петербург	1	—	2	—	—
Оренбург	1	1	—	1	—
Екатеринбург	—	1	1	—	—
Новый Уренгой	1	1	—	1	—
Париж, Франция	1	1	5	—	1
Хьюстон, Техас, США	1	—	3	1	—
Мюнхен, ФРГ	—	2	3	—	—
Токио, Япония	—	4	1	—	—
Гаага, Нидерланды (штаб-квартира компании Шелл, «Royal Dutch Shell»)	2	1	—	—	—
Ташкент, Узбекистан	1	2	—	—	—
Роттердам, Нидерланды	1	—	—	—	1

Норильск (таблица 3). Можно сказать, что патентные цитаты выдают «городскую сеть» компании. Из активно представленных в патентных ссылках в нескольких технологических стадиях только Екатеринбург и Верхняя Пышма составляют исключения: подразделений «Норникеля» здесь нет, а интеллектуальное влияние на патенты компании существует.

Список зарубежных городов, в которых расположены организации, на разработки которых активно ссылаются в патентах компании, возглавляют Токио, Торонто, Катлеттсберг, Эспоо (город-спутник Хельсинки). За ними следуют города, интеллектуальный след которых в патентных ссылках «Норникеля» меньше, – Бьютт, Солт-Лейк-Сити, Йоханнесбург, Квебек и Лондон. Анализ собранных данных о патентных ссылках на внешние

организации показывает, что лучшая по сравнению с «НОВАТЭКом» обеспеченность «Норникеля» собственными патентными разработками сочетается с более активным использованием внешних сетей знания.

На фоне других арктических компаний России и мира «Норникель» является абсолютно уникальным феноменом ввиду того, что его корпоративная инновационная система предельно диверсифицирована в отраслевом, территориальном и структурном плане: есть исследовательские, проектные, образовательные институты, размещенные в нескольких крупных российских городах – интеллектуальных базах горнорудного освоения Норильского промрайона. Как показывает анализ патентной статистики ПАО «НОВАТЭК», инновационная система многих других компаний организована проще. В будущем предстоит выяснить, связано ли это прежде всего с солидным возрастом работы компании в арктической территории или отражает тип природных ресурсов, которые добывает «Норникель», уникальные свойства руды и специфичные способы ее переработки в металлы. По сравнению с углеводородами эти природные ак-

Таблица 3. География цитирований и ссылок патентов ПАО «ГМК «Норильский никель»» по основным стадиям производственного процесса.

Анализируемые параметры патентной активности	Стадии производственного процесса						
	Добыча руды	Обогащение руды	Извлечение концентрата металла	Переработка концентрата металла	Электролитическое рафинирование металла	Флотационное обогащение руды	Комплексная металлургическая обработка и др.
Число патентов	2	3	8	22	10	7	23
Общее число городов в патентных ссылках	4	4	15	31	18	11	16
Количество цитирований в патентах по городам							
Москва, *Люберцы	1*	—	6	8	2	5	2
Санкт-Петербург	1	2	—	5	2	1	—
Мончегорск	—	—	1	8	1	1	—
Красноярск	—	1	1	1	—	4	3
Екатеринбург	—	—	3	1	1	—	1
Норильск	—	—	—	1	1	—	—
Верхняя Пышма	—	—	—	1	—	—	1
Токио, Япония	—	—	3	4	1	—	1
Торонто, Канада	—	—	—	7	1	—	—
Катлеттсберг, Кентукки, США	—	—	—	2	4	—	—
Эспоо, Финляндия	—	—	—	4	—	—	1
Бьютт, Монтана, США	—	2	—	1	—	1	—
Солт-Лейк-Сити, Юта, США	—	—	2	1	1	—	—
Йоханнесбург, ЮАР	—	—	1	1	1	—	—
Квебек, Канада	—	—	1	—	1	—	1
Лондон, Великобритания	—	—	1	1	1	—	—

тивы, видимо, обладают более высокой специфичностью в переработке. А эта специфичность вызывает особую нагрузку на инновации и новое знание.

Сети – коммуникационная проницаемость пространства внутри и снаружи

Важную роль в инновационном процессе играют сети – каналы коммуникации, по которым знание поступает к главным акторам инновационной деятельности в Арктике (ресурсным корпорациям, малому и среднему бизнесу, структурам управления и др.). Поскольку в Арктике транспортно-коммуникационных каналов мало, в ходе экспедиционных обследований и социологических опросов сравнительно легко проследить основные пути миграции нового знания внутрь, в местную инновационную систему.

Результативность и активность перетоков знания внутри инновационной системы в разреженной среде Арктики очень сильно зависит от сложившихся круглогодичных и сезонных наземных, водных и воздушных транспортных каналов; наличия устойчивой высокоскоростной связи с сетью Интернет⁴; конфигурации стационарных и временных элементов системы расселения (центро-периферийная или полицентричная, наличие или отсутствие крупных городских агломераций и др.) и их взаимодействия с ближайшими внутренними, арктическими, и внешними, материковыми, форпостными и тыловыми интеллектуальными базами освоения (центрами знания и компетенций). Интегральный результат взаимодействия этих сил можно назвать коммуникационной проницаемостью конкретного участка арктического пространства.

Реалии российской Арктики показывают, что по этому свойству ее пространства радикально отличаются друг от друга. На одном полюсе находится пронизанная информационными потоками самая западная Мурманская область, которая обладает лучшей в Арктике транспортной и телекоммуникационной обустроенностью. Неудивительно, что по сводному инновационному индексу [22], по ряду формальных показателей, например количеству НИОКР-персонала, она опережает не только арктические, но даже свои южные соседние регионы.

На другом полюсе находится самый восточный «островной» и бездорожный Чукотский автономный

округ (ЧАО), в котором пока еще не решены даже вопросы устойчивой высокоскоростной интернет-связи (до сих пор не проложен телекоммуникационный кабель). По сравнению с другим арктическим «островом» – Ненецким автономным округом (НАО) – он в существенно большей степени «открыт» внешним информационным потокам за счет активной трудовой миграции и традиционных отпускных поездок с Севера на «материк» и обратно, что подтверждает сравнение статистики соотношения внешнего и внутреннего миграционного оборота в ЧАО и НАО [23].

Помимо коммуникационной проницаемости арктического пространства для успеха инновационного процесса очень важны поглотительная способность принять и внедрить инновации, желание и готовность вести инновационную деятельность, которые, в свою очередь, зависят от потребности экономики, от вызовов нового хозяйственного освоения. И здесь чемпионом в Арктике является Ямало-Ненецкий автономный округ (ЯНАО): при средних показателях по числу занятых в инновационной системе, регион с 2017 г. является чемпионом в Арктике по количеству выданных патентов на изобретения, с 2015 г. – по разработанным передовым производственным технологиям. Затраты на НИОКР у корпоративных структур, которые ведут новое освоение Ямала, с 2010 г. выросли почти в 45 раз⁵. С другой стороны, в Мурманской области, на фоне блестящей коммуникационной проницаемости, главные акторы хозяйственного освоения в виде филиалов крупных компаний до недавнего времени предъявляли слабый спрос на местные инновации, и, при не-

⁴ Особенностью «арктической общности» людей является то, что, даже при недостаточной развитости местных компьютерных сетей и затрудненности доступа к Интернету по сравнению с крупными городскими агломерациями России они используют его более активно для самообучения и добывания нового знания [21]. Это связано не только со стремлением преодолеть информационную и физическую удаленность, но и в среднем с более высокой долей людей с высшим образованием в Арктике по сравнению с остальной Россией.

⁵ Статистика инноваций: <https://rosstat.gov.ru/folder/14477>.

плохом развитии государственного НИОКР-сектора в местном научном центре Апатиты, уровень инновационности корпоративной горнодобывающей промышленности был слабым или средним.

При характеристике коммуникационной проницаемости конкретных арктических пространств важно учитывать ее конкретный административный статус:

а) весь регион относится к Арктической зоне;

б) часть региона относится к Арктической зоне, остальная часть входит в районы Крайнего Севера и приравненных к ним местностей;

в) часть региона относится к Арктической зоне, остальная – к северной и умеренной зоне.

В последнем случае легче формировать эффективные «юг – север» коммуникационные связи между находящимися внутри одного региона тыловыми интеллектуальными базами юга и районами нового корпоративного освоения Арктики: например, Красноярский край или Республика Саха (Якутия).

Главные акторы местной инновационной системы добывают новое знание по различным внутренним и внешним коммуникационным сетям, используя хорошо известные и описанные формы социальных взаимодействий: трудовую миграцию квалифицированных кадров в проекты освоения Арктики; сотрудничество корпораций с потребителями, поставщиками, научно-образовательными структурами при реализации добычных проектов; стажировки и командировки сотрудников корпораций; приглашения экспертов мирового уровня и др. (Конечно, существуют и некоммуникационные формы обретения нового знания в виде покупки патентов, лицензий, высокотехнологичного оборудования и др.) Особенность Арктики состоит в том, что огромную роль в обретении нового знания играет временная близость в форме экспедиций, командировок, производственных совещаний и сле-

тов передовиков производства. Когда расстояния предельно разъединяют специалистов друг от друга, наведение между ними мостов временной коммуникации играет беспрецедентную роль, сравнительно более важную, чем на «материке».

Институты – специфические арктические институты для инноваций в Арктике

Институты играют важную роль в работе периферийной инновационной системы Арктики. Их базовой чертой по сравнению с аналогичными институтами для инновационного процесса в давно освоенных районах является удаленность от главных центров принятия стратегических решений – как государственных, так и корпоративных. Институциональная удаленность российской Арктики означает ее зависимость от федеральных норм и правил, которые определяют ключевые решения в области хозяйственного освоения ее ресурсов. «Подвязывание» периферии к неизбежно отстающим от нее в случае ее бурного, динамичного развития (особенно характерного для этапов пионерного освоения) федеральным нормам и правилам хозяйственной деятельности контрпродуктивно.

Преодоление этого встроенного в периферийную инновационную систему противоречия между инерционными унифицированными федеральными институтами и очень специфичными и динамично меняющимися местными (региональными) условиями деятельности возможно через существенную децентрализацию власти и полномочий из центральных командных штаб-квартир в арктические филиалы, из федеральных министерств и ведомств в места пионерного хозяйственного освоения.

Лучшим решением становится допуск и признание права периферии на эксперименты, неизбежно нарушающие федеральный регламент или выходящие за его рамки. Здесь это важнее, чем обычное предоставление бюджетных льгот для инновационной деятельности. Условия освоения ресурсов Арктики до такой степени отличаются от среднестатистических условий обычной производственной деятельности в стране, что это сказывается и на особой природе накопления знания и компетенций. Поэтому поощрение экспедиционных форм добывания нового знания в поисковой подсистеме и пилотных экспериментов в эксплуатационной подсистеме является самым эффективным решением со стороны управляющих государственных и бизнес-структур.

Многие институциональные эксперименты и новшества в инновационной системе Арктики связаны с землей и ресурсами, которые являются основой местной экономики и главным приоритетом иннова-

ционного процесса. Например, это опытные режимы природопользования, примененные здесь впервые в стране (соглашения о разделе продукции), полигоны коллективного обучения добыче в нетрадиционных геологических формациях (например, опытный полигон для отработки ресурсов глубоко залегающей баженовской свиты). Они всегда резко интенсифицируют процессы накопления нового знания для работы эксплуатационной и поисковой подсистемы инновационной системы.

Точечная и ареальная периферийная инновационная система

Взаимодействие акторов, сетей и институтов внутри инновационной системы Арктики в процессе освоения природных ресурсов может проходить в предельно локализованном формате монопрофильного города либо в ареальном формате районного корпоративного контура (районного кластера добычных участков компании/компаний). В обоих случаях акторы могут быть одни и те же, но характер коммуникации и перетоков знания, институтов инновационного процесса существенно различается.

Развитие инновационной системы в моногороде тесно связано с деятельностью градообразующего добычного предприятия. Различаются варианты:

а) город – штаб-квартира ресурсной компании (например, г. Когалым как центр компании «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь») – в этом случае самостоятельность хозяйственных решений и инновационного процесса существенно выше;

б) город, зависимый от более крупного моноресурсного и административного центра (например, г. Муравленко ЯНАО, который находится в орбите влияния более крупного соседнего Ноябрьска);

в) островной моноресурсный город с высокой автономией местного филиала ресурсной корпорации (г. Губкинский ЯНАО).

Встроенная внутри городской экономики инновационная система на этапе пионерного освоения отвечает за быструю подстройку поисковой и эксплуатационной подсистем в близко расположенных новых добычных проектах. Город естественным образом превращается в ближайший интеллектуальный центр, локальную базу освоения.

В дальнейшем, на стадии быстрого роста и дальнейшей стабилизации объемов добычи, императив производственной инновационности гаснет, «градус» новаторства перемещается в другие сферы городской экономики (социальную, жизнеобеспечения, рекреационную и др.). Узкоотраслевая производственно заточенная инновационная система перерождается в территориальную.

На этапе спада добычи опять усиливается императив производственной инновационности. Перед градообразующими добычными предприятиями выдвигаются вызовы ослабления негативных эффектов падающей отдачи от естественного истощения природных активов и продления жизненного цикла месторождения за счет новых технологий и методов разведки и добычи, например технологий повышения нефтеотдачи пластов, утилизации попутного нефтяного газа, переработки конденсатных фракций местных углеводородов и др.

Инновационный процесс в этих условиях ориентирован либо на придание прежнему освоению «второго дыхания» (например, за счет отработки техногенных отвалов прежних лет освоения); либо на обновление процесса освоения за счет его переключения, например, с добычи газа на газоконденсат, с россыпного на рудное золото и др.; либо на формирование абсолютно новой траектории ресурсного освоения. Первый и второй варианты могут сопровождаться либо сохранением прежних ключевых корпоративных акторов, которые в этом случае сами проводят инновационную модернизацию своих производственных активов, либо появлением малых и средних акторов, которые включаются в производственную и инновационную систему, чтобы придать ей новую динамику. В этом случае здесь начинают работать совсем новые эффекты. В третьем варианте возможно появление нового крупного корпоративного игрока, новых предпринимателей, а уход или дробление, рассыпание прежнего градообразующего предприятия высоко вероятны. В этом случае возникает сильное противоречие между острой потребностью в инновационном процессе и слабой заинтересованностью прежнего актора в его проведении. Функции драйвера инновационной системы должны быть подхвачены кем-то из субъектов местной экономики или новой при-

шедшей корпоративной структурой (что менее вероятно).

Такова общая схема, реализация которой сопряжена с колоссальными трудностями. Периферийное экономико-географическое положение монопрофильных городов Арктики; когнитивные и другие блокировки новых траекторий развития ввиду многолетней зашоренности корпоративных «генералов» и руководителей местной власти на одном, выбранном еще в советское время пути; массовый отток из региона талантливой молодежи на протяжении последних десятилетий и очень слабый приток новых квалифицированных кадров ввиду хронического дефицита жилья, значительно большего, чем в среднем российском городе, резко ограничивают набор идей по поводу развития градообразующего предприятия и новых траекторий освоения. А если добавить к этому еще нередкокую интеллектуальную монополию на решение городских проблем руководства градообразующего предприятия, то поле возможностей для выдвижения и обсуждения новых инициатив вообще сужается до маленького окошка.

Стратегии «разгерметизации» градообразующего добычного предприятия, направленные на активизацию импульсов производственного обновления, усиленный поиск новых траекторий освоения ресурсов, могут включать несколько основных направлений:

1. Передача производственных компетенций от филиала корпорации – градообразующего предприятия – ее спин-оффам и стартапам, которые способны придать радикальность инновационному процессу в добычном производстве.

2. Уменьшение жесткости сложившихся производственных схем с целью допустить сосуществование нескольких технологических цепочек, ориентированных на выпуск малыми предприятиями (спин-оффами и спин-аутами) качественно разнообразной продукции, нацеленной на

различные рынки. Этому может естественно способствовать изменение свойств природных активов – от качественно однородных к гетерогенным, смесовым, конденсатным, – которое даст старт технологическим рекомбинациям с получением широкого спектра малотоннажной конечной продукции. Например, в шведском арктическом моногороде Кируна внутри градообразующего предприятия – государственной ЛКАВ – были созданы научно-исследовательские лаборатории AggloLab и MetLab, работающие на стыке химии, металлургии, техники, электроники, информационных технологий; а шахта и предприятия ЛКАВ стали естественными полигонами для апробации достижений лабораторий [24].

3. Новая промышленная политика местной власти, стимулирующая инновационный поиск всех субъектов местной производственной системы – как крупных, так и малых. Нередко она сопровождается созданием объектов инновационной инфраструктуры в городе или использованием для целей производственного обновления инфраструктуры поддержки малого предпринимательства.

Районная инновационная система кластерного корпоративного освоения может существовать в стационарной и мобильной (вахтовой) форме, с опорой на материковые тыловые базы освоения. Осваиваемое пространство определяет здесь абсолютно другой тип коммуникации, чем в локализованной городской системе. Там центром накопления заемной и местной информации выступает сам город: в его структурах, прежде всего в градообразующем предприятии, концентрируются информационные потоки, которые потом уже «уходят» на окрестные промыслы, а в районной системе существенно большую роль играет самостоятельная добыча, в том числе экспедиционными методами, новой рассеянной информации, и уже потом – ее концентрация в добычных точках роста или ближайших производственных центрах. В этом смысле районная инновационная система более привязана к пионерному освоению, а городская – к уже состоявшемуся зрелому освоению, сформированному территориальному каркасу (сеть стационарного расселения и инфраструктурные объекты) и накопленной информационной базе внутри поисковой и эксплуатационной подсистемы.

Заключение

1. Концепция периферийной инновационной системы существенно обогащает наши традиционные представления о процессе освоения природных ресурсов Арктики, расширяет инновационный процесс за принятые рамки только экспедиционного, поискового этапа на последующие (этап стабилизации до-

бычи и истощения, старения ресурсной провинции). Возникает новое представление о знании как подлинном драйвере экономического развития арктических территорий России. Этот взгляд наследует подходы Фридриха Листа о приоритетности создания нового знания в процессе развития, подходы Карла Маркса о науке как подлинной производительной силе, Ричарда Нельсона и других создателей теории инновационных систем о роли инноваций в культивировании конструктивного разнообразия в интересах развития.

С другой стороны, наша привязка периферийной инновационной системы к природным ресурсам, которые являются основой арктической экономики, их поиску, добыче, переработке делает саму эту концепцию более предметной и адекватной условиям российской Арктики. На этапе пионерного освоения ресурсов периферийная инновационная система имеет производственный, отраслевой характер. В дальнейшем, по мере стабилизации и спада в добыче природного ресурса она обретает более комплексный характер и перерождается в территориальную, которая включает не только производственные, но также социальные, жизнеобеспечивающие, сервисные инновации.

2. Ключевыми акторами периферийной инновационной системы Арктики выступают крупные ресурсные компании. Лишь на самом первом поисковом этапе и на этапе истощения значительную роль играют также малые и средние фирмы, индивидуальные предприниматели. Они конвертируют имеющееся знание о ресурсах территории в добычный процесс с учетом технологических возможностей и ограничений конкретной исторической эпохи.

Успех освоения природных ресурсов напрямую зависит от способности ключевых акторов «напрягать» внутренние и внешние каналы получения нового знания. Нередкий недостаток местного знания на первых этапах освоения заставляет корпорации активно «засасывать» внешнее знание и формировать в этих целях временные и постоянные сети с внешними партнерами. Эффективность использования добытого внешнего знания и его конструктивного «смешивания» с собственным, генерированным структурами корпорации, зависит от «поглотительной способности» ресурсных компаний, то есть наличия образованных и компетентных профессиональных кадров.

Анализ патентной активности двух арктических корпораций – ПАО «НОВАТЭК» и ПАО «ГМК «Норильский никель»» выявил в обоих случаях ее резкую неравномерность по годам и наличие разных стратегий – более ориентированную на закупку изобретений «на стороне» у первой компании и приоритет собственных разработок у второй компании. Пиковая патентная активность в обоих случаях предвывает

нарастание активности корпорации в освоении новых ресурсных проектов Арктики.

3. Анализ различных факторов, которые определяют интенсивность работы внутренних и внешних сетей перетоков знания, привел нас к понятию коммуникационной проницаемости пространства. В Арктике она зависит от конфигураций сети расселения, основных транспортных маршрутов, наличия кабеля широкополосной связи и других факторов. Среди арктических территорий России максимальную коммуникационную проницаемость имеет Мурманская область, минимальную Чукотский автономный округ. Но для успеха развертывания инновационного процесса в освоении природных ресурсов Арктики, помимо коммуникационной проницаемости, требуется также высокая инновационная емкость (поглотительная способность) ресурсных компаний – ключевых акторов периферийной инновационной системы. На нее влияют различные блокировки: когнитивная (зашоренность представлений), функциональная (сложившиеся контракты, глубоко укорененные производственные отношения), политическая (отношения бизнеса с властью на территории присутствия).

4. Важнейшим институциональным противоречием в работе периферийной инновационной системой и во всем процессе хозяйственного освоения ресурсов Арктики является несоответствие унифицированных федеральных норм и правил специфичным условиям Арктики. Это названо нами, вслед за известным аляскинским экономистом Ли Хаски, условиями институциональной удаленности Арктики. Преодоление этих издержек связано с делегированием полномочий из центра, из штаб-квартир компаний на арктическую периферию, в филиалы. Всемерное поощрение экспериментов и поисковой деятельности в работе исследовательской и эксплуатационной (добычной) подсистемы периферийной иннова-

ционной системы является конструктивным ответом на этот вызов.

5. Лишь в последнее десятилетие феномен периферийной инновационной системы признан в мировой литературе. Однако он до сих пор рассматривается как единый феномен. Между тем наше исследование и весь практический опыт подтверждают, что разнообразие периферийных систем российской Арктики не меньше, а возможно – и больше, чем аналогичных систем в плотно заселенных территориях России и мира. Периферийная инновационная система различается по охвату ареала (городская или районная), по степени влияния ключевого актора (корпоративная, государственная или государственно-корпоративная), по стадии освоения, к которой она приурочена (информационная, пионерная, стабилизации, истощения), по типу ключевого природного ресурса и другим факторам.

6. Именно инновационная система определяет траекторию процесса хозяйственного освоения – будет ли она долговременной или оборвется на первых стадиях. Очень рельефна и относительно хорошо изучена ее роль в старопромышленных арктических территориях. На этой, «бифуркационной», стадии она задает направленность будущего развития. Как указывают западные исследователи [12], здесь возможны:

а) обновление и углубление пути развития за счет революционных инноваций;

б) диверсификация в виде расширения траектории на базе прежних компетенций за счет постепенных инноваций (так называемый феномен «связанного разнообразия») или диверсификация вне связи с прежними компетенциями (феномен «несвязанного разнообразия»);

в) создание абсолютно новой траектории развития за счет революционных инноваций.

Благодарности

Исследование проведено в рамках работы по проекту РФФИ №18–05–00600 «Новая теория освоения Арктики и Севера: полимасштабный междисциплинарный синтез».

Литература

1. P. Cooke
Geoforum, 1992, 23(3), 365. DOI: 10.1016/0016-7185(92)90048-9.
2. C. Freeman
The Economics of Industrial Innovation, GB, London, Frances Pinter, 1982, 250 pp.
3. C. Freeman
Camb. J. Econ., 1995, 19(1), 5.
DOI: 10.1093/oxfordjournals.cje.a035309.
4. *National Innovation Systems. A Comparative Analysis*, Ed. R. Nelson, GB, Oxford, Oxford University Press, 1993, 552 pp.
5. *National Innovation Systems: Towards a Theory of Innovation and Interactive Learning*, Ed. B.-Å. Lundvall, GB, London, Pinter Publ., 1992, 317 pp.
6. L. Ferrucci, D. Porcheddu
B Regional Development in Knowledge Economy, Ser. Regions and Cities, Eds P. Cooke, A. Piccaluga, GB, London, Routledge, 2006, p. 203.
7. S. Virkkala
Eur. Plan. Stud., 2007, 15(4), 511.
DOI: 10.1080/09654310601133948.
8. A.N. Petrov
B Beyond Territory. Dynamic Geographies of Knowledge Creation, Diffusion, and Innovation, Eds H. Bathelt, M. Feldman, D.F. Kogler, GB, London, Routledge, 2011, pp. 168–190.
9. J. Karlsen, A. Isaksen, O. Spilling
Entrep. Reg. Dev., 2011, 23(3), 235.
DOI: 10.1080/08985620903233945.
10. S. Dawley
Econ. Geogr., 2014, 90(1), 91.
DOI: 10.1111/ecge.12028.
11. A. Isaksen, J. Karlsson
B Innovation in Peripheral Regions. Handbook of the Geographies of Innovation, Eds R. Shearmur, Ch. Carrincazeaux, D. Doloreux, GB, Cheltenham, Edward Elgar Publ., 2016, pp. 277–286.
(https://EconPapers.repec.org/RePEc:elg:eechap:16055_16).
12. B.T. Ashheim, A. Isaksen Arne, M. Trippl
Advanced Introduction to Regional Innovation Systems, GB, London, Edward Elgar Publ., 2019, 160 pp.
13. S. Iammarino, P. McCann
Multinationals and Economic Geography. Location, Technology and Innovation, GB, London, Edward Elgar Publ., 2013, 496 pp.
14. G. Dosi
Res. Policy, 1982, 11(3), 147. DOI: 10.1016/0048-7333(82)90016-6.
15. F. Todtling, M. Trippl
Res. Policy, 2005, 34(8), 1203. DOI: 10.1016/j.respol.2005.01.018.
16. A. Torre
Reg. Stud., 2008, 42(6), 869. DOI: 10.1080/00343400801922814.
17. *Синергия пространства: региональные инновационные системы, кластеры и перетоки знания*, под ред. А.Н. Пилясова, РФ, Москва-Смоленск, Ойкумена, 2012, 760 с.
18. В.П. Мосунов, Ю.С. Никольников, А.А. Сысов
Территориальные структуры районов нового освоения, РФ, Новосибирск, Наука, 1990, 153 с.
19. A. Markusen
Econ. Geogr., 1996, 72(3), 293. DOI: 10.2307/144402.
20. J. H. Dunning
Int. J. Econ. Bus., 2001, 8(2), 173.
DOI: 10.1080/13571510110051441.
21. А.Н. Пилясов
Север и рынок: формирование экономического порядка, 2018, № 5(61), 35. DOI: 10.25702/KSC.2220-802X.5.2018.61.35-54.

22. *Рейтинг инновационного развития субъектов Российской Федерации, 2020*, Вып. 6, под ред. Л.М. Гохберга, РФ, Москва, НИУ ВШЭ, 264 с.
 23. *А.Н. Пилиясов, Н.В. Гальцева, Е.А. Атаманова*
Экономика региона, 2017, 13(1), 114. DOI: 10.17059/2017-1-11.

24. *Н.Ю. Замятина, А.Н. Пилиясов*
Инновационный поиск в монопрофильных городах: блокировки развития, новая промышленная политика и дорожная карта перемен, РФ, Москва, УРСС, 2015, 216 с.

English

Peripheral Innovation System and Its Place in the Development of the Russian Arctic Resources*

Alexander N. Pilyasov

Professor,
 Director of ANO Institute of Regional Consulting,
 Lomonosov Moscow State University
 1 Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia
 pelyasov@mail.ru

Elena S. Putilova

ANO Institute of Regional Consulting
 32 Nakhimovsky Ave., Moscow,
 117218, Russia
 es_putilova@mail.ru

Abstract

The authors considered the concept of peripheral innovation system in the context of the development of natural resources in the Arctic. Russia's resource corporations are its key actors. On the example of the analysis of patent activity of “NOVATEK” and “Norilsk Nickel” companies, the differences between Arctic companies in the strategies for obtaining new knowledge are demonstrated. Peaks of patent activity, as a rule, precede the deployment of projects for new resource development in the Arctic.

The authors have classified the peripheral innovation system according to: the coverage of the area; the degree of influence of the key actor; the stage of development to which it is confined; the type of key natural resource; and other factors.

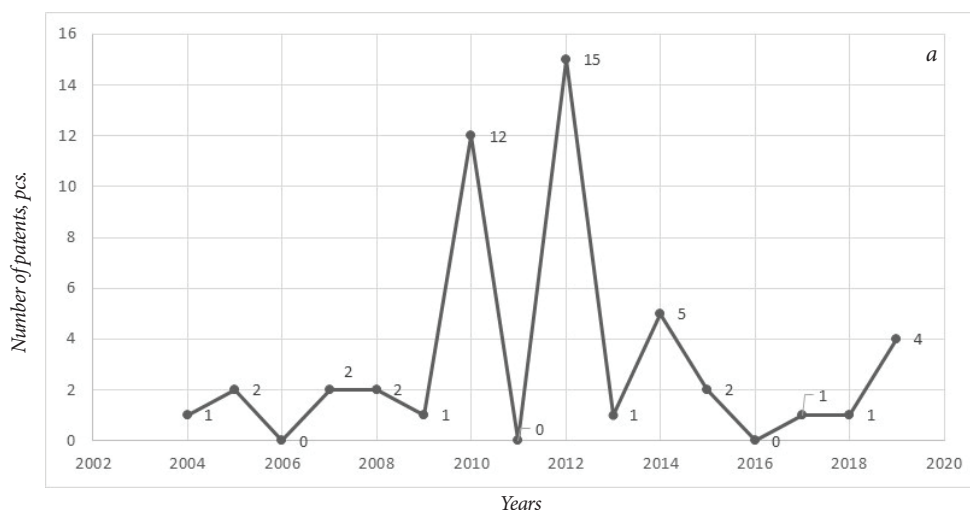
The concept of communication “permeability” of space is introduced, which in the Arctic depends on the configuration of the settlement network, the main transport routes, the availability of a broadband cable and other factors. Thus, the Murmansk region has the maximum communication permeability in the Arctic; the Chukotka Autonomous District has the minimum.

It is shown that the inconsistency of the unified federal legislation and rules with the specific conditions of the Arctic hinders the peripheral innovation system work, as well as the entire process of economic development of the Russian Arctic resources.

Keywords: peripheral innovation system, Arctic resource development process, actors, networks, institutions.

*The work was financially supported by RFBR (project 18-05-00600).

Images & Tables



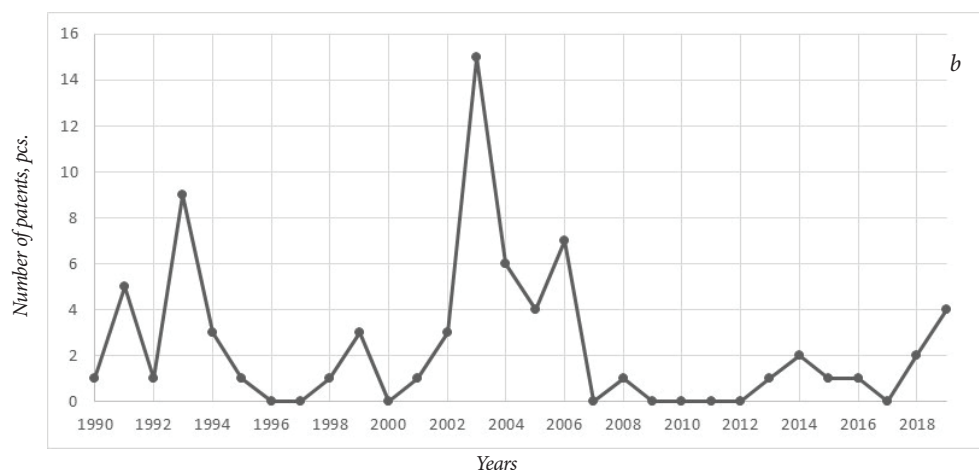


Fig. 1. Patent activity of companies: a – “NOVATEK”, b – “Norilsky nickel”.

Table 1. Comparative analysis of patent activity.

Analyzed parameters of patent activity	OJSC NOVATEK	OJSC MMC Norilsk Nickel
Total number of patents	49	75
Developed by the company	34 (69.4%)	50+4 "Gipronickel Institute" (72%)
Developed in collaboration with other companies	2 (4.1%)	19 (25.3%)
Purchased from other companies	13 (26.5%)	2 (2.7%)
Without references	15 (30.6%)	11 (14.7%)
With references	34 (69.4%)	64 (85.3%)

Table 2. The geography of citations and references of OJSC NOVATEK patents by the main stages of the production process.

Analyzed parameters of patent activity	Stages of production process				
	Gas production, preparation of field installation	Processing of casing-head and other gas	Gas liquefaction	Gas transport	Production service, management, LNG engines, etc.
Total number of patents	9	15	11	5	9
Total number of cities in patent references	18	19	20	10	6
Number of citations in patents by city					
Moscow	6	8	6	2	2
Tyumen	4	3	1	1	1
Ufa	3	—	2	—	—
Saint-Petersburg	1	—	2	—	—
Orenburg	1	1	—	1	—
Ekaterinburg	—	1	1	—	—
Novy Urengoy	1	1	—	1	—
Paris, France	1	1	5	—	1
Houston, Texas, USA	1	—	3	1	—
Munich, Germany	—	2	3	—	—
Tokyo, Japan	—	4	1	—	—
The Hague, Netherlands ("Royal Dutch Shell" headquarters)	2	1	—	—	—
Toshkent, Uzbekistan	1	2	—	—	—
Rotterdam, Netherlands	1	—	—	—	1

Table 3. The geography of citations and references of OJSC MMC Norilsk Nickel patents by the main stages of the production process.

Analyzed parameters of patent activity	Stages of production process						
	Mining	Ore beneficiation	Recovery of metal concentrate	Recycling of metal concentrate	Electrorefining of metal	Ore separation by flotation	Complex metallurgical processing, etc.
Total number of patents	2	3	8	22	10	7	23
Total number of cities in patent references	4	4	15	31	18	11	16
Number of citations in patents by city							
Moscow, * Lyubertsy	1*	—	6	8	2	5	2
Saint-Petersburg	1	2	—	5	2	1	—
Monchegorsk	—	—	1	8	1	1	—
Krasnoyarsk	—	1	1	1	—	4	3
Ekaterinburg	—	—	3	1	1	—	1
Norilsk	—	—	—	1	1	—	—
Verkhnyaya Pyshma	—	—	—	1	—	—	1
Tokyo, Japan	—	—	3	4	1	—	1
Toronto, Canada	—	—	—	7	1	—	—
Catlettsburg, Kentucky, USA	—	—	—	2	4	—	—
Espoo, Finland	—	—	—	4	—	—	1
Butte, Montana, USA	—	2	—	1	—	1	—
Salt Lake City, Utah, USA	—	—	2	1	1	—	—
Johannesburg, RSA	—	—	1	1	1	—	—
Quebec, Canada	—	—	1	—	1	—	1
London, UK	—	—	1	1	1	—	—

References

1. P. Cooke
Geoforum, 1992, 23(3), 365. DOI: 10.1016/0016-7185(92)90048-9.
2. C. Freeman
The Economics of Industrial Innovation, GB, London, Frances Pinter, 1982, 250 pp.
3. C. Freeman
Camb. J. Econ., 1995, 19(1), 5.
DOI: 10.1093/oxfordjournals.cje.a035309.
4. *National Innovation Systems. A Comparative Analysis*, Ed. R. Nelson, GB, Oxford, Oxford University Press, 1993, 552 pp.
5. *National Innovation Systems: Towards a Theory of Innovation and Interactive Learning*, Ed. B.-Å. Lundvall, GB, London, Pinter Publ., 1992, 317 pp.
6. L. Ferrucci, D. Porcheddu
In *Regional Development in Knowledge Economy, Ser. Regions and Cities*, Eds P. Cooke, A. Piccaluga, GB, London, Routledge, 2006, p. 203.
7. S. Virkkala
Eur. Plan. Stud., 2007, 15(4), 511.
DOI: 10.1080/09654310601133948.
8. A.N. Petrov
In *Beyond Territory. Dynamic Geographies of Knowledge Creation, Diffusion, and Innovation*, Eds H. Bathelt, M. Feldman, D.F. Kogler, GB, London, Routledge, 2011, pp. 168–190.
9. J. Karlsen, A. Isaksen, O. Spilling
Entrep. Reg. Dev., 2011, 23(3), 235.
DOI: 10.1080/08985620903233945.
10. S. Dawley
Econ. Geogr., 2014, 90(1), 91. DOI: 10.1111/ecge.12028.
11. A. Isaksen, J. Karlsson
In *Innovation in Peripheral Regions. Handbook of the Geographies of Innovation*, Eds R. Shearmur, Ch. Carrincazeaux, D. Doloreux, GB, Cheltenham, Edward Elgar Publ., 2016, pp. 277–286.
(https://EconPapers.repec.org/RePEc:elg:eechap:16055_16).
12. B.T. Asheim, A. Isaksen Arne, M. Trippl
Advanced Introduction to Regional Innovation Systems, GB, London, Edward Elgar Publ., 2019, 160 pp.
13. S. Iammarino, P. McCann
Multinationals and Economic Geography. Location, Technology and Innovation, GB, London, Edward Elgar Publ., 2013, 496 pp.
14. G. Dosi
Res. Policy, 1982, 11(3), 147. DOI: 10.1016/0048-7333(82)90016-6.
15. F. Todtling, M. Trippl
Res. Policy, 2005, 34(8), 1203. DOI: 10.1016/j.respol.2005.01.018.

16. **A. Torre**
Reg. Stud., 2008, **42**(6), 869. DOI: 10.1080/00343400801922814.
17. **Synergy of Space: Regional Innovation Systems, Clusters and Knowledge Spillovers** [*Sinergiya prostranstva: regional'nyye innovatsionnyye sistemy, klasteri i peretoki znaniya*], Ed. A.N. Pilyasov, Russia, Moscow-Smolensk, Ecumene, 2012, 760 pp. (in Russian).
18. **V.P. Mosunov, Yu.S. Nikulnikov, A.A. Sysyoev**
Territorial Structures of Areas of New Development [*Territorialnye struktury rayonov novogo osvoyeniya*], RF, Novosibirsk, Nauka, 1990, 153 pp. (in Russian).
19. **A. Markusen**
Econ. Geogr., 1996, **72**(3), 293.
DOI: 10.2307/144402.
20. **J. H. Dunning**
Int. J. Econ. Bus., 2001, **8**(2), 173.
DOI: 10.1080/13571510110051441.
21. **A.N. Pilyasov**
J. "Sever i rynek: formirovanie èkonomičeskogo porádka" [*North and Market: Formation of Economic Order*], 2018, № 5(61), 35 (in Russian). DOI: 10.1080/13571510110051441.
22. **Rating of Innovative Development of Regions of the Russian Federation** [*Reyting innovatsionnogo razvitiya subektov Rossiyskoy Federatsii*], 2020, Iss. 6, Ed. L.M. Gokhberg, RF, Moscow, Higher School of Economics Publ., 2020, 264 pp. (in Russian).
23. **A.N. Pelyasov, N.V. Galtseva, E.A. Atamanova**
Economy of Region [*Ekonomika regiona*], 2017, **13**(1), 114.
DOI: 10.17059/2017-1-11.
24. **N.Y. Zamyatina, A.N. Pilyasov**
Innovative Search in Single-Industry Cities: Development Lock-ins, New Industrial Policy and a Roadmap for Change [*Innovatsionny poisk v monoprofilnykh gorodakh: blokirovki razvitiya, novaya promyshlennaya politika i dorozhnaya karta peremen*], RF, Moscow, URSS Publ., 2015, 216 pp. (in Russian).

ФГБУ «АНИИ». Геофизические исследования в высоких широтах*

А.С. Калишин, Н.Ф. Благовещенская, О.А. Трошичев, А.В. Франк-Каменецкий

Представлены результаты геофизических исследований в высоких широтах, полученные специалистами Арктического и антарктического научно-исследовательского института (АНИИ). Результаты базируются на оперативных данных наземных наблюдений и направлены на изучение механизмов солнечно-земных связей и искусственного воздействия мощного коротковолнового (КВ) радиоизлучения на ионосферную плазму с целью снижения негативных последствий эффектов космической погоды на среду обитания человека. Приведено краткое описание сети геофизического мониторинга в арктическом регионе Российской Федерации. Представлены результаты исследований условий распространения КВ-радиоволн в высоких широтах при различных гелиогеофизических условиях, моделирования геофизических процессов в авроральной ионосфере, эффектов модификации высокоширотной ионосферы мощными КВ-радиоволнами, связи изменений погоды и климата с вариациями солнечной активности, разработана методика расчета РС-индекса магнитной активности.

