

ISSN 0555-2648



ПРОБЛЕМЫ АРКТИКИ И АНТАРКТИКИ

№ 2 (104)

2015 г.



МИНИСТЕРСТВО ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ
И ЭКОЛОГИИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ
И МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

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

ПРОБЛЕМЫ АРКТИКИ И АНТАРКТИКИ

№ 2 (104)

Издается с июня 1937 г.

Санкт-Петербург
ААНИИ
2015

Главный редактор

д-р геогр. наук, профессор *И.Е. Фролов* (ААНИИ)

Редакционная коллегия

канд. физ.-мат. наук *А.И. Данилов* (зам. главного редактора)

канд. геогр. наук *И.В. Бузин*

(ученый секретарь, тел. (812) 337-3212, e-mail: buzin@aari.ru)

А.А. Меркулов

(секретарь, тел. (812) 337-3135, e-mail: aam@aari.ru)

д-р геогр. наук *Г.В. Алексеев* (ААНИИ)

канд. физ.-мат. наук *Л.П. Бобылев* (Фонд Нансен-центр)

д-р геогр. наук *В.С. Вуглинский* (ГГИ)

канд. геол.-минерал. наук *Г.Э. Грикуров* (ВНИИОкеангеология)

д-р геогр. наук *Г.К. Зубакин* (ААНИИ)

д-р геол.-минерал. наук *В.Л. Иванов* (ВНИИОкеангеология)

д-р физ.-мат. наук *В.М. Катцов* (ГГО)

канд. геогр. наук *В.Я. Липенков* (ААНИИ)

канд. техн. наук *В.А. Лихоманов* (ААНИИ)

д-р физ.-мат. наук *А.П. Макишас* (ААНИИ)

д-р геогр. наук *Е.У. Миронов* (ААНИИ)

канд. биол. наук *А.В. Неелов* (ЗИН РАН)

д-р геогр. наук *А.Ю. Прошутинский* (Woods Hole Oceanographic Institute, USA)

канд. геогр. наук *В.Ф. Радионов* (ААНИИ)

д-р философии *Д. Рэйно* (Centre National de la Recherche Scientifique, France)

д-р физ.-мат. наук *В.А. Рожков* (СПбГУ)

д-р геогр. наук *Л.М. Саватюгин* (ААНИИ)

д-р техн. наук *К.Г. Ставров* (ОАО «ГНИНГИ»)

д-р физ.-мат. наук *Л.А. Тимохов* (ААНИИ)

д-р физ.-мат. наук *О.А. Трошичев* (ААНИИ)

ПРОБЛЕМЫ АРКТИКИ И АНТАРКТИКИ

№ 2 (104)

Свидетельство о регистрации

ПИ № ФС77-35144 от 28 января 2009 г.

Выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи и массовых коммуникаций
В соответствии с решением Президиума Высшей аттестационной комиссии Минобрнауки России от
19 февраля 2010 года № 6/6 журнал включен в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и
изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание
ученых степеней доктора и кандидата наук.

Подписные индексы издания в каталоге «Газеты. Журналы» ОАО «Агентство Роспечать»

70279 – на год

48657 – для индивидуальных подписчиков (на полгода)

70278 – для предприятий и организаций (на полгода)

Редактор Е.В. Миненко

ISSN 0555-2648

© Государственный научный центр РФ
Арктический и антарктический
научно-исследовательский институт
(ГНЦ РФ ААНИИ), 2015

СОДЕРЖАНИЕ

<i>А.П. Макидас, Т. Уттал, Т. Лаурила, Н.А. Парамонова.</i> Гидрометеорологическая обсерватория Тикси (К пятилетию открытия).....	5
<i>В.Г. Дмитриев, А.И. Данилов.</i> Перспективы создания инновационных технологий мониторинга гидрометеорологической и геофизической обстановки на архипелаге Шпицберген и в Западной Арктической зоне Российской Федерации.....	13
<i>Е.У. Миронов, В.Г. Смирнов, И.А. Бычкова, М.Ю. Кулаков, Д.М. Демчев.</i> Новые технологии обнаружения айсбергов и прогнозирования их дрейфа в западном секторе Арктики	21
<i>А.П. Нагурный, А.П. Макидас, А.С. Макаров.</i> Метан в приповерхностном слое атмосферы Арктики.....	33
<i>А.В. Богородский, Г.А. Лебедев.</i> Технологии гидроакустического мониторинга дрейфующего льда для обеспечения ледовой безопасности гидротехнических сооружений на шельфе замерзающих морей	44
<i>В.Е. Бородачев, И.В. Бородачев.</i> Ледовитость Карского моря в вариациях климата Арктики.....	57
<i>Г.Н. Войнов.</i> Способ приведения ежечасных наблюдений за уровнем моря к однородным рядам с помощью калибровки приливов	68
<i>Л.А. Тимохов, А.Ю. Ипатов, Е. Хёлеманн, М. Янут, Х. Кассенс.</i> Холодные шельфовые воды моря Лаптевых летом 2013 г.	81
<i>Д.И. Тисленко, Б.В. Иванов.</i> Долгопериодная изменчивость температуры атлантических вод во фьордах острова Западный Шпицберген в период первого (1920–1940 гг.) и современного потепления в Арктике.....	93

СТРАНИЦЫ ИСТОРИИ

<i>В.В. Лукин.</i> Первые шаги ААНИИ в Антарктике	101
Памяти Г.К. Зубакина	120

CONTENTS

<i>A.P. Makshtas, T. Uttal, T. Laurila, N.A. Paramonova.</i> Tiksi Hydrometeorological Observatory (the fifth anniversary of the opening).....	5
<i>V.G. Dmitriev, A.I. Danilov.</i> Prospects for the creation of innovative technologies for hydrometeorological and geophysical conditions monitoring on Spitsbergen and Western Arctic zone of the Russian Federation.....	13
<i>Ye.U. Mironov, V.G. Smirnov, I.A. Bychkova, M.Yu. Kulakov, D.M. Demchev.</i> Modern technologies for Iceberg detection and their drift forecasting in the Western Arctic.....	21
<i>A.P. Nagurny, A.P. Makshtas, A.S. Makarov.</i> Methane in the atmospheric surface layer in the Arctic	33
<i>A.V. Bogorodskiy, G.A. Lebedev.</i> Technologies of hydroacoustic monitoring of drifting ice for providing ice safety of hydraulic engineering constructions on the shelf of the freezing seas.....	44
<i>VE. Borodachev, I.V. Borodachev.</i> Kara sea ice extent and the Arctic climate variations.....	57
<i>G.N. Voinov.</i> Techniques of reduction of the hourly series of the sea level records to uniform series by means of calibration of the tidal signal.....	68
<i>L.A. Timokhov, J. Hölemann, A.Yu. Ipatov, M. Janout, H. Kassens.</i> Cold shelf waters of the laptev sea in the summer of 2013	81
<i>D.I. Tislenko, B.V. Ivanov.</i> Long-term variability of atlantic waters temperature in the fjords of Spitsbergen in conditions of modern warming.....	93

PAGES OF HISTORY

<i>V.V. Lukin.</i> The first steps AARI in Antarctica	101
In Memory of G.K. Zubakin	120

УДК 061.63:551.579(09)

Поступила 4 марта 2015 г.