Ключевые слова: геофизические исследования, высокоширотная ионосфера, моделирование, модификация, КВ-радиоволна, магнитная активность.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты №№ 97-05-65443, 00-05-64819, 04-05-64160, 07-05-00167, 07-05-13516, 18-05-80004 и 06-05-64311).

Введение

С началом эры космических полетов стало очевидным, что проявления магнитно-ионосферных возмущений, наблюдаемых на земной поверхности, тесно связаны с «космической погодой» (КП) – непрерывными изменениями характеристик околоземного космического пространства (ОКП), которые являются результатом прохождения через орбиту Земли солнечной плазмы («солнечного ветра»). Резкие флуктуации электромагнитного поля в ОКП и воздействие высокоэнергичной компоненты плазмы могут приводить как к кратковременным, так и к фатальным нарушениям работы аппаратуры на спутниках. Магнитно-ионосферные возмущения в высоких широтах оказывают существенное влияние на функционирование систем

радиосвязи, радиолокации и навигации, ионосферные токи генерируют на поверхности Земли электрические поля, а в энергетических, коммуникационных системах и в трубопроводах – мощные геомагнитно-индуцированные токи, приводящие к нарушениям в работе этих систем. Установлено также влияние гелиогеофизических возмущений на атмосферные процессы и здоровье человека. Таким образом, проблема мониторинга КП имеет отношение к широкому комплексу задач, имеющих оборонное и хозяй-



**КАЛИШИН
Алексей Сергеевич**
Арктический и антарктический
научно-исследовательский
институт



**БЛАГОВЕЩЕНСКАЯ
Наталья Федоровна**
Арктический и антарктический
научно-исследовательский
институт



**ТРОШИЧЕВ
Олег Александрович**
профессор,
Арктический и антарктический
научно-исследовательский
институт



**ФРАНК-КАМЕНЕЦКИЙ
Александр Викторович**
Арктический и антарктический
научно-исследовательский
институт

ственное значение, от обеспечения надежного функционирования космических систем до освоения северных территорий России. Информация об условиях в космическом пространстве должна учитываться при проектировании технологических систем для выбора оптимальных вариантов защиты от неблагоприятных космических воздействий.

Мониторинг КП предполагает использование широкого комплекса наблюдательных средств, которые позволяли бы получать сведения о наиболее значительных явлениях на Солнце, в межпланетной среде и в магнитосфере. Специальные службы КП начали действовать в экономически развитых странах около 20 лет назад. Эти службы оценивают текущее и прогнозируют будущее состояние КП, используя в основном следующие спутниковые наблюдения: солнечных вспышек; извержений солнечной массы из короны Солнца (СМЕ) и измерения солнечной радиоэмиссии; измерения параметров солнечного ветра в точке Лагранжа L1 (на удалении 1.5 млн км от Земли); а также спутниковые измерения потоков энергичных частиц в магнитосфере.

Основная проблема прогнозирования КП в России состоит в том, что Россия никогда не имела спутниковой службы слежения за Солнцем и солнечным ветром. Возможности России в части спутникового мониторинга магнитосферных процессов также несопоставимы с возможностями США. Таким образом, в области прогноза космической погоды Россия находится в сильной информационной зависимости от службы космической погоды США. Эта зависимость может быть значительно снижена использованием наземных методов.

В последние десятилетия существенное развитие получили исследования в области искусственного воздействия на высокоширотную ионосферу мощного КВ-радиоизлучения от специально построенных наземных КВ-нагревных комплексов.

Это связано в первую очередь с введением в эксплуатацию комплекса HAARP (High Frequency Active Auroral Research Program) на Аляске, США, и началом широкомасштабных комплексных экспериментов научного и прикладного характера. Как показали эксперименты на различных КВ-нагревных комплексах, эффекты искусственного воздействия на ионосферу подобны эффектам естественных ионосферных возмущений и могут быть сопоставимы с ними по интенсивности. Воздействие мощных КВ-радиоволн на высокоширотную ионосферу приводит к возбуждению более мощных искусственных возмущений, а также генерации новых явлений, которые принципиально невозможны в средних широтах. В настоящее время в высоких широтах исследования проводятся на двух КВ-нагревных комплексах HAARP и стенде EISCAT/Heating (Тромсё, Норвегия), принадлежащих Европейской научной ассоциации EISCAT. С 2019 г. резко активизировались исследования на комплексе HAARP. В рамках программы Arctic Research in the National Interest (США) выделено приоритетное финансирование на проведение исследований по проекту HAARP. Для эффективного диагностирования ионосферных возмущений естественного и искусственного происхождения европейская научная Ассоциация EISCAT строит в Норвегии радар некогерентного рассеяния радиоволн нового поколения, не имеющий аналогов в мире. Рассматриваются технические предложения по строительству нового КВ-нагревного комплекса, совмещенного с радаром EISCAT_3D, который позволит в полной мере реализовать возможности радара. Мотивация строительства нового КВ-нагревного комплекса объясняется научной результативностью исследований ассоциации EISCAT по нагревной тематике.

В настоящем обзоре будут представлены результаты геофизических исследований в высоких широтах, выполняемые специалистами Арктического и антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ), в рамках проектов, поддержанных Российским фондом фундаментальных исследований. Результаты базируются на данных наземных наблюдений и направлены на изучение механизмов солнечно-земных связей и искусственного воздействия мощного КВ-радиоизлучения на ионосферную плазму с целью снижения негативных последствий эффектов космической погоды на среду обитания человека.

Сеть геофизических пунктов наблюдений в российском секторе Арктики

Арктический институт активно проводил регулярные исследования состояния магнитного поля

Земли и ионосферы в Арктике с 30-х годов XX века. Для этих целей впервые в СССР была разработана и внедрена на базе сети станций Росгидромета уникальная аппаратура. Так, сотрудники Арктического института изготовили и внедрили первый отечественный образец риометра (Relative Ionospheric Opacity Meter), им же принадлежит приоритет в интерпретации полученных данных (поглощения космического радиоизлучения), как в плане фундаментальных исследований физики солнечно-земных связей, так и в прикладных задачах диагностики и прогнозирования условий распространения КВ-радиоволн. Была разработана аппаратура наклонного радиозондирования ионосферы, за которую коллектив сотрудников был награжден медалями ВДНХ. К сожалению, в 1990-х годах регулярные наблюдения в Арктике практически прекратились вследствие недостатка финансирования, что повлекло за собой уход специалистов и выход из строя научно-исследовательского оборудования.

С 2009 г. по 2015 г. в рамках федеральной целевой программы (ФЦП) «Геофизика» была восстановлена система мониторинга геофизической обстановки в Арктической зоне Российской Федерации. Реконструкция сети была выполнена на базе передовых цифровых технических средств измерений и передачи данных. В ААНИИ был организован Полярный геофизический центр (ПГЦ) по сбору, хранению и передаче потребителям геофизической информации в режиме реального времени. В настоящий момент сеть включает в себя 11 станций Росгидромета и ФГБУ «ААНИИ» (рис. 1), на которых ведутся измерения магнитного поля Земли, риометрические наблюдения поглощения космического радиоизлучения, проводится верти-

кальное и наклонное зондирование ионосферы.

Высокоширотная геофизическая сеть на сегодняшний день включает в себя семь пунктов вертикального зондирования ионосферы (ВЗИ). Станции ВЗИ расположены в зоне полярных сияний и южнее ее – авроральной и субавроральной областях высокоширотной ионосферы.

Ионозонд является радиолокационной станцией декаметрового диапазона длин волн, принцип действия которой основан на измерении времени распространения посланной вертикально вверх и вернувшейся обратно последовательности импульсов. В результате сеанса зондирования получается высотночастотная характеристика ионосферы – ионограмма, содержащая информацию о высотном распределении электронной концентрации.

В качестве сетевого ионозонда был выбран канадский цифровой ионозонд CADI (Canadian Advanced Digital Ionosonde) разработанный в Western Ontario University и изготовленный компанией Scientific Instrumentation Ltd. Основными критериями, предъявляемыми к аппаратуре, являлись надежность при эксплуатации в арктических условиях, оптимальное соотношение цена/качество, возможность работы в сетевом и автоном-



Рис. 1. Сеть станций мониторинга геофизической обстановки в Арктике.

ном режиме, малая мощность излучения и энергопотребления, простота в эксплуатации.

Все станции ВЗИ работают по единой программе – цикл зондирования один раз в 15 минут. Ионограммы в режиме реального времени передаются в ПГЦ ААНИИ, где происходит их обработка. Для оперативной автоматизированной обработки ионограмм было разработано уникальное программное обеспечение [1]. Результаты мониторинга в виде часовых телеграмм, содержащих основные сведения о параметрах ионосферы, передаются потребителям.

В процессе реконструкции сети было развернуто семь приемо-передающих пунктов наклонного зондирования ионосферы (НЗИ) и один приемный пункт в поселке Баренцбург на архипелаге Шпицберген. В отличие от ВЗИ, при НЗИ приемный и передающий пункты пространственно разнесены и синхронизированы по времени. Таким образом, излученные одним диагностическим передатчиком сигналы одновременно регистрируются на всех пунктах приема сети, что позволяет исследовать характеристики ионосферы в точках отражения и условия распространения коротких радиоволн в обширном регионе. Информация, получаемая в виде дистанционно-частотных характеристик, отражает реальную картину распространения волн на конкретных радиотрассах и дает возможность определить максимальные и минимальные наблюдаемые частоты, модовую структуру, аномальные механизмы распространения радиоволн.

На приемо-передающих пунктах была внедрена аппаратура НЗИ, использующая широкополосные сигналы, в частности с линейно-частотной модуляцией (ЛЧМ), реализованная на базе трансивера фирмы ICOM [2].

Для обработки результатов НЗИ, выполняемой в ПГЦ ААНИИ, разработаны методики и программное обеспечение для автоматического

определения модовой структуры ионограмм, разделения отражений от регулярного E- и спорадического Es-слоя ионосферы. Был разработан алгоритм восстановления критической частоты слоя E в центральной точке отражения радиотрассы НЗИ с применением индекса эффективных солнечных пятен [3].

Кроме систем зондирования ионосферы, в сеть мониторинга входит семь пунктов регистрации интенсивности космического радиоизлучения (риометры). Это довольно простой, но очень эффективный способ измерения радиопрозрачности ионосферы. Риометр представляет собой приемное устройство, измеряющее уровень галактического космического излучения на частотах 20–50 МГц. В высоких широтах высыпавшиеся потоки частиц создают аномальную ионизацию в слое D ионосферы, которая может превышать на порядки уровень регулярной ионизации. Аномально ионизированный слой поглощает энергию проходящих через него радиоволн, тем самым ухудшая условия распространения радиоволн. При наличии спорадической ионизации в ионосфере уровень галактического радиоизлучения падает, что приводит к ослаблению принимаемого риометром сигнала. Степень ослабления является количественной оценкой поглощения радиоволн и пропорциональна величине электронной концентрации в слое спорадической ионизации.

На арктических станциях были установлены риометры фирмы LA JOLLA SCIENCES (<http://lajollasciences.com/index.html>) с рабочей частотой 30 МГц. Антенна риометра представляет собой фазированную антенную решетку (ФАР), диаграмма направленности которой направлена в зенит. ФАР состоит из двух элементов, в качестве которых используются полуволновые вибраторы с рефлекторами. Ежесекундные уровни космического радиошума передаются в виде форматированных сообщений по цифровым каналам связи в ПГЦ ФГБУ «ААНИИ», где происходит расчет кривой спокойного дня и величины поглощения.

Специалистами ААНИИ была также реконструирована сеть наблюдений геомагнитного поля. На сегодняшний день функционирует десять пунктов магнитных наблюдений, где проводятся регулярные абсолютные наблюдения и непрерывная регистрация вариаций геомагнитного поля. Были установлены новые магнитные павильоны и магнитометрическое оборудование фирмы LEMI (<https://www.isr.lviv.ua/index.htm>). Так же, как и результаты риометрических измерений, ежесекундные значения вариаций магнитного поля Земли в режиме реального времени передаются в ПГЦ.

Магнитные данные станций, расположенных в авроральной зоне, являются основой сотрудничества

России в международных проектах по расчету авроральных $AL/AU/AE/AO$ индексов магнитной активности. В настоящее время в качестве показателя интенсивности магнитосферных суббурь мировое научное сообщество использует AE -индекс, который является алгебраической суммой максимальных амплитуд положительных (AU) и отрицательных (AL) магнитных возмущений в авроральной зоне. Российский сектор авроральной зоны составляет треть длины всей зоны, поэтому российские арктические станции крайне необходимы для корректного расчета авроральных индексов магнитосферной активности. Для обеспечения оперативности расчета авроральных индексов и их распространения между ААНИИ и Центром анализа данных по геомагнетизму и космическому магнетизму Киотского университета (Data Analysis Center for Geomagnetism and Space Magnetism – DACGSM) в 2011 г. был заключен меморандум о сотрудничестве, в рамках которого ААНИИ обеспечивает подготовку и передачу в режиме реального времени данных цепочки станций AE -индекса в DACGSM.

Анализ условий распространения радиоволн в высоких широтах

На основе результатов мониторинга геофизических условий в Арктической зоне выполнен ряд работ по анализу условий распространения дециметровых волн в высоких широтах при различных гелиогеофизических условиях. Показано, что распространение КВ-радиоволн подвержено существенному воздействию ионосферных и магнитосферных возмущений, особенно при повышенной солнечной активности [4–5].

Разработаны подходы к моделированию эффектов, связанных с поглощением радиоволн на высокоширотных радиотрассах наклонного зондирования ионосферы в период солнечных рентгеновских вспышек и поглощения типа полярной шапки [6]. Результаты моделирования показали хорошее согласие с экспериментальными данными.

Были исследованы возможности моделирования условий распространения КВ-радиоволн в высоких широтах с использованием международной модели ионосферы IRI [7]. Наблюдались сильные отличия прогнозируемых характеристик ионосферы по модели IRI от реально наблюдаемых в высоких широтах, даже в относительно спокойных геомагнитных условиях. Было продемонстрировано, что ошибка прогнозирования растет с увеличением геомагнитной активности. Показано, что для удовлетворительного использования модели IRI необходимо проводить ее комплексную адаптацию по экспериментальным данным.

PC-индекс – индикатор магнитной активности

В 1995 г. в ААНИИ был разработан и введен в практику PC-индекс – индикатор магнитной активности, которая генерируется в полярных шапках (Polar Caps) Земли при взаимодействии «солнечного ветра» с земной магнитосферой. Одноминутный PC-индекс рассчитывается независимо для северного и южного полушарий на основе магнитных измерений околополюсных станций Туле в Гренландии (PCN) и Восток (географические координаты $78^{\circ}27'$ ю.ш., $106^{\circ}52'$ в.д.) в Антарктике (PCS) по унифицированной процедуре [8], согласованной ААНИИ (который отвечает за производство PCS-индекса) и Датским Техническим Университетом (который отвечает за производство PCN-индекса). Методика расчета PC-индекса детально описана в монографиях [9–10]. Расчет 1-минутных значений PCN- и PCS-индексов ведется в реальном времени и публикуется на сайте <http://pcindex.org>.

Исследования, выполненные в ААНИИ, показали:

1. Поведение PC-индекса контролируется вариациями электрического поля солнечного ветра EKL («межпланетного электрического поля»), при этом временная задержка ΔT отклика PC-индекса на вариации поля EKL определяется скоростью изменения поля $dEKL/dt$ [11].

2. Рост PC-индекса всегда предшествует развитию магнитных возмущений в авроральной зоне (магнитных суббурь), интенсивность которых (AL -индекс) линейно связана с величиной PC-индекса.

3. Поведение PC-индекса на фазе развития суббури определяется интенсивностью продольных магнитосферных токов (field-aligned currents, FAC) в системе R1 [12].

4. Мировые магнитные бури начинаются, если PC-индекс стабильно (на протяжении более одного часа) превышает пороговый уровень ~ 1.5 – 2.0 мВ/м, при этом мощность

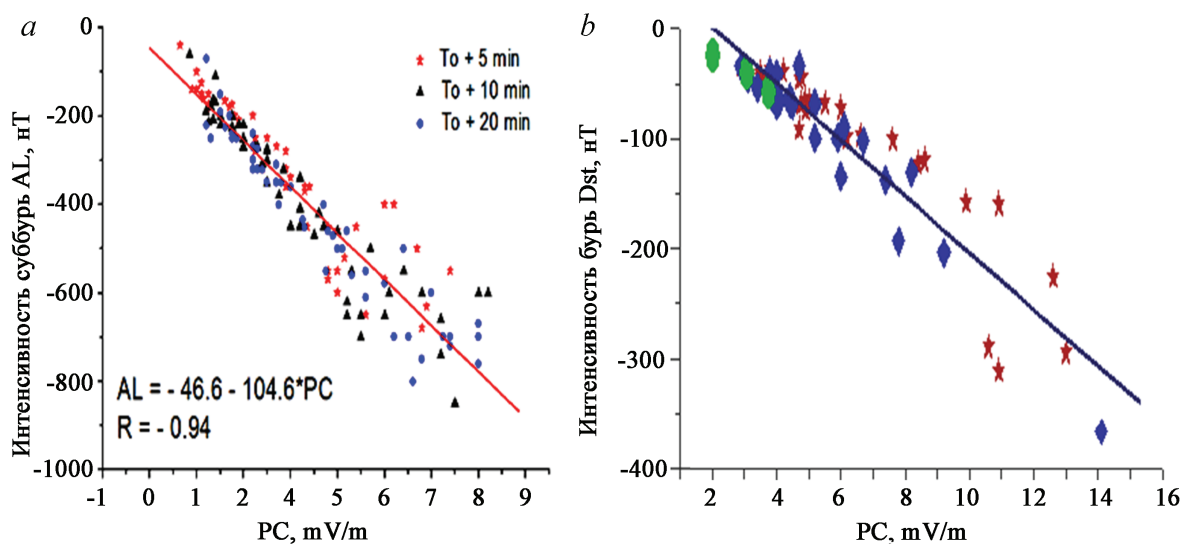


Рис. 2. Зависимость интенсивности магнитосферных суббурь (а) и магнитных бурь (б) от величины PC-индекса.

магнитной бури (Dst_{min}) определяется величиной PC-индекса [12].

На рис. 2 представлены статистически обоснованные соотношения между величиной PC-индекса и интенсивностью магнитосферных возмущений [13].

Рис. 2а показывает соотношения между PC-индексом и интенсивностью магнитосферных суббурь (AL-индекс), полученные через 5, 10 и 20 минут после внезапного начала суббури, то есть в моменты $T_0 + 5$ минут, $T_0 + 10$ минут и $T_0 + 20$ минут (где T_0 – время внезапного начала суббури). Рис. 1б показывает соотношения между PC_{max} (максимальной величиной PC-индекса, наблюдаемой перед магнитной бурей) и Dst_{min} для трех типов магнитных бурь: классических бурь (красные звездочки), пульсирующих бурь (зеленые ромбы) и их комбинации – композитных бурь (синие ромбы). Как можно видеть, интенсивность магнитосферных возмущений связана с величиной PC-индекса линейным законом.

На основании этих экспериментальных результатов в 2013 г. Международная ассоциация геомагнетизма и аэрономии (МАГА) одобрила PC-индекс в качестве показателя энергии солнечного ветра, поступающей в земную магнитосферу при ее взаимодействии с солнечным ветром. Именно это свойство PC-ин-

декса определяет его принципиальное отличие от различных «функций взаимодействия» (которые характеризуют геоэффективность солнечного ветра, фиксируемого в точке Лагранжа) и от наземных индексов магнитной активности AL и Dst, которые характеризуют энергию солнечного ветра, уже реализованную в магнитосфере в форме суббурь или магнитных бурь.

Кроме того, детальный анализ связи изменений PC-индекса и AL-, Dst-индексов с вариациями параметров солнечного ветра, измеренных в точке Лагранжа, показал [14], что в 20% рассмотренных событий реальное электрическое поле EKL, воздействующее на земную магнитосферу, не соответствует полю EKL, рассчитанному по данным о параметрах солнечного ветра в точке Лагранжа. Это означает, что потоки солнечного ветра, зафиксированные на удалении 1.5 млн км перед земной магнитосферой, в этих случаях не контактировали с магнитосферой. Следовательно, PC-индекс позволяет верифицировать реальное поле EKL, воздействующее на магнитосферу, и определять корректность использования параметров солнечного ветра в точке Лагранжа (и, соответственно, данных, представляемых на американском сайте OMNI) для анализа солнечно-земных связей.

Было также установлено, что импульсы динамического давления солнечного ветра (PSW) влияют на поступление энергии в магнитосферу только в том случае, если они коррелируют с ростом поля EKL. В противном случае магнитная активность (PC- и AL-индексы) остается на нулевом уровне даже при большой мощности импульсов динамического давления.

Наземный PC-индекс как показатель поступающей в магнитосферу энергии солнечного ветра

является надежным средством мониторинга и текущего прогнозирования (наукастинга) развития магнитосферных суббурь и магнитных бурь. Возможности использования PC -индекса как стандарта оценки мощности магнитосферных возмущений были рассмотрены Международной организацией по стандартам (International Standard Organization, ISO). Эксперты Технического Комитета ISO/TC20/SC14 «Космическая среда» рассмотрели подготовленный в ААНИИ технический отчет «Оперативная оценка поступающей в магнитосферу энергии солнечного ветра посредством наземного PC -индекса» и рекомендовали его для ознакомления международному научному сообществу. Согласно справке (www.mendeley.com), число прочтений статей о PC -индексе превысило 20 000, ссылки на них содержатся более чем в 1 800 научных работах, а за последние полгода ссылки на статьи о PC -индексе зарегистрированы более чем в 400 научных публикациях (справка Academia.edu).

Моделирование геофизических процессов в авроральной ионосфере

В отделе геофизики ААНИИ активно развивается направление по моделированию геофизических процессов в авроральной ионосфере. Авроральный овал играет ключевую роль в фундаментальных космических исследованиях, а также в изучении вопросов, связанных с функционированием систем радиосвязи, радиолокации и навигации, возникновением видимых полярных сияний и т. д. В настоящий момент спутниковых и наземных систем для непрерывного мониторинга всей высокоширотной зоны не существует, поэтому эту задачу решают с помощью моделирования.

Модель OVATION Prime (2010) и ее более поздние модификации, разработанные Патриком Ньюэл-

лом и его коллегами в Университете Джона Хопкинса (Мэриленд, США), можно считать наиболее удачными из существующих моделей. Использование характеристик солнечного ветра, измеряемых американским спутником ACE в точке Лагранжа L1, в качестве основных параметров модели стало ее преимуществом и одновременно недостатком. С одной стороны, OVATION Prime (2010) позволяет с ограниченной точностью прогнозировать положение и интенсивность активной зоны высыпаний на 30 и более минут вперед. С другой стороны, в силу удаленности спутника ACE от дневной границы магнитосферы точность оценки текущего состояния аврорального овала заметно ниже по сравнению с моделями, входными параметрами которых являются наземные индексы магнитной активности. В связи с этим в отделе геофизики ААНИИ модель OVATION Prime (2010) была адаптирована под индекс магнитной активности полярной шапки (PC), который является показателем поступающей в магнитосферу энергии солнечного ветра. Результаты испытаний новой версии модели OVATION Prime (PC) показали заметное улучшение ее точности и были представлены на международных конференциях, а также опубликованы в [15]. На *рис. 3* представлено пространственно-временное распределение авроральных высыпаний как функция величины PC -индекса.

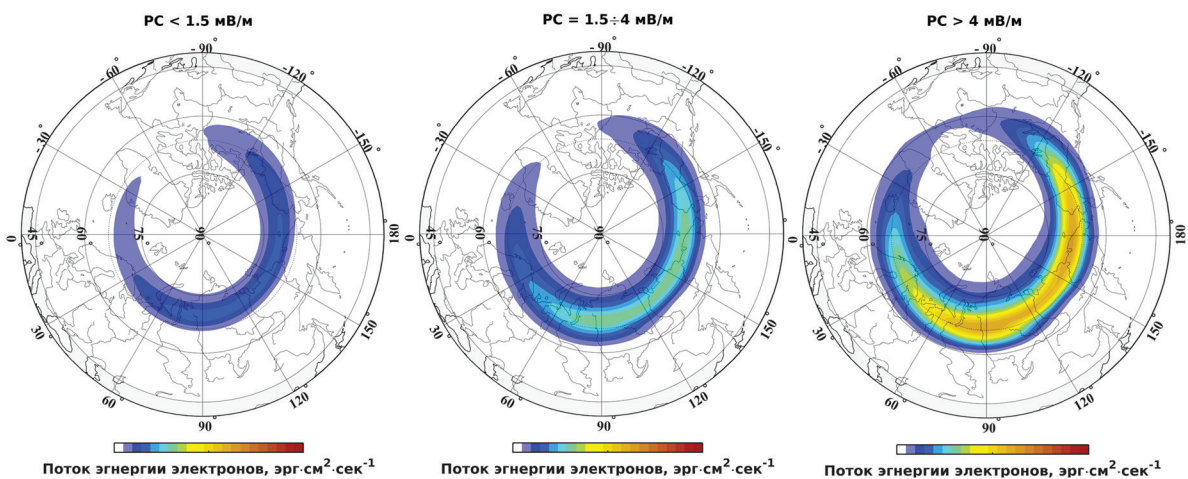


Рис. 3. Пространственно-временное распределение плотности потока энергии авроральных высыпаний в зависимости от величины PC -индекса.

Модификация высокоширотной ионосферы мощными КВ-радиоволнами

Одним из направлений работ, развиваемых специалистами ААНИИ, являются экспериментальные исследования эффектов воздействия мощных КВ-радиоволн на высокоширотную ионосферу. С середины 1990-х годов работы выполнялись на технических средствах Европейской научной ассоциации EISCAT в рамках различных грантов. EISCAT принадлежит КВ-нагревный стенд, расположенный в Тромсё, Норвегия, и не имеющий аналогов в России как по географическому расположению (высокие широты), так и по техническим характеристикам. В 2008 г. было заключено Соглашение между ФГБУ «ААНИИ» (Росгидромет) и Европейской научной ассоциацией EISCAT. В рамках данного Соглашения резко возрос объем проводимых нагревных экспериментов специалистами ААНИИ, которые получили право регулярной работы на всех технических средствах EISCAT по собственным программам в объеме оплаченной квоты часов работы.

КВ-нагревной стенд является универсальным научно-исследовательским инструментом для искусственной модификации и изучения высокоширотной ионосферы [16]. Излучение мощной КВ-радиоволны (волны накачки) производится при помощи одной из трех имеющихся антенных систем. Каждая антенная система представляет собой фазированную антенную решетку, состоящую из полноволновых ортогональных диполей. Такое расположение диполей обеспечивает формирование круговой поляризации излучаемой волны накачки. Если вращение вектора электрического поля E волны накачки совпадает с направлением гировращения электронов, то такая волна имеет необыкновенную (X -мода) поляризацию, если вращение происходит в противоположную сторону, то волна обладает обыкновен-

ной (O -мода) поляризацией. Наиболее эффективная из антенных систем ФАР 1 состоит из 144 элементов, ширина главного лепестка диаграммы направленности (ДН) составляет порядка $5-6^\circ$ (на уровне 3 дБ), работает в диапазоне частот от 5.4 до 8.0 МГц и обеспечивает эффективную мощность излучения ($P_{эфф}$) до 1.2 ГВт.

В качестве средств диагностирования фоновых геофизических условий и эффектов воздействия мощной КВ-радиоволны используется большой ряд измерительного оборудования: магнитометр, камера всего неба, ионозонд вертикального радиозондирования, приемник для регистрации искусственного радиоизлучения ионосферы (ИРИ). Основным средством диагностирования являются радары некогерентного рассеяния радиоволн, которые находятся в непосредственной близости от нагревного стенда и обеспечивают получение детальной информации об интенсивностях искусственных возмущений с высоким пространственным и временным разрешением в широком диапазоне высот (90–800 км). Для дистанционного диагностирования эффектов воздействия привлекались данные результатов наблюдений КВ-радаров CUTLASS (SuperDARN), использовались многоканальные приемные КВ-доплеровские комплексы, аппаратура регистрации узкополосного искусственного радиоизлучения (в полосе ± 1 кГц относительно частоты нагрева) и комплексы НЗИ, работающие в сетевом режиме.

Большинство экспериментов, проведенных сотрудниками ААНИИ на нагревном комплексе EISCAT/Heating, тесно связаны с нелинейным взаимодействием волны накачки и ионосферной плазмы на высотах F-области. Как правило, для модификации F-области ионосферы используется мощная КВ-радиоволна обыкновенной поляризации (O -мода). Такая волна наиболее эффективно воздействует на ионосферную плазму в области высот отражения и верхнегибридного резонанса. При комплексном диагностировании результатов воздействия волны накачки O -поляризации было установлено, что такая волна способна возбуждать искусственное радиоизлучение ионосферы (ИРИ) вблизи второй гармоники частоты волны накачки [17], генерировать вытянутые вдоль магнитных силовых линий мелкомасштабные искусственные ионосферные неоднородности (МИИН) в ночной F-области ионосферы [18]. Был проведен детальный анализ эффекта магнитного зенита, и показано, что наиболее сильное возрастание температуры электронов происходит при излучении мощной радиоволны вдоль направления силовых линий геомагнитного поля [19]. Полученные результаты продемонстрировали сильную зависимость различных явлений, индуцированных O -волной накачки, таких как интенсив-

ность МИИН, спектр ИРИ, искусственная оптическая эмиссия, ленгмюровская и ионно-акустическая турбулентности, от близости частоты волны накачки к частоте электронной гирогармоники (nf_{ce} , где n – номер гармоники, f_{ce} – гирочастота электрона) [20–21].

В отличие от волны накачки O -поляризации, волна X -поляризации не достигает высоты верхнегибридного резонанса и отражается от ионосферы ниже, чем O -волна. Следовательно, она не должна возбуждать тепловую параметрическую (резонансную) неустойчивость (thermal parametric (resonance) instability – TPI), ответственную за генерацию МИИН, а также параметрическую распадную неустойчивость (parametric decay instability – PDI) и трансформацию на электростатические плазменные волны, такие как волна Ленгмюра и ионно-звуковая волна. Кроме того, электрическое поле волны накачки X -моды на высоте отражения перпендикулярно геомагнитному полю, а для возбуждения PDI требуется параллельное электрическое поле, которое реализуется для волны накачки O -моды.

Тем не менее, результаты многочисленных экспериментов, выполненных сотрудниками ААНИИ, впервые позволили обнаружить, что мощная КВ-радиоволна необыкновенной поляризации, излучаемая

в направлении магнитного зенита, способна вызывать разнообразные индуцированные явления в F -области ионосферы высоких широт, которые могут по интенсивности существенно превосходить явления, вызванные волной накачки O -поляризации. Полученные данные позволили провести комплексный анализ и сравнить результаты диагностирования эффектов нагрева высокоширотной ионосферы мощной КВ-радиоволной обыкновенной и необыкновенной поляризации.

Показано, что волна накачки O -поляризации генерирует МИИН только при частотах нагрева f_H ниже критической частоты $F2$ -слоя ионосферы $f_H \leq f_oF2$, в то время как МИИН при X -поляризации возбуждаются на частотах как ниже, так и выше (до 2 МГц) критической частоты слоя $F2$ ($f_H \leq f_oF2$ и $f_H > f_oF2$), однако при этом необходимы более высокие значения порогового электрического поля [22].

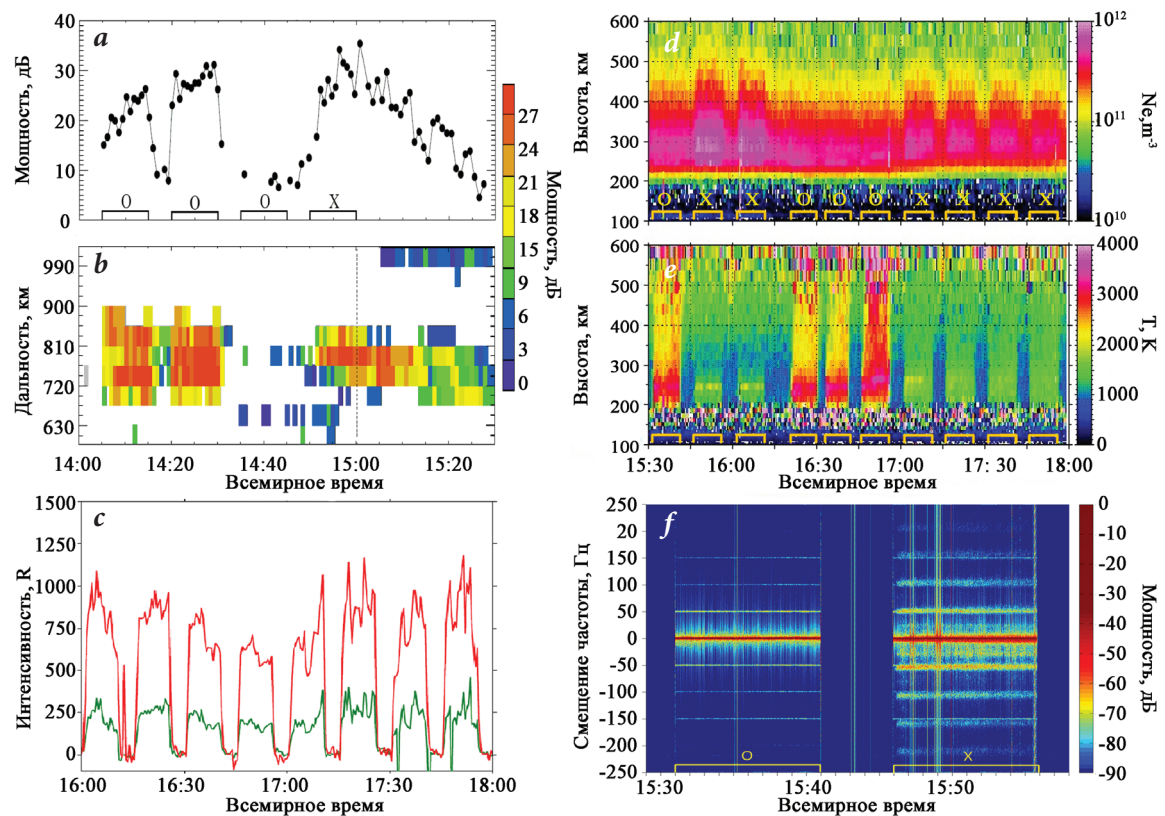


Рис. 4. Эффекты воздействия мощной КВ-радиоволны комплекса EISCAT/Heating на полярную ионосферу по данным комплексных измерений: а, б – мощность рассеянных на МИИН сигналов по данным КВ-радара CUTLASS (SuperDARN) (луч 5) 5 ноября 2009 г.; с – интенсивность искусственных оптических излучений в красной (630.0 нм) и зеленой (557.7 нм) линиях по данным DASI-2 в Тромсё (EISCAT) 22 октября 2013 г.; д, е – высотное-временное распределение электронной плотности N_e и температуры электронов T_e по данным радара некогерентного рассеяния в Тромсё 3 ноября 2013 г.; ф – спектры нагревающего сигнала комплекса EISCAT/Heating, зарегистрированные 25 февраля 2013 г. вблизи С.-Петербурга.

Особенностью МИИН, генерируемых X -волной, является большое время релаксации, которое может достигать нескольких минут, в отличие от МИИН, возбуждаемых на O -моду, время жизни которых составляет единицы секунд после выключения нагревного комплекса. В качестве примера на *рис. 4a* и *4b* приведены результаты наблюдений генерируемых МИИН, зафиксированных 5 ноября 2009 г. при помощи радара CUTLASS, расположенного в Ханкасалми.

Комплекс EISCAT/Heating излучал на частоте $f_H = 4040$ кГц циклами «10 мин. нагрев/5 мин. пауза», $P_{эфф}$ составляла 130 МВт (циклы нагрева и мода поляризации волны накачки указана на *рис. 4a*). Как видно из *рис. 4a* и *4b*, в последнем цикле излучения X -волны накачки возбуждались МИИН с временем релаксации более 25 мин. Необходимо также отметить значительную разницу во временах релаксации МИИН при X -поляризации, возбуждаемых на высоких ($f_H = 5.5\text{--}8.0$ МГц) и низких ($f_H = 4.0\text{--}5.0$ МГц) частотах нагрева. Время релаксации МИИН, возбуждаемых, в первом случае не превышает трех минут, тогда как во втором случае оно может превышать пять минут. Времена нарастания и релаксации МИИН при X -нагреве существенно зависят от «предыстории» воздействия волны накачки. При «холодном» старте (первый цикл нагрева) время образования МИИН, то есть нарастания интенсивности рассеянного на МИИН сигнала составляет 60–70 с, а при $f_H > f_oF2$ может достигать 150 с. В последующих циклах нагрева времена нарастания составляют единицы секунд, а время релаксации увеличивается.

Поведение температуры T_e и концентрации N_e электронов в F-области ионосферы при X - и O -режимах нагрева носят противоположный характер. При X -нагреве наблюдаются сильные возрастания N_e (до 100%) в широком диапазоне высот как на частотах выше, так и ниже критической частоты слоя F2 ($f_H \leq f_oF2$

и $f_H > f_oF2$). При этом возмущения T_e за счет омического нагрева для условий $f_H \leq f_oF2$ происходили в основном в узком диапазоне высот и не превышали 20% от фоновых значений. При X -нагреве на частотах $f_H > f_oF2$ возрастания T_e увеличивались до 50%. На *рис. 4d* и *4e* приведены типичные высотно-временные распределения N_e и T_e , полученные 3 ноября 2013 г. радаром некогерентного рассеяния в Тромсё. Мощная КВ-радиоволна нагревного комплекса излучалась при помощи ФАР-1 в магнитный зенит на частоте 6.2 МГц, $P_{эфф} = 450$ МВт. Нагревные циклы и поляризация мощной КВ-радиоволны указаны на оси времени.

Воздействие мощной КВ-радиоволны O -поляризации сопровождалось сильным повышением T_e до 200–300% и, как правило, незначительным изменением N_e на 10–20%. В особых условиях O -нагрева (на частотах вблизи критической частоты, а также вблизи гармоник гирочастоты электронов) наблюдались возрастания N_e , но они были меньше, чем при X -нагреве. В условиях, когда $f_H > f_oF2$, эффектов при O -нагреве не наблюдалось.

Мы предполагаем, что излученная в направлении магнитного зенита X -волна инициирует ускорение электронов вследствие совпадения поляризации волны с направлением гировращения электронов. Как было показано в [23], поток ускоренных электронов может вызвать повышенное образование ионизации. Наличие ускоренных электронов подтверждается и оптическими наблюдениями. Было обнаружено, что нагрев X -волной приводит к генерации очень интенсивного оптического излучения в красной и зеленой линиях атомарного кислорода. Отношение интенсивности зеленой линии к красной составляло 0.35–0.50 [24]. На *рис. 4c* приведены интенсивности искусственного оптического излучения в красной (630.0 нм) и зеленой (557.7 нм) линиях по данным камеры DASI-2 в Тромсё 22 октября 2013 г. Мощная волна X -поляризации излучалась на частоте 7100 кГц в магнитный зенит с 16 по 18 UT циклами «10 мин нагрев/5 мин пауза». Этот экспериментальный факт может служить подтверждением наличия сильного ускорения электронов и, как следствие, повышения N_e в направлении магнитного зенита.

Эксперименты на комплексе EISCAT/Heating позволили впервые обнаружить, что при нагреве на X -моду на частотах $f_H < f_oF2$ и $f_H > f_oF2$ могут возбуждаться различные дискретные компоненты в спектре узкополосного радиоизлучения ионосферы (УИРИ) в полосе частот порядка ± 1 кГц относительно частоты волны накачки. УИРИ регистрировалось на значительном (более 1000 км) удалении от КВ-нагревного комплекса [22]. Это принципиально важный результат, свидетельствующий о возможности распростра-

нения сигналов из искусственно возмущенной области ионосферы над нагревным комплексом на большие расстояния практически без затухания. Пример спектра УИРИ, зарегистрированного под Санкт-Петербургом 28 октября 2015 г., приведен на *рис. 4f*. Нагревной комплекс EISCAT/Heating излучал на частоте $f_H = 5423$ кГц циклами «10 мин. нагрев / 5 мин. пауза» (циклы нагрева и мода поляризации волны накачки указаны на *рис. 4f*). На наш взгляд, генерация дискретных компонент в спектре УИРИ вызвана рассеянием Бриллюэна волны накачки на возбуждаемых электростатических ионно-циклотронных волнах (ионов атомарного кислорода) [25].

Результаты выполненных экспериментов на КВ-нагревном комплексе EISCAT/Heating свидетельствуют о регулярности и повторяемости эффектов воздействия мощных КВ-радиоволн на высокоширотную ионосферу. Показано, что происходит сильная модификация F-области высокоширотной ионосферы в поле мощной КВ-радиоволны как обыкновенной, так и необыкновенной поляризации, выявлены основные характеристические особенности возбуждаемых явлений.

Связь изменений погоды и климата с вариациями солнечной активности

Атмосферное электрическое поле

За последние годы значительно увеличился объем экспериментальных данных, свидетельствующих о связи изменений погоды и климата с вариациями солнечной активности. В настоящее время наиболее вероятным механизмом предполагается комбинация прямого воздействия изменения суммарной солнечной радиации (~0.1% в течение солнечного цикла) и косвенного воздействия ультрафиолетовой радиации (несколько процентов в течение солнечного цикла). Однако изменения этих параметров не могут объяснить наблюдаемые изо дня в день изменения метеорологических характеристик, обусловленных вариациями солнечной активности. К ним относятся эффекты, связанные с солнечными протонными событиями, уменьшением потока галактических космических лучей (GCR), вариациями потока релятивистских электронов и секторной структурой магнитного поля солнечного ветра [26–27]. Наиболее вероятным механизмом этих связей является изменение плотности атмосферного электрического поля и токов [28].

Еще в течение первой четверти двадцатого века институтом Карнеги в Вашингтоне было проведено семь крупных морских круизов, в ходе которых проводились измерения атмосферного электрического поля. Предварительные измерения атмосферного электричества были сделаны во время рейса корабля «Гали-

лей» (1907) и продолжены в круизах корабля «Карнеги» в 1909–1917 гг. и в 1928–1929 гг. Первоначально получение любых надежных измерений электрического поля атмосферы над океаном казалось невозможным из-за движения судов, смены парусов, брызг и сырости, но к круизу в 1928/1929 г. техника улучшилась настолько существенно, что появилась возможность непрерывной регистрации интенсивности электрического поля.

Анализ результатов позволил получить важный результат – суточное изменение электрического поля в мировом времени не зависит от положения корабля. Эта суточная вариация, являющаяся ключевой частью современного понимания физики глобальной электрической цепи, известна как кривая Карнеги.

Согласно современным представлениям, основным источником электрического поля в атмосфере являются грозовые облака. В полярных районах существенный вклад вносят электрические поля ионосферы, возникающие в результате взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой Земли.

Наблюдения вариаций атмосферного электрического поля были начаты на станции Восток в 1998 г. в рамках Российско-Австралийского проекта. В 2005 году был полностью модернизирован измерительный комплекс, который практически без перерывов работает до настоящего времени. За более чем 20-летний период наблюдений установлено, что Антарктическое плато в районе станции Восток является идеальным местом для проведения исследований глобальной атмосферно-электрической цепи. Здесь не бывает низкой облачности, сильных ветров, очень редки осадки, почти полностью отсутствуют антропогенные воздействия. Условия «хорошей погоды» наблюдаются здесь более чем в 50% от общего времени наблюдений.

Результаты анализа данных первых лет наблюдений показали, что

суточные вариации E_z , полученные в периоды, удовлетворяющие условиям «хорошей погоды», соответствуют глобальной кривой Карнеги [29]. Этот результат получен впервые по данным наблюдений на материковых станциях. Установлена связь вариаций межпланетного магнитного поля (ММП) с вариациями электрического поля. При этом V_y -компонента ММП воздействует на электрическое поле преимущественно в околополуденные часы местного магнитного времени, в то время как связь с V_z -компонентой наблюдается в утренние и вечерние часы. Сделан вывод о том, что ММП воздействует на E_z через систему продольных токов, определяющую распределение электрического потенциала и токов в полярной ионосфере и, соответственно, потенциал ионосферы над точкой наблюдения [29]. Дальнейшие исследования связи вариаций E_z с потенциалом ионосферы, рассчитанным по модели, подтвердили вывод о непосредственном влиянии ионосферного потенциала на величину приземного электрического поля [30] (рис. 5).

В работе [27] показано существование значительной связи между среднесуточной величиной ММП V_y (и, соответственно, величиной атмосферного электрического поля) и вариациями давления в Антарктике. Подобная чувствительность вариаций давления к внутренним (метеогенераторы) и внешним (ММП V_y) источникам для региона Антарктического плато (магнитная широта $m_{lat} > 83^\circ$) предполагает существование единого источника этих вариаций. Показано, что этим источником может быть глобальная электрическая цепь. Реакция атмосферного давления на Антарктическом плато запаздывает на несколько дней по отношению к вариациям E_z , обусловленным внутренним генератором.

В [31] рассмотрена связь вариаций электрического поля как с локальными метеорологическими параметрами, так и с величиной потенциала ионосферы. Рассчитанные регресси-

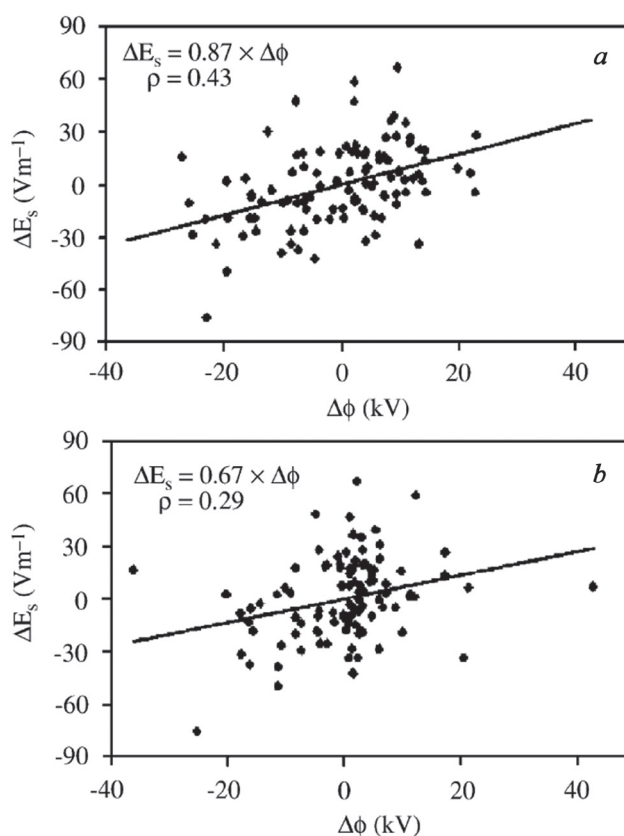


Рис. 5. Зависимость величины вариаций атмосферного электрического поля на станции Восток (ΔE_s) от величины ионосферного потенциала ($\Delta\phi$), рассчитанного по моделям Веймара (а) и IZMEM (б) над точкой наблюдения.

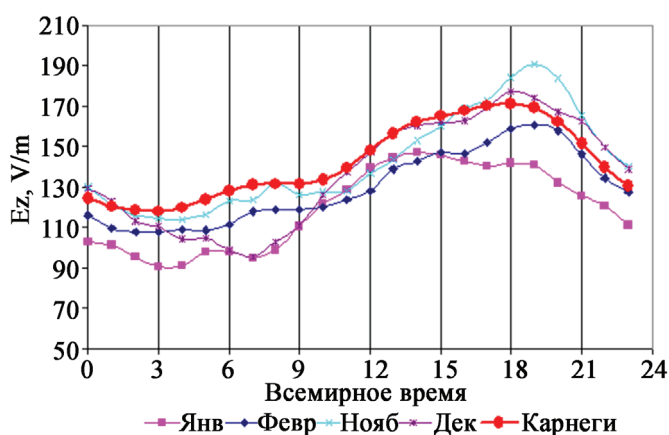


Рис. 6. Суточный ход электрического поля на станции Восток для летних (январь, февраль, ноябрь, декабрь) месяцев 2010 г.

онные соотношения позволили получить суточный ход атмосферного электрического поля, создаваемого грозowymi генераторами, очищенный от влияния локальных метеорологических и ионосферных источников. В результате получен суточный ход для различных месяцев, совпадающий с результатами экспедиции Карнеги, рис. 6.

В работе [32] измерения атмосферного электрического поля на станции Конкордия на Антарктическом плато сравниваются с измерениями на станции Вос-

ток (560 км), а также измерениями Карнеги (1915–1929). Из измерений на станциях Восток и Конкордия оценен и исключен вклад влияния солнечного ветра. Одновременные измерения позволили выделить периоды, когда ковариабельность измерений электрического поля на двух станциях превышает 90%, а также интервалы, когда очевидна значительная локальная изменчивость. Одновременные изменения формы и среднего уровня суточной вариации, аналогичные вариациям Карнеги, интерпретируются как результат изменений атмосферного тока, вытекающего из электрифицированных облаков, преобладающих в низких широтах. Более мелкие локальные метеорологические эффекты удалены из данных станции Восток, показывая изменения в форме среднемесячных суточных вариаций, которые аналогичным образом приписываются изменениям от месяца к месяцу преимущественно низкоширотной системы конвекции.

Депрессия озона в Антарктиде

Депрессия озона, или озоновая «дыра», развивается в экстремальных метеорологических условиях Антарктики ежегодно в весенний период в результате фотохимических и динамических процессов. Разрушение озона в области, ограниченной стратосферным полярным вихрем, демонстрирует значительные межгодовые флуктуации, интенсивность которых сравнима с величиной многолетнего отрицательного тренда содержания озона, наблюдающегося с начала 80-х годов прошлого века. Межгодовые флуктуации, являясь следствием причин динамического характера, не позволяют однозначно определить фактический многолетний тренд общего содержания озона (ОСО), происходящий из-за повышенного содержания в атмосфере разрушающих озон веществ, что препятствует достоверной оценке эффективности мер, принимаемых на международном уровне для сохранения озонового слоя.

Данные, представленные в *таблице 1*, показывают, что в 2014–2019 гг. наблюдалось чередование интенсивности озоновых «дыр» и, как следствие, нерегу-

лярные изменения знака многолетнего тренда. Озоновая «дыра» 2015 г. оказалась одной из самых мощных за весь период наблюдения (1979–2019). Далее в 2016 и 2017 гг. фиксировались относительно слабые, а в 2018 г. – опять мощная озоновая «дыра». Но в следующем 2019 г. озоновая «дыра» сократилась до рекордно малых размеров. Однако эта аномалия 2019 г. связана с особыми метеорологическими процессами и не свидетельствует о резком уменьшении многолетнего спада озона.

Изучение межгодовых вариаций ОСО позволяет разделить изменения, обусловленные антропогенными и естественными причинами. Исследования, проведенные в ААНИИ, показали, что уровень спада озона зависит от мощности зимнего антарктического вихря, на которую влияют изменения крупномасштабной циркуляции, текущие метеорологические условия и солнечная активность [33]. Доминирующим фактором, определяющим мощность озоновой «дыры», являются экваториальные квазидвухлетние осцилляции (КДО), которые, модулируя циркуляцию средних и высоких широт, воздействуют на интенсивность вихря в Антарктике и перенос озона из тропиков к южным полярным широтам. Проведенный в ААНИИ анализ показал, что зависимость от КДО определяет возможность прогноза межгодовых флуктуаций мощности «озоновой дыры» на основе прогноза КДО. Также были выявлены неизвестные ранее сезонные закономерности КДО

Таблица 1. Вариации ОСО с 2014 г. по 2019 г.

Годы	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Карта озоновой «дыры» над Антарктикой 28 октября						
Минимум ОСО, еД*	128.6	117.2	123.2	141.8	111.8	167.0
Площадь, млн км ²	20.9	25.6	17.4	22.9	22.9	9.3

* еД – единица Добсона, равна слою озона толщиной 10 мкм при стандартных давлении и температуре.

и дискретность изменения периода цикла КДО [34–35], которые позволяют делать долгосрочный (до пяти лет) прогноз КДО и, соответственно, прогноз изменений концентрации озона над Антарктикой. Таким образом, можно выделить изменения, обусловленные динамическими факторами и оценить направление многолетнего тренда изменения содержания озона, связанного с содержанием озоноразрушающих веществ в атмосфере.

Заключение

В обзоре представлены результаты геофизических исследований ААНИИ в высоких широтах, которые сводятся к следующему:

- приведено краткое описание сети геофизических наблюдательных станций в арктическом регионе Российской Федерации;
- выполнен анализ условий распространения декаметровых волн в высоких широтах при различных гелиогеофизических условиях по данным экспериментальных наблюдений и моделирования. Показано, что распространение КВ-радиоволн подвержено существенному воздействию ионосферных и магнитосферных возмущений, особенно при повышенной солнечной активности;
- разработана методика расчета *PC*-индекса магнитной активности и установлена связь межпланетного электрического поля и *PC*-индекса;
- выполнены исследования по моделированию геофизических процессов в авроральной ионосфере;
- выполнены исследования эффектов модификации высокоширотной ионосферы мощными КВ-радиоволнами при различных режимах воздействия (поляризация мощной

КВ-радиоволны, частота нагрева и отношение частоты нагрева к критической частоте слоя F2, направление излучения мощной волны). Результаты экспериментов на КВ-нагревном комплексе EISCAT/Heating свидетельствуют о регулярности и повторяемости эффектов воздействия мощных КВ-радиоволн на высокоширотную ионосферу. Показано, что происходит сильная модификация F-области высокоширотной ионосферы в поле мощной КВ-радиоволны как обыкновенной, так и необыкновенной поляризации, выявлены основные характеристические особенности возбуждаемых явлений;

- исследована связь изменений погоды и климата с вариациями солнечной активности. Рассмотрена связь вариаций атмосферного электрического поля, измеряемого в Антарктиде, как с локальными метеорологическими параметрами, так и с величиной потенциала ионосферы. Рассчитанные регрессионные соотношения позволили получить суточный ход атмосферного электрического поля, создаваемого грозowymi генераторами, очищенного от влияния локальных метеорологических и ионосферных источников;
- установлено, что доминирующим фактором, определяющим мощность озоновой «дыры» в Антарктиде, являются экваториальные квазидвухлетние осцилляции (КДО), которые, модулируя циркуляцию атмосферы средних и высоких широт, воздействуют на интенсивность вихря в Антарктике и перенос озона из тропиков к южным полярным широтам. Проведенный в ААНИИ анализ показал, что зависимость от КДО определяет возможность прогноза межгодовых флуктуаций мощности «озоновой дыры» на основе прогноза КДО.

В обзоре представлены результаты геофизических исследований в высоких широтах, полученные специалистами ААНИИ в рамках проектов, поддержанных РФФИ (№№ 97–05–65443, 00–05–64819, 04–05–64160, 07–05–00167, 07–05–13516, 18–05–80004, 06–05–64311а), а также по тематике, интересующей РФФИ.

Авторы выражают благодарность сотрудникам Российского научного центра на архипелаге Шпицберген, Высокоширотной Арктической экспедиции и Российской Антарктической экспедиции за помощь в подготовке и проведении исследований.

Литература

1. Д.А. Сормакон, Д.Д. Розов, Л.Н. Макарова, А.В. Широков
Свид. регистр. програм. ЭВМ, RU 2015613082, 2015.
2. В.А. Иванов, В.И. Куркин, В.Е. Носов, В.П. Урядов, В.В. Шумаев
Известия вузов. Радиофизика, 2003, **46**(11), 919.
3. Д.Д. Розов
В Мат. конф. «Излучение и рассеяние электромагнитных волн (ИРЭМВ)» (РФ, Дивноморское, 24–28 июня, 2019), РФ, 2019, с. 84–87.
4. N. Zolotukhina, N. Polekh, V. Kurkin, D. Rogov, E. Romanova, M. Chelpanov
J. Geophys. Res.: Space Physics, 2017, **122**, 2484.
DOI: 10.1002/2016JA023180.
5. Д.В. Благовещенский, Д.Д. Розов
Геоматематизм и Аэронавтика, 2011, **51**(4), 540.
6. N.Y. Zaalov, E.V. Moskaleva, D.D. Rogov, N.N. Zernov
Adv. Sp. Res., 2015, **56**(11), 2527.
DOI: 10.1016/j.asr.2015.09.008.
7. D.V. Blagoveshchensky, O.A. Maltseva, M.M. Anishin, D.D. Rogov, M.A. Sergeeva
Adv. Sp. Res., 2016, **57**(3), 821. DOI: 10.1016/j.asr.2015.11.029.
8. O. Troshichev, A. Janzhura, P. Stauning
J. Geophys. Res.: Space Physics, 2006, **111**, A05208.
DOI: 10.1029/2005JA011402.
9. O. Troshichev, A. Janzhura
Space Weather Monitoring by Ground-Based Means: PC Index, FRG, Berlin, Heidelberg, Springer Verlag, 2012, 288 pp.
DOI: 10.1007/978-3-642-16803-1.
10. O.A. Troshichev
Polar Cap Magnetic Activity (PC-Index) and Space Weather Monitoring, France, Editions Universitaires Europeennes, 2017, 148 pp.
11. O.A. Troshichev, D.A. Sormakov
Earth Planets Space, 2015, **67**, 170.
DOI: 10.1186/s40623-015-0338-4.
12. O.A. Troshichev, D. A. Sormakov
J. Atmos. Solar-Terr. Phys., 2018, **180**, 60.
DOI: 10.1016/j.jastp.2017.10.012.
13. O.A. Troshichev, N.A. Podorozhkina, D.A. Sormakov, A.S. Janzhura
J. Geophys. Res.: Space Physics, 2014, **119**, 6521.
DOI: 10.1002/2014JA019940.
14. O.A. Troshichev, D.A. Sormakov
J. Atmos. Solar-Terr. Phys., 2019, **196**, 105147.
DOI: 10.1016/j.jastp.2019.105147.
15. V.B. Ovodenko, M.V. Klimenko, I.E. Zakharenkova, A.V. Oinats, D.S. Kotova, A.V. Nikolaev, D.D. Rogov, I.V. Tyutin, P.A. Budnikov, J.C. Coxon, B.J. Anderson
Space Weather, 2020, **18**, e2019SW002378.
DOI: 10.1029/2019SW002378.
16. M.T. Rietveld, A. Senior, J. Markkanen, A. Westman
Radio Sci., 2016, **51**(9), 1533. DOI: 10.1002/2016RS006093.
17. N.F. Blagoveshchenskaya, V.A. Kornienko, M.T. Rietveld, B. Thidé, A. Brekke, I.V. Moskvina, S. Nozdrachev
Geophys. Res. Lett., 1998, **25**, 873.
DOI: 10.1029/98GL00492.
18. N.F. Blagoveshchenskaya, T.D. Borisova, V.A. Kornienko, T.B. Leyser, M. Rietveld, B. Thidé
Adv. Space Res., 2006, **382**, 503.
DOI: 10.1016/j.asr.2004.12.008.
19. M.T. Rietveld, M.J. Kosch, N.F. Blagoveshchenskaya, V.A. Kornienko, T.B. Leyser, T.K. Yeoman
J. Geophys. Res.: Space Physics, 2003, **108**, 1141.
DOI: 10.1029/2002JA009543.
20. N.F. Blagoveshchenskaya, H.C. Carlson, V.A. Kornienko, T.D. Borisova, M.T. Rietveld, T.K. Yeoman, A. Brekke
Ann. Geophys., 2009, **27**, 131. DOI: 10.5194/angeo-27-131-2009.
21. Т.Д. Борисова, Н.Ф. Благовещенская, А.С. Калишин, М.Т. Риевельд, Т.К. Йоман, И. Хагстром
Известия высших учебных заведений. Радиофизика, 2015, **58**(8), 623.
22. N.F. Blagoveshchenskaya, T.D. Borisova, T.K. Yeoman, I. Häggström, A.S. Kalishin
J. Atmos. Solar-Terr. Phys., 2015, **135**, 50.
DOI: 10.1016/j.jastp.2015.10.009.
23. H.C. Carlson, V.B. Wickwar, G.P. Mantas
J. Atmos. Solar-Terr. Phys., 1982, **44**, 1089.
DOI: 10.1016/0021-9169(82)90020-4.
24. N.F. Blagoveshchenskaya, T.D. Borisova, M. Kosch, T. Sergienko, U. Brändström, T.K. Yeoman, I. Häggström
J. Geophys. Res.: Space Physics, 2014, **119**, 104083.
DOI: 10.1002/2014JA020658.
25. A.D. Yellu, W.A. Scales, A. Mahmoudian, P.A. Bernhardt, C.L. Siefring, M.J. McCarrick
Geophys. Res. Lett., 2018, **45**, 8690. DOI: 10.1029/2018GL078924.
26. S.M. Mansurov, L.G. Mansurova, G.S. Mansurov, V.V. Mikhnevich, A.M. Visotsky
J. Atmos. Terr. Phys., 1974, **36**, 1957.
DOI: 10.1016/0021-9169(74)90182-2.
27. G.B. Burns, B.A. Tinsley, A.V. Frank-Kamenetsky, E.A. Bering
J. Geophys. Res.: Space Physics, 2007, **112**, D04103.
DOI: 10.1029/2006JD007246.
28. B.A. Tinsley, G.B. Burns, L. Zhou
J. Adv. Space Res., 2007, **40**, 1126. DOI: 10.1016/j.asr.2007.01.07.
29. A.V. Frank-Kamenetsky, O.A. Troshichev, G.B. Burns, V.O. Papitashvili
J. Geophys. Res.: Space Physics, 2001, **106**, 179.
DOI: 10.1029/2000JA900058.
30. R.C. Corney, G.B. Burns, K. Michael, A.V. Frank-Kamenetsky, O.A. Troshichev, E.A. Bering, V.O. Papitashvili, A.M. Breed, M.L. Duldig
J. Atmos. Solar-Terr. Phys., 2003, **65**, 345.
DOI: 10.1016/S1364-6826(02)00225-0.
31. G.B. Burns, B.A. Tinsley, A.V. Frank-Kamenetsky, O.A. Troshichev, W.J.R. French, A.R. Klekociuk
J. Atmos. Sci., 2012, **69**(6), 2061. DOI: 10.1175/JAS-D-11-0212.1.
32. G.B. Burns, A.V. Frank-Kamenetsky, B.A. Tinsley, W.J.R. French, P. Grigioni, G. Camporeale, E.A. Bering
Am. Meteorol. Soc., 2017, **74**(3), 783.
DOI: 10.1175/JAS-D-16-0159.1.
33. O.A. Troshichev, I.P. Gabis
J. Atmos. Solar-Terr. Phys., 2005, **67**, 93.
DOI: 10.1016/j.jastp.2004.07.020.
34. I.P. Gabis
J. Atmos. Solar-Terr. Phys., 2018, **179**, 316.
DOI: 10.1016/j.jastp.2018.08.012.
35. I.P. Gabis
J. Atmos. Solar-Terr. Phys., 2020, **207**, 105353.
DOI: 10.1016/j.jastp.2020.105353.

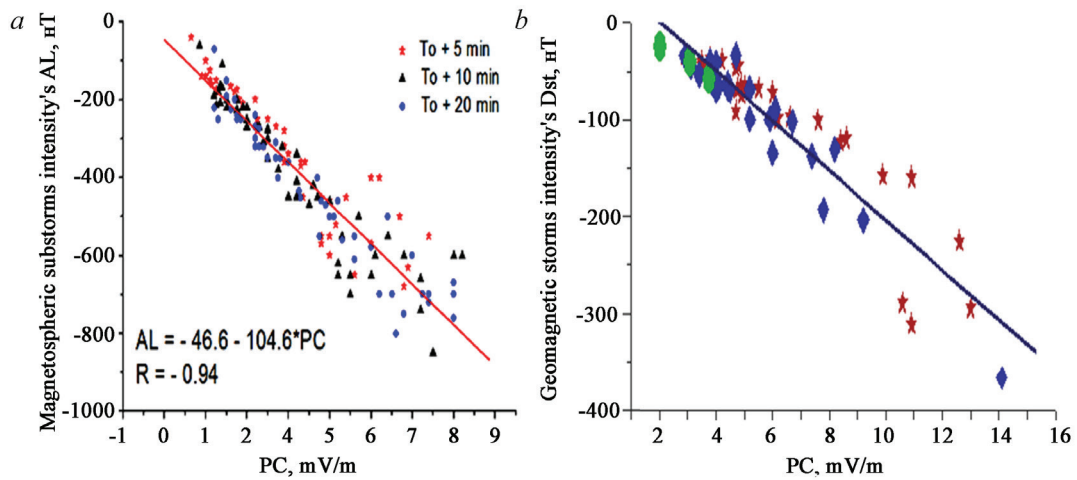


Fig. 2. Intensity of magnetic substorms (a) and storms (b) depending on the PC-index magnitude.

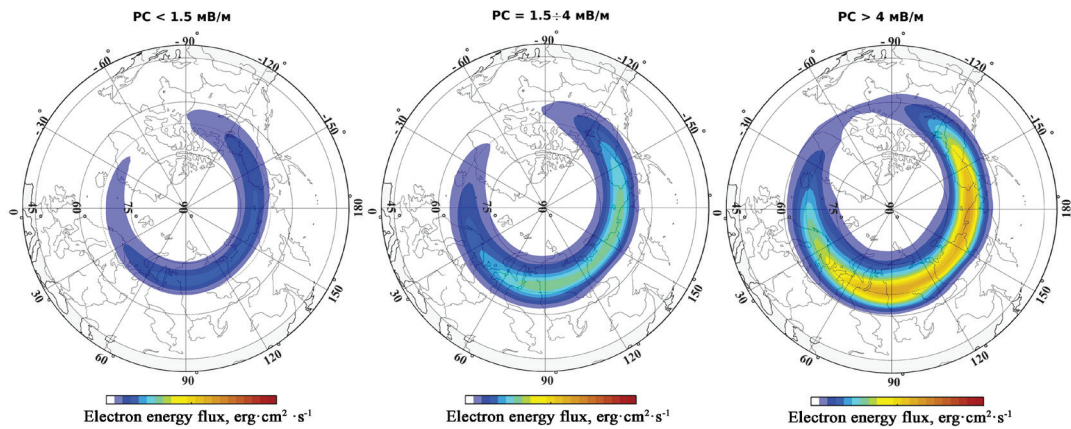


Fig. 3. Spatio-temporal distribution of auroral precipitation energy flux depending on the PC-index.

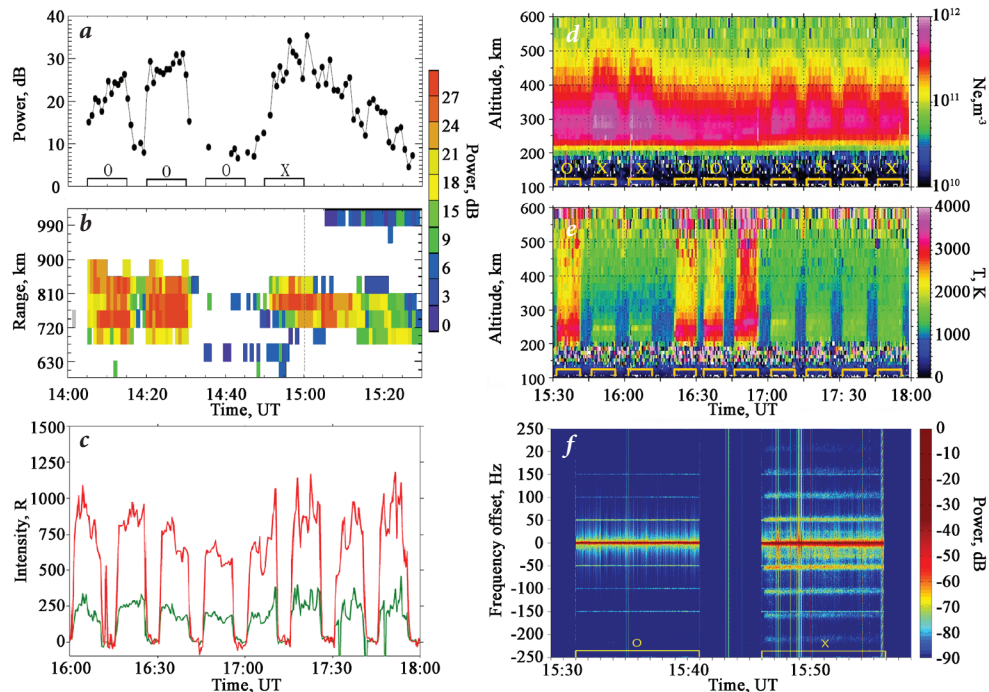


Fig. 4. Phenomena in the polar ionosphere induced by powerful HF radiowaves from EISCAT/Heating facility taken by multi-instrument observations. Heater-on cycles and polarization of HF pump wave are shown on the time axis. a, b – backscatter power from small-scale artificial field-aligned irregularities (AFAIs) observed by the coherent HF radar CUTLASS (SuperDARN) for beam 5 on 5 November 2009; c – intensity of HF-induced optical emissions in red (630 nm) and green (557.7 nm) lines of atomic oxygen observed by DASI-2 camera at EISCAT site in Tromsø on 22 October 2013; d, e – altitude-temporal distribution of the electron density and temperature from the EISCAT UHF radar observations at Tromsø on 3 November 2013; f – spectrogram of the heater signals from the EISCAT/Heating facility recorded near St. Petersburg on 25 February 2013.

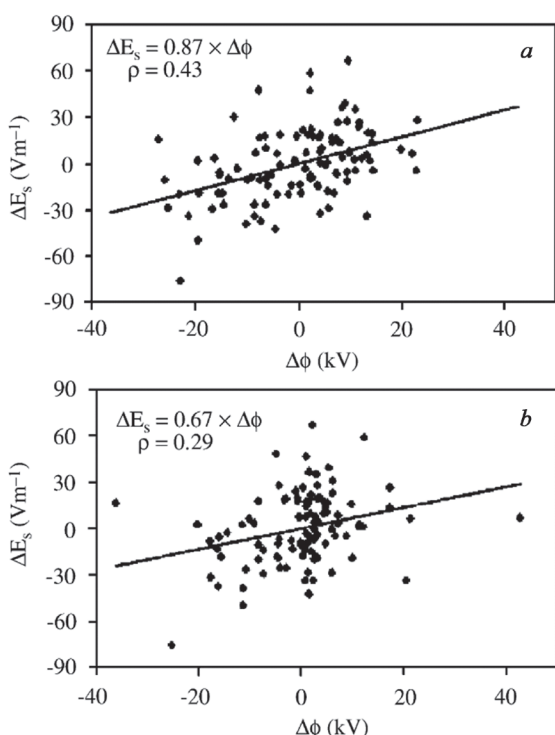


Fig. 5. Atmospheric electric field (ΔE_s) variations at Vostok station depending on ionospheric potential ($\Delta\Phi$) value above the observation point calculated using the Weimar (a) and IZMEM (b) models.

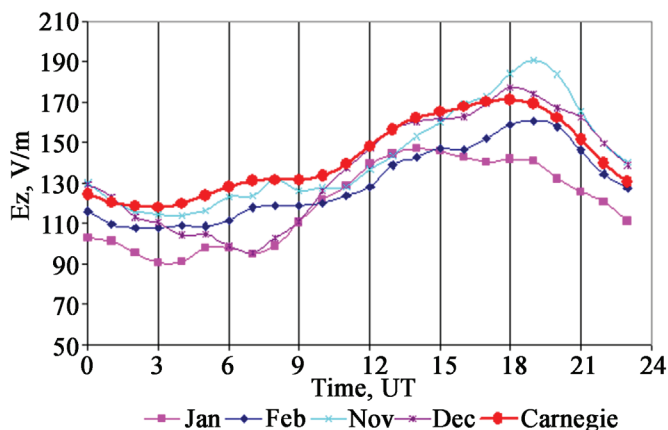


Fig. 6. The diurnal variation of the electric field at Vostok station for the summer (January, February, November, December) months of 2010.

Table 1. Antarctic ozone holes in 2014–2019

Years	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Map of the total ozone over the Antarctic, October 28 th						
Minimum total ozone (DU*)	128.6	117.2	123.2	141.8	111.8	167.0
Ozone hole area (million km ²)	20.9	25.6	17.4	22.9	22.9	9.3

* DU – The Dobson unit; it is defined as the thickness (in units of 10 μm) of that layer of pure gas which would be formed by the total column amount at standard conditions for temperature and pressure.

References

1. D.A. Sormakov, D.D. Rogov, L.N. Makarova, A.V. Shirochkov *Registr. Cert. Comp. Progr.*, RU 2015613082, 2015 (in Russian).
2. V.A. Ivanov, V.I. Kurkin, V.E. Nosov, V.P. Uryadov, V.V. Shumaev *Radiophysics and Quantum Electronics*, 2003, **46**(11), 919.
3. D.D. Rogov *In Proc. Conf. "2019 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW)" (RF, Divnomorskoe, 24–28 June, 2019), IEEE Publ.*, RF, 2019, p. 84–87.
4. N. Zolotukhina, N. Polekh, V. Kurkin, D. Rogov, E. Romanova, M. Chelpanov *J. Geophys. Res.: Space Physics*, 2017, **122**, 2484. DOI: 10.1002/2016JA023180.
5. D.V. Blagoveshchenskiy, D.D. Rogov *Geomagnetism and Aeronomy*, 2011, **51**(4), 540.
6. N.Y. Zaalov, E.V. Moskaleva, D.D. Rogov, N.N. Zernov *Adv. Sp. Res.*, 2015, **56**(11), 2527. DOI: 10.1016/j.asr.2015.09.008.
7. D.V. Blagoveshchenskiy, O.A. Maltseva, M.M. Anishin, D.D. Rogov, M.A. Sergeeva *Adv. Sp. Res.*, 2016, **57**(3), 821. DOI: 10.1016/j.asr.2015.11.029.
8. O. Troshichev, A. Janzhura, P. Stauning *J. Geophys. Res.: Space Physics*, 2006, **111**, A05208. DOI: 10.1029/2005JA011402.
9. O. Troshichev, A. Janzhura *Space Weather Monitoring by Ground-Based Means: PC Index*,

- FRG, Berlin, Heidelberg, Springer Verlag, 2012, 288 pp.
DOI: 10.1007/978-3-642-16803-1.
10. **O.A. Troshichev**
Polar Cap Magnetic Activity (PC-Index) and Space Weather Monitoring, France, Editions Universitaires Europeennes, 2017, 148 pp.
 11. **O.A. Troshichev, D.A. Sormakov**
Earth Planets Space, 2015, **67**, 170.
DOI: 10.1186/s40623-015-0338-4.
 12. **O.A. Troshichev, D.A. Sormakov**
J. Atmos. Solar-Terr. Phys., 2018, **180**, 60.
DOI: 10.1016/j.jastp.2017.10.012.
 13. **O.A. Troshichev, N.A. Podorozhkina, D.A. Sormakov, A.S. Janzhura**
J. Geophys. Res.: Space Physics, 2014, **119**, 6521.
DOI: 10.1002/2014JA019940.
 14. **O.A. Troshichev, D.A. Sormakov**
J. Atmos. Solar-Terr. Phys., 2019, **196**, 105147.
DOI: 10.1016/j.jastp.2019.105147.
 15. **V.B. Ovodenko, M.V. Klimenko, I.E. Zakharenkova, A.V. Oinats, D.S. Kotova, A.V. Nikolaev, D.D. Rogov, I.V. Tyutin, P.A. Budnikov, J.C. Coxon, B.J. Anderson**
Space Weather, 2020, **18**, e2019SW002378.
DOI: 10.1029/2019SW002378.
 16. **M.T. Rietveld, A. Senior, J. Markkanen, A. Westman**
Radio Sci., 2016, **51**(9), 1533. DOI: 10.1002/2016RS006093.
 17. **N.F. Blagoveshchenskaya, V.A. Kornienko, M.T. Rietveld, B. Thidé, A. Brekke, I.V. Moskvina, S. Nozdrachev**
Geophys. Res. Lett., 1998, **25**, 873. DOI: 10.1029/98GL00492.
 18. **N.F. Blagoveshchenskaya, T.D. Borisova, V.A. Kornienko, T.B. Leyser, M. Rietveld, B. Thidé**
Adv. Space Res., 2006, **382**, 503. DOI: 10.1016/j.asr.2004.12.008.
 19. **M.T. Rietveld, M.J. Kosch, N.F. Blagoveshchenskaya, V.A. Kornienko, T.B. Leyser, T.K. Yeoman**
J. Geophys. Res.: Space Physics, 2003, **108**, 1141.
DOI: 10.1029/2002JA009543.
 20. **N.F. Blagoveshchenskaya, H.C. Carlson, V.A. Kornienko, T.D. Borisova, M.T. Rietveld, T.K. Yeoman, A. Brekke**
Ann. Geophys., 2009, **27**, 131. DOI: 10.5194/angeo-27-131-2009.
 21. **T.D. Borisova, N.F. Blagoveshchenskaya, A.S. Kalishin, M.T. Rietveld, T.K. Yeoman, I. Häggström**
Radiophysics and Quantum Electronics, 2016, **58**(8), 561.
DOI: 10.1007/s11141-016-9629-2.
 22. **N.F. Blagoveshchenskaya, T.D. Borisova, T.K. Yeoman, I. Häggström, A.S. Kalishin**
J. Atmos. Solar-Terr. Phys., 2015, **135**, 50.
DOI: 10.1016/j.jastp.2015.10.009.
 23. **H.C. Carlson, V.B. Wickwar, G.P. Mantas**
J. Atmos. Solar-Terr. Phys., 1982, **44**, 1089.
DOI: 10.1016/0021-9169(82)90020-4.
 24. **N.F. Blagoveshchenskaya, T.D. Borisova, M. Kosch, T. Sergienko, U. Brändström, T.K. Yeoman, I. Häggström**
J. Geophys. Res.: Space Physics, 2014, **119**, 104083.
DOI: 10.1002/2014JA020658.
 25. **A.D. Yellu, W.A. Scales, A. Mahmoudian, P.A. Bernhardt, C.L. Siefring, M.J. McCarrick**
Geophys. Res. Lett., 2018, **45**, 8690.
DOI: 10.1029/2018GL078924.
 26. **S.M. Mansurov, L.G. Mansurova, G.S. Mansurov, V.V. Mikhnevich, A.M. Visotsky**
J. Atmos. Terr. Phys., 1974, **36**, 1957.
DOI: 10.1016/0021-9169(74)90182-2.
 27. **G.B. Burns, B.A. Tinsley, A.V. Frank-Kamenetsky, E.A. Bering**
J. Geophys. Res.: Space Physics, 2007, **112**, D04103.
DOI: 10.1029/2006JD007246.
 28. **B.A. Tinsley, G.B. Burns, L. Zhou**
J. Adv. Space Res., 2007, **40**, 1126.
DOI: 10.1016/j.asr.2007.01.07.
 29. **A.V. Frank-Kamenetsky, O.A. Troshichev, G.B. Burns, V.O. Papitashvili**
J. Geophys. Res.: Space Physics, 2001, **106**, 179.
DOI: 10.1029/2000JA900058.
 30. **R.C. Corney, G.B. Burns, K. Michael, A.V. Frank-Kamenetsky, O.A. Troshichev, E.A. Bering, V.O. Papitashvili, A.M. Breed, M.L. Duldig**
J. Atmos. Solar-Terr. Phys., 2003, **65**, 345.
DOI: 10.1016/S1364-6826(02)00225-0.
 31. **G.B. Burns, B.A. Tinsley, A.V. Frank-Kamenetsky, O.A. Troshichev, W.J.R. French, A.R. Klekociuk**
J. Atmos. Sci., 2012, **69**(6), 2061.
DOI: 10.1175/JAS-D-11-0212.1.
 32. **G.B. Burns, A.V. Frank-Kamenetsky, B.A. Tinsley, W.J.R. French, P. Grigioni, G. Camporeale, E.A. Bering**
Am. Meteorol. Soc., 2017, **74**(3), 783.
DOI: 10.1175/JAS-D-16-0159.1.
 33. **O.A. Troshichev, I.P. Gabis**
J. Atmos. Solar-Terr. Phys., 2005, **67**, 93.
DOI: 10.1016/j.jastp.2004.07.020.
 34. **I.P. Gabis**
J. Atmos. Solar-Terr. Phys., 2018, **179**, 316.
DOI: 10.1016/j.jastp.2018.08.012.
 35. **I.P. Gabis**
J. Atmos. Solar-Terr. Phys., 2020, **207**, 105353.
DOI: 10.1016/j.jastp.2020.105353.