Памяти одного из основателей ГМО Тикси
А.И. Решетникова

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ ТИКСИ
(К ПЯТИЛЕТИЮ ОТКРЫТИЯ)

д-р физ.-мат. наук А.П. МАКШТАС¹, рук. группы Т. УТТАЛ²,
рук. группы Т. ЛАУРИЛА³, канд. физ.-мат. наук Н.А. ПАРАМОНОВА⁴

¹ — ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, e-mail: mir@aari.ru

² — Лаборатория исследований системы Земли, НОАА, Боулдер, США, e-mail: taneil.uttal@noaa.gov

³ — Финский метеорологический институт, г. Хельсинки, e-mail: Tuomas.Laurila@fmi.fi

⁴ — Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова, Санкт-Петербург, e-mail: nina-paramonova@gmail.ru

Представлена история развития гидрометеорологических наблюдений в Тикси, создания в 2007 – 2010 гг. современной Гидрометеорологической обсерватории и обзор основных результатов выполняемых в настоящее время в рамках программы Международных метеорологических наблюдений.

Ключевые слова: метеорологические наблюдения, климат, парниковые газы, международная обсерватория, Тикси.

В 1739 г. во время Великой Северной экспедиции была нанесена на карту расположенная к югу от полуострова Быковского бухта, названная Д. Лаптевым губой Горелой. В XIX в. губа Горелая была переименована в бухту Тикси. В якутском языке слово «тикси» имеет несколько значений: стоянка, пристань, отмель. Но есть еще одно значение этого слова — «встреча». Именно здесь терпящие бедствие первопроходцы Севера встречали приют и гостеприимство местных жителей, что и послужило основанием для переименования.

В конце 1920-х гг. Правительством СССР была сформулирована задача всестороннего освоения Арктики. В этой связи на заседании Полярной конференции, состоявшейся в Ленинграде в 1928 г., по предложению В.Ю. Визе было принято решение об участии в проведении в 1932–1933 гг. Второго Международного полярного года, в том числе путем создания на побережье и островах Северного Ледовитого океана сети полярных метеорологических и геофизических станций. Во исполнение решений этой и последующих конференций Всесоюзным арктическим институтом (ныне ААНИИ) и Якутской геофизической обсерваторией летом 1932 г. была организована Нижне-Ленская экспедиция. Одной из основных задач экспедиции было строительство гидрометеорологической станции в бухте Тикси. Пятого августа 1932 г. пароход «Лена» под командованием первого якутского полярного капитана А.Д. Богатырева подошел к заливу Сого, расположенному в южной части бухты Тикси, с первой сменой полярников и необходимыми для организации станции строительными материалами, оборудованием и продуктами. Работы по строительству станции велись чрезвычайно быстро, уже 12 августа в эфир была передана первая радиограмма со сводкой погоды.

Помимо чисто метеорологических наблюдений в задачи сотрудников станции «Полярка» входили наблюдения за уровнем моря и температурой воды в заливах, толщиной снега и льда, составляющими радиационного баланса и за полярными сияниями. Сотрудники станции проводили многочисленные геологические обследования окрестностей. Именно ими были детально разведаны залежи бурого угля на берегу речки Сого. Они проводили также геодезическую, топографическую и геомагнитную съемки местности. За год зимовки было описано более 350 км побережья губы Буор-Хая.

В 1936 г. на базе станции «Полярка» создается, как филиал Всесоюзного арктического института, Арктическая научно-исследовательская обсерватория (АНИО) с отделами метеорологии, аэрологии, гидрологии и бюро погоды. Одновременно вблизи «Полярки» были организованы магнитная, ионосферная и мерзлотная лаборатории Якутской геофизической обсерватории Академии наук СССР. Для более оперативного сбора и распространения гидрометеорологической информации на базе Тиксинской радиостанции в 1957 г. создается Тиксинский районный радиометцентр (РМЦ): центр сбора информации 30 полярных станций Северной Якутии. В 1964 г. объединенные РМЦ и АНИО получают статус Гидрометеорологической обсерватории (ГМО). В этом же году в Тикси проходит Вторая научная конференция арктических обсерваторий. В работе конференции принимали участие ученые ААНИИ, Центрального института прогнозов, Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова, ведущие специалисты и руководители других арктических РМЦ и Арктических обсерваторий (м. Шмидта, Певек и Диксон). В 1967 г. при ГМО была организована Лаборатория гидрохимии и гидробиологии, которая в последующие годы расширяется и переименовывается в Комплексную лабораторию мониторинга окружающей среды.

Особенно плодотворным для ГМО был период 1960–1980-х гг. Сотрудники обсерватории участвовали в работе многочисленных гидрологических, океанологических и гидрографических экспедиций, в метеорологическом обслуживании Северного морского пути, воздушных высокоширотных экспедиций «Север» и полетов самолетов, обеспечивавших дрейфующие станции «Северный полюс». В этот период в ГМО работало много молодых ученых, ставших впоследствии известными полярными исследователями: член-корреспондент РАН А.Н. Чилингаров; член-корреспондент АН Украины Н.П. Булгаков; доктора наук Г.В. Алексеев, В.Ф. Захаров, Э.И. Саруханян, Л.А. Тимохов и более 30 кандидатов наук.

Новый импульс к расширению комплексных гидрометеорологических наблюдений в Тикси был задан в период подготовки Третьего Международного полярного года. В 2004–2006 гг. в научных организациях Росгидромета (ААНИИ, ГГО, НПО «Тайфун») при участии Полярного фонда были подготовлены предложения по участию в Международном полярном годе (МПГ) под условным названием «Создание атмосферной обсерватории климатического мониторинга в Тикси». Впоследствии предложенный проект был интегрирован в Кластер МПГ № 196 «International Arctic Systems for Observing the Atmosphere» (Международная система наблюдений атмосферы в Арктике). В 2006 г. решение о создании в Тикси современной атмосферной обсерватории было принято на Первом официальном совещании делегаций Национальной океанической и атмосферной администрации (НОАА) Министерства торговли США и Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Российской Федерации (Росгидромет), состоявшемся в Москве 27 февраля – 3 марта 2006 г. в рамках Меморандума по сотрудничеству в области метеорологии, гидрологии

и океанографии (Проект № 4.1. «Создание современной гидрометеорологической станции и Гидрометеорологической обсерватории в Тикси, Россия»). Ход реализации проекта по созданию Гидрометеорологической обсерватории в Тикси был рассмотрен и одобрен на Втором и Третьем официальных совещаниях делегаций НОАА и Росгидромета, состоявшихся в 2008 и 2010 гг.