Шестьдесят лет исследований в Центральной Антарктиде*

В.М. Котляков

Антарктическая станция Восток, основанная в 1958 г., находится над крупнейшим подледниковым озером Антарктиды – озером Восток. Существование его было теоретически предсказано в начале 1960-х годов полярным исследователем И.А. Зотиковым. В 1970-х годах было начато бурение скважины, вскрывшей толщу льда, сложенной атмосферными осадками за 420 тыс. лет. Усилиями России, Франции и США выполнены комплексные исследования ледяного керна и получена уникальная информация об изменениях климата Земли на протяжении этого времени. Выяснилось, что климат испытывал постоянные колебания, амплитуда которых не выходила за пределы стабильных границ климатической изменчивости.

Происходящее сейчас потепление вызывает увеличение влажности воздуха и возрастание количества осадков, что увеличивает питание ледникового покрова в Центральной Антарктиде. Ныне в Южнополярной области одновременно идут три процесса: некоторое накопление массы в Центральной Антарктиде, понижение поверхности в прибрежных частях материка, резкое отступление и разрушение края ледника в Западной Антарктиде и на Антарктическом полуострове. Таким образом, сделанное в 1961 г. заключение автора, что состояние Антарктического ледникового покрова близко к равновесному, подтверждается и в современную эпоху глобального потепления на Земле.

Ключевые слова: станция Восток, Центральная Антарктида, подледное таяние, подледниковое озеро, бурение льда, современное потепление.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты №№ 13-05-41195 и 15-05-00510).

Главные особенности Антарктического материка

Одной из главных задач российской кругосветной экспедиции под руководством Ф.Ф. Беллинсгаузена и М.П. Лазарева была попытка пройти как можно дальше к Южному полюсу и увидеть, наконец, южнополярный материк, о котором уже в XVIII веке уверенно писал М.В. Ломоносов: «В близости Магелланского пролива и против мыса Добрыя Надежды, около 53 градусов полуденной широты, великие льды ходят, почему сомневаться не должно, что в большем отдалении острова и матерая земля многими и несходящими снегами покрыты и что большая обширность земной поверхности около южного полюса занята оными, чем на севере».

Успех экспедиции Беллинсгаузена – Лазарева превзошел все ожидания: русские моряки убедились в существовании предполагавшейся ранее «Южной неведомой земли» и доказали всему миру возможность далекого плавания парусников в антарктических морях. Лишь к концу XIX в. стали проявляться масштабы Антарктического материка, а в начале XX в. О. Норденшельд подверг сомнению целостность материка и предложил разделить его на Западную и Восточную Антарктиду. По современным данным, средняя высота материка составляет 2350 м, тогда как средняя высота всей суши Земли (без Антарктиды) – около 900 м. Таким образом, Антарктида – самый высокий материк, и причина заключается в том, что большая часть массы материка сложена льдом, который почти вдвое легче каменных пород.

Плоская поверхность центральной части Восточной Антарктиды лежит на высоте около 3500 м над



КОТЛЯКОВ
Владимир Михайлович
академик, профессор,
научный руководитель Института географии РАН

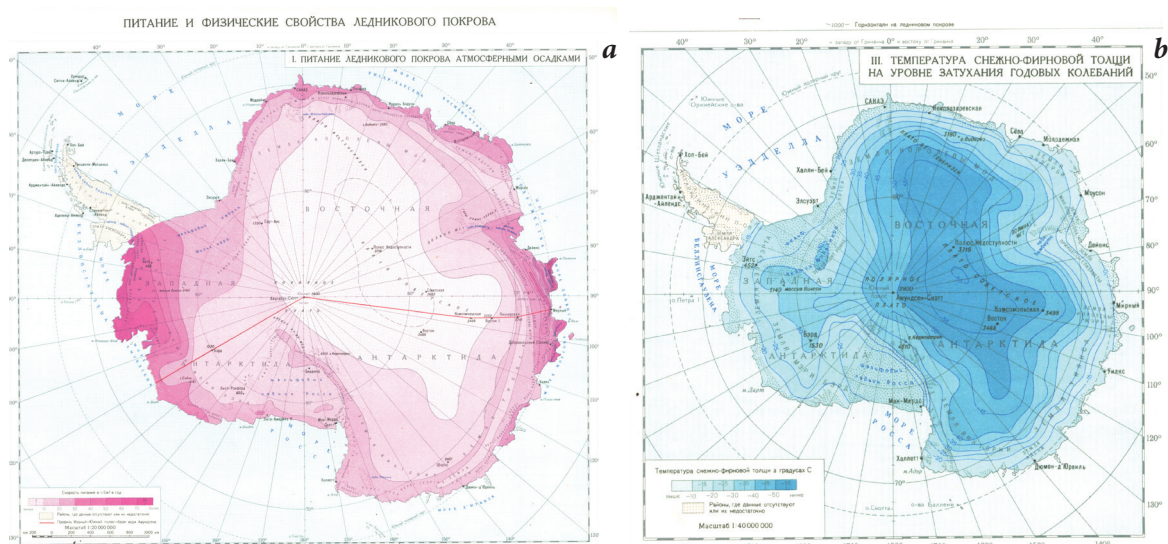


Рис. 1. Две карты из Атласа Антарктики (1966), составленные В.М. Котляковым: а – питание ледникового покрова осадками; б – температуры снежно-фирновой толщи на уровне затухания годовых колебаний.

уровнем моря, здесь господствуют исключительно низкие температуры и очень мало атмосферных осадков. По существу, это холодная пустыня: за год здесь выпадает менее 100 мм осадков, а температуры зимой опускаются ниже -80°C . В качестве иллюстраций приведу две карты, составленные мною для первого советского Атласа Антарктики в начале 1960-х годов (рис. 1а, б).

Исключительно холодный воздух, формирующийся в центральной области Восточной Антарктиды, скатывается вниз по материковому склону в виде стоковых ветров огромной силы: если в центральной части материка ветры, как правило, не превышают 4–5 м/с, то на материковом склоне возникают так называемые стоковые ветры, дующие нередко со скоростью более 30 м/с; наибольшей силы они достигают в 250–280 км от берега моря, где проходит так называемая ось пояса стоковых ветров. Именно здесь возникают снежные заструги высотой до 100–150 см, тогда как в Центральной Антарктиде их высота не превышает 30–40 см.

Организация внутриконтинентальных станций

Широкие исследования Антарктического материка начались через десять лет после завершения Второй мировой войны и были связаны с проведением Международного геофизического года (МГГ, 1957–1959 гг.). Именно в это время несколько стран, и прежде всего Советский Союз, США и Франция, начали беспрецедентные по размаху исследования на шестом континенте. Замечу, что в подготовительный период на одном из первых заседаний Комитета по подготовке к проведению МГГ в Париже в июле 1955 г. советской делегации «повезло».

Как это часто бывало в то время, наша делегация опаздывала на заседание, так как не получила вóвре-

мя въездной французской визы. На заседании в Париже утверждали места будущих национальных станций на Антарктическом континенте, и большинство стран-участниц предпочитали построить станции на берегу материка. Лишь две страны – США и СССР – планировали работы в глубине материка и думали о создании станции на Южном полюсе. Но когда на второй день наша делегация появилась на заседании, выяснилось, что станцию на Южном полюсе, названную Амундсен – Скотт, уже определили Соединенным Штатам Америки. И тогда Советский Союз предложил создать две станции – одну в глубине материка, в районе Южного геомагнитного полюса, а другую в том же секторе Антарктиды на берегу моря. Обе станции были названы по имени шлюпов Первой российской антарктической экспедиции Ф.Ф. Беллинсгаузена и М.П. Лазарева.

Станция Восток была основана в январе 1958 г., во Вторую континентальную антарктическую экспедицию, как раз когда я зимовал в Антарктиде. Начальник экспедиции А.Ф. Трёшников, будущий академик и Президент Русского географического общества, возглавил этот санно-гусеничный поход. В сравнительно короткий срок удалось преодолеть около 1400 км и создать замечательную

базу, работающую почти без пере­рывов вот уже более 60 лет. Всё про­шедшее время эта точка на материке остается Полюсом холода – здесь от­мечена самая низкая температура на земном шаре, $-89.2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

В первые же годы антарктических исследований Советский Союз взялся создать еще одну внутриматери­ковую станцию – в районе Полуса относительной недоступности, то есть в точке Восточной Антарктиды, самой удаленной от морского побере­жья материка. Эта станция, назван­ная Советской, несколько лет служила опорой для санно-тракторных походов, принесших первые сведения о подледном рельефе и природе Цен­тральной Антарктиды [1–2].

Станция Советская активно про­работала два года, а в последующем служила полевой базой при дальних внутриконтинентальных санно-гу­сеничных походах. В первые же годы здесь был установлен бюст В.И. Лени­на, позволивший провести любопыт­ные наблюдения за природой Цен­тральной Антарктиды. На *рис. 2a, b* по соотношению положения бюста и снежной поверхности хорошо вид­но, что на протяжении многих лет постоянное снегоотложение происхо­дит и в самом центре Восточной Ан­тарктиды: установленный некогда на

значительной высоте над поверхностью бюст вождя оказывается всё ближе и ближе к поверхности снега.

Крупнейшее подледниковое озеро

Другая безусловная удача расположения станции Восток заключается в том, что она находится прямо над крупнейшим подледниковым озером Антарктиды [3]. Подобные озера под центральной частью Антар­ктического ледникового покрова были теоретически предсказаны в начале 1960-х годов Игорем Алексееви­чем Зотиковым [4–5]: он научно обосновал, что суще­ствует критическая толщина ледника, при превыше­нии которой на ледниковом ложе начинается таяние льда. Такие условия складываются под значительны­ми пространствами Центральной Антарктиды, где, несмотря на очень низкие средние годовые темпера­туры, у ложа идет непрерывное таяние и под мощным ледниковым покровом возникает слой жидкой воды.

И.А. Зотиков, занимавшийся во второй половине 1950-х гг. теплофизическими расчетами спускаю­щихся к поверхности Земли космических аппаратов, в конце 1958 г. пришел на работу в Институт геогра­фии АН СССР и отправился в Антарктиду, чтобы по­лучить подтверждение своей гипотезы. Здесь он по­знакомился с флаг-штурманом авиаотряда Четвертой советской антарктической экспедиции Радием Влади­мировичем Робинсоном, выпускником кафедры по­лярных стран географического факультета МГУ.

В антарктической экспедиции Робинсон в качестве штурмана регулярно выполнял полеты на самолетах ЛИ-2 и ИЛ-12 между советскими станциями Мирный и Восток и наблюдал загадочные явления: при поле­тах над плато он видел овальные впадины с пологими

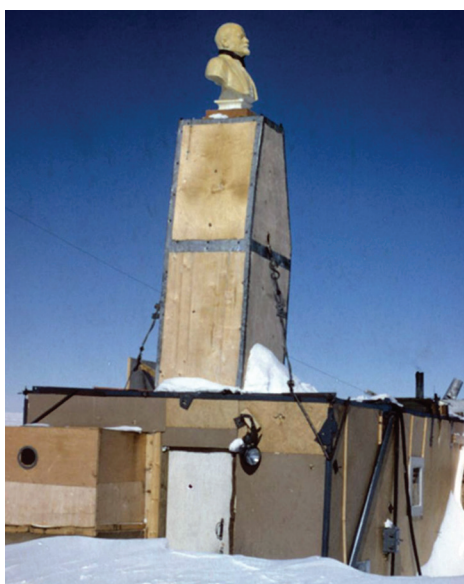


Рис. 2. Бюст В.И. Ленина на станции Советская (Полус относительной недоступности), фотографии сделаны с промежутком более десятилетия.

«берегами» глубиной около 20–30 м и протяженностью 10–12 км. Летчики называли эти своеобразные понижения «озерами».

Таким образом, Р.В. Робинсон при полетах в районе станции Восток обратил внимание на участки, резко отличавшиеся от остальной поверхности, когда самолет пролетал в стороне от них и угол зрения наблюдателя по отношению к поверхности щита был очень мал. Ныне ясно, что штурман видел именно те места, где впоследствии было обнаружено огромное подледниковое озеро. Много лет спустя это озеро увидели даже на космических снимках.

Расчеты Зотикова показали, что на траверзе от Мирного вглубь материка уже в 350 км от берега реальная толщина льда начинает превышать ее критическое значение, поэтому почти во всей Центральной Антарктиде, несмотря на очень низкие средние годовые температуры, у ложа идет непрерывное таяние и под мощным ледниковым покровом могут быть впадины, заполненные жидкой водой.

В 1959 и 1964 гг. при сейсмозондировании в Центральной Антарктиде А.П. Капица [6] получил сейсмограммы в районе станции Восток с двумя отражениями на глубинах 3730 и 4130 м. Тогда верхнее отражение приняли за отражение от подошвы ледника, а нижнее приписали границе ледниковых отложений и коренных пород. Однако позже эти отражения были интерпретированы как отражения от толщи воды, находящейся подо льдом.

Построения И.А. Зотикова основывались на простых законах физики. Температуры воздуха в Центральной Антарктиде чрезвычайно низки, и это приводит к постоянно направленному вниз потоку холода в ледниковой толще. Однако в глубинных слоях ледника проявляется действие постоянного геотермического потока, направленного из недр Земли. При огромной мощности антарктического ледника в недрах его создается колоссальное давление, и в глубоких горизонтах температура может достигнуть точки плавления льда. В свое время П.А. Кропоткин [7] полагал, что в толще больших и холодных сверху ледников температура линейно повышается с глубиной, как и в других горных породах.

Исходя из существования геотермической ступени в ледяной толще, Н.Н. Зубов [8] ввел понятие критической толщины ледника, то есть такой его мощности, при которой благодаря колоссальному давлению температура льда может достигать точки его плавления на горизонтах, расположенных выше поверхности ложа. В своих дальнейших рассуждениях Н.Н. Зубов подчеркнул, что в удаленных от берега местах на ложе Антарктического ледникового покрова может происходить таяние, несмотря на очень низкую температуру поверхности ледника.

В 1961 г. И.А. Зотиков на основе материалов первых четырех советских антарктических экспедиций провел теплофизические расчеты и показал возможность таяния на ложе ледника в центральной части Антарктиды. Появляющаяся от таяния льда вода, очевидно, скапливается в углублениях подледного ложа и формирует подледные резервуары воды. А уже в конце 1960-х гг. было получено экспериментальное подтверждение этой гипотезы. При бурении глубокой скважины на станции Бэрд в Западной Антарктиде буровой снаряд на глубине 2164 м достиг ложа, и в скважину хлынула вода, поднявшаяся почти на 60 м.

В 1970-х гг. в Восточной Антарктиде были организованы работы по Международному антарктическому гляциологическому проекту, в которых принимали участие ученые СССР, США, Франции, Великобритании, Австралии и Японии. В рамках этого проекта Британский полярный институт имени Р. Скотта выполнил большую программу полетов с радиозондированием в Центральной Антарктиде [9]. Плотность полетных галсов с зарегистрированными «специфическими отражениями» от дна ледника в районе станции Восток была столь велика, что было высказано предположение о существовании в центральной части Восточной Антарктиды большого подледникового озера с центром примерно в 150 км к северо-западу от станции Восток. Именно тогда в научный обиход вошел термин «подледниковое озеро». А самое крупное озеро в районе станции Восток было названо иностранными учеными также Восток – по имени расположенной над его южной оконечностью российской внутриматериковой станции.

В последующие годы удалось получить данные со спутника ERS-1, орбита которого позволяла провести радарную съемку Антарктического материка, исключая его околополюсную часть. По данным спутника,

в районе станции Восток обнаружилась крупная и необычная форма рельефа с контурами озера (рис. 3). Позже на основе обработки данных радарной альтиметрии со спутника ERS-1 была построена компьютерная карта поверхности Антарктиды, на которой обозначилось крупнейшее на планете подледниковое озеро.

В 1995–2008 гг. российские ученые путем наземного радиолокационного профилирования и сейсмического зондирования оконтурили границы озера и обнаружили его грандиозные размеры: около 260 км в длину, до 60 км в ширину, площадь поверхности около 15 тыс. км², мощность льда над озером 3 600–4 350 м, глубина озера до 1 200 м [3, 10]. Возможная мощность осадков на дне озера 100–200 м; температура таяния донного льда на границе с водой от –2.4 до –3.15°С; лед в районе озера движется со скоростью до 2 м/год, ледниковый щит над озером находится в состоянии гидростатического равновесия.

В ряду крупнейших пресных озер мира озеро Восток занимает пятое место – после Байкала, Ладожского, Онежского и озера Виктория в Африке.

Бурение глубокой ледниковой скважины

В 1970-х гг. на станции Восток было начато бурение глубокой ледниковой скважины (рис. 4). Техника и технология бурения этой скважины разрабатывались в Ленинградском горном институте, а на первом этапе (пока скважина не достигла глубины 900 м) изотопный анализ керн выполнялся в Москве в изотопной лаборатории Института географии АН СССР [11–12]. В дальнейшем по инициативе В.М. Котлякова и тогдашнего руководителя французских антарктических исследований Клода Лориуса работы по бурению и обработке керн из глубокой скважины выполнялись совместно, а спустя несколько лет к нам присоединились американцы.

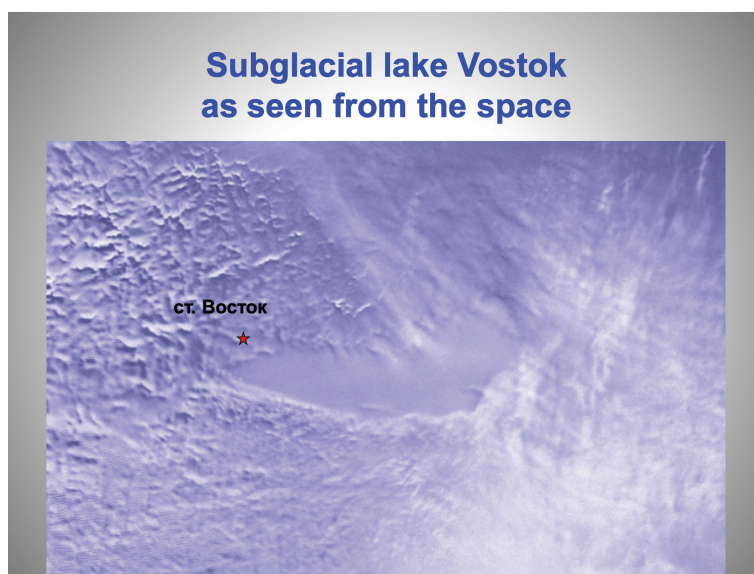


Рис. 3. Подледниковое озеро Восток на космическом снимке.



Рис. 4. Вышка для бурения глубокой скважины на станции Восток.

Все эти годы основные работы по изучению керн из скважины на станции Восток проводились в Арктическом и Антарктическом научно-исследовательском институте в Санкт-Петербурге, где впоследствии была организована специальная лаборатория, ныне занимающая центральное место в этих исследованиях. В мае 1995 г. на специальном семинаре в Кембридже специалисты из России, Великобритании, Франции, США, Германии, Италии и Японии обсуждали проблемы существования подледникового озера в районе станции Восток, задачи сохранения его чистоты на заключительных этапах бурения.

По рекомендации международных организаций бурение было приостановлено на несколько лет; за это время в нашей стране было найдено инженерное решение, позволившее пробурить самые нижние слои льда над озером и проникнуть в само озеро без опасности его загрязнения буровой жидкостью. Ведь по-прежнему стоит задача отобрать и исследовать

пробы озерной воды, провести их всесторонний минералогический, химический и микробиологический анализы (рис. 5а).

Основная толща льда, вскрытая скважиной, имеет атмосферное происхождение, то есть она сложена атмосферными осадками прошлых лет, что служит основой изучения строения и происхождения льда и дает возможность понять на этой основе историю климата Земли. Однако по данным изотопного анализа льда из глубокой ледниковой скважины на станции Восток было установлено, что ниже 3539 м залегает лед, сформировавшийся не в результате уплотнения атмосферного снега, а из замерзшей воды озера. Сопоставление микробиологических и геофизических данных позволило выдвинуть гипотезу о рифтогенном происхождении озерной котловины.

Прошли годы, бурение глубокой скважины продолжалось, и 5 февраля 2012 г. состоялось первое проникновение в озеро (рис. 5б), что было безусловным успехом российской науки и новых технологий бурения льда, разработанных в Горном институте (сейчас Национальный минерально-сырьевой университет «Горный») в Санкт-Петербурге. На глубине 3769.3 м буровой снаряд достиг воды подледного озера. Три независимых датчика в буровом снаряде зарегистрировали касание воды, и снаряд после взятия проб воды был быстро поднят примерно на 50 м. Это предотвратило примерзание снаряда к стенкам скважины, так как озерная вода, находящаяся под большим давлением, моментально поднялась на высоту около 40 м и замерзла.

Исследования ледяного керна и озера Восток

Открытие подледного озера в районе станции Восток – это глобальное географическое открытие XX века. Усилиями трех стран – России, Франции и США – выполнены комплексные исследования ледяного керна из скважины и получена уникальная

информация об изменении климата Земли за последние 420 тыс. лет. Результаты этой работы были опубликованы в десятках совместных статей в международных рецензируемых журналах и многих докладах на международных научных форумах. Главный итог был подведен в статье [13]. Опубликованные работы получили высокую оценку мировой научной общественности, широко используются в отчетах ИРСС и рассматриваются как фундаментальный вклад трех стран в исследование глобальных изменений климата на нашей планете.

Официальное сотрудничество по исследованию ледяного керна со станции Восток ученых ААНИИ и Лаборатории гляциологии и геофизики окружающей среды Национального центра научных исследований Франции началось в 1984 г., а через несколько лет к нему присоединились американцы. Объектом тройственного соглашения 1993–1998 гг. было исследование ледяного керна из скважины 5Г, бурение которой началось в 1990 г. В этот период периодически в трех странах проводились российско-франко-американские совещания Рабочей группы, на которых согласовывались конкретные взаимоотношения участников трехстороннего проекта глубокого бурения на станции Восток:

– обязательства российской стороны по бурению глубокой скважины и передаче одной трети получаемого на станции Восток ледяного керна ка-

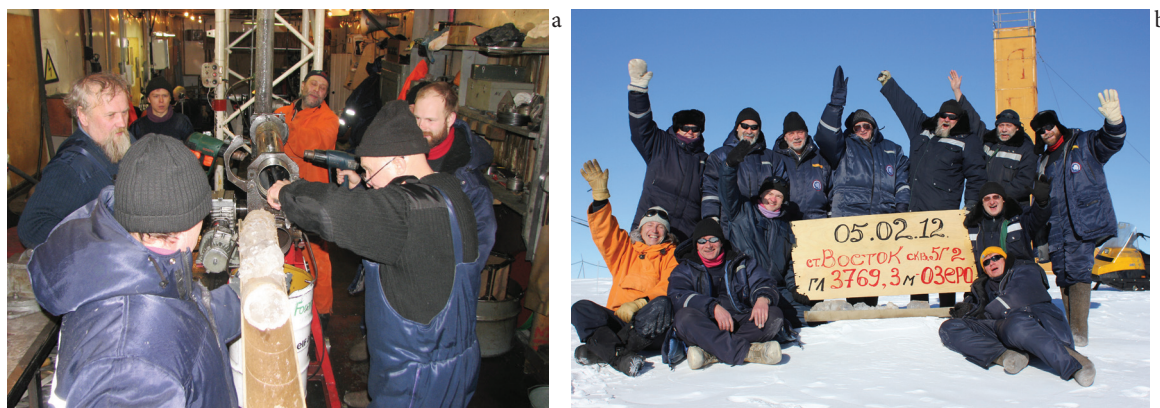


Рис. 5. Завершение бурения глубокой скважины на станции Восток: а – последний керн; б – вся буровая команда в день завершения многолетнего бурения.

ждой из участвующих в проекте стороны;

- обязательства американской стороны по авиационной поддержке полевых работ и смене зимовочного состава станции Восток через американскую базу Мак-Мёрдо;

- обязательства французской стороны по материально-технической поддержке буровых и научно-исследовательских работ российских специалистов на станции Восток;

- совместная публикация научных результатов проекта.

Уже сейчас ясно, что подледниковое озеро Восток уникально по своему строению и свойствам. Озеро, очевидно, перенасыщено кислородом, потому что тающий над ним ледниковый лед содержит пузырьки воздуха, который высвобождается в результате таяния и поступает в озерную воду. А озерный лед, который замерзает медленно, газов в себе не содержит, и поэтому кислород накапливается в озере. Согласно расчетам, в озере Восток может быть растворено до 0.7–1.3 грамма кислорода на литр воды, и известные сейчас бактерии не могут существовать в таких условиях.

Кроме того, давление в озере может достигать 400 атмосфер, здесь почти нет органических веществ, а в озеро не проникает свет, то есть невозможен фотосинтез. Поэтому организмы здесь могут существовать только за счет хемосинтеза. Жизнь в озере возможна также на дне, в осадочных породах, где кислорода нет, так как он расходуется на процессы окисления в минеральном субстрате. Кроме того, на дне озера могут быть горячие источники, создающую среду для органической жизни [14].

Таким образом, в связи с проникновением в озеро перед учеными открываются новые горизонты. Впереди нас, безусловно, ждут важные открытия, так как любой результат из возможных двух – в озере есть органическая жизнь, или, наоборот, она отсутствует – станет результатом глобального значения. Ведь до сих пор на

Земле нет ни одного места, где бы не присутствовала органическая жизнь.

Подледное озеро, скорее всего, изолировано от внешнего мира в течение нескольких миллионов лет. Расчеты показывают, что термические условия в разных частях озера неодинаковы, и это вызывает внутренние течения и активный энергообмен. Изо льда, тающего на верхней кровле озера, в воду постоянно поступает воздух, попавший в лед из атмосферы сотни тысяч и миллионы лет назад. В этих условиях в озере может обитать микрофауна и микрофлора, что представляет исключительный научный интерес.

Весь комплекс данных по ледяному керну из скважины на станции Восток свидетельствует о том, что на протяжении последних 420 тыс. лет климат испытывал постоянные колебания, амплитуда которых не выходила за пределы стабильных границ климатической изменчивости. Концентрация парниковых газов и глобальная температура в прошлом изменялись параллельно, но содержание газов резко возросло за последние 100 лет, тогда как изменения температуры не выходят за рамки ее естественных флуктуаций. Этот результат следует признать фундаментальным, свидетельствующим о безусловной связи этих двух явлений, имеющих разную природу. Наконец, голоцен, продолжающийся уже около 11 тыс. лет, оказывается намного длиннее предыдущих трех межледниковых периодов и, по многим признакам, в ближайшем геологическом будущем сменится новой ледниковой эпохой. Важно также отметить, что уровень климатического оптимума голоцена на 1.5 °С ниже максимальной температуры предыдущего межледниковья, когда, естественно, никакого антропогенного влияния на Земле не было.

Современное состояние Антарктического ледникового покрова

Мои первые оценки современного баланса массы Антарктического ледникового покрова были сделаны в 1960 г. и свидетельствовали о росте массы льда в Антарктиде. Такой вывод не противоречил сведениям об отступании ледника в некоторых береговых районах, так как из-за огромных размеров и значительной инерции избыток накопления снега во внутренних частях ледникового щита отражается на состоянии его края очень и очень не скоро.

Происходящее сейчас потепление вызывает увеличение влажности воздуха и возрастание количества выпадающих осадков. В Антарктике в результате усиления меридионального обмена воздушных масс на материк поступает относительно более теплый и более влажный воздух, что приводит к обильным снегопадам. Таким образом, вместе с глобальным потепле-

нием происходит усиление атмосферной циркуляции в Антарктике, увеличивается питание ледникового покрова, и это в конечном счете может давать положительный баланс массы и вести к росту оледенения Антарктиды.

Наблюдения последних лет свидетельствуют о том, что в Южнополярной области сейчас одновременно идут три процесса: некоторое накопление массы в Центральной Антарктиде; понижение поверхности в прибрежных частях материка; резкое отступление и разрушение края ледника в Западной Антарктиде и на Антарктическом полуострове. Возможно, в этом проявляется разная реакция на нынешнее потепление климата: одновременно усиливается таяние и увеличивается количество атмосферных осадков. Ведь и то, и другое – следствие повышения влажности более теплого воздуха.

На протяжении длительного периода противоположно направленные процессы уравниваются. Но краевые части ледникового покрова Антарктиды весьма чутко реагируют на изменение климата планеты, а сам ледниковый щит Восточной Антарктиды в конце XX века, по-видимому, всё еще оставался в относительно стабильном состоянии.

Этому есть подтверждения и в современных публикациях. Так, в газете *The New York Times* от 30 апре-

ля 2020 г. опубликована статья со ссылкой на недавнюю публикацию в журнале *Science*, где приводятся результаты наблюдений с американских спутников ICESat-1 в 2003–2009 гг. и ICESat-2 с 2018 г., показавших существенное таяние и разрушение шельфовых ледников, а также сокращение материковых льдов в Западной Антарктиде и на Антарктическом полуострове, и в то же время увеличение выпадающих осадков и прирост ледникового покрова в Восточной Антарктиде. Это значит, что заключение, высказанное мною [15] по итогам Международного геофизического года (1957–1958 гг.) о состоянии Антарктического ледникового покрова, близком к его равновесию, подтверждается и в современную эпоху глобального потепления на Земле.

Благодарности

Исследования выполнялись в рамках проектов РФФИ №№ 13–05–41195, 15–05–00510.

Литература

1. А.П. Капица, О.Г. Сорохтин
Информ. бюлл. Советской антаркт. экспедиции, 1965, №51, 19.
2. I. Gan, D. Drewry, I. Allison, V.M. Kotlyakov
Adv. Polar Sci., 2016, 27 (2), 65. DOI: 10.13679/j.advps.2016.2.00065.
3. С.В. Попов, В.Н. Масолов, В.В. Лукин
Лёд и Снег, 2011, №1(113), 25.
4. И.А. Зотиков
Антарктика. Доклады Комиссии (1961 г.), 1962, 2, 27.
5. I.A. Zotikov
Intern. Assoc. Scient. Hydrology. Bulletin, 1963, 8(1), 36.
DOI: 10.1080/02626666309493295.
6. А.П. Капица
Подледный рельеф Антарктиды, СССР, Москва, Наука, 1968, 98 с.
7. П.А. Кропоткин
Исследования о ледниковом периоде. Вып. 1: О ледниковых наносах в Финляндии; Об основаниях гипотезы ледникового периода, Сер.: Зап. Русского геогр. об-ва по общей географии, т. 7, Российская империя, С.-Петербург, Типография М. Стасюлевича, 1876, 717 с.
8. Н.Н. Зубов
Метеорология и гидрология, 1959, №2, 22.
9. G. De Q. Robin, D.J. Drewry, D.T. Meldrum
Phil. Trans. Royal Soc. of London. Ser. B., 1977, 279(963), 185.
DOI: 10.1098/rstb.1977.0081.
10. С.В. Попов, Ю.Б. Черноглазов
Лёд и Снег, 2011, №1(113), 13.
11. Н.И. Барков, Ф.Г. Гордиенко, Е.С. Короткевич, В.М. Котляков
Доклады Академии наук СССР 1974, 214(6), 1382.
12. Н.И. Барков, Ф.Г. Гордиенко, Е.С. Короткевич, В.М. Котляков
Доклады Академии наук СССР 1976, 230(3), 656.
13. J.R. Petit, J. Jouzel, D. Raynaud, N.I. Barkov, J.-M. Barnola, I. Basile, M. Bender, J. Chappellaz, M. Davis, G. Delaygue, M. Delmotte, V.M. Kotlyakov, M. Legrand, V.Y. Lipenkov, C. Lorius, L. Pépin, C. Ritz, E. Saltzman, M. Stievenard
Nature, 1999, 399(6735), 429.
DOI: 10.1038/20859.
14. S.A. Bulat, I.A. Alekhina, M. Blot, J.-R. Petit, M. de Angelis, D. Wagenbach, V.Ya. Lipenkov, L.P. Vasilyeva, D.M. Wloch, D. Raynaud, V.V. Lukin
Intern. Journ. Astrobiology, 2004, 3(1), 1.
DOI: 10.1017/S1473550404001879.
15. В.М. Котляков
Снежный покров Антарктиды и его роль в современном оледенении материка, СССР, Москва, Изд. АН СССР, 1961, 246 с.

English

Sixty Years of Research in Central Antarctica*

Vladimir M. Kotlyakov

Academician, Professor,

Science Director of Institute of Geography, RAS

29 Staromonetny Lane, Moscow, 119017, Russia

vladkot4@gmail.com

Abstract

The Vostok station, founded in January 1958, is located above the largest subglacial lake in Antarctica, Lake Vostok. Its existence was theoretically predicted in the early 1960s by polar explorer I.A. Zotikov. In the 1970s, drilling of a deep borehole was started here, revealing the thickness of deposited ice formed by atmospheric precipitation for over 420 thousand years. Russia, France, and the United States have made comprehensive studies of the ice core from the borehole and obtained unique information about changes in the Earth's climate. It was found that for the period the climate have experienced constant fluctuations, the amplitude of which did not go beyond the stable boundaries of climate variability.

The current warming causes an increase in humidity and precipitation, which increases the feeding of the ice sheet in Central Antarctica. Now in the South Polar region three processes are simultaneously occurring: some mass accumulation in Central Antarctica, surface lowering in the coastal parts of the continent, and a sharp retreat and destruction of the glacier edge in West Antarctica and on the Antarctic Peninsula. Thus, the author's conclusion given in 1961, that the state of the Antarctic ice sheet is close to equilibrium, is also confirmed in the modern era of global warming on Earth.

Keywords: Vostok station, Central Antarctica, subglacial melting, subglacial lake, deep ice drilling, global warming.

*The work was financially supported by RFBR (projects 13-05-41195 and 15-05-00510).

Images & Tables

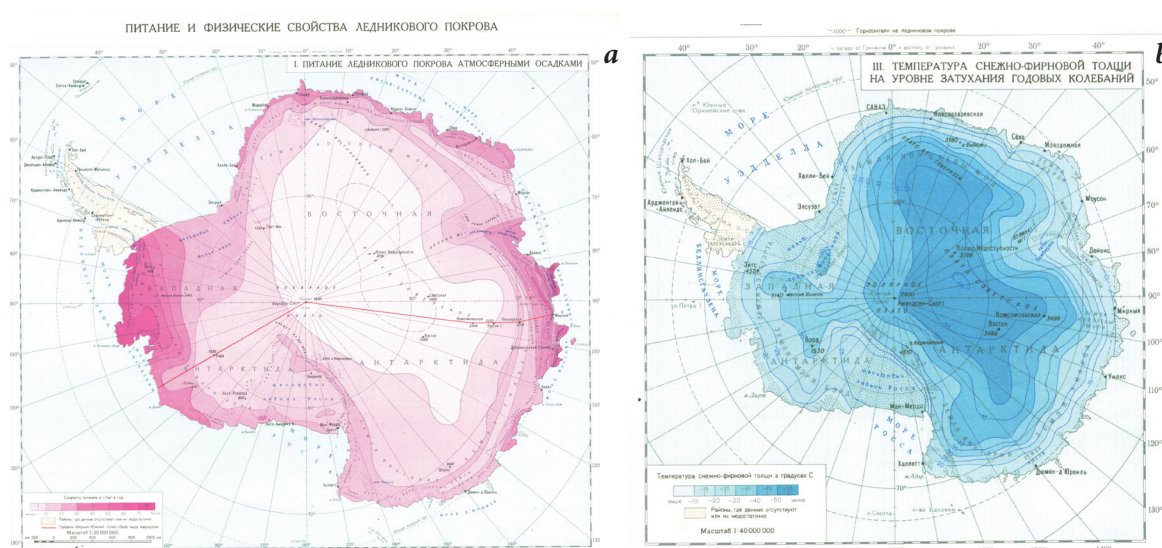


Fig. 1. Two maps, compiled by V.M. Kotlyakov, from the Atlas of the Antarctica (1966): a - feeding of the ice sheet by precipitation; b - temperatures of the snow-firn strata at the level of attenuation of annual fluctuations.



Fig. 2. Bust of Lenin at Sovetskaya polar station (Pole of Inaccessibility), photographs were taken with a gap of more than 10 years.

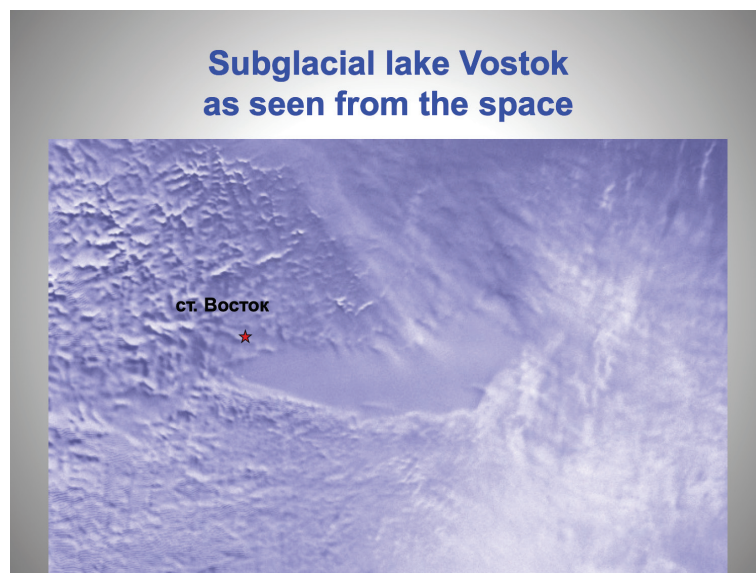


Fig. 3. Subglacial Lake Vostok, view from the space.



Fig. 4. A derrick for drilling a deep borehole at Vostok polar station.



Fig. 5. Completion of drilling of deep borehole at Vostok polar station: a – the last core; b – all the drilling crew on the closing day of drilling.

References

1. **A.P. Kapitsa, O.G. Sorokhtin**
Inform. Bull. Soviet Antarct. Exped., 1965, №51, 19.
2. **I. Gan, D. Drewry, I. Allison, V.M. Kotlyakov**
Adv. Polar Sci., 2016, 27(2), 65.
DOI: 10.13679/j.advps.2016.2.00065.
3. **S.V. Popov, V.N. Masolov, V.V. Lukin**
Ice and Snow, 2011, №1(113), 25.
4. **I.A. Zotikov**
The Antarctica; Commission reports (1961), 1962, 2, 27.
5. **I.A. Zotikov**
Intern. Assoc. Scient. Hydrology. Bulletin, 1963, 8(1), 36.
DOI: 10.1080/02626666309493295.
6. **A.P. Kapitsa**
Subglacial Relief of Antarctica [Podlednyy relief Antarktidy], USSR, Moscow, Nauka Publ., 1968, 98 pp. (in Russian).
7. **P.A. Kropotkin**
Research on the Ice Age. Iss. 1: About Glacial Deposits in Finland; On the Foundations of the Ice Age Hypothesis [Issledovaniya o lednikovom periode. Vyp. 1: O lednikovykh nanosakh v Finlyandii; Ob osnovaniyakh gipotezy lednikovogo perioda], Works of the Russian Geographical Society on General Geography, Vol. 7, Russian Empire, SPb., Stasyulevich Publ., 1876, 717 pp. (in Russian).
8. **N.N. Zubov**
Meteorology and Hydrology, 1959, №2, 22 (in Russian).
9. **G. De Q. Robin, D.J. Drewry, D.T. Meldrum**
Phil. Trans. Royal Soc. of London. Ser. B., 1977, 279(963), 185.
DOI: 10.1098/rstb.1977.0081.
10. **S.V. Popov, Yu.B. Chernoglazov**
Ice and Snow, 2011, №1(113), 13.
11. **N.I. Barkov, F.G. Gordienko, E.S. Korotkevich, V.M. Kotlyakov**
Doklady Akademii nauk SSSR [Reports of the USSR Academy of Sciences], 1974, 214(6), 1382 (in Russian).
12. **N.I. Barkov, F.G. Gordienko, E.S. Korotkevich, V.M. Kotlyakov**
Doklady Akademii nauk SSSR [Reports of the USSR Academy of Sciences], 1976, 230(3), 656.
13. **J.R. Petit, J. Jouzel, D. Raynaud, N.I. Barkov, J.-M. Barnola, I. Basile, M. Bender, J. Chappellaz, M. Davis, G. Delaygue, M. Delmotte, V.M. Kotlyakov, M. Legrand, V.Y. Lipenkov, C. Lorius, L. Pépin, C. Ritz, E. Saltzman, M. Stievenard**
Nature, 1999, 399(6735), 429. DOI: 10.1038/20859.
14. **S.A. Bulat, I.A. Alekhina, M. Blot, J.-R. Petit, M. de Angelis, D. Wagenbach, V.Ya. Lipenkov, L.P. Vasilyeva, D.M. Wloch, D. Raynaud, V.V. Lukin**
Intern. Journ. Astrobiology, 2004, 3(1), 1.
DOI: 10.1017/S1473550404001879.
15. **V.M. Kotlyakov**
The Snow Cover of the Antarctic and its Role in the Present-Day Glaciation of the Continent. Israel, Jerusalem, 1966, 256 pp.

Российские экспедиции XIX века в Южном океане и их научное значение*

С.А. Добролюбов

Рассмотрены основные научные результаты океанографических работ российских кругосветных экспедиций XIX века: Крузенштерна – Лисянского, Беллинсгаузена – Лазарева, Коцебу – Ленца и Макарова в высоких широтах Южного полушария. Обсуждаются приборы и технологии измерений, впервые применявшиеся в мировой практике. Исследован вопрос об эволюции взглядов на формирование меридиональной циркуляции вод океанов: от работ Ленца и Макарова до наших дней.

Ключевые слова: российские кругосветные плавания, Южный океан, Антарктида, глубинные воды, меридиональная циркуляция.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты №№ 99-05-64222, 02-05-64454, 05-05-64408, 08-05-00943, 11-05-00634 и 14-05-00841).

Введение

В 2020 году мы отмечаем два важных юбилея – 500-летие открытия Магелланова пролива и 200-летие открытия Антарктиды. В 1520 году впервые был открыт проход из Атлантического океана в Тихий в высоких широтах Южного полушария – флотилия Фернана Магеллана прошла извилистым узким проливом, называемым теперь его именем. Простирравшиеся на юг от пролива берега, получившие название «Земли Огней», тогда были восприняты как северный выступ Южного материка. Лишь в конце XVI в. Френсис Дрейк обнаружил южнее Огненной Земли обширное водное пространство, которое сегодня мы называем проливом Дрейка. Но интерес к поискам Южного материка не ослабевал. Английский капитан Джеймс Кук был первым из европейцев, кто в 70-е годы XVIII в. на практике познакомился с тяжелейшими условиями плавания в водах Южного океана, проникнув на парусных судах до 71° ю. ш. сквозь айсберги и льды, но так и не встретив суши. Он считал, что «...отверг возможность существования материка, который, если и может быть обнаружен, то лишь близ полюса, в местах недоступных для плавания» [1].

Ситуация кардинально изменилась в самом начале XIX века, благодаря удачному сочетанию экономических интересов Российско-американской компании и политических интересов России на

северных побережьях Тихого океана. Необходимо было искать новые способы снабжения Северо-Американских колоний, поскольку старые пути сообщения с ними через Сибирь и порт Охотск были очень длительными, дороги и тяжелы, а путь через Южный океан оказывался более длинным, но эффективным.

За 63 года русские моряки совершили 42 плавания из Кронштадта в северную часть Тихого океана. Из этого числа 28 плаваний были кругосветными в полном смысле этого слова. Всего в этих плаваниях приняли участие 32 судна. Мыс Горн русские парусники огибали 40 раз, мыс Доброй Надежды – 35 раз [1–2]. Ни один из иностранных флотов не мог похвастаться подобными достижениями.

Результаты этих плаваний без преувеличения огромны. Помимо решения задачи снабжения русских поселений и охраны морских рубежей России, они сыграли важную роль в развитии и совершенствовании



ДОБРОЛЮБОВ

Сергей Анатольевич

профессор, член-корреспондент РАН,
МГУ им. М.В. Ломоносова

флота, стали великолепной школой, из которой вышли несколько десятков выдающихся адмиралов-флотоводцев, ученых с мировыми именами, крупных общественных деятелей, писателей-маринистов. Абсолютно уникальными были научные результаты этих экспедиций, о наиболее важных открытиях в Южном океане и эволюции представлений о его роли в общей циркуляции океанов будет рассказано ниже.

Первые российские кругосветные плавания и открытие Антарктиды

Первая русская кругосветная экспедиция призвана была доставить на Дальний Восток грузы Российско-американской компании, затем продать меха этой компании в Китае, закупить там на вырученные деньги товары для Европейской России, а также доставить в Японию посольство Н.П. Резанова. Попутно экспедиция должна была производить наблюдения по географии, гидрометеорологии, биологии, этнографии. Для экспедиции были куплены в Англии два корабля: один водоизмещением 450 т, названный «Надеждой», и другой водоизмещением 350 т, названный «Невой». В командование «Надеждой» вступил **Иван Федорович Крузенштерн**, в командование «Невой» – капитан-лейтенант **Юрий Федорович Лисянский**.

Команды обоих судов (как офицеры, так и матросы) были военными и набраны из добровольцев. Несмотря на то, что «Надежда» и «Нева» принадлежали частной Российско-американской компании, император Александр I разрешил им плавание под военным Андреевским флагом. Экспедиция была снабжена лучшими для того времени астрономическими и навигационными приборами, термометрами для измерения температуры воды. Кроме того, сравнительно незадолго до плавания был разработан способ определения долготы на кораблях по угловым расстояниям Луны от Солнца

(«способ лунных расстояний»). Это значительно облегчило определение широт и долгот в море. Благодаря точности своего счисления, опирающегося на частые и точные определения широт и долгот, обоим кораблям удалось по разности счислимых и наблюденных («обсервованных») мест определить направления и скорости морских течений во многих районах их плавания. На «Надежде», кроме обычных измерений температуры поверхностного слоя океана, был впервые в практике использован для глубоководных исследований изобретенный в 1782 г. термометр Сикса, предназначенный для измерения наибольшей и наименьшей температуры [3].

В августе 1803 г. Крузенштерн и Лисянский вышли из Кронштадта, в ноябре того же года «Надежда» и «Нева» впервые в истории русского флота пересекли экватор и вошли в Южное полушарие. При приближении к мысу Горн поднялся жестокий шторм; но в первый же спокойный день при выходе из пролива Дрейка у берегов Чили Крузенштерн смог определить температуру воды – на поверхности $2\frac{3}{4}$ °С, на глубине 60 саженей (110 м) – $2\frac{1}{2}$ °С, а на 100 саженях (183 м) – $1\frac{1}{2}$ °С [2]. По существу, это первые относительно точные измерения температуры воды на глубинах в Южном океане.

В течение всего этого плавания производились наблюдения над морскими течениями, температурой и плотностью воды на разных глубинах (до 400 м), над приливами и отливами. Через три года после отплытия экспедиция в августе 1806 г. завершилась в Кронштадте. Можно с уверенностью сказать, что первое кругосветное плавание Крузенштерна положило начало новой науке – океанографии.

Отечественная война 1812 г. и победа над Наполеоном стала могучим толчком в развитии отечественного мореплавания и российской географии. Император Александр I, словно вспомнив слова своего предка Петра Первого: «Оградя отечество безопасностью от неприятеля, надлежит стараться находить славу государству через искусство и науки», – согласился на организацию нескольких морских экспедиций в Южный океан и моря Арктики. Наибольшую славу приобрела экспедиция **Ф.Ф. Беллинсгаузена – М.П. Лазарева**, ознаменовавшаяся величайшим географическим открытием XIX в. – открытием шестого материка – Антарктиды [2].

Шлюпом «Восток» (водоизмещением 900 т) командовал Ф.Ф. Беллинсгаузен, ходивший в 1803–1806 гг. с Крузенштерном на «Надежде». Шлюпом «Мирный» (водоизмещением 530 т) командовал уже во второй своей экспедиции в качестве командира М.П. Лазарев, впоследствии прославленный адмирал, один из известнейших русских флотовод-

цев. Подробные инструкции, составленные главным инициатором экспедиции И.Ф. Крузенштерном, содержали настоятельные рекомендации проникнуть как можно дальше в высокие широты Южного полушария. И.Ф. Крузенштерн подчеркивал: «Славу такого предприятия не должны допускать отнять у нас; она в продолжении краткого времени достанется непременно в удел англичанам или французам». Экипажи кораблей были укомплектованы исключительно добровольцами, включая и нижних чинов.

В июле 1819 г. «Восток» и «Мирный» вышли из Кронштадта и к декабрю были у острова Южная Георгия (рис. 1). Здесь начались географические открытия, и на карте появились острова, названные в честь участников экспедиции. Обследовав затем Землю Сандвича, открытую Дж. Куком в 1775 г., и присвоив этому архипелагу наименование Южных Сандвичевых островов, экспедиция взяла курс на юг.

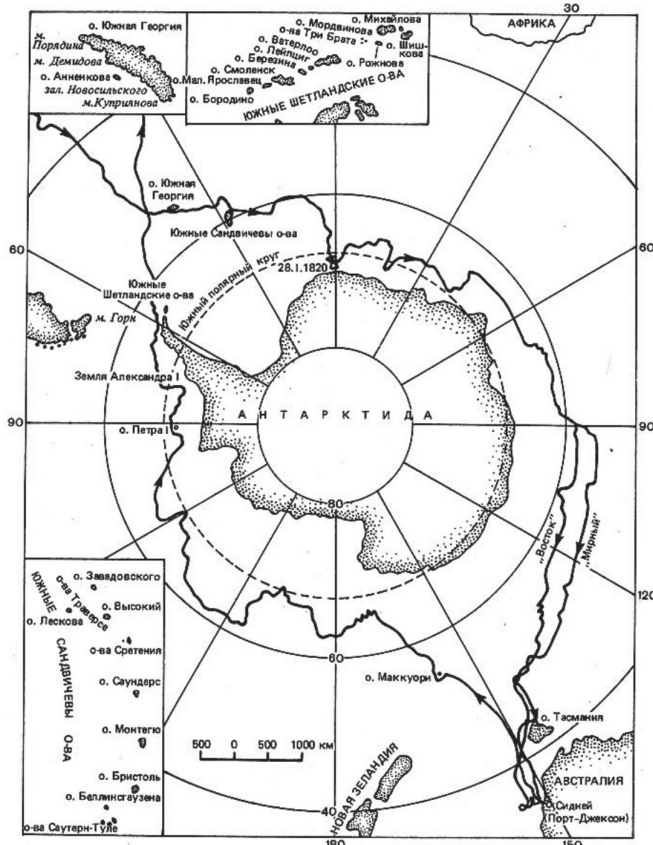


Рис. 1. Маршрут плавания Ф.Ф. Беллинсгаузена и М.П. Лазарева в Южном океане.

16 (28) января 1820 г. на 69° ю. ш. и 2° з. д. «Восток» и «Мирный» подошли к покрытым «бугристыми» льдами берегам Антарктиды. В первый раз люди видели новый материк, но подойти к нему было невозможно, льды преграждали путь. Русские моряки отметили все признаки земли. Берег, увиденный Беллинсгаузенем и Лазаревым, сейчас

называется Землей Кронпринцессы Марты.

В марте 1820 г., с началом антарктической зимы, шлюпы направились в южную часть Тихого океана, в результате была открыта островная группа, получившая название островов Россиян (острова Кутузова, Лазарева, Раевского, Волконского, Барклая де Толли и другие). С наступлением весны «Восток» и «Мирный» снова отправились в высокие широты Южного полушария. Настойчивость мореплавателей в результате была вознаграждена. В январе 1821 г. были открыты остров Петра I и Берег Александра I (на современных картах этот участок суши называется Землей Александра I). Обследовав затем и нанеся на карту Южные Шетландские острова, летом 1821 г. шлюпы вернулись к родным берегам, потеряв за все плавание только двух человек.

Плавание Беллинсгаузена и Лазарева было редким по слаженности действий капитанов. В общей сложности «Восток» и «Мирный» 100 дней шли среди льдов, ни разу не разлучаясь. Во время безветрия производились океанологические наблюдения, в частности измерялась температура и удельный вес морской воды на глубинах. Для доставания образцов воды с глубин до 220 сажен (400 м) употреблялся специальный прибор (батометр). Очень тщательно описывались все случаи свечения моря. Для лова светящихся морских организмов с кормы на ходу опускался в море мешок, пропускавший воду. Это был прообраз современных планктонных сетей.

Экспедиция Ф.Ф. Беллинсгаузена и М.П. Лазарева совершила открытие материка Антарктида, что неоспоримо причислено к великим географическим открытиям [2–3]. Кроме берегов Антарктиды, открыты и нанесены на карту 29 ранее неизвестных островов, произведены точные астрономические определения координат десятков приметных географических пунктов, выполне-

ны первые океанографические измерения в высоких широтах Южного океана.

Экспедиции О.Е. Коцебу и Э.Х. Ленца

Из всех российских кругосветных экспедиций первой половины XIX в. именно плавание **Отто Евстафьевича Коцебу** внесли наибольший вклад в развитие мировой океанографии как науки. Практически все дальнейшие плавание русских судов первой половины XIX века преследовали те или иные практические цели, научные наблюдения производились на этих судах лишь попутно. Однако в 1815 г. была организована чисто научная экспедиция для отыскания морского пути из Берингова моря в Атлантический океан и географических исследований в Тихом океане. Специально для экспедиции был построен бриг «Рюрик». По своему водоизмещению (180 т) это было самое маленькое из всех русских парусных судов, совершивших кругосветные плавание.

Бриг «Рюрик» был приобретен и плавал на средства одного человека – государственного канцлера и министра иностранных дел графа Н.П. Румянцева, энтузиаста географических исследований. Инструкции для плавания были составлены И.Ф. Крузенштерном, по представлению которого начальником экспедиции был назначен бывший кадет «Надежды» лейтенант О.Е. Коцебу. В программу исследований входили океанографические наблюдения: измерение глубины, температуры воды, определение солёности воды по ее плотности (ареометрирование), скорости и направления течений, приливных колебаний во время стоянок, цвета и прозрачности воды, свечения моря ночью, образования льдов.

В июле 1815 г. «Рюрик» направился в долгий путь, в январе 1816 г. обогнул мыс Горн. У этого мыса во время одного из штормов огромный

вал, вкатившийся с кормы на палубу, смыл Коцебу за борт. К счастью, он успел ухватиться за «пук веревки» и спастись чудом. Примечательно, что в течение двух последних лет плавания на судне оставалось только два офицера, включая Коцебу, вынужденных стоять вахты попеременно. В июле 1818 г. «Рюрик» вернулся в Петербург.

Результаты экспедиции Коцебу были весьма велики. Помимо важных открытий в Тихом океане и к северу от Берингова пролива, уникальны результаты океанологических наблюдений. Было произведено свыше 300 измерений температуры и плотности поверхностных вод, 83 измерения температуры на глубинах океана, в том числе в 10 местах с помощью термометра Сикса измерялись вертикальные профили температуры. Наибольшая глубина, на которой измерялась температура, составила 1829 метров.

Впервые в океанологической практике Коцебу измерял относительную прозрачность морской воды. Для этой цели на тросе опускалась в море белая тарелка и отмечалась глубина, на которой эта тарелка исчезала из виду. Такой прием используется и сейчас, только вместо тарелки на глубину опускается белый диск определенных размеров.

Через пять лет после возвращения из плавания на «Рюрике» О.Е. Коцебу был назначен командиром шлюпа «Предприятие» водоизмещением 750 т. Шлюпу были поручены доставка грузов на Камчатку и крейсерство для охраны русских поселений на Алеутских островах. Одновременно ему разрешалось производство географических исследований, но «не в ущерб основным заданиям».

План научных исследований вновь был подготовлен И.Ф. Крузенштерном, ставшим к тому времени адмиралом. Он обратился к ректору Дерптского (Тартусского) университета профессору Г.Ф. Парроту с просьбой рекомендовать для кругосветного плавания способных молодых естествоиспытателей. Дерптский университет был в те годы одним из крупнейших научных центров России с сильной школой естественных наук. Выбор в части физики пал на студента третьего курса университета Эмилия Христиановича Ленца. Паррот не ошибся, рекомендуя юного студента (ему было 19 лет) в такую ответственную экспедицию. Ленц не только оправдал доверие своего наставника, но и позднее прославил русскую науку. Инструкция, разработанная для Ленца Парротом, предусматривала исследовать магнитные склонения, глубины, температуру и плотность морской воды на разных глубинах, вести метеорологические наблюдения. Намечено было также произвести ряд опытов для определения упругости ртути и некоторых других металлов

и веществ, используя давление воды на больших глубинах океана.

Паррот вместе с Ленцем сконструировали два прибора: батометр для взятия проб воды и измерения температур на разных глубинах и специальную лебедку для опускания батометра. Оба прибора имели огромное значение для научных наблюдений экспедиции. Следует отметить, что изобретенный Парротом и Ленцем батометр полностью отвечал всем требованиям, предъявляемым к подобным приборам и в нашу эпоху: он должен быть строго герметичен, а проба воды, отбираемая им, должна иметь ту же температуру, что и на глубине в месте ее взятия [2].

Придавая большое значение точности измерения, Ленц провел ряд испытаний батометров и составил таблицы поправок к показаниям термометров. Для определения солености морской воды Ленц взял в плавание ареометр – прибор для определения плотности жидкости. Затем уже по плотности при атмосферном давлении и температуре определялась соленость.

В июле 1823 г. шлюп вышел из Кронштадта. Плавание «Предприятия» продолжалось три года без десяти дней. Во время плавания были выполнены точные определения географических координат вновь открытых островов, определились магнитное склонение, колебания уровня моря. Наибольшее научное значение имели океанологические наблюдения. С помощью своего батометра Ленц произвел много глубоководных измерений температуры и удельного веса морской воды, в том числе в высоких южных широтах. Наибольшая глубина измерений была равна 1972 метрам. При вычислении глубины погружения приборов вводились поправки на отклонения троса от вертикали и на укорачивание троса при намокании. Методы и приборы, использованные на «Предприятии», положили начало точным океанологическим работам. С.О. Макаров [4] считал наблюдения Ленца удельного веса морской

воды не только первыми в хронологическом отношении, но и первыми в качественном, ставя их выше своих наблюдений и наблюдений «Челленджера» – судна знаменитой английской экспедиции по исследованию океана 1872–1876 гг.

Важен не только самый факт измерения Ленцем температуры глубинных слоев воды океана, – он первым определил, что температура вод Мирового океана на глубинах очень низка – на глубине более 1900 м она оказалась равной 2.2 °С. Ленц высказал первые доказанные опытом положения, что теплые воды тропиков поверхностными течениями выносятся в высокие широты, а холодные полярные воды с глубинными течениями проникают в низкие широты и там поднимаются вверх. Причем такую схему он подтвердил с помощью собственных измерений вертикального профиля температуры: он установил положение соответствующей термоклины изотермы 14.5 °С, связав колебания ее глубины с соответствующим поднятием или опусканием вод [5]. Схематично эта концепция приведена на рис. 2, причем первенство Ленца в создании схемы меридиональной циркуляции океанов признано во всем мире [3].

Результаты плавания

С.О. Макарова на «Витязе»

Широкое внедрение во второй половине XIX века на морских судах

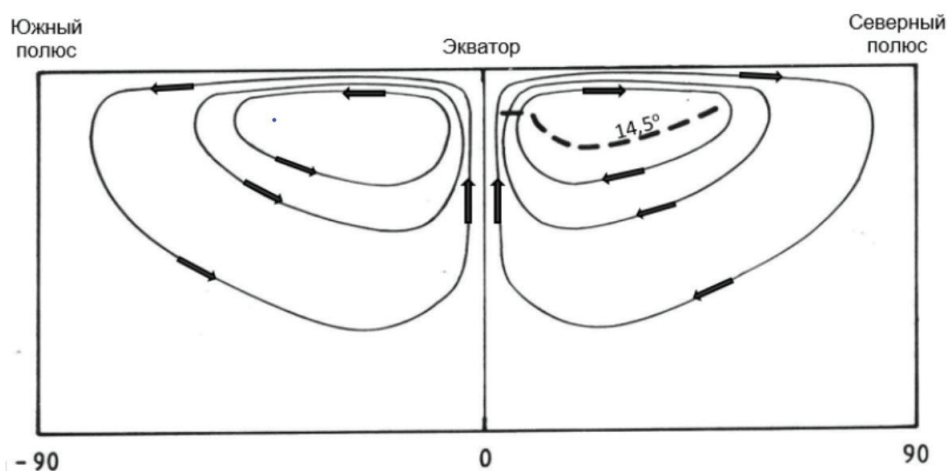


Рис. 2. Схема меридиональной циркуляции вод океанов Э.Х. Ленца. Штриховой линией показано положение изотермы 14.5 °С.

парового двигателя и винта отразилось на возможностях исследования режима Мирового океана. Влияние условий погоды на производство исследовательских работ в море сильно уменьшилось. Поэтому начиная с 1860-х годов русские винтовые суда начали при следовании вокруг Южной Америки на Дальний Восток использовать Магелланов пролив. Этим же путем проследовал в конце 1886 года и корвет «Витязь» водоизмещением 3200 т под командованием **Степана Осиповича Макарова**.

Перед С.О. Макаровым были поставлены задачи: в ходе кругосветного плавания усовершенствовать морскую подготовку личного состава корабля (экипаж состоял из 372 человек) и оценить возможности отдаленных российских портов на случай войны с Японией. Средств на научную работу казной отпущено не было. Макаров по собственной инициативе проделал огромную исследовательскую работу, измерительные приборы приходилось изобретать и мастерить самому или покупать на собственные средства.

В августе 1886 года «Витязь» вышел из Кронштадта в дальнейшее трехлетнее плавание. В рейсе были сделаны около 260 глубоководных океанографических станций, в том числе в Южном океане вблизи Патагонии. Результатом плавания стал двухтомный труд С.О. Макарова «Витязь и Тихий океан» [4]. Он получил в 1894 г. полную премию Академии наук и большую золотую медаль Императорского Русского Географического общества. Эта книга стала классическим трудом по океанографии и принесла автору славу ученого с мировым именем. Ценность этого труда состоит не только в использовании огромного числа океанографических наблюдений, но и в богатстве и оригинальности мыслей автора – большинство из них является настоящим вкладом в теоретическую океанологию и в методику океанографических наблюдений [2].

Макаров особое значение прида-

вал точности измерений, боролся с формальным заполнением журналов наблюдений, добиваясь, прежде всего, правдивости записей. «Необходимо совершенно отказаться от всяких предвзятых мыслей и вносить в журнал только действительные цифры показаний инструментов. Если наблюдения не сделаны, то следует оставить пустое место, но ни в коем случае не вносить предполагаемой величины... Указания на возможную неточность наблюдений не только не уменьшают доверия к цифрам, но, напротив, увеличат его, ибо наименее достоверные наблюдения те, о точности которых совершенно нельзя судить» [4]. И спустя 130 лет эти слова должны быть руководством к действию для любого естествоиспытателя.

Уникальны оправдавшиеся впоследствии высказывания Макарова об антарктическом происхождении глубинных вод северной части Тихого океана. Действительно, абиссальные глубины Тихого океана заполнены водой, приходящей от Антарктиды, поскольку там плотность воды зимой выше, чем на севере этого бассейна, и плотная вода у дна устремляется из Южного полушария через экватор на север. Таким образом, Макаров усовершенствовал схему меридиональной циркуляции Ленца, впервые заявив о потоке вод из Южного океана в Северное полушарие. Примечательно, что подобная схема глубинной циркуляции была разработана только через 50 лет после гибели Макарова Г. Стоммелом [6].

Развитие идей Э.Х. Ленца и С.О. Макарова о меридиональной циркуляции вод

Следующим этапом развития идей русских океанографов XIX века стала концепция «глобального океанского конвейера» [7]. Если схема, представленная на *рис. 2*, предполагала равный вклад высоких широт Южного и Северного полушарий в формирование глубинных вод, то схема «конвейера» свидетельствовала, что образующиеся в Северной Атлантике глубинные воды распространяются затем по всему Мировому океану, а им на смену должен идти компенсационный поток вод верхнего слоя в противоположном направлении, замыкающий глобальную циркуляцию: из Тихого океана через моря Индонезии и Индийский океан в Южный океан и далее на север в Атлантику.

В дальнейшем и эта схема была усовершенствована. Так, по результатам работ в рамках проектов, поддержанных РФФИ (№№ 99-05-64222, 02-05-64454, 05-05-64408, 08-05-00943, 11-05-00634, 14-05-00841), автору этой статьи удалось получить глобальную картину потока водных масс в океанах, переноса тепловой энергии и рас-

пресненных вод, выявить особую роль Южного океана в формировании бюджета тепла и в глобальном гидрологическом цикле [8].

Была количественно подтверждена идея, впервые высказанная С.О. Макаровым, об обмене глубинных вод между полушариями. Показано, что глобальная меж океанская циркуляция, нарушающая симметрию схемы Ленца, формируется за счет разницы в солености между Атлантическим и Тихим океанами, определяемой принципиально разным бюджетом влаги и затратами тепла на испарение над акваториями этих океанов. Кроме того, удалось определить ключевую роль водных масс промежуточного слоя, погружающихся в Южном океане на горизонты 500–1 500 метров, в межширотном перераспределении распресненных вод и формировании меридиональной и меж океанской циркуляции. Оказалось, что дополнительное количество тепловой энергии поступает в Атлантический океан из Индийского через Южный к югу от Африки, а распресненная вода,

компенсирующая избыток испарения, приходит в Атлантику с двух сторон: из Северного Ледовитого океана и в Южном океане через пролив Дрейка [9].

Так как океан – наиболее инерционное звено в климатической системе Земли, мониторинг меридиональной и меж океанской циркуляции вод, включая весь диапазон глубин, служит необходимым условием успешного прогноза будущих изменений климата. Те наблюдения в приантарктическом районе, которые российские моряки начали два века назад, станут первыми корректными реперными точками, относительно которых будущие поколения будут судить о долгопериодных изменениях характеристик Мирового океана.

Литература

1. **М.Г. Деев**
Введение в историю географических открытий, Ч.1, Открытие Земли, РФ, Москва, Изд. Московского университета, 2005, 175 с.
2. **Н.Н. Зубов**
Отечественные мореплаватели – исследователи морей и океанов, СССР, Москва, Географгиз, 1954, 309 с.
3. **I. Jones, J. Jones**
Oceanography in the days of sail, Australia, Sydney, Hale and Iremonger, 1992, 288 pp.
4. **С.О. Макаров**
«Витязь» и Тихий океан. Т. 1, Российская империя, Санкт-Петербург, 1894, 511 с.
5. **E. Lenz**
Annalen der Physik und Chemie, 1848, **149**, 615.
6. **H. Stommel**
Nature, 1957, **180**(4589), 733.
DOI: 10.1038/180733a0.
7. **W.S. Broecker**
Oceanography, 1991, **4**(2), 79. DOI: 10.5670/oceanog.1991.07.
8. **С.А. Добролюбов**
Вестник Московского Университета. Серия 5. География, 1993, №1, 19.
9. **С.А. Добролюбов**
Известия РАН, сер. географическая, 2005, №1, 33.

English

Russian Expeditions of the 19th Century in the Southern Ocean and Their Scientific Significance*

Sergey A. Dobrolyubov
Professor, RAS Corresponding Member,
Lomonosov Moscow State University
1 Leninskiye Gory,
GSP-1, Moscow, 117234, Russia
science@geogr.msu.ru

Abstract

The paper constitutes a review of the main scientific achievements of Russian round-the-world expeditions of the 19th century in the high latitudes of the Southern Hemisphere, that are Kruzenshtern – Lisyansky, Bellingshausen – Lazarev, Kotzebue – Lenz and Makarov marine research cruises. Devices and measurement technologies used by Russian researches for the first time in world practice are discussed. The evolution of scientific views on the

formation of the ocean waters meridional circulation from the works of Lenz and Makarov to the present day is investigated.

Keywords: Russian circumnavigation, Southern Ocean, Antarctica, deep waters, meridional circulation.

*The work was financially supported by RFBR (projects 99-05-64222, 02-05-64454, 05-05-64408, 08-05-00943, 11-05-00634 and 14-05-00841).

Images & Tables

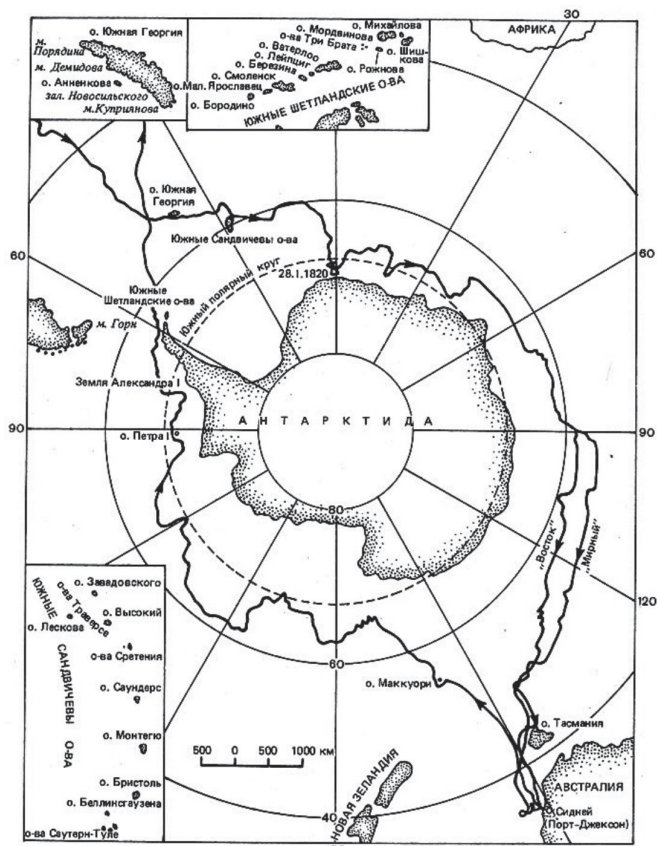


Fig. 1. The route of cruise by F.F. Bellingshausen and M.P. Lazarev in the Southern Ocean.

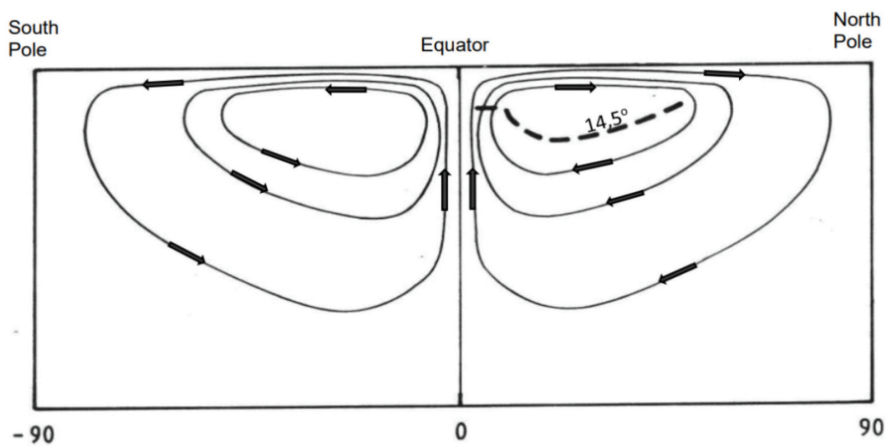


Fig. 2. Scheme of meridional ocean circulation of E. Lenz. The bar line shows the position of isotherm 14.5 °C.

References

1. **M.G. Deev**
An Introduction to the History of Discovery, Part 1, Discovery of the Earth [Vvedenie v istoriyu geograficheskix otkrytij, Ch. 1. Otkrytie Zemli], RF, Moscow, MSU Publ. House, 2005, 175 pp. (in Russian).
2. **N.N. Zubov**
Russian Sailors – Explorers of the Seas and Oceans [Otechestvennye moreplavately – issledovateli morey i okeanov], USSR, Moskva, Geografiz Publ., 1954, 309 pp. (in Russian).
3. **I. Jones, J. Jones**
Oceanography in the days of sail, Australia, Sydney, Hale and Iremonger, 1992, 288 pp.
4. **S.O. Makarov**
“Vityaz” and the Pacific Ocean. Vol. 1
[“Vityaz” i Tikhyy okean. T. 1], Russian Empire, Snt. Petersburg, 1894, 511 pp. (in Russian).
5. **E. Lenz**
Annalen der Physik und Chemie, 1848, **149**, 615.
6. **H. Stommel**
Nature, 1957, **180**(4589), 733. DOI: 10.1038/180733a0.
7. **W.S. Broecker**
Oceanography, 1991, **4**(2), 79.
DOI: 10.5670/oceanog.1991.07.
8. **S.A. Dobrolyubov**
Vestnik MGU. Ser.5. Geography, 1993, №1, 19 (in Russian).
9. **S.A. Dobrolyubov**
Izvestiya RAN, Ser. Geograficheskaya, 2005, №1, 33 (in Russian).

Основные результаты исследований Арктического и антарктического НИИ Росгидромета в Антарктике*

А.А. Екайкин, Н.Н. Антипов, Д.Ю. Большиянов, С.Р. Веркулич, Б.В. Иванов, А.В. Клепиков, В.Я. Липенков, А.С. Макаров, В.Ф. Радионов, И.В. Федорова, И.Е. Фролов

В настоящей работе приведен краткий обзор результатов палеогеографических, гляциологических, гидрологических, климатических, метеорологических и океанологических исследований Арктического и антарктического НИИ Росгидромета в Антарктике со второй половины 1950-х годов по настоящее время.

Ключевые слова: Антарктида, гидрология, гляциология, керны, климатология, оазисы, озеро Восток, океанология, палеогеография.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты №№ 98-05-65184, 02-05-22003, 03-05-65295, 05-05-66803, 05-05-65248, 08-05-00824, 08-05-00767, 10-05-93106, 10-05-01049, 12-05-00607, 13-05-00607, 14-05-00548, 14-05-00787, 14-05-93106, 15-35-50949, 16-35-50065, 16-54-00197, 17-05-00037, 17-05-01168 и 18-05-00334).

Введение

В нынешнем, 2020 году российская антарктическая наука празднует несколько знаковых юбилеев. Прежде всего – это 200-летие открытия Антарктиды русскими моряками в январе 1820 г. Во-вторых – 100-летие Государственного научного центра Российской Федерации Арктического

и антарктического НИИ Росгидромета. В этот же ряд можно поставить и 50-летие начала проекта глубокого бурения льда на станции Восток – пожалуй, самого масштабного и богатого открытиями научного мероприятия, осуществленного в Антарктике.

С 1958 г., когда Арктический и антарктический научно-исследовательский институт (ААНИИ) стал центром научных и экспедиционных исследований



ЕКАЙКИН
Алексей Анатольевич
Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Институт наук о Земле СПбГУ



АНТИПОВ
Николай Николаевич
Арктический и антарктический научно-исследовательский институт



БОЛЬШИЯНОВ
Дмитрий Юрьевич
профессор, Арктический и антарктический научно-исследовательский институт



ВЕРКУЛИЧ
Сергей Романович
Арктический и антарктический научно-исследовательский институт



ИВАНОВ
Борис Вячеславович
Арктический и антарктический научно-исследовательский институт



КЛЕПИКОВ
Александр Вячеславович
Начальник Российской антарктической экспедиции Арктического и антарктического научно-исследовательского института



ЛИПЕНКОВ
Владимир Яковлевич
Арктический и антарктический научно-исследовательский институт



МАКАРОВ
Александр Сергеевич
профессор РАН, директор Арктического и антарктического научно-исследовательского института



РАДИОНОВ
Владимир Федорович
Арктический и антарктический научно-исследовательский институт



ФЕДОРОВА
Ирина Викторовна
Институт наук о Земле СПбГУ



ФРОЛОВ
Иван Евгеньевич
член-корреспондент РАН, профессор, научный руководитель Арктического и антарктического научно-исследовательского института

Антарктики, в нашем институте выполнен колоссальный объем работы по всестороннему изучению шестого континента, по всем научным фронтам – от биологии до гляциологии, от геофизики до геологии.

В этой статье мы приводим краткий обзор результатов научных изысканий сотрудников нашего института в области гляциологии, палеогеографии, климатологии, океанологии и гидрологии. Результаты геофизических исследований более детально рассмотрены в другой статье этого выпуска.

Существенную финансовую поддержку научным исследованиям ААНИИ в Антарктике оказал Российский фонд фундаментальных исследований. За последние 30 лет на гранты РФФИ в институте было успешно выполнено несколько десятков проектов по приоритетным направлениям антарктических исследований.

Гляциологические и палеоклиматические исследования в Центральной Антарктиде, изучение подледникового озера Восток

Гляциологические исследования нашей страны в Центральной Антарктиде начались в середине 1950-х гг., с первых же комплексных антарктических экспедиций, во время которых советские полярники совершили целую серию внутриконтинентальных научных санно-гусеничных походов по восточно-антарктическому ледниковому плато вплоть до Южного полюса. Во время этих походов были основаны такие станции, как Пионерская, Восток-1, Комсомольская, Восток (16 декабря 1957 г.), Полюс недоступности, Советская. Из них лишь станция Восток существу-

ет до настоящего времени. Позднее были осуществлены научные походы до пунктов «Купол В» и «Купол С» (в районе последнего сейчас находится франко-итальянская станция Конкордия). В 1970–1973 гг. на протяжении четырех лет осуществлялись наблюдения за накоплением снега вдоль 1410-километрового снегомерного профиля от станции Мирный до станции Восток. Эти наблюдения позволили получить уникальный для того времени научный материал.

В 1970 г. начались систематические гляцио-буровые работы на станции Восток и в ее окрестностях.

К тому моменту начал интенсивно развиваться такой метод палеоклиматологии как бурение скважин в полярных ледниках и изучение ледяных кернов. В ААНИИ пионером этих исследований стал Н.И. Барков. Еще в 1960 г. он получил авторское свидетельство № 127629 на изобретение под названием «Электробур для бурения скважин во льду». В 1966 г. к разработке термобура подключился Ленинградский Горный институт (ЛГИ, ныне СПбГУ) и после ряда испытаний на склоне ледника в районе станции Мирный установка была доставлена на Восток, и в апреле 1970 г. там было начато бурение глубиной

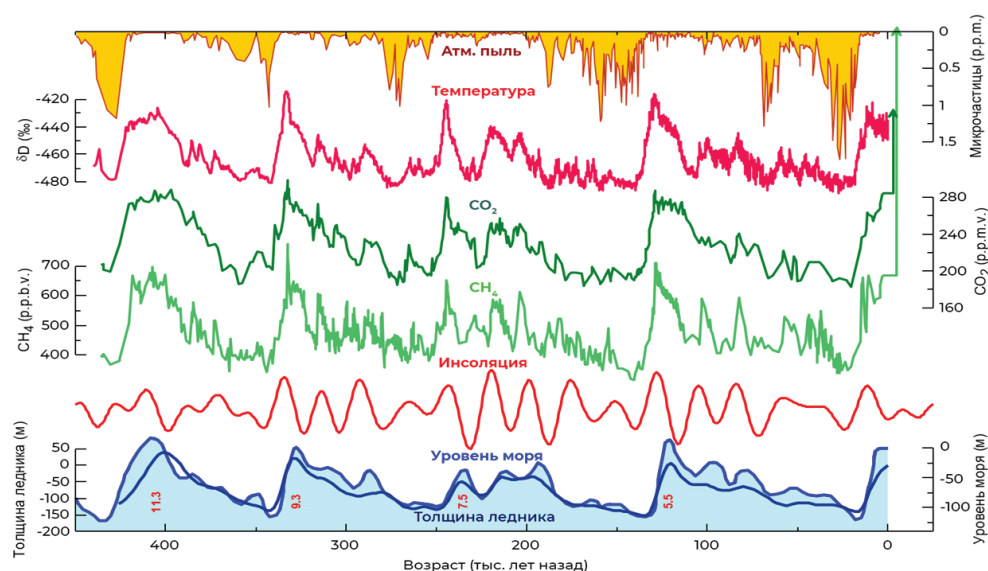


Рис. 1. История климата Земли за последние 440 тыс. лет по данным исследования глубокого керна станции Восток [3]. Сверху вниз: концентрация атмосферной пыли во льду; температура воздуха, реконструированная по изотопному составу (доля дейтерия δD) ледяных слоев; концентрация парниковых газов (углекислого газа и метана) в атмосфере планеты; солнечный форсинг (колебания летней инсоляции на 65°с. ш.); уровень моря (голубая заливка) и толщина антарктического ледникового щита в районе станции Восток (темно-синяя кривая).

скважины [1]. Изотопные исследования, выполненные по 500-метровому керну, впервые позволили изучить климатические условия максимума последнего оледенения в центральной Антарктиде.

В последующие 20 лет были пробурены четыре скважины глубиной до 2546 м. Во всех случаях прекращение бурения было связано с аварийными ситуациями в скважине. В феврале 1990 г. была забурена очередная скважина, получившая название 5Г («пятая глубокая»). В 1991 г. ее бурение было прервано на глубине 2503 м из-за очередной аварии и возобновлено с отметки 2232 м (скважина 5Г-1). До глубины 2755 м 5Г-1, как и все предыдущие скважины, бурилась тепловым снарядом, а далее, начиная с февраля 1995 г., бурение было продолжено электромеханическим снарядом КЭМС-132 [1]. В январе 1998 г. бурение было остановлено на глубине 3623 м.