Согласно резолюциям, содержащимся в Протоколах совещаний, главными целями проекта были определены:

- создание Гидрометеорологической исследовательской обсерватории, оснащенной современными средствами наблюдений и связи, системой энергоснабжения, лабораторными и офисными помещениями, на которой будет проводиться сбор качественных данных о составе атмосферы и атмосферных процессах, а также о сопутствующих параметрах океана и суши для целей изучения погоды и климата;
- интегрирование данных наблюдений и измерений, проводимых в обсерватории, в международные наблюдательские сети: Global Atmosphere Watch (Глобальная служба атмосферы, ГСА), Baseline Surface Radiation Network (Базовая сеть наземных радиационных наблюдений, БСРН), Climate Reference Network (Базовая климатическая сеть, БКС), Global Terrestrial Network for Permafrost (Глобальная сеть наблюдений за вечной мерзлотой) и Micropulse Lidar Network (Сеть лидарных наблюдений за облачностью и аэрозолями).

В резолюциях подчеркивалось, что обсерватория в Тикси должна стать важным компонентом сети действующих арктических атмосферных обсерваторий, включающей обсерватории в Барроу (Аляска, США), Еурика и Алерт (Канада), Саммит (Гренландия). Нью-Олесунн (Норвегия), Паллас и Солданкула (Финляндия), Абиско (Швеция). Совместная работа перечисленных обсерваторий обеспечит циркумполярный мониторинг атмосферных процессов в высоких широтах.

Кратко основные этапы создания Гидрометеорологической обсерватории Тикси можно охарактеризовать следующим образом.

2004 г. — первое обсуждение возможности создания атмосферной обсерватории в Тикси.

2005 г. — первый визит ученых Росгидромета, Полярного фонда, НОАА и ФМИ в Тикси.

2006 г. — подготовлены предложения по участию в Международном полярном годе (МПГ) в рамках проекта «Создание Атмосферной обсерватории климатического мониторинга в Тикси». На Первом официальном совещании делегаций НОАА и Росгидромета, состоявшемся в Москве 27 февраля – 3 марта 2006 г. в рамках Меморандума по сотрудничеству в области метеорологии, гидрологии и океанографии принято окончательное решение о создании в Тикси современной Гидрометеорологической обсерватории. В ноябре 2006 г. А.Н. Чилингаров торжественно открыл главное здание обсерватории, построенное Полярным фондом (рис. 1).

2007 г. — в НОАА проведено обсуждение конкретных планов создания Гидрометеорологической обсерватории; состоялся второй визит ученых Росгидромета, Полярного фонда, НОАА и ФМИ в Тикси.

2008 г. — ход реализации проекта по созданию Гидрометеорологической обсерватории в Тикси рассмотрен и одобрен на Втором официальном совещании делегаций НОАА и Росгидромета, состоявшемся в г. Силвер-Спринг, США.

2009 г. — начаты регулярные наблюдения за атмосферой в главном здании обсерватории (сентябрь).

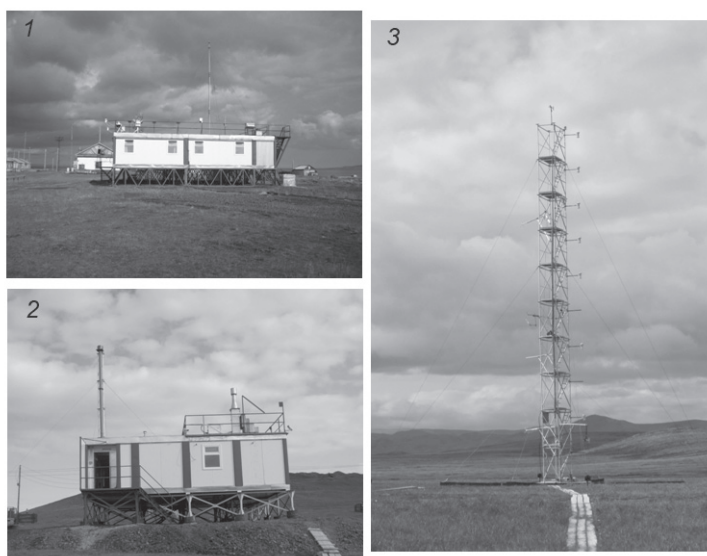


Рис. 1. Основные составляющие инфраструктуры ГМО Тикси:
1 — главное здание ГМО Тикси, 2 — павильон чистого воздуха,
3 — 20-метровая башня для измерения потоков тепла и парниковых газов.

2010 г. — возведена уникальная двадцатиметровая башня для проведения исследований процессов энерго- и массообмена в приземном слое атмосферы (рис. 1), установлены основные компоненты измерительных систем по программам БСРН, ГСА, КБС (НОАА, ААНИИ, ГГО); выполнены циклы наблюдений за потоками углекислого газа и метана на границе подстилающей поверхности — атмосфера (ФМИ, ГГО, ААНИИ); влагозапасом атмосферы и жидкокапельной влаги в воздухе и напряженностью электромагнитного поля в приземном слое атмосферы (ГГО); характеристиками аэрозоля в приземном слое и во всей толще атмосферы (Институт оптики атмосферы СО РАН); ход реализации проекта рассмотрен и одобрен на Третьем официальном совещании делегаций НОАА и Росгидромета, состоявшемся в Санкт-Петербурге; двадцать третьего августа 2010 г. ГМО Тикси посетил премьер-министр РФ В.В. Путин; двадцать пятого августа 2010 г. в присутствии официальных представителей ВМО, Росгидромета, НОАА, ННФ США и ФМИ состоялось официальное открытие атмосферных наблюдений в ГМО Тикси.

2011 г. — Полярным фондом закончено строительство павильона чистого воздуха и проведены подготовительные работы по обеспечению измерений на окружающей его территории; на средства Правительства Республики Саха (Якутия) выполнена реконструкция системы электроснабжения Гидрометеорологической обсерватории и осуществлен ремонт дороги поселок Тикси — павильон чистого воздуха — главное здание обсерватории; сотрудниками ААНИИ организованы система передачи данных из Тикси в Санкт-Петербург по спутниковому каналу и Центр приема, обработки и передачи данных участникам ГМО Тикси; сотрудниками НОАА и ААНИИ закончено развертывание комплексов аппаратуры по программам БСРН, БКС и международной сети по наблюдениям аэрозольной составляющей атмосферы АЭРОНЕТ; сотрудниками НОАА организованы измерения концентрации приземного озона и сажевого

аэрозоля; сотрудниками ФМИ и ГГО начаты регулярные измерения характеристик процессов энерго- и массообмена в приземном слое атмосферы и концентрации парниковых газов и аэрозолей; сотрудниками НПО «Тайфун» развернута аппаратура и начаты регулярные отборы проб на СО₂; сотрудниками ГГО и НОАА организован отбор проб воздуха для анализа газового состава атмосферы; сотрудниками ААНИИ организованы регулярные наблюдения за температурным режимом деятельного слоя почвы, приходящей и рассеянной коротковолновой радиацией; сотрудниками ИФА РАН, ААНИИ и НОАА начаты регулярные исследования турбулентности в приземном слое атмосферы на башне; в ААНИИ созданы регулярно пополняемые архивы данных стандартных метеорологических и аэрологических наблюдений, проводимых в Тикси с 1932 г. (архивы размещены на сайте ААНИИ <http://www.aari.nw.ru>).

Начиная с 2011 г. в ГМО Тикси проводятся комплексные регулярные исследования атмосферы, ледяного покрова и вечной мерзлоты. Результаты наблюдений регулярно размещаются на сайте Международной сети полярных обсерваторий <http://www.iasoa.org>.

В сентябре 2012 г. в ААНИИ состоялась встреча основных участников проекта ГМО Тикси из организаций Росгидромета, НОАА и ФМИ (Uttal et al, 2013). На совещании были подведены итоги первого года работы ГМО. В представленных докладах были рассмотрены особенности многолетней и сезонной изменчивости основных характеристик атмосферы и подстилающей поверхности, включая припайные льды. В частности, анализ созданных архивов данных метеорологических и ледовых наблюдений показал лишь небольшой положительный тренд температуры воздуха и практическое отсутствие значимого тренда максимальной толщины припайных льдов (Макштас и др., 2011). В то же время анализ архива метеорологических данных 22 метеостанций Северной Якутии за 1976–2010 гг. позволил оценить, насколько репрезентативны данные ГМО Тикси для анализа климатической изменчивости всего региона (Иванов, Макштас, 2012). Было показано, что по температуре воздуха и атмосферному давлению данные измерений в Тикси при месячном осреднении хорошо коррелируют лишь с данными станций, расположенных к западу от Верхоянского хребта. Выполненная по данным того же архива оценка суровости климата по данным станций Северной Якутии показала, что климат района обсерватории является одним из наиболее суровых вследствие неблагоприятного сочетания низких температур воздуха и большой скорости ветра (Иванов, Макштас, 2014).

Другими интересными результатами, полученными по данным ГМО Тикси и представленными на совещании, были: наличие периода полного разрушения приземного озона весной, наблюдаемого также в ГМО Барроу, Аляска, однако с выраженным сдвигом по времени; отсутствие сколь-либо значимого увеличения концентрации метана по сравнению с данными наблюдений на других обсерваториях (Решетников, Ивахов, 2012), несмотря на то, что ГМО Тикси расположена на берегу моря Лаптевых, в районе, где по данным работы (Шахова и др., 2008) его содержание в воде максимально; годовой цикл исследований загрязнений приземного слоя атмосферы показал, что в районе Тикси сравнительно высокие уровни стойких органических загрязнителей (ДЦТ); потоки парниковых газов в приземной атмосфере, как и ожидалось, были минимальны в зимний период, когда снег препятствует газообмену подстилающей поверхности с атмосферой, но в летний период они значительны и имеют четко выраженный суточный ход с преимущественным поглощением подсти-

лающей поверхностью углекислого газа; характеристики аэрозолей в приземном слое атмосферы имеют четко выраженные сезонные циклы, обусловленные различным преимущественным направлением переноса (с суши или моря), а также вследствие наличия локальных источников (расположенный в 6 км поселок Тикси), вероятно особенно существенных в зимний период при устойчивой стратификации атмосферы.

В 2013–2014 гг. ГМО Тикси работала по всем упомянутым выше программам, за исключением наблюдений за загрязнением приземного слоя атмосферы, приостановленных вследствие отсутствия финансирования. При этом расширился круг научных программ и участников. В сентябре 2014 г. учеными Университета Трира (Германия) и ААНИИ на территории ГМО Тикси был развернут комплекс аппаратуры, включающий сцинтилломметр BLS 900 (Scintec), позволяющий оценить средний турбулентный поток явного тепла на горизонтальных трассах протяженностью до 1,5 км, и акустический содар с антенной Scintec MFAS, предназначенный для получения каждые 5 мин профилей температуры воздуха до высоты 500 м, скорости и направления ветра до высоты 1 км. Развернутый комплекс позволяет получать информацию о состоянии приземного и пограничного слоев атмосферы, а также исследовать процессы турбулентного энергообмена атмосферы с подстилающей поверхностью. Обработка и анализ массивов данных, полученных с помощью сцинтилломметра и содара, позволяют усовершенствовать параметризацию процессов в моделях энерго- и массообмена подстилающей поверхности и атмосферы. Для валидации результатов измерений планируется использовать данные профильных измерений на градиентной башне и данные аэрологических зондирований.

В период с 21 сентября по 2 октября и с 20 по 27 ноября 2014 г. проводимые в ГМО Тикси метеорологические измерения, измерения парниковых газов, концентрации и размеров аэрозоля и массовой концентрации сажевого аэрозоля (BC) были дополнены, в рамках сотрудничества НИИ ядерной физики им. Д.В. Скобельцына МГУ и ААНИИ, отбором проб аэрозоля для его последующего всестороннего анализа методами аналитической химии, микроскопии и спектроскопии. Полученные данные о физико-химических и оптических свойствах аэрозолей, кроме самостоятельного научного значения, будут использованы для всесторонней калибровки аэталометра AE-31, установленного в ГМО Тикси в 2010 г. Это позволит впервые применить алгоритм определения эквивалентного BC, разрабатываемый в настоящее время в Международной сети ACTRIS, к данным, получаемым в ГМО Тикси. Последнее необходимо для проведения сравнительного анализа сезонной и межгодовой изменчивости характеристик хорошо поглощающего полярного аэрозоля между всеми арктическими станциями и для включения данных длительного мониторинга аэрозолей в ГМО Тикси в глобальную модель транспорта и осаждения сажевого аэрозоля.