Бурение скважин 5Г и 5Г-1 и изучение ледяного керна осуществлялось в рамках трехстороннего российско-франко-американского сотрудничества, и именно международный характер этого проекта стал ключевым фактором успеха этих работ. Сотрудничество с Францией и США позволило выполнить всесторонние комплексные исследования образцов льда – изотопные, газовые, химические, минеральные, кристаллографические, биологические анализы; реконструировать историю климата и окружающей среды Земли за последние 440 тыс. лет (рис. 1); сделать ряд фундаментальных научных открытий [2].

В частности, было обнаружено, что климат Земли испытывает асимметричные квазициклические колебания с периодом около 100 тыс. лет, с коротким теплым межледниковьем, плавным переходом к длинной холодной эпохе оледенения и его резким окончанием – потеплением, знаменующим начало очередного межледниковья. Также впервые на основе прямых экспериментальных данных

о содержании углекислого газа и метана в атмосфере в прошлом была показана ключевая роль парниковых газов в формировании этих климатических колебаний. Помимо этого, было показано, что современная концентрация CO_2 (около 370 ppm – частей на миллион – в конце 1990-х гг.) в атмосфере существенно превышает естественные пределы концентрации этого газа за последние полмиллиона лет (180–280 ppm). Основные результаты изучения ледяного керна станции Восток изложены в работе Ж.Р. Пети с соавторами [2], которой было суждено стать одной из наиболее цитируемых публикаций в науках о Земле. Палеоклиматические данные по керну Востока были широко использованы в первых отчетах Межправительственной группы экспертов по климату (МГЭИК) в качестве естественных колебаний параметров климатической системы, на фоне которых происходят современные антропогенные глобальные изменения. На многие годы «восточные» климатические ряды стали эталонными для палеогеографов и климатологов всего мира.

В ходе изучения «восточного» ледяного керна был разработан целый ряд новых методов и технологий по извлечению палеоклиматической информации из образцов льда и ее интерпретации. В частности, был изобретен новый способ измерения общего газосодержания во льду, основанный на точном измерении давления извлеченного изо льда воздуха, и показано, что изменчивость газосодержания коррелирует с вариациями местной солнечной инсоляции [4] и, соответственно, может быть использована для абсолютного датирования ледяного керна [5].

Была разработана физическая модель роста гидратов воздуха во льду, которая в дальнейшем использована для датирования древних базальных слоев ледника (см. ниже).

Разработана и усовершенствована термодинамическая модель движения ледника, которая позволила надежно датировать ледяной керн станции Восток [5]. В дальнейшем эти разработки позволили построить единую хроностратиграфическую шкалу для целого ряда антарктических и гренландских кернов.

В последние годы основной акцент в палеоклиматическом направлении сместился в сторону поиска и изучения древнейшего на планете льда возрастом до 2 млн лет. Актуальность этой задачи связана с загадкой причин так называемого «среднеплейстоценового климатического перехода» – увеличения периода основного климатического цикла с 40 до 100 тыс. лет при одновременном увеличении амплитуды колебаний в два раза, которое произошло около 1 млн лет назад. Поиск древнейшего льда – одна из наиболее значимых и при этом сложных задач современных гляциологии и палеоклиматологии. Международные

усилия в этом направлении координируются проектом IPICS (<http://pastglobalchanges.org/science/end-aff/ipics/intro>).

В глубоком керне 5Г-1 в интервале 3310–3538 м расположен интервал льда атмосферного происхождения возрастом более 420 тыс. лет, характеризующийся нарушенным залеганием слоев, вследствие чего в течение долгого времени не было возможности выполнить датирование этого интервала и извлечь из него климатическую информацию. Недавние успехи в разработке новых методов датирования, основанных на измерении размера гидратов воздуха и концентрации космогенного изотопа ^{81}Kr [6–7], позволили построить хроностратиграфическую шкалу для этого льда и установить, что возраст льда на глубине 3 538 м достигает 1.2 млн лет [7]. Таким образом, впервые было показано, что лед возрастом более 1 млн лет действительно залегает в нижних слоях ледника в Центральной Антарктиде. Была сделана попытка извлечь частично сохранившуюся климатическую информацию за период 1.2–0.4 млн лет назад, и показано, что температура воздуха в Антарктиде за это время испытала незначительное понижение [8].

Обнаружение древнего льда в «восточном» керне дает надежду на то, что в других районах Центральной Антарктиды этот лед может находиться в ненарушенном состоянии. Одним из наиболее перспективных мест следует считать так называемый Ледораздел В – участок главного ледораздела Антарктиды, с которого берет свое начало линия тока льда, проходящая через скважину 5Г. В январе 2020 г. был выполнен первый комплексный научный поход к топографическому куполу Ледораздела В, который показал, что скорость снегонакопления там всего на 10% больше, чем в районе станции Восток, а температура фирна на глубине затухания сезонных колебаний – на 1.5 °C ниже. Таким образом, эти первые предварительные результаты не противоречат гипотезе о том, что Ледораздел В действительно является перспективным местом для поисков древнейшего льда.

Параллельно с глубоким бурением льда и изучением керна 5Г в окрестностях станции Восток начал реализовываться проект изучения подледникового озера Восток. Изложение истории открытия озера выходит за рамки данной статьи, упомянем лишь, что окончательно существование обширного водоема подо льдом Восточной Антарктиды в районе станции Восток было доказано в первой половине 1990-х гг. [9]. В марте 1998 г. в ААНИИ состоялось международное научное совещание «Изучение озера Восток – научные задачи и технологии», на котором были сформулированы цели и задачи изучения озера, включая подготовку экологически безопасного первого вскрытия этого водоема, технология которого была разработа-

на специалистами Санкт-Петербургского горного университета (СПГУ) и ААНИИ в 1999–2001 гг.

Тогда же, во второй половине 1990-х, начались совместные дистанционные геофизические исследования озера, выполнявшиеся специалистами Полярной морской геолого-разведочной экспедиции (ПМГРЭ) при логистической поддержке Российской антарктической экспедиции (РАЭ ААНИИ). В результате этих исследований, в частности, было установлено, что озеро Восток – пятый в мире по объему пресноводный водоем, количество воды в котором оценивается величиной 6 100 км³. Площадь водного зеркала составляет около 15.4 тыс. км², средняя толщина водного слоя – 400 м, а максимальная глубина воды – 1 200 м, толщина льда над озером варьирует от 3 700 до 4 350 м [10].

В декабре 2005 г., после восьмилетнего перерыва, возобновились буровые работы в глубокой скважине 5Г-1 [1]. Бурение проходило непросто, специалистам СПГУ приходилось адаптировать технологию к высокой температуре в нижней части скважины и гигантозернистому льду. В октябре 2007 г. в результате очередной аварии скважина 5Г-1 была утеряна на глубине 3 666 м, после чего с глубины 3 580 м было начато забуривание нового ствола, 5Г-2. Наконец, в результате титанических усилий членов гляциобурового отряда, после многих лет работы 5 февраля 2012 г. на глубине 3 769 м (по керну) буровой снаряд достиг поверхности подледникового озера.

Керны 5Г-1 и 5Г-2 в интервале 3 538–3 769 м сложены льдом конжеляционного типа, сформировавшимся в результате медленного намерзания озерной воды на подошву ледника. Соответственно, комплексные исследования этого льда позволили получить обширные знания об озере Восток еще до первого вскрытия озера. В частности, были изучены изотопный [11] и химический составы этого льда, газосодержание и кристал-

лическая структура [12], изотопный состав растворенного во льду гелия, выполнены микробиологические и минералогические исследования обнаруженных в керне минеральных включений. Помимо изучения керна озерного льда, выполнено трехмерное моделирование циркуляции воды в озере, а также измерение баланса массы озера с помощью точных геодезических методов. Результаты предварительных исследований озера были обобщены в работах [12–14].

В частности, было установлено, что озеро, по всей видимости, находится в равновесном состоянии, то есть приходная часть баланса массы (таяние льда в северной части озера) уравнивается расходной (замерзанием воды в его южной части). На дне озера действуют активные геотермальные источники. В целом, озеро характеризуется довольно активной термохалинной циркуляцией воды. В южной части водная толща, вероятно, стратифицирована, причем верхний слой состоит из смеси поступившей из северной части талой ледниковой воды и резидентной воды озера. Озеро насыщено атмосферными газами, в том числе кислородом, концентрация которого может в десятки раз превышать значения, характерные для наземных водоемов. Микробный состав озера установить не удалось, за исключением термофильных бактерий, которые обитают на дне озера вблизи горячих источников.

В результате двух вскрытий озера в 2012 и 2015 годах в руках исследователей оказались первые образцы воды, полученные в твердом виде после того, как озерная вода поднялась в скважину и замерзла там. Дальнейшие исследования показали, что эти образцы пригодны лишь для изучения изотопного состава озерной воды [15], тогда как с точки зрения химического, газового и минерального составов эти пробы загрязнены следами заливочной жидкости. Также было установлено, что при контакте озерной воды с заливочной жидко-

стью в скважине происходит образование гидратов фреона, что делает невозможными дальнейшие прямые исследования озера с экологически чистым отбором проб через существующую скважину.

В настоящее время проект изучения озера Восток фактически находится в замороженном состоянии, что связано с прекращением в 2013 г. финансирования в рамках подпрограммы «Антарктика» ФЦП «Мировой океан».

Третьим направлением работ в Центральной Антарктиде стали гляциологические исследования в окрестностях станции Восток, целью которых является мониторинг изотопного состава и скорости накопления снега, изучение пространственной изменчивости этих параметров, исследование процесса формирования климатического сигнала изотопного состава снежной толщи, изучение климатической изменчивости центральной Антарктиды в позднем голоцене (последние 2000 лет).

Начало этим работам было положено в январе 1970 г., когда сотрудником отдела географии ААНИИ Н.И. Барковым был заложен снегомерный полигон в окрестностях станции Восток. С тех пор и до настоящего времени на этом полигоне на регулярной основе (ежегодно, а в отдельные периоды – ежемесячно) и по единой методике выполнялась снегомерная съемка – измерение высоты снегомерных вех и плотности верхнего слоя снежной толщи. В 1998 г. поблизости от старого полигона был разбит идентичный новый снегомерный полигон, что позволило расширить площадной охват снегомерной съемки и повысить точность результатов. По данным этих наблюдений было установлено, что средняя за последние 50 лет скорость снегонакопления составляет $2.26 \pm 0.1 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$. Таким образом, район станции Восток – одна из самых сухих областей Антарктиды и всей планеты.

В 1980-х гг. измерение скорости снегонакопления было дополнено систематическим мониторингом изотопного состава верхней части снежной толщи и снежных осадков. Первое обобщение этих данных [16] показало наличие статистически значимой корреляции между изотопным составом снежной толщи и температурой воздуха, при которой имело место формирование этих снежных слоев.

Была изучена пространственная изменчивость характеристик снега в различных масштабах. В субкилометровом масштабе было показано, что как скорость накопления, так и изотопный состав снега обладают огромной изменчивостью, которая является основной причиной формирования так называемого «стратиграфического шума» во временных рядах этих параметров. Отношение сигнала к шуму составляет < 0.1 – практическим выводом из этого является

невозможность надежной реконструкции климатической изменчивости по данным лишь одного шурфа или керна, для решения этой задачи требуется осреднение по нескольким рядам. В региональном (территория озера Восток) и континентальном масштабе (Земля Принцессы Елизаветы) было показано, что пространственная изменчивость характеристик снега формируется под влиянием сочетания зональных и азональных факторов [17].

Мониторинг изотопного состава осадков был начат в 2000 г. Ввиду исключительно суровых погодных условий во время полярной ночи и крайне низкой интенсивности снегопадов отбор проб осадков на Востоке – весьма сложная задача. В связи с этим, на сегодняшний день у нас есть пробы отдельных снегопадов лишь за два года – 2000-й и 2017-й. Для каждой пробы имеется полная метеоинформация (температура, давление, ветер, погодные явления), все пробы разбиты на три группы в зависимости от типа осадков (осадки из облаков, ледяные иглы и изморозь). Предварительные результаты исследований этих образцов показывают четкую корреляцию между изотопным составом осадков и температурой воздуха во время их выпадения. Впервые в мировой практике была также определена концентрация кислорода-17 в этих пробах – интерпретация этих данных позволит лучше понять механизм осадкообразования в Центральной Антарктиде.

Параллельно с отбором осадков выполнялся мониторинг изотопного состава поверхностного (верхние 0.30 м) слоя снега. Целью этих работ является изучение процесса передачи климатического сигнала от осадков в снежно-фирновую толщу и искажение этого сигнала постдепозиционными процессами. В частности, было показано, что изотопный состав верхнего слоя снега меняется в спокойные дни без атмосферных явлений (без осадков и позёмка) за счет обмена водяным паром с атмосферой и нижележащими слоями снега. С глубиной величина этих изменений уменьшается, и уже на глубине 0.15–0.20 м изотопный состав снега остается неизменным на протяжении всего годового цикла. По мере увеличения возраста снега и фирна амплитуда изотопных вариаций снижается за счет диффузионного сглаживания.

Обобщение данных, полученных по целому ряду шурфов и мелких скважин, работы в которых велись на протяжении многих лет в зоне активности Российской антарктической экспедиции между станциями Мирный, Восток и Прогресс, позволили реконструировать климатические изменения в этой области за последние 350 лет [17]. Было, в частности, установлено, что в течение этого периода времени данный сектор Антарктиды испытал незначительное потепление. Что интересно, наши данные не обнаружива-

ют существенного положительного тренда температуры во второй половине XX века, связанного с современным антропогенным потеплением, что резко отличает этот регион от остальной части планеты [18].

В настоящий момент в ААНИИ развивается проект Vos2k, целью которого является детальная и свободная от стратиграфического шума реконструкция климата в районе станции Восток за последние 2000 лет по данным минимум трех фирновых кернов глубиной до 70 м. Предварительные результаты этих работ показали, что за последние два тысячелетия температура воздуха в этом районе была стабильной, без значимых трендов на временных отрезках порядка сотен лет. В то же время скорость снегонакопления обнаруживает рост в современную эпоху. Средняя по всему ряду скорость снегонакопления составила $1.8 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$, при этом в последние 200 лет она выросла до $2.1 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$. Современная же скорость накопления по данным инструментальных измерений ($2.26 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$, см. выше), по-видимому, является самой большой за два тысячелетия.

Палеогеографические исследования в антарктических оазисах

В течение последних десятилетий палеогеографы ААНИИ изучали историю развития природной среды свободных от оледенения районов краевой зоны Антарктиды в позднем плейстоцене – голоцене (последние 50 000 лет). Фактический материал собирался в ходе летних сезонных работ Российской (ранее Советской) антарктической экспедиции в восточно-антарктических прибрежных оазисах Бангера, Ширмахера, Холмы Ларсеманн и Холмы Тала, в горных районах Унтер-Зе и Массива Фишера, и на островах Кинг-Джордж, Пингвин, Нельсона в районе Антарктического полуострова – всего в 15 экспедициях с 1987 г. Изучались рельеф, четвертичные отложения суши и донные осадки

водоемов. Полученные данные натурных наблюдений и лабораторных исследований (определение возраста, биогеохимический, гранулометрический, варвометрический, микропалеонтологический и другие анализы отложений), их обобщение и сравнение с материалами зарубежных специалистов позволили получить важные результаты, опубликованные в многочисленных статьях в отечественных и зарубежных журналах, а также в фундаментальных изданиях [19–21].

Для оазисов Бангера, Ширмахера и Холмы Ларсеманн, острова Кинг-Джордж, где расположены российские станции и есть соответствующая поддержка отечественных исследований, были выполнены наиболее детальные на сегодняшний день реконструкции послеледниковых изменений климата, уровня моря и оледенения (рис. 2) с временным разрешением сотни – первые тысячи лет [19–27]. Изучение разрезов древних отложений острова Кинг-Джордж, а также кернов многолетнемерзлых грунтов, извлеченных при бурении скважин в оазисах Ширмахера и Холмы Ларсеманн, предоставило уникальные и неожиданные (на фоне общепринятых представлений) сведения о природной обстановке во время интерстадиала МИС 3 в краевой зоне Антарктиды. Климатические условия в указанных районах были тогда не холоднее современных, а относительный уровень моря в районах острова Кинг-Джордж и оазиса Холмы Ларсеманн превышал современные отметки уровня моря на 30 м [25–27]. Еще более неожиданные результаты были получены в горном Массиве Фишера при изучении толщи морских отложений: их возраст по ЭПР-датировкам (методом электронного парамагнитного резонанса) морских гребешков и моллюсков составил около 850 тыс. лет, предполагая большую молодость Антарктического ледникового щита по сравнению с принятой точкой зрения [19].

Появление этих реконструкций позволило провести на новом фак-

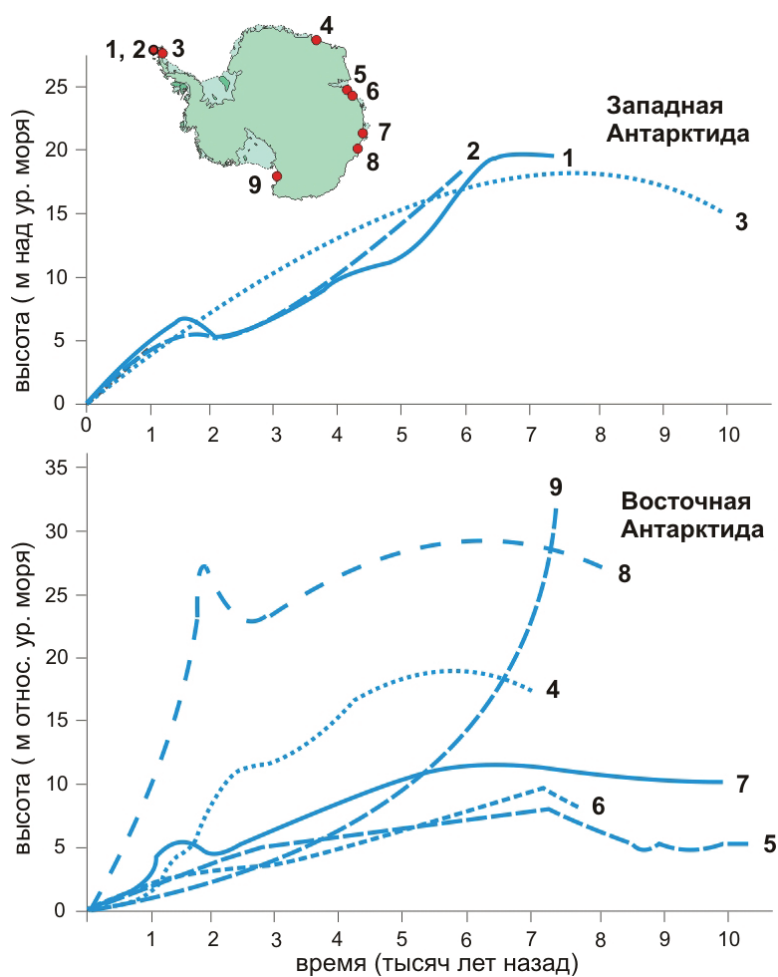


Рис. 2. Изменения относительного уровня моря в краевой зоне Антарктиды. 1 – остров Кинг-Джордж; 2 – остров Ливингстон; 3 – остров Джеймса Росса; 4 – Берег Соля; 5 – Холмы Ларсеманн; 6 – оазис Вестфолль; 7 – оазис Бангера; 8 – острова Уиндмилл; 9 – залив Терра-Нова.

тическом материале сравнительный анализ хода и условий развития оледенения последнего ледникового максимума (ПЛМ) и дегляциации в краевой зоне Антарктиды; анализ был нацелен на выявление роли и взаимосвязи глобальных, региональных и локальных изменений климата, уровня моря и оледенения при формировании общих черт и различий эволюции краевой зоны материка.

Было обосновано, что во время активного развития ПЛМ в краевой зоне Антарктиды (примерно с 26 000 лет назад (л.н.)) приращение ледниковых масс на шельфе заметно опережало рост оледенения на суше, обуславливая дефицит атмосферного питания континентальных районов. Примерно 22 000–17 000 л.н. существовала система сочлененных маломощных (менее 300 м) ледников на участках суши, мощных (часто более 1 000 м) подвижных ледников в глубоких депрессиях и менее подвижных мощных ледниковых масс на выровненных приподнятых пространствах шельфа. Для хода дегляциации краевой зоны были выделены основные фазы: с конца позднего неоплейстоцена – начала

голоцена до 7 500–7 000 л.н.; с 7 500–7 000 до 4 500–4 000 л.н.; с 4 500–4 000 до 1 000 л.н.; последние 1 000 лет. Этот ход в целом определялся глобальными изменениями климата и уровня моря, однако их влияние было наиболее сильным в раннем голоцене, а затем ослабевало одновременно с ростом значения региональных и локальных факторов. Так, после глобальных фаз потепления в раннем голоцене второй максимум тепла в большинстве окраинных районов имел место между 4 000 и 2 000 л.н.; дальнейшие климатические флуктуации в районах схожи похолоданием примерно между 2 000 и 1 500 л.н., тогда как зарегистрированные в ледяных ядрах свидетельства потепления 1 000 л.н. и похолодания во время малого ледникового периода трудно найти в данных из краевой зоны. Реконструированные кривые изменений относительного уровня моря (рис. 2) отражают общий рост уровня с раннего голоцена до максимальных высотных отметок между 6 000–7 500 л.н. и последующую тенденцию его падения. Снижение уровня до 3 000–3 500 л.н. было быстрым, после чего замедлилось, причем между 2 500 и 1 500 л.н. в некоторых районах регистрируется его небольшое повышение. Главные различия кривых состоят в высотах и времени максимального подъема вод. Сравнение кривых по Антарктиде с кривой эвстатических осцилляций обнаруживает сходство лишь главного тренда – подъем уровня до середины голоцена (хотя в Антарктиде пик подъема был на 1 000–1 500 лет раньше) и последующая тенденция к его падению. Других совпадений практически нет, что объясняется большим влиянием в краевой зоне Антарктиды региональных и локальных движений земной коры.

Исследование современного климата Антарктиды

Систематические и регулярные метеорологические наблюдения нашей страны в Антарктиде начались в феврале 1956 г., когда была открыта первая советская станция на ледяном континенте – обсерватория Мирный. На первом этапе этих исследований, продолжавшемся до середины 1960-х гг. [28], основное внимание было сосредоточено на получении и накоплении, анализе и систематизации гидрометеорологической информации. Результаты ее научного обобщения с 1958 г. публиковались в «Информационных бюллетенях Советской Антарктической экспедиции» (выпуски 1–115) и в сборниках статей «Проблемы Арктики и Антарктики». В частности, в них довольно детально и подробно был охарактеризован гидрометеорологический режим районов расположения станций. Выявленные закономерности климата Антарктиды были обобщены в монографии Н.П. Русина «Метео-

рологический и радиационный режим Антарктиды», а также в Атласе Антарктики (см. обзор в [28]).

С началом формирования в конце 1970-х гг. концепции климатического мониторинга активизировались климатические обобщения полученной ранее информации, в частности были опубликованы монографии с описанием радиационного климата и структуры приземного ветра в Антарктиде [28].

Результаты мониторинга температуры воздуха в Антарктике по данным российских и иностранных станций позволили сделать следующие выводы. Для Антарктиды характерна ярко выраженная секторность, причем разные сектора отличаются совершенно различным ходом температуры (рис. 3). Для района Антарктического полуострова и сектора моря Беллингаузена на протяжении всего периода наблюдений был характерен достаточно интенсивный рост температуры. Начиная с конца 1990-х этот рост прекратился и даже сменился похолоданием, что связывается со смещением к северу пояса западных ветров. Береговые станции Восточной Антарктиды в основном характеризуются отсутствием статистически значимого тренда, а в секторе моря Уэдделла (станция Халли-Бэй) наблюдалось похолодание. В центральной Антарктиде (станции Восток и Амундсен-Скотт) начиная с середины 1950-х гг. наблюдается потепление, причем на Южном полюсе в последние годы намечилось усиление этого тренда.

Для оценки состояния атмосферы и ее изменений были начаты и продолжаются до настоящего времени регулярные натурные исследования спектральной прозрачности и так называемых климатически активных составляющих атмосферы: аэрозоля, углекислого газа, метана, озона, окиси углерода. Установлено, что в периоды между крупными вулканическими извержениями значения параметров аэрозольного ослабления солнечной радиации в Антарктиде по-прежнему

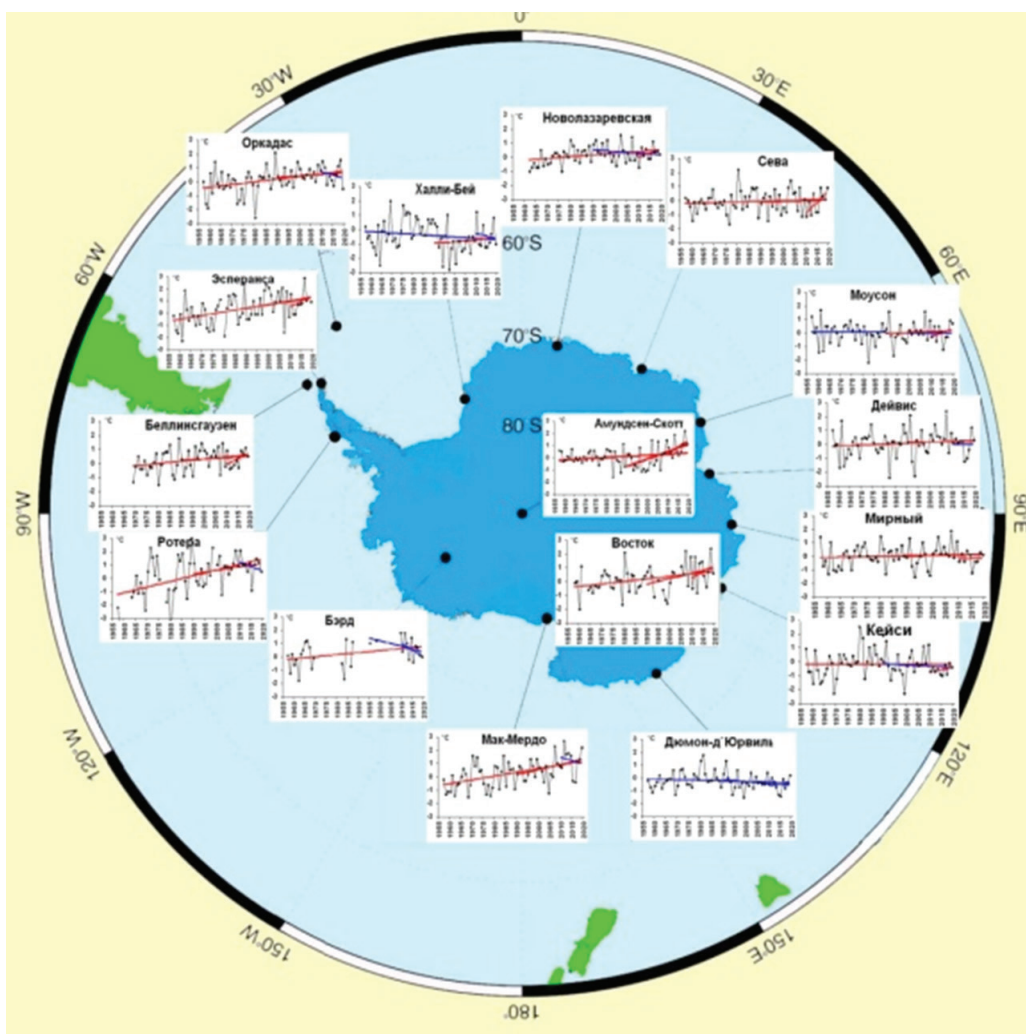


Рис. 3. Временные ряды аномалий среднегодовой температуры воздуха на антарктических станциях, °С.

остаются практически самыми низкими на Земле [29]. По существу, они характеризуют минимальный фоновый уровень спектральной аэрозольной толщины атмосферы и стабильны во времени в пределах своей естественной изменчивости. Это означает, что до настоящего времени антарктическая атмосфера не подвержена влиянию антропогенных аэрозолей.

До начала 2000-х гг. на антарктических станциях отмечалась устойчивая тенденция уменьшения общего содержания озона антарктической весной; в настоящее время наблюдается тенденция возвращения величин общего содержания озона (ОСО) к значениям, характерным для периода, предшествующего проявлению эффекта озоновой дыры [30].

Помимо мониторинговых климатических измерений, сотрудниками

ААНИИ выполнялись специализированные метеорологические исследования. Так, в районе станций Прогресс и Новолазаревская в период с 2004 г. по 2020 г. выполнялись измерения отражательной способности различных типов естественных и искусственных (взлетно-посадочной полосы аэродрома) поверхностей. Обобщение натурных экспериментов, выполненных в 2004–2009 гг., позволило получить новые данные об альбедо различных типов снежно-ледниковой поверхности в районе станции Новолазаревская (ледниковый купол, снежники, искусственные ледяные сооружения). Впервые было реализовано простое техническое решение защиты взлетно-посадочной полосы ледового аэродрома от радиационного и теплового разрушения в период максимальной инсоляции. Это достигается созданием слоя искусственной ледяной крошки толщиной не менее 0.05 м.

Использование беспилотных летательных аппаратов позволило впервые оценить пространственную неоднородность естественных и искусственных снежно-ледниковых поверхностей с позиции их отражательной способности. Работы, выполненные в районе

станций Прогресс и Новолазаревская в 2018–2020 гг., позволили впервые получить сравнительные оценки альбедо различных типов подстилающей поверхности: скального основания оазисов, ледникового купола, включая зону краевых трещин, эпишельфовых озер и озер оазисов, снежников, поверхности шельфового ледника и припая [31].

Комплексные исследования водоемов антарктических оазисов

Комплексные гидрологические, гидрохимические, изотопные и биологические исследования водоемов антарктических оазисов были начаты еще в советское время сотрудниками различных научно-исследовательских учреждений нашей страны. В современную эпоху эти работы были сконцентрированы в районах оазиса Холмы Ларсеманн, оазиса Ширмахера, оазиса Бангера и на острове Кинг-Джордж.

С 2006 г. (51-я и 52-я РАЭ) проводятся гидрологические и гидрохимические наблюдения на озерах оазиса Ширмахера. Согласно полученным экспериментальным данным за период 2007–2009 гг., большинство водоемов оазиса относится к пресным водам малой минерализации с преобладанием атмосферного типа водного питания и выраженным гидрокарбонатно-кальциевым составом воды. Для большинства эпишельфовых озер минерализация несколько выше и составляет 35–97 мг/л со сменой ионного состава воды до хлоридно-натриевого (кальциевого) [32] (рис. 4). К отличительным гидрохимическим особенностям озер оазиса относится и локальное распространение сульфатно-кальциевых (натриевых)

вод повышенной минерализации (до 600–900 мг/л), характерных для мелких водоемов с тенденцией к высыханию к концу летнего сезона.

Важно отметить высокое содержание растворенного кислорода в озерах – до 25 мг/л. Причем его содержание меняется не только в течение сезона, но и по глубине. Максимальная концентрация O₂ иногда наблюдается на дне, что связано с фотосинтетической активностью водорослей, живущих в нижних слоях водной толщи. Нужно отметить также возрастание содержания биогенных элементов в озерах оазиса по сравнению с 1983/1984 г., связанное с антропогенным поступлением хозяйственно-бытовых стоков станции. В настоящее время усиление антропогенной нагрузки со стороны полярных станций наряду с интенсификацией биохимических процессов, связанных с потеплением климата оазиса, приводит к постепенному увеличению фоновых концентраций в водоемах всего оазиса. Выявленное возрастание содержания растворенного кремния в озерных водах может быть обусловлено интенсификацией криогенных процессов под влиянием климатических изменений в оазисе.

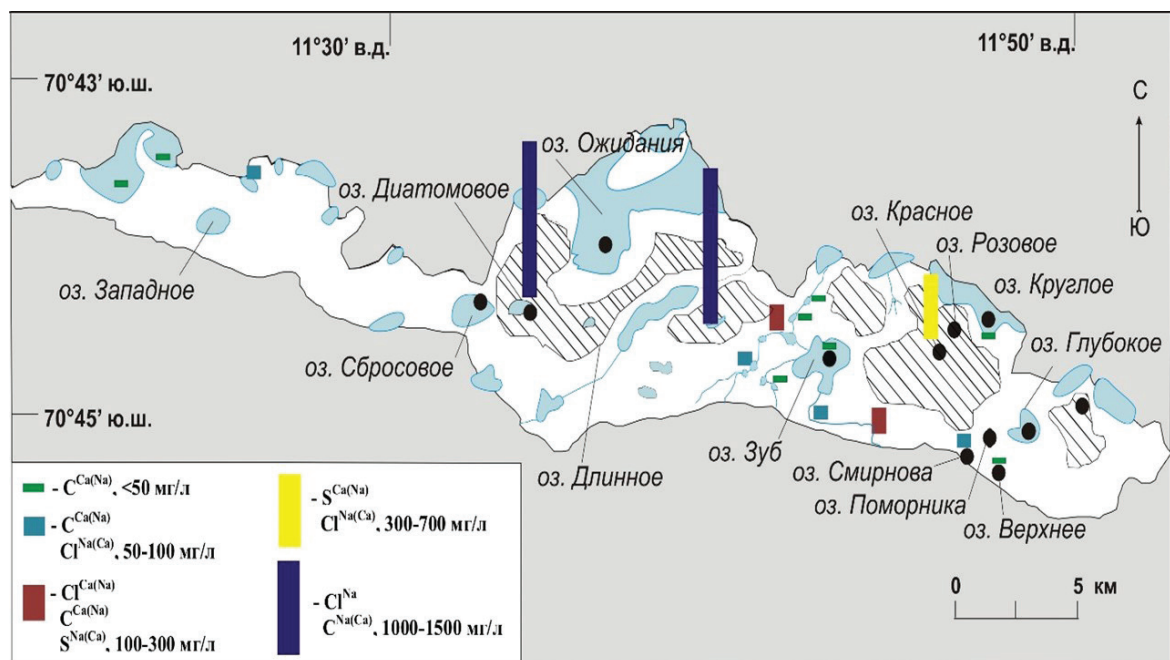


Рис. 4. Гидрохимические параметры озер оазиса Ширмахера.

В следующем сезоне были продолжены гидрологические, гидрохимические и изотопные исследования озер оазиса Ширмахера. Гидрологические измерения заключались в регулярных замерах уровня воды на водомерных постах. Эти наблюдения позволили выявить сезонный ход расхода воды в соединяющих озера речках, а также (в начале января 2016 г.) зафиксировать каскадный прорыв целой серии озер. Каскад прорывных озер (Станционное, Топографов с одной стороны, Смирнова, Поморника с другой стороны, а далее Глубокое, Лагерное, и эпишельфовое Привальное) действует практически каждый год во время максимального таяния. Однако ранее отмечаемый прорыв озера Верхнее уже не происходит в связи с возросшим водозабором из озера на нужды станции.

Гидрохимические исследования проводились на 87 водоемах оазиса. Отобрана 21 проба воды для дальнейшего анализа на содержание биогенных веществ и 50 проб для проведения полного гидрохимического анализа, 27 проб на содержание зоопланктона, 109 проб на измерение изотопного состава воды ($\delta^{18}\text{O}$, δD) и 10 проб снега.

На основании полученных в летний сезон 61-й РАЭ данных и ранее опубликованных исследований можно охарактеризовать полученные группы озер.

В первую (I) группу входят сточные озера южной части оазиса, питающиеся преимущественно тальми ледниковыми водами. Воды данной группы озер значительно обогащены легкими изотопами, характеризуются значениями $\delta\text{D} = -227\dots-296\text{‰}$ и $\delta^{18}\text{O} = -28.9\dots-37.5\text{‰}$. Для них характерны низкие температуры и самая низкая минерализация по сравнению с другими группами озер. Содержание растворенного кислорода в среднем не отличается от III и IV группы. Также для данной группы озер наблюдаются самые низкие значения хлорофилла «а» и взвешенного вещества.

Вторую (II) отчетливую группу составляют небольшие бессточные водоемы с ограниченным водным питанием, располагающиеся в центре оазиса на водораздельных пространствах и в северной части. Озера данной группы из-за своих небольших размеров хорошо прогреваются в летнее время, и содержание кислорода в них ниже, чем в озерах других групп, а минерализация отдельных озер этой группы возрастает в летний сезон до 960 мг/л в связи с разбавлением солей, находящихся на дне озерных ванн.

Концентрации хлорофилла «а» и взвешенного вещества в данной группе выше, чем в I и III группах озер. Значения pH данной группы характеризует водоемы как нейтральные и слабощелочные. В летнее время поверхность оазиса, благодаря сильному поглощению солнечной энергии темной поверхностью озерного дна и незначительным альбедо, получает солнечного тепла в три раза больше, чем окружающая снежно-ледяная поверхность. Скальная поверхность оазиса иногда нагревается до $+26\text{ °C}$, а температура приземного слоя воздуха повышается до $+5\text{ °C}$. Относительная влажность воздуха в среднем за год не превышает 52%. При таких условиях происходит сильное испарение с поверхности озер, что подтверждается отклонением изотопного состава вод данной группы от линии метеорных вод. Воды второй группы озер значительно обогащены тяжелыми изотопами, характеризуются значениями $\delta\text{D} = -166\dots-214\text{‰}$ и $\delta^{18}\text{O} = -16.2\dots-25.7\text{‰}$.

Промежуточные гидрохимические характеристики имеют озера третьей группы (III) со смешанным снежно-ледниковым питанием, летним стоком и слабой минерализацией. В зависимости от размера и глубины в летний период озера этой группы прогреваются от $+0.3\text{ °C}$ до $+10.8\text{ °C}$. Воды данной группы характеризуются значениями $\delta\text{D} = -212\dots-246\text{‰}$ и $\delta^{18}\text{O} = -26.1\dots-31.6\text{‰}$.

Четвертую, малочисленную группу (IV) составляют глубокие эпишельфовые озера, которые не оттаивают круглый год (летом бывают только закраины у берегов). Для озер этой группы характерны низкие температуры воды, повышенное содержание кислорода, небольшая минерализация до 100 мг/л. Содержание взвешенного вещества в эпишельфовых водоемах выше по сравнению с озерами других групп, так как они являются приемными водоемами стекающих с поверхности оазиса ручьев и временных водотоков, которые приносят с собой взвешенные частицы. Воды данной группы характеризуются значениями изотопов воды $\delta\text{D} = -224\dots-251\text{‰}$ и $\delta^{18}\text{O} = -28.5\dots-31.7\text{‰}$.

В ходе 54-го сезона РАЭ в оазисе Ширмахера впервые проводились радиолокационные исследования на снежниках, озерах и эпишельфовых водоемах. Результаты анализа георадарных профилей позволили

получить сведения о толщине льда озер, трещинах в ледовом покрове прилегающих к оазису территорий покровного и шельфового ледников, рельефе дна и мощности донных отложений. Также метод радиолокации оказался весьма показателен для прогнозирования формирования внутриснежниковой гидрографической сети.

Так, на профиле, проходящем через впоследствии обрушившуюся пещеру, четко видно ледяной козырек над пещерой, видны процесс постепенного образования полости и структура слоев снега и льда, а также система трещин и проседание снежника в центральной части примерно на 1 м.

В рамках сезонных работ 58-й и 59-й РАЭ впервые выполнено комплексное исследование химического состава вод озер полуострова Файлдс (остров Кинг-Джордж), в результате которого получена новая информация о характеристиках, современных процессах и факторах формирования химического состава водоемов [33].

Состав озерных вод полуострова (включая основные ионы, микроэлементы, биогенные элементы и изотопы $\delta^{18}\text{O}$ и δD) в большинстве случаев схож, хотя и подвержен некоторым изменениям в зависимости от местоположения водоема, особенностей его водосбора, времени вскрытия водоема ото льда и степени морского влияния на него.