Сотрудниками ГГО, НОАА и ФМИ продолжены непрерывные измерения и регулярный отбор проб воздуха во флаги для определения концентрации парниковых газов. Получен ряд данных о концентрации CO_2 и CH_4 в пробах воздуха с февраля 2011 г. по ноябрь 2014 г. На его основе проведена обработка и коррекция результатов непрерывных измерений установленным в июле 2013 г. газоанализатором G2310 фирмы Picarro. Кроме этого, данные по концентрации метана, полученные лазерным газоанализатором DLT-100 фирмы Los Gatos Research (LGR) в период с 2011 г. по июль 2013 г., скорректированы на дрейф шкалы прибора. После проведенной коррекции сформированы ряды среднечасовых значений концентрации метана за 2011–2014 гг. и концентрации CO_2 с июля 2013 г. по ноябрь 2014 г. Сравнение сезонного хода

концентраций показал, что в 2014 г. наблюдался рост концентрации как CO_2 , так и CH_4 , составивший $1,9 \text{ млн}^{-1}$ и 19 млрд^{-1} соответственно. При этом концентрация CO_2 возрастает в зимние месяцы, а CH_4 летом.

Продолжены опытные измерения параметров атмосферного электричества (напряженности электрического поля атмосферы и электрической проводимости воздуха). Сформирован электронный архив данных наблюдений. Судя по предварительным результатам, полученные данные не противоречат физическим представлениям. Полученный на ГМО Тикси суточный ход E проявляется в виде простой волны (унитарная вариация) с максимумом после 18 часов GMT.

Выполнен комплекс исследований на припайных льдах района ГМО Тикси. Проанализированы данные наблюдений, проведенных весной 2011 г., когда был зафиксирован феномен экстремального таяния припайных льдов, и данные прямых измерений температуры и солености воды в бухте Тикси (губа Буор-Хая, шельф моря Лаптевых), выполненных в конце зимы 2012 г. Данные наблюдений дополнены результатами расчетов с помощью усовершенствованной термодинамической модели припайных льдов (Макштас и др., 2012).

Разработана стационарная математическая модель для расчета термической структуры деятельного слоя грунта в районе ГМО Тикси. Выполнена предварительная параметризация теплофизических свойств ландшафтных характеристик. С помощью разработанной модели рассчитаны глубины сезонного протаивания песчано-гравийных и глинистых грунтов за последние 75 лет. Проведено сравнение полученных результатов с имеющимися оценками и данными расчетов по эмпирической зависимости.

Продолжен анализ межгодовой изменчивости климата свободной атмосферы по данным радиозондирований, выполненных на сети аэрологических станций, входящих в Международную сеть полярных обсерваторий. Также выполнен анализ межгодовой изменчивости характеристик приземного слоя атмосферы на тех же станциях. В дальнейшем, кроме детального анализа, они будут дополнены данными радиационного баланса подстилающей поверхности и данными о самой поверхности, состояние которой определяет метеорологические условия в приземном слое атмосферы и определяется ими.

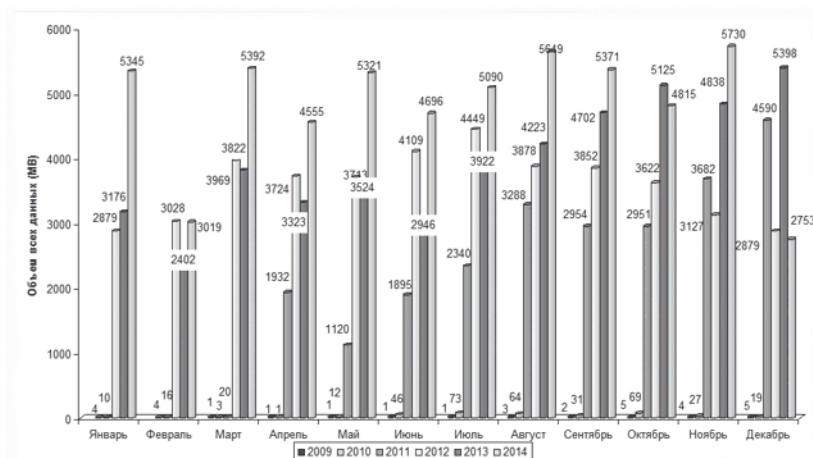


Рис. 2. Динамика поступления данных за период работы ГМО Тикси (2009–2014 гг.).

В связи с расширением круга задач и числа измеряемых параметров существенно возрос объем информации, передаваемой по спутниковому каналу в Центр данных Тикси (рис. 2). За последние два года, вследствие установки новых измерительных систем и совершенствования системы приема и передачи данных, объем получаемой и передаваемой участникам проекта ГМО Тикси информации достиг 5,5 Гб в месяц.

В целом, несмотря на ряд трудностей организационного и кадрового характера, продолжается поступательное развитие ГМО Тикси. В настоящее время она включена в международные программы наблюдений ГСА (региональная станция), БСРН, АЭРОНЕТ и БКС. Предполагается расширение ее функций в качестве глобальной станции ГСА, станции Глобальной службы криосферы (CryoNET), станции программ Циркумполярного мониторинга деятельного слоя (CALM), Арктического мониторинга атмосферных загрязнений (AMAP) и Год полярного прогноза (YOPP). В ее работе выражают желание принять участие японские и корейские исследователи.

Подводя итоги, можно утверждать, что современная Гидрометеорологическая обсерватория Тикси, программа которой была разработана на основе фундаментальных принципов наблюдений и совместного использования данных Всемирной метеорологической организации, является достойным преемником ГМО Тикси советского периода и отвечает современным требованиям арктических наблюдений XXI века.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Иванов Н.Е., Макистас А.П. Многолетняя изменчивость характеристик климата Северной Якутии // Проблемы Арктики и Антарктики. 2012. № 4 (94). С. 5–22.
- Иванов Н.Е., Макистас А.П. Оценка влияния климата на социально-экономическую деятельность в Северной Якутии // Проблемы Арктики и Антарктики. 2014. № 2 (100). С. 57–74.
- Макистас А.П., Богородский П.В., Кустов В.Ю. Быстрое таяние припайного льда в заливе Сого (бухта Тикси) весной 2011 г. // Проблемы Арктики и Антарктики, 2012. № 1 (91). С. 37–47.
- Макистас А.П., Большакова И.И., Гунн Р.М., Жукова О.Л., Иванов Н.Е., Шутилин С.В. Климат района Гидрометеорологической обсерватории Тикси // Метеорологические и геофизические исследования. М.: Paulsen, 2011. С. 49–74.
- Решетников А.И., Ивахов В.М. Результаты непрерывных наблюдений за концентрацией метана на станции Тикси (сравнение с данными наблюдений на шельфе моря Лаптевых) // Труды ГГО. 2012. Т. 566. С. 257–269.
- Шахова Н.Е., Семилетов И.П., В.И. Сергиенко, Салюк А.Н., Бельчева И.И., Космач Д.А. Состояние вопроса о роли Восточно-Сибирского шельфа в современном цикле метана // Изменение окружающей среды и климата. Природные катастрофы. М.: Пробел, 2008. С. 164–176.
- Uttal T., Makshtas A., Laurila T. The Tiksi International Hydrometeorological Observatory — an Arctic members Partnership // Bulletin (The Journal of the World Meteorological Organization). 2013. Vol. 62 (1). P. 22–26.

A.P. MAKSHAS, T. UTTAL, T. LAURILA, N.A. PARAMONOVA

TIKSI HYDROMETEOROLOGICAL OBSERVATORY (THE FIFTH ANNIVERSARY OF THE OPENING)

The history of hydrometeorological observations in Tiksi from 1932 to organized in 2007–2010 modern Hydrometeorological Observatory and review of the main results, obtained in framework of the international meteorological observations are presented.

Keywords: meteorological observations, climate, greenhouse gases, international observatory.

УДК [551.326.02+551.501+550.34.03+502.175] Поступила 24 февраля 2015 г.
(481-922.1+985-15)

ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ МОНИТОРИНГА ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ И ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ НА АРХИПЕЛАГЕ ШПИЦБЕРГЕН И В ЗАПАДНОЙ АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

канд. тех. наук В.Г.ДМИТРИЕВ, канд. физ.-мат. наук А.И. ДАНИЛОВ

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, e-mail: v_dmitriev@aari.ru

В статье приводятся основные сведения о проекте «Создание новых методов и средств мониторинга гидрометеорологической и геофизической обстановки на архипелаге Шпицберген и в Западной Арктической зоне Российской Федерации», выполняемом в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» группой отечественных научных и образовательных организаций. Реализация проекта способствует укреплению российского присутствия на архипелаге Шпицберген. Проект рассчитан на 2014–2016 гг.

Ключевые слова: Шпицберген, Западная Арктика, гидрометеорологическая обстановка, геофизическая обстановка, мониторинг, ледовая обстановка, айсберговая опасность, спутниковые наблюдения, опасные гидрометеорологические и геофизические явления, опасные геодинамические явления, сейсмическая активность, загрязнение, информационно-телекоммуникационная инфраструктура, аппаратно-программный комплекс.

Развитие прикладных научных исследований относится к одному из наиболее эффективных и соответствующих национальным интересам Российской Федерации видов деятельности в Арктике, включая архипелаг Шпицберген, направленных на обеспечение разработки важнейших научно-технологических задач, необходимых для инновационного развития в масштабе отдельных секторов экономики (транспорт, добыча минеральных и водных биологических ресурсов, охрана окружающей среды, туризм) и международного сотрудничества.

Специфика российского присутствия на архипелаге Шпицберген определяется суровыми природно-климатическими условиями, определяемыми высокоширотным расположением архипелага и уязвимостью арктических экосистем к внешним воздействиям.

Общезвестно, что неблагоприятные гидрометеорологические (ГМ) условия способны оказать существенное негативное воздействие на любой вид морской деятельности, вплоть до возникновения аварийных и даже катастрофических ситуаций. В особенности это относится к Арктике, где практически каждое хозяйственное или оборонное мероприятие выполняется в условиях, близких к экстремальным. По этой причине

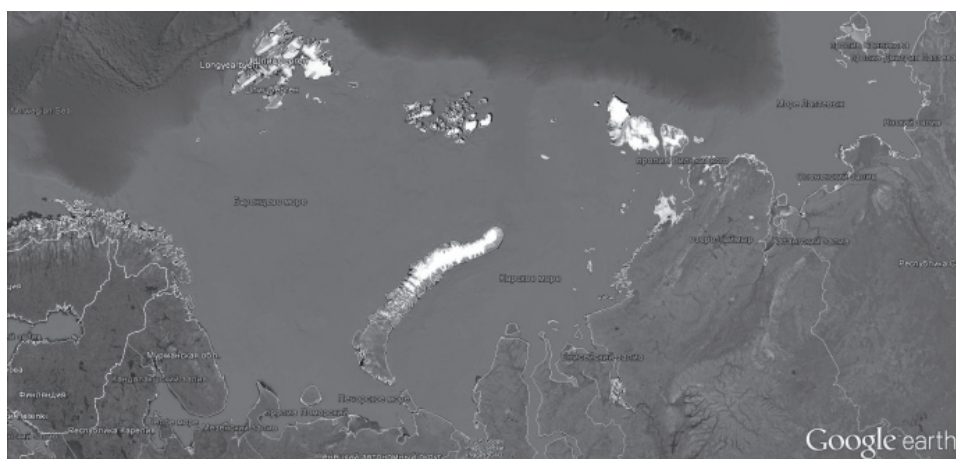


Рис. 1. Район действия проекта «Создание новых методов и средств мониторинга гидрометеорологической и геофизической обстановки на архипелаге Шпицберген и в Западной Арктической зоне Российской Федерации». Иллюстрация получена с помощью сервиса Google Earth.

обеспечение гидрометеорологической безопасности при планировании и осуществлении морской деятельности в Арктике является одной из наиболее приоритетных задач.

Гидрометеорологические угрозы, обусловленные ледовой обстановкой, следует рассматривать как важную составную часть опасных природных условий. При этом к опасным гидрометеорологическим явлениям относятся отдельные явления или их сочетания, воздействие которых может представлять угрозу жизни или здоровью граждан, а также может наносить материальный ущерб. Необходимо выполнить систематизацию и анализ гидрометеорологических угроз, учитывающих региональные особенности состояния ледяного покрова и формирования ледовой обстановки: во-первых, для раннего замерзания акватории и вторжений льда и, во-вторых, для опасных ледовых явлений, таких как сжатие льдов, облипание судов и обледенение судов.



Рис. 2. Неблагоприятные гидрометеорологические угрозы приводят к обледенению палубных конструкций ледокола (слева — «Капитан Драницын» в Баренцевом море) и к неблагоприятной ледовой обстановке: справа — большой столообразный айсберг массой 3,7 млн т, обнаруженный экспедицией ААНИИ в мае 2003 г. в составе аномального скопления айсбергов в районе Штокмановского ГКМ. Фото из архива ААНИИ.

Для каждого субъекта, заинтересованного в обеспечении ГМ безопасности, требуется определенный вид информации: набор ГМ параметров, географический охват, временной регламент, пространственно-временная детализация, форма представления, заблаговременность, статистическая обеспеченность и т.д., т.е. процедуры подготовки и передачи информации потребителю в каждом конкретном случае существенно разнятся. Из этого следует, что оптимальным вариантом организации обеспечения ГМ безопасности является создание специальной гибкой системы, в которой четко увязаны информационные потоки, оперативно корректируется состав, временной регламент, формы представления и способы передачи информации, имеются квалифицированные кадры и отлажены обратные связи.