По ионному составу воды озера полуострова Файлдс относятся к хлоридному классу натриевой группы различных типов. Анализ биогенных элементов в летний период 58-й РАЭ показал наличие малых концентраций фосфатов, нитритов и нитратов и относительно высокое содержание силикатов в большинстве озер. Содержание тяжелых металлов (Cu, Fe, Mn, Zn, Ni, Al, Cd) ниже предельно допустимых концентраций и в большинстве водоемов незначительно. Однако выполненные повторные наблюдения на озерах полуострова Файлдс во время летнего сезона 65-й РАЭ показали резкое возрастание содержания биогенных элементов в некоторых озерах полуострова, что связано как с изменением трофического статуса водоемов, так и с возросшей антропогенной нагрузкой [33].

При относительной однородности состава вод большинства озер на полуострове выделяются несколько объектов. В первую очередь это озеро Длинное, а также расположенные у краевой части ледника Беллингаузена ручьи Глетчер и Артигас и озеро 3L3. Озеро Длинное отличается самыми высокими значениями общей минерализации и повышенным содержанием силикатов. При этом по преобладающим ионам воды озера относятся к тому же типу, что и большинство озер полуострова, – хлоридно-натриевому. Кроме того, в озере Длинное зафиксированы

сравнительно высокие концентрации тяжелых металлов Cu, Fe, Mn, Zn, Al. В ручьях Глетчер и Артигас были зафиксированы максимальные из измеренных во всех водных объектах полуострова концентраций Fe и Al. Ручей Артигас вытекает из озера 3L3, в котором также были обнаружены повышенные концентрации Fe и Al. К тому же озера Длинное и 3L3 отличаются от остальных озер полуострова по содержанию биогенных элементов: в летний период 58-й РАЭ только в них были зафиксированы окисленные формы азота ($\text{NO}_2 + \text{NO}_3$).

Полученная в ходе работ характеристика гидрохимического состава вод полуострова Файлдс может быть использована в качестве основы для дальнейших исследований в данном направлении.

В летний сезон 60-й РАЭ (декабрь 2014 – январь 2015 г.) выполнен мониторинг зоопланктонных сообществ пресноводных озер оазиса Холмы Ларсеманн. По гидробиологической характеристике исследованные водоемы данного оазиса характеризуются весьма бедным видовым разнообразием, с доминированием эндемичных для Восточной Антарктиды видов, с низкими показателями численности и биомассы.

Бедное видовое разнообразие, возможно, связано не только с изолированностью многих озер, но также с отмеченным возрастанием антропогенной нагрузки и, как следствие, ухудшением качества вод. Это видно, например, по изменениям концентрации фосфатов в воде некоторых водоемов.

Для оценочных прогнозов изменения экосистем озер оазиса необходимо продолжение мониторинга, наблюдения за изменением баланса воды и веществ озер, а также гидробиологическими показателями.

Исследования Южного океана

Основным направлением экспедиционных исследований океанологического режима, регулярно проводя-

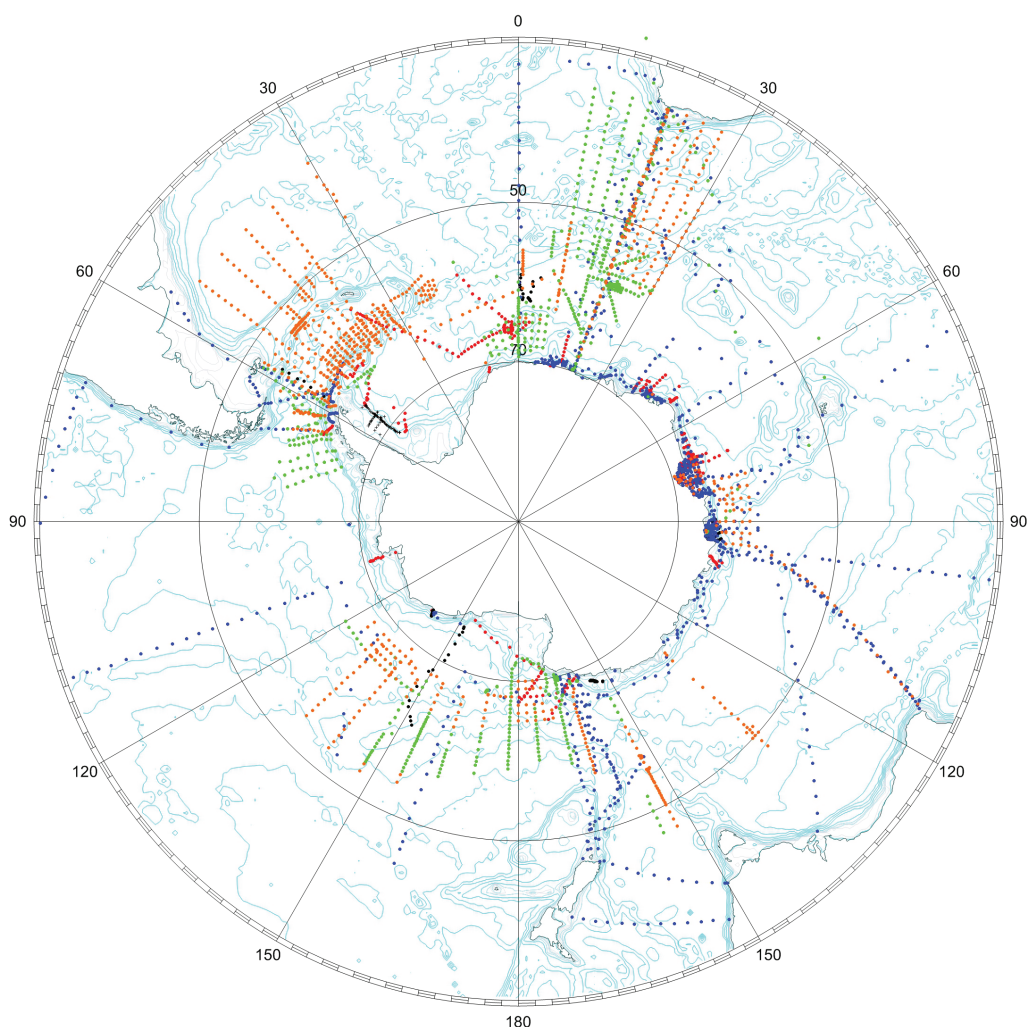


Рис. 5. Океанологические исследования Южного океана судами ААНИИ, выполненные в рамках национальных и международных программ в период с 1975 г. по настоящее время.

щихся в ААНИИ в рамках работ РАЭ, является мониторинг происходящих изменений в структуре и характеристиках вод Южного океана, с которыми в значительной степени связаны наблюдаемые изменения глобального климата. Наиболее важной является область шельфа – материкового склона Антарктиды, с которой связаны процессы образования плотных холодных вод, опускание (каскадинг) которых с шельфа в абиссальную область ведет как к насыщению кислородом (вентиляции) глубинных вод, так и к формированию важнейшей составляющей крупномасштабной циркуляции Мирового океана – Антарктической донной воды (АДВ). Такие наблюдения в рамках сезонных работ Российской антарктической экспедиции проводятся в различных районах Южного океана – морях Со-

дружества, Дейвиса, Моусона, Амундсена, Беллингаузена, в проливах Брансфилд и Дрейка (рис. 5).

Основной областью исследования в последние десятилетия стал залив Прюдс моря Содружества, в акватории которого проведено значительное количество специально запланированных наблюдений, позволивших установить важную роль региона как еще одной области, где формируется Антарктическая донная вода (АДВ). Непосредственно процессы опускания плотных вод с шельфа удалось обнаружить на разрезе вдоль 70° в. д., который в период с 2004 по 2016 гг. был выполнен девять раз в одних и тех же координатах, что позволило выявить особенности межгодовой изменчивости процессов. В 2016 г. в данной области выполнен полигон, позволивший получить представление о мезомасштабных пространственных особенностях процессов распространения вод на шельфе и материковом склоне.

На основе экспедиционных и теоретических исследований получены достаточно полные представления о характеристиках и структуре водных масс на шельфе и материковом склоне как отражении процессов

формирования АДВ, получены оценки их межгодовой изменчивости, актуальные для изучения причин происходящих изменений климата.

Выполнено детальное исследование трансформации и перемешивания вод в области антарктического склонового фронта в крутых (срединных) частях материкового склона, а также в малоисследованной глубоководной части склона.

Анализ проявлений каскадинга показал, что наиболее часто плотные воды стекают в виде дискретных меандров или плюмов. Реже наблюдаются интрузии, оторванные от склона струи и вихревые линзы. Глубина стока меандров определяется плотностью опускающихся вод, эффективностью их перелива через бровку шельфа и крутизной материкового склона.

В настоящее время продолжаются экспедиционные и теоретические исследования, включая моделирование глубоководного стока плотных шельфовых вод в области антарктического материкового склона с конфигурацией шельфа и склона, близкой к фактической, и с термохалинными характеристиками шельфовых вод, соответствующих наблюдаемому.

Результаты океанологических исследований обобщены в целом ряде работ в российских и зарубежных научных журналах [34].

В 2011 и 2012 гг. были выполнены сравнительные исследования припайных льдов в заливе Саннефьорд в районе оазиса Холмы Ларсеманн, что позволило оценить их максимальную толщину и доказать существование многолетнего припая в этом районе. В результате уникальных наблюдений с помощью океанографических зондирующих комплексов и подводной видеоаппаратуры удалось зафиксировать присутствие слоя конжеляционного внутриводного льда весенне-летнего происхождения, оценить толщину этого слоя, размеры и формы кристаллов. Выявлены термохалинные условия в подледном слое океана, сопровождающие формирование внутриводного льда [35].

Заключение

В настоящей работе выполнен краткий и не претендующий на полноту обзор результатов научных исследований Арктического и антарктического НИИ Росгидромета в Антарктике за период с конца 1950-х гг. по настоящее время. В частности, в данной статье приведены некоторые ключевые результаты палеогеографических, гляциологических, климатических, метеорологических и океанологических исследований.

На станции Восток завершено бурение ледяной скважины глубиной 3769 м, а изучение добытого из нее ледяного керна позволило реконструиро-

вать климат планеты за последние 440 тыс. лет. 5 февраля 2012 г. скважина достигла поверхности подледникового озера Восток. Путем прямых (изучение керна озерного льда и озерной воды) и дистанционных (радиолокационных и сейсмических) исследований были получены уникальные данные о морфологии озера, его гидрологическом режиме, а также о его возможных микробных обитателях.

Мониторинг изотопного состава и скорости накопления снега в окрестностях озера Восток позволил установить переходную функцию зависимости между приземной температурой воздуха и изотопным составом снежной толщи, а также реконструировать температуру и баланс массы снежной поверхности за последние 350 лет.

В результате палеогеографических исследований в антарктических оазисах были выполнены наиболее детальные на сегодняшний день реконструкции изменения климата, уровня моря и оледенения отдельных районов краевой зоны Антарктиды за последние 50 тыс. лет; выявлены общие черты хода и условий, а также региональные различия изменений климата, уровня моря и оледенения краевой зоны материка. В целом эти работы способствовали развитию методики палеогеографических исследований на шестом континенте.

Мониторинг метеорологических условий на пяти российских антарктических станциях (Мирный, Прогресс, Новолазаревская, Беллинсгаузен и Восток) совместно с аналогичными работами на зарубежных станциях позволил выявить секторные различия климата Антарктики и выявить проявление современных глобальных климатических изменений в различных районах материка.

Комплексные исследования водоемов оазисов Бангера, Ширмахера, Холмы Ларсеманн и острова Кинг-Джордж выявили закономерности гидрологического, гидрохимического и изотопного режима антарктиче-

ских озер, а также их биологическое разнообразие.

В результате океанологических исследований в морях Южного океана получены достаточно полные представления о характеристиках и структуре водных масс на шельфе и материковом склоне как отражении процессов формирования АДВ; получены оценки их межгодовой изменчивости, актуальные для изучения причин происходящих изменений климата. Выполнено детальное

исследование трансформации и перемешивания вод в области антарктического склонового фронта в крутых (срединных) частях материкового склона, а также в малоисследованной глубоководной части склона.

Благодарности

Работы выполнены в рамках проектов РФФИ: 98-05-65184, 02-05-22003, 03-05-65295, 05-05-66803, 05-05-65248, 08-05-00824, 08-05-00767, 10-05-93106, 10-05-01049, 12-05-00607, 13-05-00607, 14-05-00548, 14-05-00787, 14-05-93106, 15-35-50949, 16-35-50065, 16-54-00197, 17-05-00037, 17-05-01168, 18-05-00334.

Литература

1. N.I. Vasiliev, P.G. Talalay, N.E. Bobin, V.K. Chistyakov, V.M. Zubkov, A.V. Krasilev, A. N. Dmitriev, S.V. Yankilevich, V.Y. Lipenkov *Ann. Glaciol.*, 2007, 47, 10. DOI: 10.3189/172756407786857776.
2. J.R. Petit, I. Basile, A. Leroyuet, D. Raynaud, C. Lorius, J. Jouzel, M. Stievenard, V.Ya. Lipenkov, N.I. Barkov, B.B. Kudryashov, M. Davis, E. Saltzman, V.M. Kotlyakov *Nature*, 1999, 387, 359. DOI: 10.1038/387359a0.
3. D. Raynaud, J.M. Barnola, R. Souchez, R. Lorrain, J.R. Petit, P. Duval, V.Ya. Lipenkov *Nature*, 2005, 436, 39. DOI: 10.1038/43639b.
4. V.Ya. Lipenkov, D. Raynaud, M.F. Loutre, P. Duval *Quaternary Sci. Rev.*, 2011, 30(23-24), 3280. DOI: 10.1016/j.quascirev.2011.07.013.
5. A.N. Salamatina, E.A. Tsyganova, S.V. Popov, V.Ya. Lipenkov, В *Physics of Ice Core Record*, Ed. T. Hondoh, Japan, Sapporo, Hokkaido University Press, 2009, pp. 167–194.
6. В.Я. Липенков, А.А. Екайкин *Лёд и Снег*, 2018, 58(2), 255. DOI: 10.15356/2076-6734-2018-2-255-260.
7. V.Ya. Lipenkov, A.N. Salamatina, W. Jiang, F. Ritterbusch, M.L. Bender, A. Orsi, A. Landais, T. Uchida, A.A. Ekaykin, D. Raynaud, G.-M. Yang, Z.-T. Lu, J. Chappelaz *Geophys. Res. Abstr.*, 2019, 21, EGU2019-8505.
8. А.А. Екайкин, В.Я. Липенков, А.Н. Верес, А.В. Козачек, А.А. Скажун *Лёд и Снег*, 2019, 59(4), 437. DOI: 10.15356/2076-6734-2019-4-463.
9. А.Р. Капитса, J.K. Ridley, G.D. Robin, M.J. Siebert, I. Zotikov *Nature*, 1996, 381, 684. DOI: 10.1038/381684a0.
10. С.В. Попов, В.Н. Масолов, В.В. Лукин *Лёд и Снег*, 2011, № 1(113), 25.
11. А.А. Екайкин, V.Ya. Lipenkov, J.R. Petit, S. Johnsen, J. Jouzel, V. Masson-Delmotte *J. Geophys. Res.*, 2010, 115(C5), C05003. DOI: 10.1029/2009JC005329.
12. В.Я. Липенков, Е.В. Полякова, А.А. Екайкин *Лёд и Снег*, 2012, 52(4), 65. DOI: 10.15356/2076-6734-2012-4-65-77.
13. В.Я. Липенков, В.В. Лукин, С.А. Булат, Н.И. Васильев, А.А. Екайкин, Г.Л. Лейченко, В.Н. Масолов, С.В. Попов, Л.М. Саватюгин, А.Н. Саламатин, Ю.А. Шибяев В *Полярная криосфера и воды суши. Сер. Вклад России в Международный полярный год 2007/08*, под ред. В.М. Котлякова, РФ, Москва, Paulsen, 2011, 320 с.
14. V.Ya. Lipenkov, A.A. Ekaykin, E.V. Polyakova, D. Raynaud *Phil. Trans. R. Soc. A*, 2016, 374(2059), 20140303. DOI: 10.1098/rsta.2014.0303.
15. А.А. Екайкин, V.Ya. Lipenkov, A.V. Kozachek, D.O. Vladimirova *Isot. Environ. Health Stud.*, 2016, 52(4-5), 468. DOI: 10.1080/10256016.2015.1129327.
16. А.А. Екайкин, V.Ya. Lipenkov, I.N. Kuzmina, J.R. Petit, V. Masson-Delmotte, S.J. Johnsen *Ann. Glaciol.*, 2004, 39, 569.
17. А.А. Екайкин, D.O. Vladimirova, V.Ya. Lipenkov, V. Masson-Delmotte *Clim. Past*, 2017, 13, 61. DOI: 10.5194/cp-13-61-2017.
18. PAGES2k Consortium *Nature Scientific Data*, 2017, 4, 170088. DOI: 10.1038/sdata.2017.88.
19. Антарктика, Геоморфологический атлас, РФ, С.-Петербург, Изд-во «Карта», 2011, 105 карт, 256 с.
20. Палеоклимат полярных областей Земли в голоцене, под ред. Д.Ю. Большакова, С.Р. Веркулича, РФ, С.-Петербург, ААНИИ, 2019, 204 с.
21. С.Р. Веркулич *Автореф. дис. док. географ. наук*, ИГ РАН, ААНИИ, РФ, Москва, 2011, 46 с.
22. S. Berg, M. Melles, D. Gore, S. Verkulich, Z. Pushina *Antarct. Sci.*, 2020, 32(Sp. Iss. 2), 107. DOI: 10.1017/S0954102019000476.
23. S.R. Verkulich, A. Hiller *Antarct. Sci.*, 1994, 6(3), 395. DOI: 10.1017/S0954102094000593.
24. M. Melles, T. Kulbe, S.R. Verkulich, H.-W. Hubberten В *The Antarctic Region: Geological Evolution and Processes: Proc. 7th International Symposium on Antarctic Earth Sciences (Italy, Siena, 1995)*, Ed. C.A. Ricci, Italy, Siena, Terra Antarctica Publ., 1997, pp. 809-820.
25. С.Р. Веркулич *Известия РАН. Сер. географическая*, 2007, № 4, 38.
26. С.Р. Веркулич *Криосфера Земли*, 2009, 13(2), 73.
27. С.Р. Веркулич, З.В. Пушина, И.Н. Сократова, М. Меллес, Б. Диекманн *Материалы гляциологических исследований*, 2007, № 102, 23.
28. Л.М. Саватюгин *Российская наука в Антарктике*, РФ, Москва, ИД «Городец», 2004, 304 с.
29. В.Ф. Радионов, Е.Н. Русина, Е.Е. Сибир *Метеорология и гидрология*, 2020, № 2, 35.
30. Е.Е. Сибир, В.Ф. Радионов, Е.Н. Русина *Метеорология и гидрология*, 2020, № 3, 33.
31. Д.М. Журавский, У.В. Прохорова, Б.В. Иванов, А.С. Янжура, Н.М. Куртчиков, М.В. Курапов *Исследование Земли из Космоса*, 2019, № 4, 18. DOI: 10.31857/S0205-96142019418-28.

Images & Tables

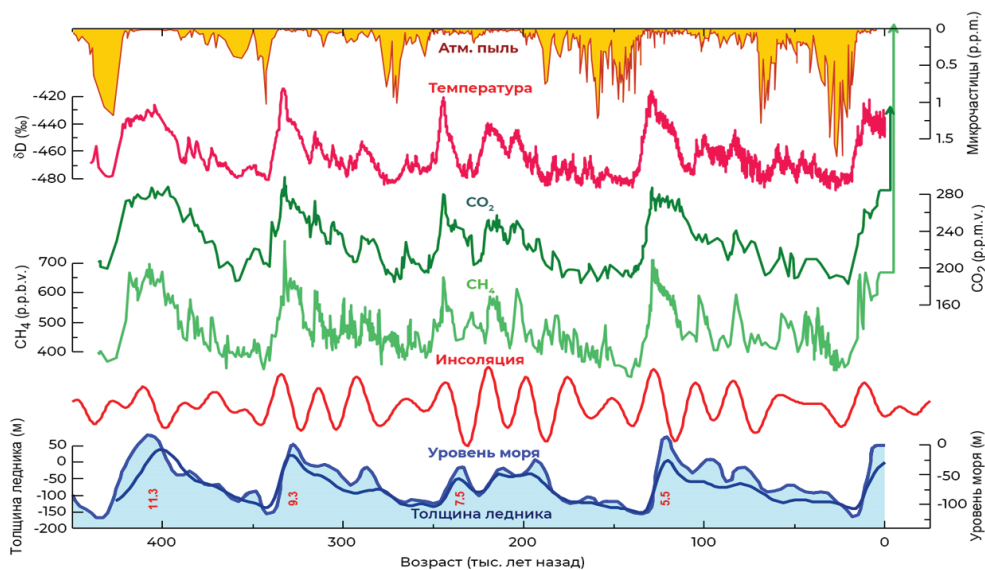


Fig. 1. History of Earth's climate over the past 440 ka based on Vostok deep ice core data [3]. Top to bottom: the concentration of atmospheric dust in ice; air temperature reconstructed from the isotopic content (δD) of ice layers; concentration of greenhouse gases in the planet's atmosphere; solar forcing (summer insolation at 65° north); sea level (blue shading) and the Antarctic ice sheet thickness at Vostok (dark-blue curve).

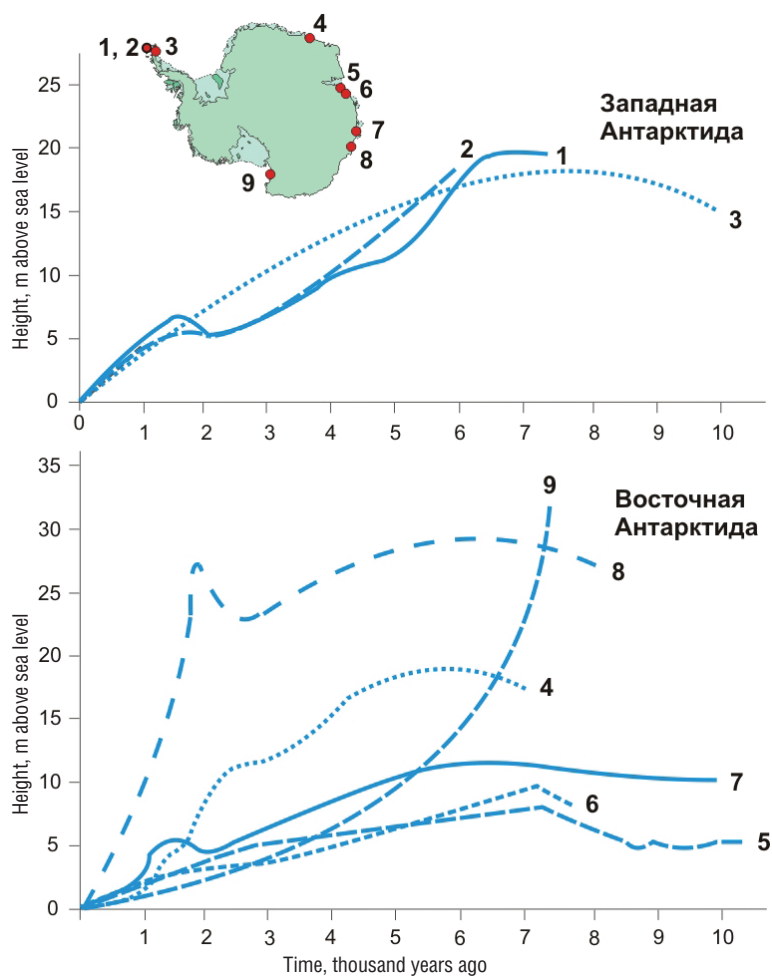


Fig. 2. Changes in relative sea level in the coastal zone of Antarctica. 1 – King George island; 2 – Livingston isl.; 3 – James Ross isl.; 4 – Soya Coast; 5 – Larsemann Hills; 6 – Vestfold oasis; 7 – Bunger oasis; 8 – Windmill isls.; 9 – Terra Nova Bay.

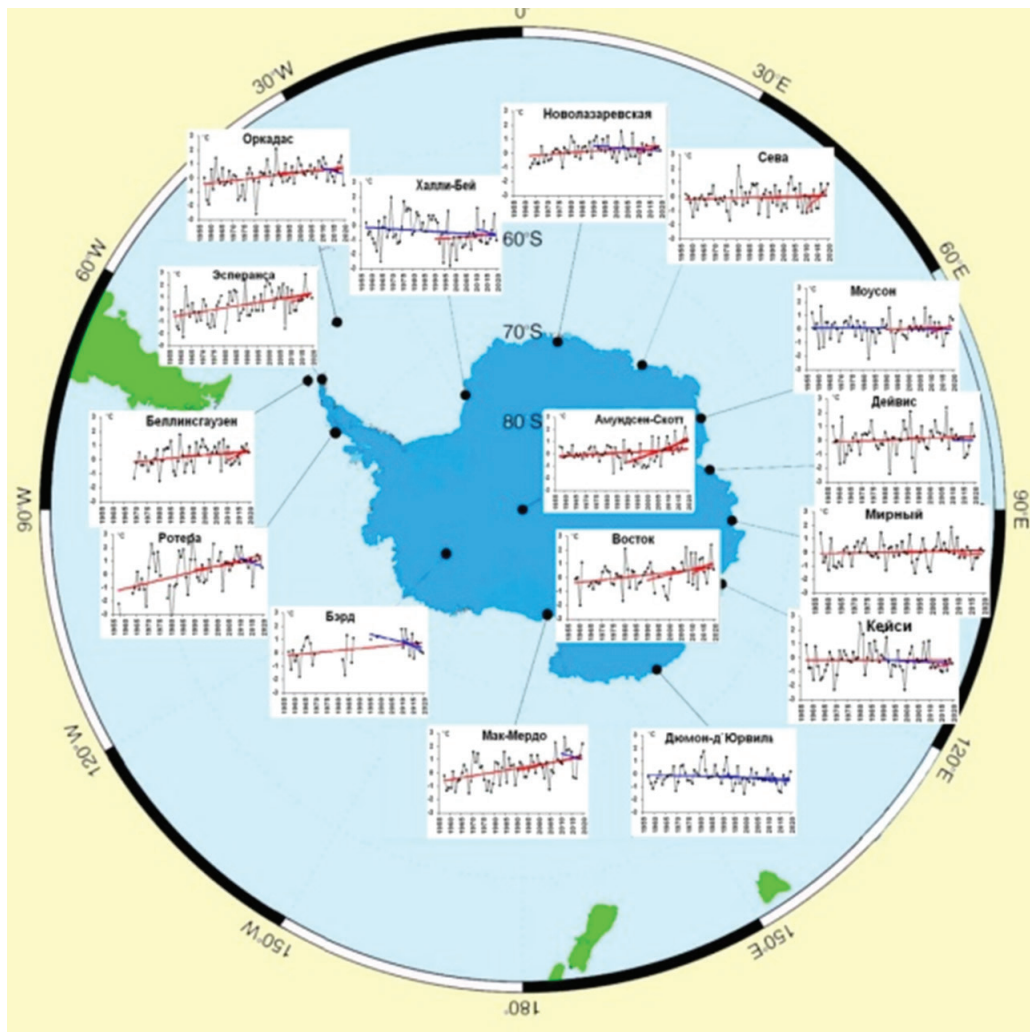


Fig. 3. Time series of mean air temperature anomalies at Antarctic stations, °C.

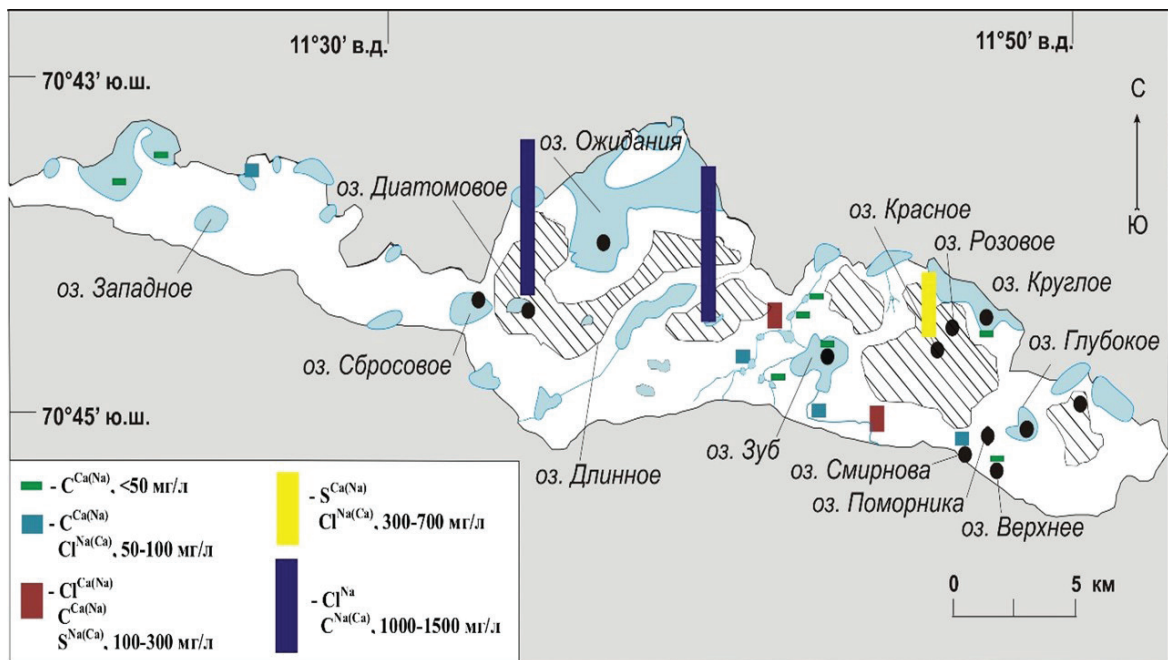


Fig. 4. Hydrochemical parameters of the Schirmacher Oasis lakes.

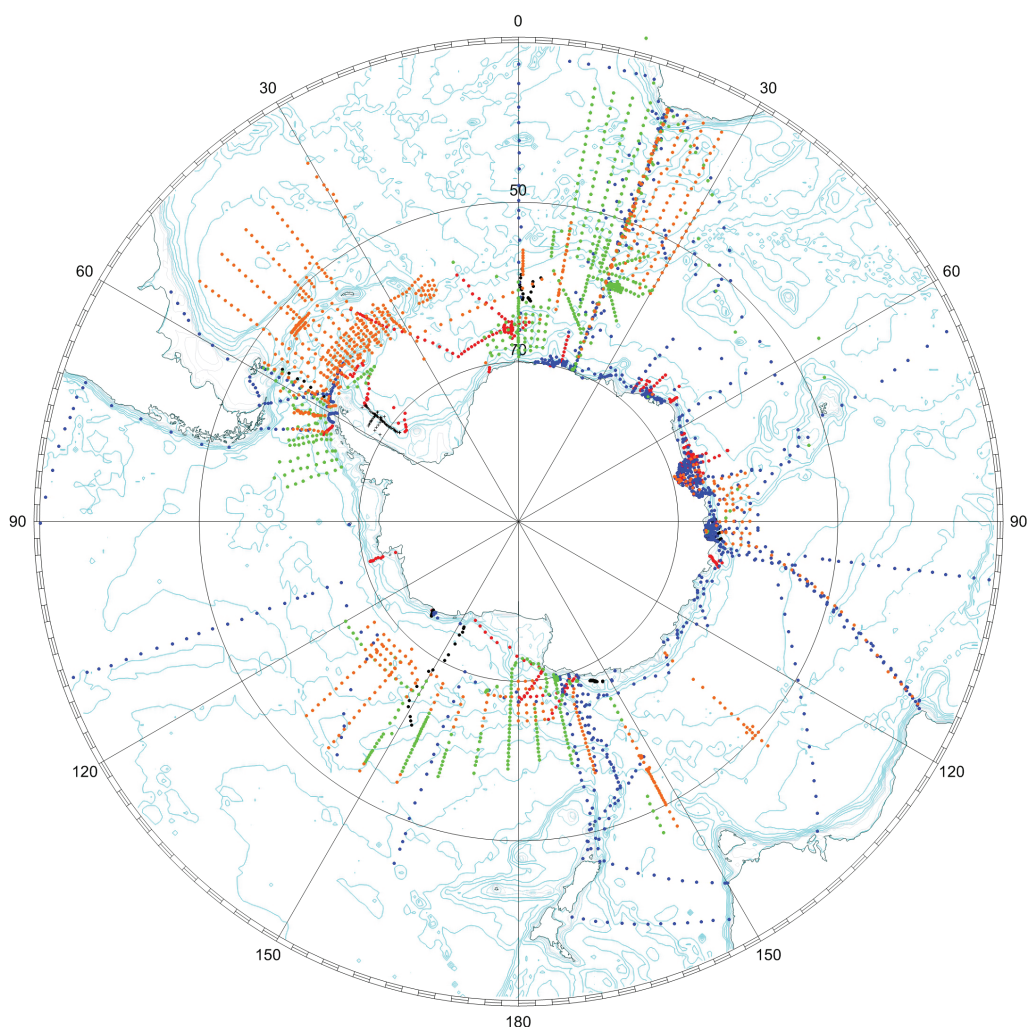


Fig. 5. Oceanographic investigations in the Southern Ocean by AARI's ships implemented in the frames of national and international programs since 1975 till present.

References

1. N.I. Vasiliev, P.G. Talalay, N.E. Bobin, V.K. Chistyakov, V.M. Zubkov, A.V. Krasilev, A. N. Dmitriev, S.V. Yankilevich, V.Y. Lipenkov *Ann. Glaciol.*, 2007, 47, 10. DOI: 10.3189/172756407786857776.
2. J.R. Petit, I. Basile, A. Leruyet, D. Raynaud, C. Lorius, J. Jouzel, M. Stievenard, V.Ya. Lipenkov, N.I. Barkov, B.B. Kudryashov, M. Davis, E. Saltzman, V.M. Kotlyakov *Nature*, 1999, 387, 359. DOI: 10.1038/387359a0.
3. D. Raynaud, J.M. Barnola, R. Souchez, R. Lorrain, J.R. Petit, P. Duval, V.Ya. Lipenkov *Nature*, 2005, 436, 39. DOI: 10.1038/43639b.
4. V.Ya. Lipenkov, D. Raynaud, M.F. Loutre, P. Duval *Quaternary Sci. Rev.*, 2011, 30(23-24), 3280. DOI: 10.1016/j.quascirev.2011.07.013.
5. A.N. Salamatina, E.A. Tsyganova, S.V. Popov, V.Ya. Lipenkov In *Physics of Ice Core Record*, Ed. T. Hondoh, Japan, Sapporo, Hokkaido University Press, 2009, pp. 167–194.
6. V.Ya. Lipenkov, A.A. Ekaykin *Ice and Snow*, 2018, 58(2), 255 (in Russian).- DOI: 10.15356/2076-6734-2018-2-255-260.
7. V.Ya. Lipenkov, A.N. Salamatina, W. Jiang, F. Ritterbusch, M.L. Bender, A. Orsi, A. Landais, T. Uchida, A.A. Ekaykin, D. Raynaud, G.-M. Yang, Z.-T. Lu, J. Chappelaz *Geophys. Res. Abstr.*, 2019, 21, EGU2019-8505.
8. A.A. Ekaykin, V.Ya. Lipenkov, A.N. Veres, A.V. Kozachek, A.A. Skakun *Ice and Snow*, 2019, 59(4), 437 (in Russian). DOI: 10.15356/2076-6734-2019-4-463.
9. A.P. Kapitsa, J.K. Ridley, G.D. Robin, M.J. Siebert, I. Zotikov *Nature*, 1996, 381, 684. DOI: 10.1038/381684a0.
10. S.V. Popov, V.N. Masolov, V.V. Lukin *Ice and Snow*, 2011, № 1(113), 25 (in Russian).
11. A.A. Ekaykin, V.Ya. Lipenkov, J.R. Petit, S. Johnsen, J. Jouzel, V. Masson-Delmotte *J. Geophys. Res.*, 2010, 115(C5), C05003. DOI: 10.1029/2009JC005329.
12. V.Ya. Lipenkov, E.V. Polyakova, A.A. Ekaykin *Ice and Snow*, 52(4), 65 (in Russian). DOI: 10.15356/2076-6734-2012-4-65-77.
13. V.Ya. Lipenkov, V.V. Lukin, S.A. Bulat, N.I. Vassiliev, A.A. Ekaykin, G.L. Leitchenkov, V.N. Masolov, S.V. Popov, L.M. Savatyugin, A.N. Salamatina, Yu.A. Shibaev In *Polar Cryosphere and Waters of Land, Ser. Contribution of Russia to the International Polar Year 2007/08*, Ed. V.M. Kotlyakov, RF, Moscow, Paulsen, 2011, 320 pp. (in Russian).
14. V.Ya. Lipenkov, A.A. Ekaykin, E.V. Polyakova, D. Raynaud *Phil. Trans. R. Soc. A*, 2016, 374(2059), 20140303. DOI: 10.1098/rsta.2014.0303.

15. A.A. Ekaykin, V.Ya. Lipenkov, A.V. Kozachek, D.O. Vladimirova *Isot. Environ. Health Stud.*, 2016, 52(4-5), 468. DOI: 10.1080/10256016.2015.1129327.
16. A.A. Ekaykin, V.Ya. Lipenkov, I.N. Kuzmina, J.R. Petit, V. Masson-Delmotte, S.J. Johnsen *Ann. Glaciol.*, 2004, 39, 569.
17. A.A. Ekaykin, D.O. Vladimirova, V.Ya. Lipenkov, V. Masson-Delmotte *Clim. Past*, 2017, 13, 61. DOI: 10.5194/cp-13-61-2017.
18. **PAGES2k Consortium** *Nature Scientific Data*, 2017, 4, 170088. DOI: 10.1038/sdata.2017.88.
19. *Antarctica. Geomorphological Atlas*, RF, Snt. Petersburg, "Karta" Publ., 2011, 105 maps, 256 pp. (in Russian).
20. *Paleoclimate of the Polar Regions of the Earth in the Holocene*, Eds D.Yu. Bolshiyakov, S.R. Verkulich, RF, Snt. Petersburg, AARI Publ., 2019, 204 pp. (in Russian).
21. **S.R. Verkulich** *Abstr. D. Sc. Thes. (Geography) [Abstract of Dissertation for the degree of Doctor of Geographical Sciences]*, IG RAS, AARI, RF, Moscow, 2011, 46 pp. (in Russian).
22. S. Berg, M. Melles, D. Gore, S. Verkulich, Z. Pushina *Antarct. Sci.*, 2020, 32(Sp. Iss. 2), 107. DOI: 10.1017/S0954102019000476.
23. **S.R. Verkulich, A. Hiller** *Antarct. Sci.*, 1994, 6(3), 395. DOI: 10.1017/S0954102094000593.
24. M. Melles, T. Kulbe, S.R. Verkulich, H.-W. Hubberten *In The Antarctic Region: Geological Evolution and Processes: Proc. 7th International Symposium on Antarctic Earth Sciences (Italy, Siena, 1995)*, Ed. C.A. Ricci, Italy, Siena, Terra Antartica Publ., 1997, pp. 809-820.
25. **S.R. Verkulich** *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Ser. Geograficheskaya*, 2007, № 4, 38 (in Russian).
26. **S.R. Verkulich** *Kriosfera Zemli*, 2009, 13(2), 73 (in Russian).
27. **S.R. Verkulich, Z.V. Pushina, I.N. Sokratova** *Materialy glyatsiologicheskikh issledovaniy*, 2007, № 102, 23 (in Russian).
28. **L.M. Savatyugin** *Russian Science in Antarctica [Rossiyskaya nauka v Antarktike]*, RF, Moscow, "Gorodets" Publ., 2004, 304 pp. (in Russian).
29. **V.F. Radionov, E.N. Rusina, E.E. Sibir** *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2020, 45(2), 74. DOI: 10.3103/S1068373920020028.
30. **E.E. Sibir, V.F. Radionov, E.N. Rusina** *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2020, 45(3), 161. DOI: 10.3103/S1068373920030036.
31. **D.M. Zhuravsky, U.V. Prokhorova, B.V. Ivanov, A.S. Yanzhura, N.M. Kuprikov, M.V. Kurapov** *Issledovaniya Zemli iz Kosmosa*, 2019, № 4, 18 (in Russian). DOI: 10.31857/S0205-96142019418-28.
32. **I.V. Fedorova, L.M. Savatyugin, M.A. Anisimov, N.S. Azarova** *Ice and Snow*, 2010, № 3(111), 63 (in Russian).
33. **T.V. Skorospekhova, I.V. Fedorova, A.A. Chetverova, N.K. Alekseeva, S.R. Verkulich, I.S. Ezhikov, A.V. Kozachek** *Arctic and Antarctic Research*, 2016, № 2(108), 79 (in Russian).
34. **A.V. Klepikov, N.N. Antipov** *Ice and Snow*, 2014, 54(4), 81 (in Russian). DOI: 10.15356/2076-6734-2014-4-81-94.
35. **B.V. Ivanov, A.M. Bezgreshnov** *Arctic and Antarctic Research*, 2014, № 2(100), 33 (in Russian).