С точки зрения обеспечения ГМ безопасности район архипелага Шпицберген и прилегающие акватории арктических морей и Центрального Арктического бассейна представляют несомненный интерес. В этом районе осуществляется крупномасштабный контакт Атлантики и Арктики, обуславливающий сложную систему атмосферной циркуляции, морских течений, интенсивный обмен водными массами с существенно различными свойствами, и, в отличие от других арктических морей, здесь преобладают открытые пространства, в гораздо меньшей степени стесненные берегами. Отработка системы ГМ обеспечения на примере района Шпицбергена и морей Западной Арктики позволит сравнительно быстро распространить ее на другие регионы Арктики.

Айсберговая угроза для работ и исследований по освоению шельфов Баренцева и Карского морей, особенно для стационарных морских платформ и терминалов, является главной ледовой опасностью. Экспедиция ААНИИ зимой 2003 г. в пределах площадки Штокмановского ГКМ обнаружила скопление айсбергов. Масса одного из них достигала 3,7 млн т. Этот фактор изменил концепцию освоения месторождения. Исторические данные и современные наблюдения в Карском море регистрируют значительное количество айсбергов и их обломков в районах предполагаемой добычи нефти.

В настоящее время имеются достаточно обширные данные о ледниках Шпицбергена, Земли Франца-Иосифа, Новой Земли, о динамике айсбергов в Баренцевом и Карском морях, обобщение которых, а также проведение дополнительных наблюдений позволят создать систему дистанционного мониторинга выводных арктических ледников, примыкающих зон и морских акваторий для оценки айсберговой угрозы морской деятельности в Западной Арктике. В работе могут быть в полной мере использованы возможности пункта приема спутниковой информации Российского научного центра на Шпицбергене.

Относительно будущих климатических изменений в Арктике нет однозначного ответа. Предполагаются как дальнейшее однонаправленное потепление климата, так и циклические изменения климата. Обе тенденции присутствуют в данных наблюдений за XX век и начало XXI века. Это означает, что при общей вековой тенденции к возрастанию температуры в масштабе десятилетий возможны замедления ее роста и понижения температуры. В любом случае изменения климата следует рассматривать как фактор, требующий учета при проектировании и эксплуатации долговременных сложных морских объектов и сооружений береговой инфраструктуры.

Сохраняющаяся неопределенность будущих изменений климата придает особую актуальность мониторингу происходящих изменений, прогнозированию дальнейших изменений и оценке возможных последствий для природопользования в приатлантической Арктике. Потепление климата может привести к интенсификации образования айсбергов в результате деградации ледников на Шпицбергене, архипе-

лагах Земля Франца-Иосифа, Новая Земля, Северная Земля, что создаст опасность для плавания танкеров, буровых платформ и судоходства по СМП. Может измениться повторяемость опасных гидрометеорологических явлений — штормов, брызговых обледенений, штормового волнения моря, катастрофических осадков, оказывающих неблагоприятные воздействия на объекты природопользования и местной индустрии.

Одновременно с продолжающимся потеплением в Арктике появились свидетельства о приостановке роста средней глобальной и полушарной температуры воздуха. Поэтому возникает вопрос, продолжатся ли изменения в арктической климатической системе в соответствии с прогнозируемым дальнейшим глобальным потеплением или арктический климат последует за новой тенденцией в наблюдаемом изменении глобального климата? Можно ожидать, что остановится и потепление в Арктике, поскольку существуют дальние связи между областями избыточного нагревания в низких широтах океана, где потепление приостановилось, и областями стока тепла из океана в высоких широтах. Известно, что климат приатлантической Арктики особенно сильно зависит от поступления тепла, приносимого теплыми океанскими течениями в Норвежское, Гренландское, Баренцево моря. Поэтому своевременное обнаружение изменений в этих морях, включая фьорды Западного Шпицбергена, и их прогноз составляют важное условие предвидения появлений аномалий в природной среде приатлантической Арктики.

Шпицберген является своего рода форпостом на пути распространения климатических изменений в океане и атмосфере, которые здесь опережают проявление таковых далее в приатлантической Арктике. Совместный анализ данных наблюдений за природной средой на Шпицбергене и на кластере российских арктических станций, расположенных в приатлантической Арктике, а также на островах и побережье к западу от меридиана Шпицбергена позволит установить степень сопряженности и запаздывания климатических и погодных аномалий в регионе и возможности для предвидения. Включение в анализ глобальных массивов наблюдаемых и смоделированных данных о характеристиках океана и атмосферы позволит выявить дальние связи и их прогностический потенциал.

В части мониторинга загрязнения объектов окружающей среды арктических территорий имеющиеся в настоящее время методики не позволяют осуществлять одновременное определение широкого круга экотоксикантов, таких как хлорфенолы, полициклические ароматические углеводороды и др., а также обладают недостаточно высокой чувствительностью, что обуславливает необходимость разработки новых методов и средств мониторинга загрязнения территории и акватории экологически опасными химическими элементами и соединениями.

Техническая доступность ресурсов углеводородов на акваториях и промышленная безопасность морских добычных и трубопроводных систем определяется глубиной залегания, рельефом и геологическим строением дна и ледовой обстановкой. Большая часть ресурсов нефти и свободного газа сосредоточена в замерзающих частях Баренцева и Карского морей. Основные геологические и техногенные процессы могут влиять на строительство и эксплуатацию инженерных сооружений на Западно-Арктическом шельфе России.

Анализ угроз сейсмической активности и оценка степени опасности для конкретных локальных районов Западной Арктики показывают, что для надежного контроля геодинамического режима на эксплуатируемых участках шельфа необходимо иметь методы и средства, обладающие достаточной чувствительностью, гарантирующей обнаружение и точную локацию событий, и обеспечивающие надежное определение

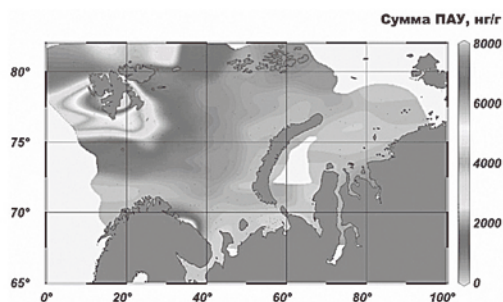


Рис. 4. Распределение суммы полициклических ароматических углеводородов в верхнем слое донных осадков (по данным *Norwegian Journal of Geology*. 2006. Vol. 86).

координат гипоцентров толчков в контурах и в ближней периферии будущих мульд проседания, формирующихся над отрабатываемыми нефтегазовыми месторождениями. В нынешнем состоянии эта сеть из-за удаленности регистрирующих центров на 600–900 км от месторождений не гарантирует мониторинг слабых землетрясений ни на Штокмановском газоконденсатном месторождении, ни на северном отрезке трассы Штокмановского морского трубопровода, ни на нефтяных полях Печорского моря.