Поток Антарктической донной воды в абиссальных каналах Атлантики*

Е.Г. Морозов

Рассмотрены потоки Антарктической донной воды в нескольких абиссальных каналах Атлантики. Работа выполнена на основании многолетних исследований в каналах на протяжении 2002–2020 годов. Донная вода образуется в море Уэдделла и медленно распространяется на север, достигая широт Европы. На пути своего распространения донная вода проходит через несколько подводных каналов, где и проводились измерения.

Ключевые слова: Антарктическая донная вода, абиссальные каналы, течения.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-08-00246).

Введение

В холодные периоды года на антарктическом шельфе формируется холодная водная масса высокой солености за счет выхолаживания с поверхности и ледообразования. Она носит название Антарктическая шельфовая вода. По мере стекания с антарктического шельфа она смешивается с окружающими водами [1] и достигает абиссальных глубин океана, формируя Антарктическую донную воду (ААДВ). Сток шельфовой воды и формирование ААДВ происходит в нескольких районах по периметру Антарктиды. Антарктический континентальный склон в море Уэдделла является районом наиболее интенсивного формирования ААДВ во всем Южном океане.

Антарктическая донная вода, по определению Вюста [2], – это донная вода антарктического происхождения с потенциальной температурой менее 2 °С. Толщина слоя Антарктической донной воды уменьшается от 3–4 км в приантарктической области, где она занимает практически всю толщу океана, до нескольких сотен метров в северных областях Мирового океана. Уменьшение толщины слоя обусловлено перемешиванием с более теплыми вышележащими слоями.

По оценкам Манка и Вунша [3], в отсутствие приливного перемешивания весь Мировой океан, за исключением верхнего слоя ветрового перемешивания толщиной около 100 м, заполнился бы холодной антарктической водой. Схема генерального направления распространения донной воды и ее протекания по абиссальным каналам Атлантики показана на рис. 1.

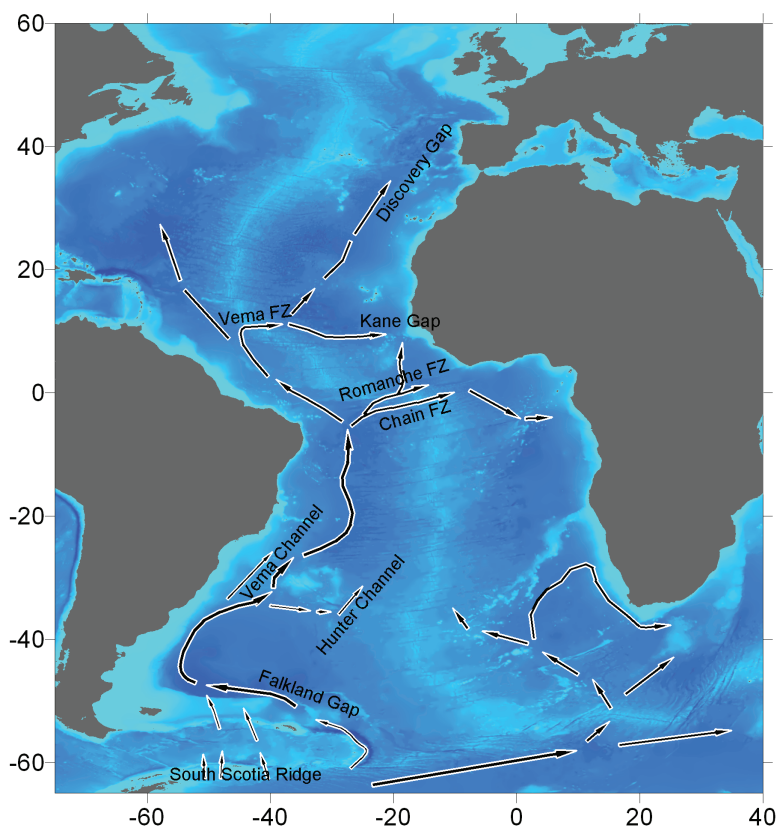


Рис. 1. Схема потока Антарктической донной воды в Атлантике.



МОРОЗОВ

Евгений Георгиевич

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН

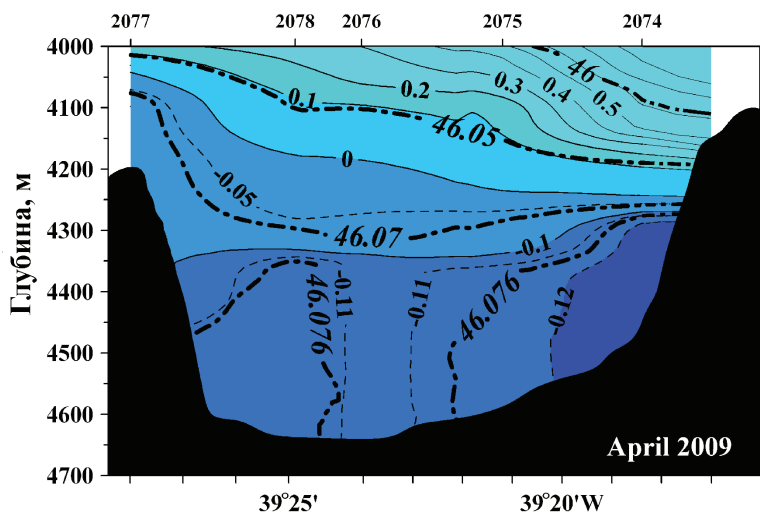


Рис. 2. Распределение потенциальной температуры на разрезе по $31^{\circ}12'$ ю. ш. через канал Вима. Штрихпунктирной линией показана условная плотность.

Антарктическая донная вода распространяется из моря Уэдделла на север в море Скотия через проходы в хребте Южного Скотия, а также через Южно-Сандвичев желоб. Часть ААДВ из моря Скотия распространяется на запад в пролив Дрейка. Проникновение ААДВ на север в Аргентинскую котловину осуществляется из моря Скотия и котловины Георгия через Фолклендский проход в Фолклендском хребте [4]. Часть этого потока следует вдоль южной и западной окраины Аргентинской котловины. Другая часть захватывается Субантарктическим фронтом и следует на восток вместе с Антарктическим циркумполярным течением [4].

Антарктическая донная вода перетекает из Аргентинской котловины в Бразильскую котловину через каналы Вима и Хантер, а также над плато Сантос. На севере Бразильской котловины поток донной воды делится на две части. Одна часть переносится на восток через разломы Романш и Чейн, а другая часть распространяется на северо-запад через Экваториальный канал. Далее северо-западный поток делится еще на два потока. Через разлом Вима донная вода течет на восток в котловину Зеленого мыса, а другой поток следует на север в Североамериканскую котловину.

Рассмотрим по отдельности потоки в разных абиссальных каналах.

Канал Вима

Канал Вима соединяет глубоководные части Аргентинской и Бразильской котловин. Через этот канал распространяются наиболее плотные и холодные донные воды. Глубины канала Вима превышают 4600 м на фоне глубин плато Сантос около 4200 м. Это узкий проход между двумя террасами, расположенными по обе стороны от него. Его ширина в самой узкой части

составляет немногим более 15 километров. Средний поток донной воды через канал Вима оценен как 3.5 Св (1 Свэдруп равен 10^6 м³/с). Средние скорости потока равняются 0.30 м/с, а максимальные достигают 0.60 м/с [5].

Канал был обнаружен в 1950-х годах, а гидрологические измерения в нем начались в 1972 г. Стандартный разрез поперек канала Вима по широте $31^{\circ}12'$ – $31^{\circ}14'$ ю. ш. был выполнен 25 раз с 1991 по 2020 гг. В отдельные годы выполнялся разрез из 3–6 станций, иногда измерения проводились только на одной станции.

Струя Антарктической донной воды в канале обычно хорошо перемешана по вертикали в придонном слое 100–150 м. Однако имеется горизонтальная стратификация струи. За счет экмановских сил трения самое холодное ядро потока обычно прижато к восточной, то есть правой стенке канала по ходу потока. Это хорошо согласуется с данными моделирования [6]. Существует также западная струя ААДВ, над западным склоном канала Вима на глубинах около 4200 м. Распределение потенциальной температуры на разрезе через канал Вима по $31^{\circ}12'$ ю. ш. показано на рис. 2.

За длительный период времени измерений на стандартном разрезе по $31^{\circ}12'$ ю. ш. обнаружена тенденция к повышению потенциальной температуры в ядре ААДВ во времени [7]. При этом до 1993 г. потенциальная температура на широте $31^{\circ}12'$ ю. ш. равнялась -0.18 °С, а отклонения не превышали 0.01 °С. Затем потенциальная температура увеличивалась. После 2004 г. наблюдались флуктуации температуры между -0.120 °С и -0.130 °С, но, по наблюдениям до 2020 г., эта тенденция сохранилась (рис. 3).

Струя ААДВ теплеет при распространении потока с юга на север на протяжении всего канала Вима за счет перемешивания с вышележащими водами. На протяжении длины канала наблюдается почти линейное

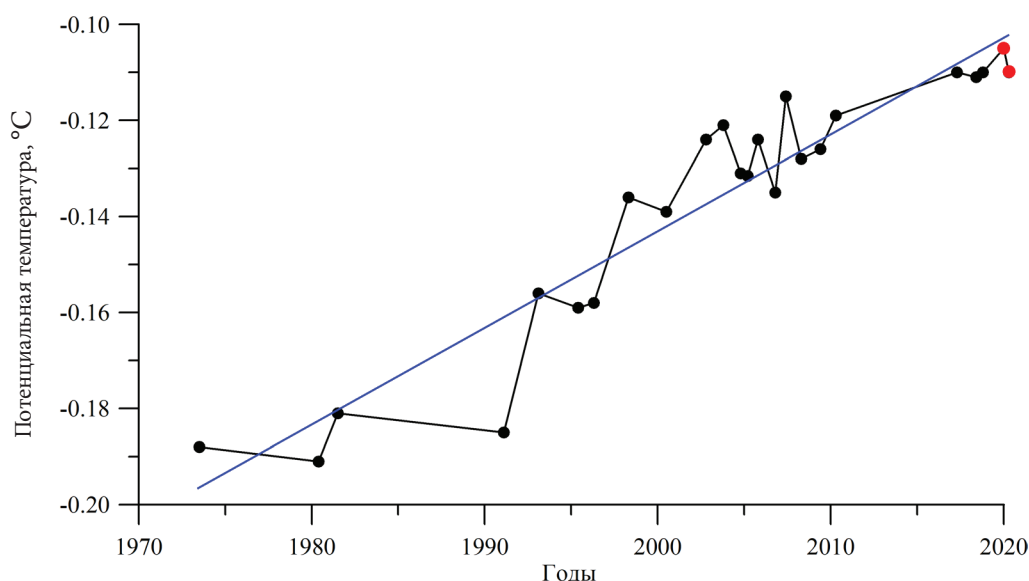


Рис. 3. Многолетний тренд потенциальной температуры в придонном слое канала Вима на широте 31°12' ю. ш.: красные точки — измерения, проведенные в 2020 г. Синей линией показано линейное приближение тренда.

возрастание температуры Антарктической донной воды. По данным 2003 г., когда был сделан разрез вдоль канала Вима, в самой южной части канала потенциальная температура равняется -0.135 °C, а в северной части она несколько возросла и достигала -0.094 °C.

Разломы Романш и Чейн

Холодные донные воды из западной части Атлантики распространяются в восточные бассейны экваториальной зоны океана через экваториальные разломы Романш и Чейн. Затем эти воды распространяются на юг в Ангольскую котловину.

Разлом Романш представляет собой глубокий проход в Срединно-Атлантическом хребте в экваториальной зоне Атлантики, глубина которого в среднем составляет 4500–5000 м. Длина разлома около 800 км. Ширина разлома Романш изменяется от 10 до 40 км. Главная седловина разлома (умеренно пологая) расположена на долготе $13^{\circ}22'$ з. д. на глубине 4350 м. Самое глубокое место разлома — впадина Вима глубиной 7850 м. Разлом Чейн расположен южнее экватора, в 200–300 км к югу от разлома Романш. Его главная седловина находится на глубине 4050 м ($12^{\circ}22'$ з. д.).

Во время выполнения программы WOCE в 1991–1994 гг. потоки в разломах Романш и Чейн изучались французскими океанологами [8]. Российские исследования экваториальных разломов проводились в 2005, 2009–2013 гг.

По данным измерений скорости течений на буях в 1991–1994 гг. и более поздних измерений погружаемым акустическим профилографом течений, поток донной воды в каждом из разломов оценен как 0.5 Св. Средние скорости течения находятся в пределах 0.10–0.20 м/с. Температура в западной части разлома Романш равняется около 0.5 °C, а в восточной его части увеличивается до 1.66 °C. При этом повышение температуры вдоль разлома — существенно неравномерное. В его восточной части наблюдается резкое увеличение придонной температуры и солености. Такое увеличение, очевидно, свидетельствует о сильном перемешивании в районе главной седловины, которое связано, по-видимому, с приливными течениями, возможными водопадами и генерацией приливных внутренних волн. Аналогичное распределение температуры наблюдается и в разломе Чейн, где был обнаружен подводный водопад в 2009 г. [5].

Разлом Вима

Разлом Вима в Северо-Атлантическом хребте расположен на широте 11° с. ш. между долготами 43.5° и 41° з. д. Ширина разлома около 8–15 км, а максимальная глубина около 5200 м. Три главные седловины разлома имеют глубины 4690, 4650 и 4710 м соответственно на долготах 41.02° , 40.92° , 40.88° з. д.

В октябре 2006 г. в экспедиции на НИС «Академик Иоффе» была выполнена полигонная съемка из 25 STD-станций в районе трех седловин разлома

Вима (40.5°–41° з. д.). Измерения были продолжены в 2014–2016 гг. Поток ААДВ на восток через этот разлом был оценен как 1.0 Св. Максимальная скорость потока достигала 0.46 м/с [9].

Распространение ААДВ к востоку от Срединно-Атлантического хребта

На основании данных гидрологических измерений Мантила и Рид [10] сделали вывод, что донные воды, распространяющиеся через разлом Романш, заполняют глубокие котловины только в экваториальной и юго-восточной частях Атлантики, но не проникают на север через проход Кейн на 9° с. ш. Главным источником ААДВ для глубоких бассейнов всей Восточной Атлантики к северу от прохода Кейн является разлом Вима. Воды, прошедшие через этот разлом, достигают прохода Дискавери в Восточно-Азорском хребте на 37° с. ш. Придонные температуры в районе прохода Кейн составляют 1.83–1.86 °С. Поэтому водообмен в слое ААДВ через этот проход возможен.

В работе [11] была предложена схема распространения ААДВ на северо-восток на основе измерений до 1991 г. По этой схеме ААДВ, которая перетекала к востоку от срединного хребта через разлом Вима, разделяется на две ветви. Одна ветвь переносит донные воды на северо-восток, а другая на юго-восток. За прошедшие после этой публикации годы накопилось много данных, которые показывают, что в целом их схема правильная. Мы построили карту придонных температур на основании новых данных измерений, в основном во время выполнения программы WOCE. Эти измерения уточняют предыдущую схему (рис. 4).

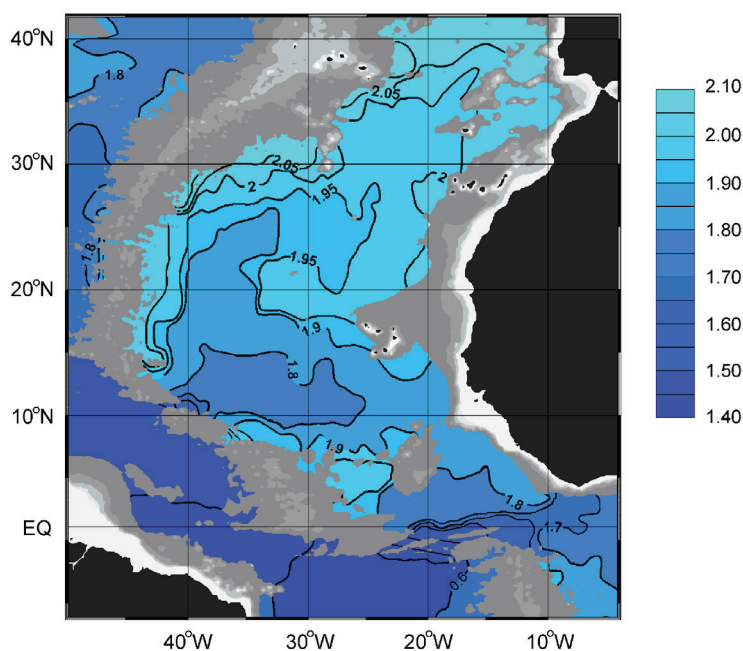


Рис. 4. Распределение потенциальной температуры у дна в северо-восточной Атлантике.

Из рисунка видно, что основной поток донных вод в Восточную Атлантику идет через разлом Вима на 11° с. ш.

Поток ААДВ через разломы Романш, Чейн и Вима оценивается как 0.5 Св в каждом из каналов. Однако более сильное перемешивание в районе разломов Романш и Чейн, вызванное внутренними волнами, препятствует распространению ААДВ, прошедшей через разломы Романш и Чейн, в Северо-Восточную Атлантику. Перед затеканием вод в разломы Романш и Вима их температуры равны соответственно 0.5° и 1.3 °С. Разница в температурах после прохождения разломов становится очень малой: $\theta = 1.66^\circ$ (Романш) и $\theta = 1.69^\circ$ (Вима) [5]. Большие амплитуды внутренних приливов в районе разлома Романш [12] приводят к сильному перемешиванию. В разломе Романш амплитуда внутренних приливов достигает 50 м, в то время как в разломе Вима она близка к 20 м.

Проход Кейн

Проход Кейн расположен между возвышенностью Сьерра-Леоне и Гвинейским плато, вблизи Африканского континента. Он соединяет котловины Сьерра-Леоне и Зеленого мыса и имеет глубину седловины около 4500 м [13]. Придонный слой в этих котловинах заполняется донными водами антарктического происхождения, которые перетекают из западной Атлантики в восточную часть океана.

Впервые в мае 2009 г. мы выполнили прямые измерения скорости течений в проходе Кейн. Поток ААДВ оказался направлен на юго-восток. В октябре 2009 г. был выполнен разрез из трех станций поперек прохода. В отличие от весенних измерений поток ААДВ уже оказался направлен на северо-запад. Оценка расхода составила 0.16 Св для границы $\theta < 1.9^\circ\text{C}$. В октябре 2010 г. в проходе Кейн была установлена донная станция с измерителями течений в придонном слое. Нижний прибор

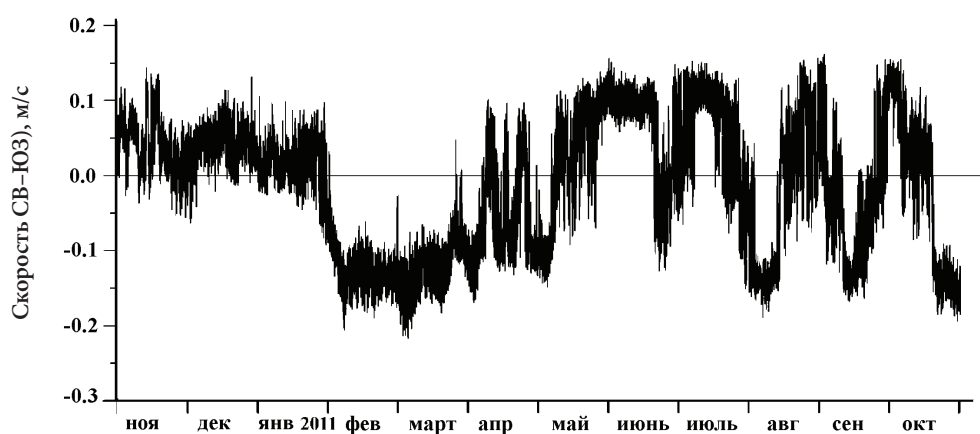


Рис. 5. График скорости течений вдоль прохода Кейн (по линии северо-восток – юго-запад) в 7 м над дном: положительные скорости на юго-запад.

находился в 7 м от дна. Измерения течений велись с интервалом 10 мин. Подъем этой станции был выполнен через год, в октябре 2011 г. Измерения течений в течение года показали, что направление течений менялось на обратное несколько раз. График скорости течений в течение года показан на рис. 5. Среднее течение за весь годовой период наблюдений оказалось практически нулевым.

Проход Дискавери

Проход Дискавери состоит из двух проходов на широте 37° с. ш. в районе 16° з. д. и 19° з. д. Это место считается конечной точкой распространения Антарктической донной воды с потенциальной температурой менее 2°C на север. К северу от прохода обнаруживается только более теплая вода. Длина прохода Дискавери около 150 км, ширина 10–50 км (по изобате 4500 м).

Первые детальные исследования в районе прохода Дискавери были выполнены в 1982 г. [14]. Перенос вод с потенциальной температурой менее 2.05°C из котловины Мадейра в Иберийскую котловину в работе был оценен как 0.2 Св, а скорости переноса около 0.05 м/с.

Измерения течений 2011 г. выявили разнонаправленный поток со скоростями 0.05–0.15 м/с [15], а в 2013 г. в западном проходе были зафиксированы скорости до 0.15 м/с.

Заключение

Исследования потоков в абиссальных каналах Атлантики, выполненные в последние годы, показывают, что эти потоки характеризуются в целом высокими скоростями и переносами. Антарктическая донная вода проникает в Аргентинскую котловину сквозь многочисленные разломы в хребтах. Затем она перетекает в Бразильскую котловину через каналы Вима и Хантер, а также над плато Сантос. После канала Вима ААДВ медленно течет по Бразильской котловине, а затем делится на два потока: на восток в разломы Романш и Чейн, а также на северо-запад. Часть северо-западного потока ответвляется на восток и перетекает по разлому Вима в Северо-Восточную Атлантику. Благодаря сильному перемешиванию в разломах Романш и Чейн за счет приливных внутренних волн поток ААДВ значительно теплеет. Затем этот поток достигает прохода Кейн и далее почти не распространяется. Все глубинные котловины северо-восточной Атлантики заполняются донной водой через разлом Вима. Проход Дискавери является конечной точкой распространения ААДВ в смысле ее определения как воды с потенциальной температурой менее 2°C .

Таким образом, наши измерения позволили уточнить глобальную схему донных течений в Атлантике и получить дополнительные оценки влияния антарктических вод на климат планеты, что важно для совершенствования моделей изменения климата.

Благодарности

На протяжении нескольких лет наша работа (и в том числе океанские экспедиции) была поддержана грантами Российского фонда фундаментальных исследований. В настоящее время ведутся работы по проекту № 20–08–00246.

Литература

1. **Е.Г. Морозов, Р.Ю. Тараканов**
Доклады Академии наук, 2012, **445**(6), 453.
2. **J. Jungclauss, M. Vanicek**
J. Geophys. Res., 1999, **104**(C9), 21123. DOI: 10.1029/1998JC900055.
3. **A.W. Mantyla, J.L. Reid**
Deep Sea Res. Part A. Oceanogr. Res. Papers, 1983, **30**(8), 805.
DOI: 10.1016/0198-0149(83)90002-X.
4. **M.S. McCartney, S.L. Bennet, M.E. Woodgate-Jones**
J. Phys. Oceanogr., 1991, **21**(8), 1089.
DOI: 10.1175/1520-0485(1991)021<1089:EFTTMA>2.0.CO;2.
5. **H. Mercier, K.G. Speer**
J. Phys. Oceanogr., 1998, **28**(5), 779.
DOI: 10.1175/1520-0485(1998)028<0779:TOBWIT>2.0.CO;2.
6. **E.G. Morozov**
Deep Sea Res. Part I: Oceanogr. Res. Papers, 1995, **42**(1), 135.
DOI: 10.1016/0967-0637(95)92886-C.
7. **E. Morozov, A. Demidov, R. Tarakanov, W. Zenk**
Abyssal Channels in the Atlantic Ocean: Water Structure and Flows,
FRG, Berlin, Springer Science & Business Media, 2010, 234 pp.
DOI: 10.1007/978-90-481-9358-5.
8. **E.G. Morozov, R. Yu. Tarakanov, D.I. Frey, T.A. Demidova,
N.I. Makarenko**
J. Oceanogr., 2018, **74**(2), 147. DOI: 10.1007/s10872-017-0445-x.
9. **Munk W.H., Wunsch C.**
Deep Sea Res. Part I: Oceanogr. Res. Papers, 1998, **45**(12), 1977.
DOI: 10.1016/S0967-0637(98)00070-3.
10. **A.H. Orsi, G.C. Johnson, J.L. Bullister**
Progr. Oceanogr., 1999, **43**(1), 55.
DOI: 10.1016/S0079-6611(99)00004-X.
11. **P.M. Saunders**
J. Phys. Oceanogr., 1987, **17**(5), 631.
DOI: 10.1175/1520-0485(1987)017<0631:FTDG>2.0.CO;2.
12. **Walter H. F. Smith, David T. Sandwell**
Science, 1997, **277**(5334), 1956.
DOI: 10.1126/science.277.5334.1956.
13. **T. Whitworth III, W.D. Nowlin Jr., R.D. Pillsbury, M.I. Moore,
R.F. Weiss**
J. Geophys. Res., 1991, **96**(C8), 1505. DOI: 10.1029/91JC01319.
14. **G. Wüst**
*Wissenschaftliche Ergebnisse, Deutsche Atlantische Expedition auf
dem Forschungs- und Vermessungsschiff „Meteor“ 1925-1927*, Ed.
A. Defant, **6**(1), Deutsches Reich, Berlin, Walter de Gruyter & Co,
1936, 411 pp.
15. **W. Zenk, E. Morozov**
Geophys. Res. Lett., 2007, **34**(14), L14607.
DOI: 10.1029/2007GL030340.

English

Antarctic Bottom Water Flow in the Abyssal Channels of the Atlantic*

*Eugene G. Morozov*Shirshov Institute of Oceanology, RAS
36 Nakhimovsky Ave., Moscow, 117997, Russia
egmorozov@mail.ru

Abstract

The flows of Antarctic Bottom Water in several abyssal channels of the Atlantic are considered. The work was carried out on the basis of long-term research in the channels in 2002–2020. Bottom water is formed in the Weddell Sea and slowly spreads northward reaching the latitudes of Europe. In the course of its propagation, bottom water passes through several underwater channels where measurements were made.

Keywords: Antarctic Bottom Water, abyssal channels, currents.

*The work was financially supported by RFBR (projects 20-08-00246).

Images & Tables ●

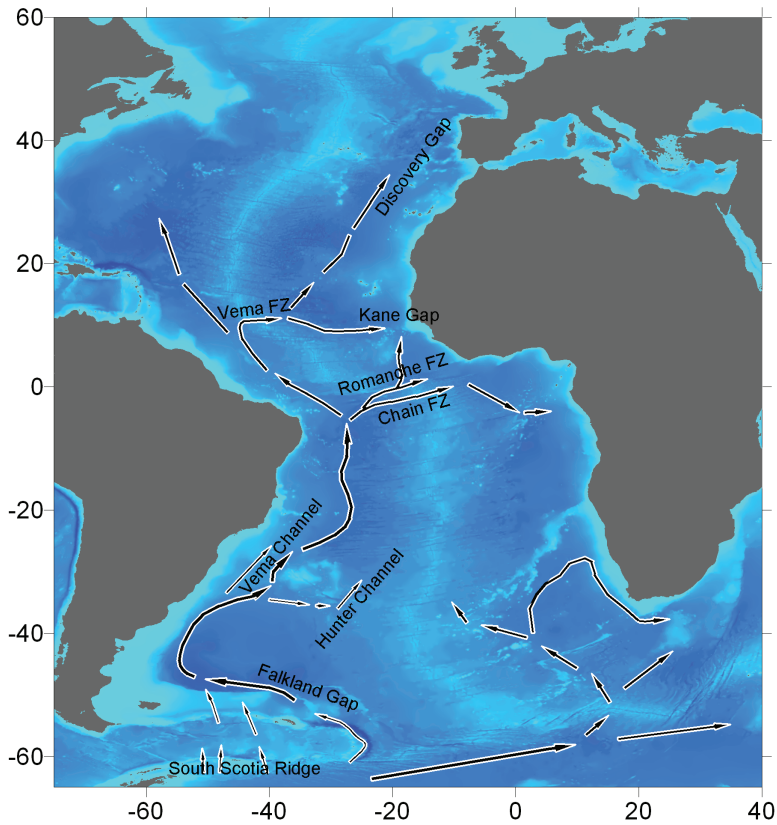


Fig. 1. Scheme of Antarctic Bottom Water flows in the Atlantic.

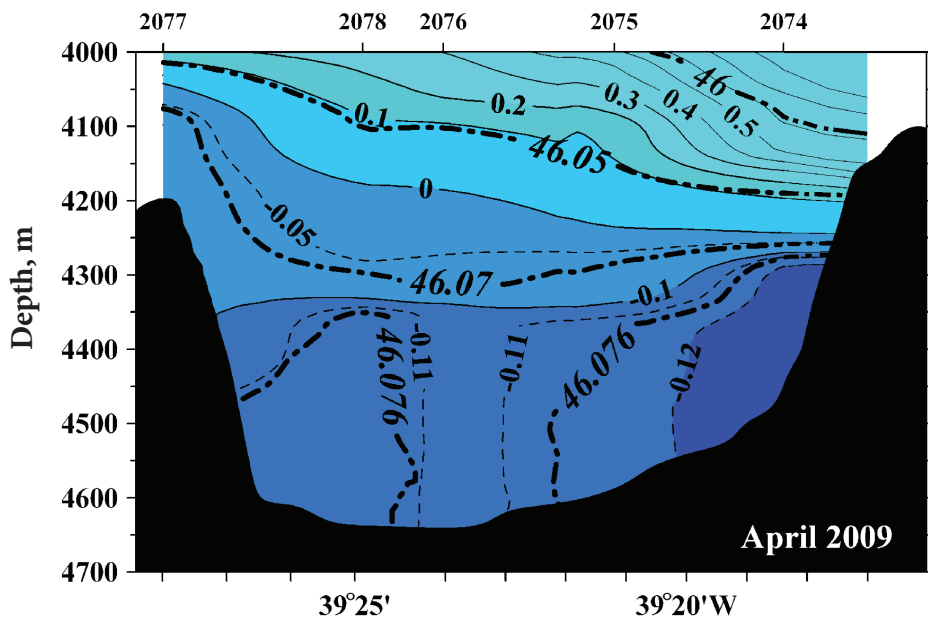


Fig. 2. Distribution of potential temperature over the section along 31°12' S, through the Vema Channel. The dash-dotted line shows density.

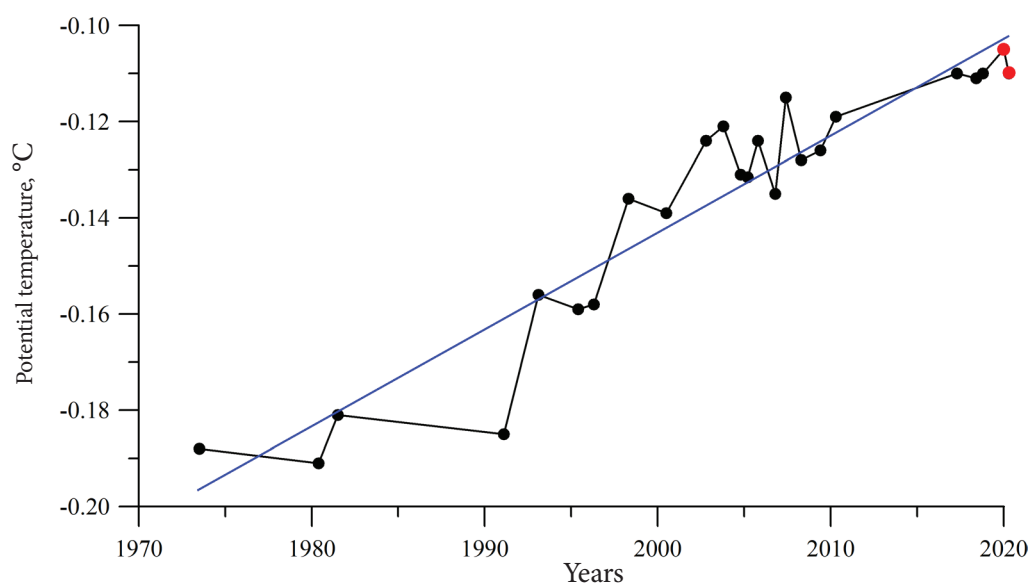


Fig. 3. Long-term trend of potential temperature in the bottom layer of the Vema Channel at 31°12' S: red dots indicate measurements taken in 2020. Blue line shows linear approximation of the trend.

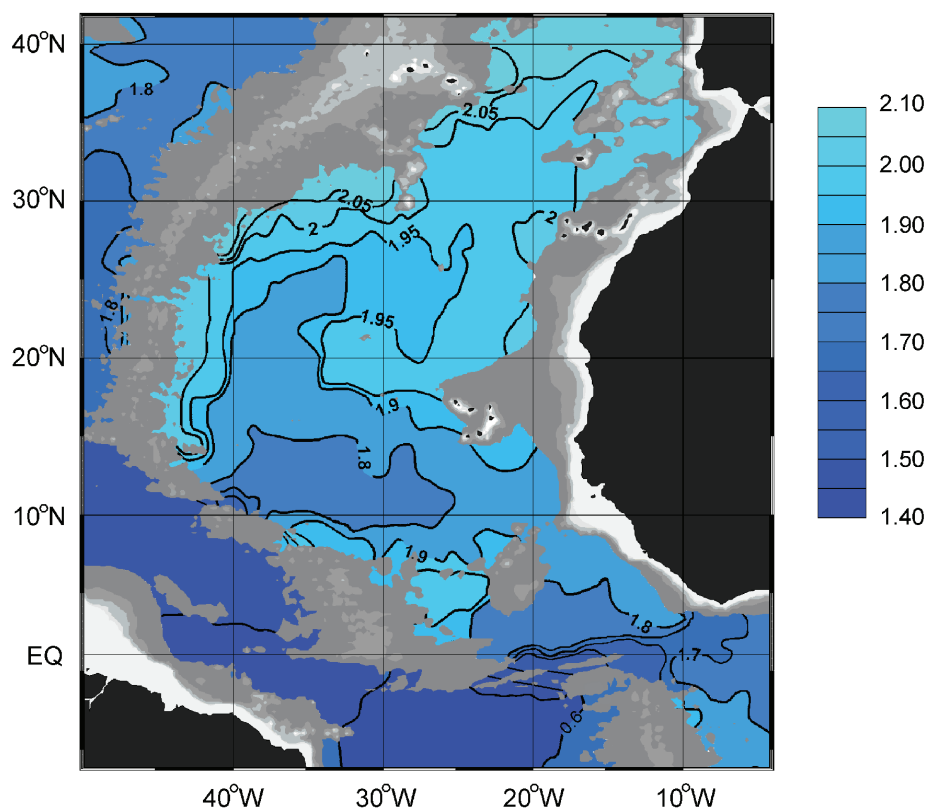


Fig. 4. Distribution of potential temperature at the bottom in the Northeast Atlantic.

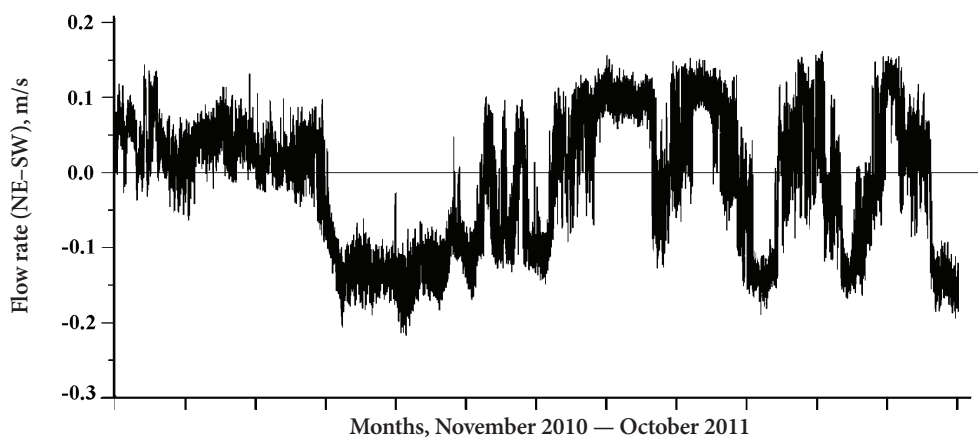


Fig. 5. Graph of the current velocity along the Kane Gap (northeast – southwest), 7 m above the bottom. Positive speeds are directed to the southwest.

References

1. E.G. Morozov, R.Y. Tarakanov
Doklady Earth Sciences, 2012, **445**(6), 453.
2. J. Jungclauss, M. Vanicek
J. Geophys. Res., 1999, **104**(C9), 21123. DOI: 10.1029/1998JC900055.
3. A.W. Mantyla, J.L. Reid
Deep Sea Res. Part A. Oceanogr. Res. Papers, 1983, **30**(8), 805.
DOI: 10.1016/0198-0149(83)90002-X.
4. M.S. McCartney, S.L. Bennet, M.E. Woodgate-Jones
J. Phys. Oceanogr., 1991, **21**(8), 1089.
DOI: 10.1175/1520-0485(1991)021<1089:EFTTMA>2.0.CO;2.
5. H. Mercier, K.G. Speer
J. Phys. Oceanogr., 1998, **28**(5), 779.
DOI: 10.1175/1520-0485(1998)028<0779:TOBWIT>2.0.CO;2.
6. E.G. Morozov
Deep Sea Res. Part I: Oceanogr. Res. Papers, 1995, **42**(1), 135.
DOI: 10.1016/0967-0637(95)92886-C.
7. E. Morozov, A. Demidov, R. Tarakanov, W. Zenk
Abyssal Channels in the Atlantic Ocean: Water Structure and Flows, FRG, Berlin, Springer Science & Business Media, 2010, 234 pp.
DOI: 10.1007/978-90-481-9358-5.
8. E.G. Morozov, R.Yu. Tarakanov, D.I. Frey, T.A. Demidova, N.I. Makarenko
J. Oceanogr., 2018, **74**(2), 147. DOI: 10.1007/s10872-017-0445-x.
9. Munk W.H., Wunsch C.
Deep Sea Res. Part I: Oceanogr. Res. Papers, 1998, **45**(12), 1977.
DOI: 10.1016/S0967-0637(98)00070-3.
10. A.H. Orsi, G.C. Johnson, J.L. Bullister
Progr. Oceanogr., 1999, **43**(1), 55.
DOI: 10.1016/S0079-6611(99)00004-X.
11. P.M. Saunders
J. Phys. Oceanogr., 1987, **17**(5), 631.
DOI: 10.1175/1520-0485(1987)017<0631:FTDG>2.0.CO;2.
12. Walter H. F. Smith, David T. Sandwell
Science, 1997, **277**(5334), 1956.
DOI: 10.1126/science.277.5334.1956.
13. T. Whitworth III, W.D. Nowlin Jr., R.D. Pillsbury, M.I. Moore, R.F. Weiss
J. Geophys. Res., 1991, **96**(C8), 1505. DOI: 10.1029/91JC01319.
14. G. Wüst
Wissenschaftliche Ergebnisse, Deutsche Atlantische Expedition auf dem Forschungs- und Vermessungsschiff „Meteor“ 1925-1927, Ed. A. Defant, **6**(1), Deutsches Reich, Berlin, Walter de Gruyter & Co, 1936, 411 pp.
15. W. Zenk, E. Morozov
Geophys. Res. Lett., 2007, **34**(14), L14607.
DOI: 10.1029/2007GL030340.

**«ВЕСТНИК РОССИЙСКОГО ФОНДА
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ»
№ 3–4 (107–108) июль–декабрь 2020 года**

Формат 60x90¹/₈.

Подписано в печать 14.12.2020. Тираж 300 экз.
Усл. печ. л. 16,00. Заказ № 865

Отпечатано в обществе с ограниченной ответственностью
«Тамбовский полиграфический союз»
392000, г. Тамбов, Моршанское шоссе, 14А
Тел. 8(4752) 53-26-27
E-mail: info@tps68.ru
www.tps68.ru