Расположение архипелага Шпицберген обеспечивает уникальные условия для проведения высокоширотных научно-практических исследований, а в связи с начавшимся активным освоением Арктики и развитием морского судоходства архипелаг может стать одним из важных логистических центров транспортной системы в регионе.

Актуальность проблемы мониторинга гидрометеорологической и геофизической обстановки на архипелаге Шпицберген и в Западной Арктической зоне Российской Федерации представляется очевидной. В связи с этим, а также учитывая новые технические и информационные возможности, появившиеся в последние годы, существует необходимость и возможность разработки новых методов и средств такого мониторинга.

В 2014 г. Министерство образования и науки Российской Федерации инициировало выполнение в рамках мероприятия 1.4 федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы», утвержденной постановлением Правительства Российской Федерации от 21 мая 2013 г. № 426, проект «Создание новых методов и средств мониторинга гидрометеорологической и геофизической обстановки на архипелаге Шпицберген и в Западной Арктической зоне Российской Федерации».

В результате конкурсных отборов головным исполнителем проекта стало федеральное государственное бюджетное учреждение «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт» (АНИИ), а в число соисполнителей вошли федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Российский государственный гидрометеорологический университет» (РГГМУ), федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова» (САФУ), федеральное государственное бюджетное учреждение науки Геофизическая служба Российской академии наук — Кольский филиал (КФ ГС РАН) и федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт экологических проблем Севера Уральского отделения Российской академии наук (ИЭПС УрО РАН). Проект рассчитан на период 2014–2016 гг.

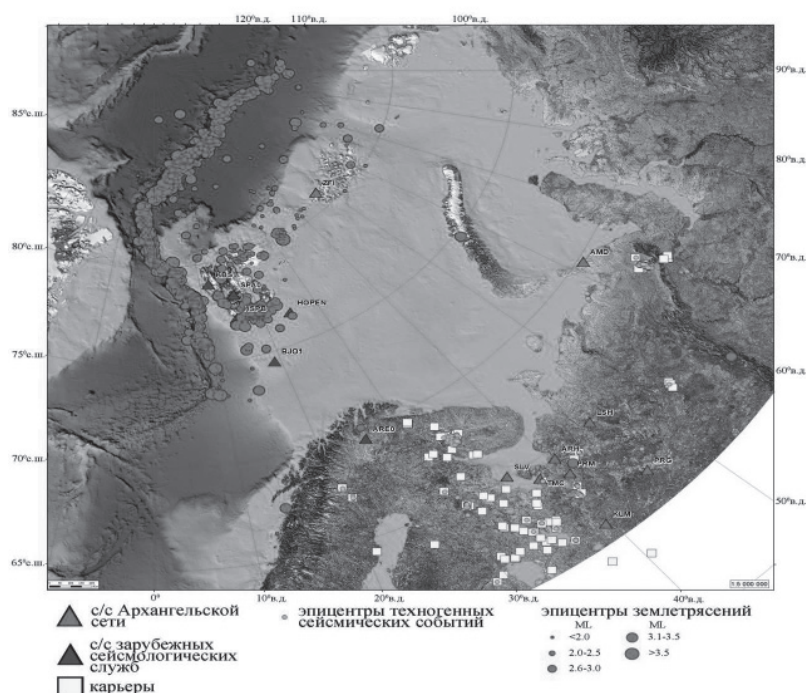


Рис. 4. Сейсмическая активность в Западной Арктике. Схема представлена ИЭПС УрО РАН.

Области и объекты разработок комплексного проекта сформированы в соответствии с научно-техническими проблемами, рисками (угрозами) и приоритетами, определенными в «Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 года», утвержденной Президентом РФ 20.02.2013, и отвечают приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники в Российской Федерации.

К основным ожидаемым результатам проекта относятся высокоточные методы и программные средства мониторинга и прогноза ледовой обстановки, мониторинга айсбергов и прогноза их дрейфа, состояния атмосферы, гидросферы и криосферы, климатических изменений, мониторинга загрязнения территории и акватории экологически опасными химическими элементами и соединениями, сейсмоинфразвукового мониторинга и детектирования сейсмической активности и опасных геодинамических явлений в районах разведки и добычи энергетических сырьевых ресурсов, мониторинга и детектирования вариаций сейсмических параметров для оценки сейсмического режима в зоне архипелага Шпицберген и в Западной Арктической зоне РФ.

Высокоточные методы и разрабатываемые на их основе программные средства мониторинга ледовой обстановки, спутникового мониторинга и предупреждения айсберговой опасности в зоне архипелага Шпицберген и в Западной Арктической зоне РФ должны обеспечить подготовку оперативных исходных ледовых и метеорологических данных для работы в режиме прогноза, выполнения прогноза (расчета) состояния ледяного покрова (сплошность, возрастной состав, дрейф, нарушения сплошности), а также преобразования и комплексирования выходной ледовой информации в формат, используемый в геоинформационных системах.

Разрабатываемые высокоточный метод и программные средства обнаружения айсбергов должны позволять выделение объектов на водной поверхности при скорости ветра до 10 м/с с размерами не менее двух элементов пространственного разрешения спутникового изображения.

Методы климатического прогноза основных климатических параметров в зоне архипелага Шпицберген и в Западной Арктической зоне РФ должны обеспечить прогнозирование основных климатических параметров (температура воздуха, ледовитость, повторяемость опасных гидрометеорологических явлений) с заблаговременностью от месяца до года и с оправдываемостью не ниже 70 % при принятой в официальных нормативах допустимой ошибке прогноза.

Методы и методики высокочувствительного детектирования опасных химических элементов и соединений в морских водах и в донных отложениях акватории архипелага Шпицберген и Западной Арктической зоны РФ должны обеспечивать определение тяжелых металлов в морских водах, хлорфенолов в морской воде и донных отложениях, общего органического углерода в морской воде и полициклических ароматических углеводородов в снеге, ледяном покрове и почве.

Методы, алгоритмы и программные средства высокоточного восстановления по спутниковым данным параметров атмосферы и атмосферных явлений в зоне архипелага Шпицберген и в Западной Арктической зоне РФ должны восстанавливать ключевые параметры атмосферы в неблагоприятных погодных условиях, включая облачность большого водозапаса, штормовые ветра и волны.

Методы и средства сейсмоинфразвукового мониторинга опасных геодинамических процессов в зоне архипелага Шпицберген и в Западной Арктической зоне РФ должны обеспечивать гарантированную регистрацию и классификацию естественных землетрясений и лютотрясений с магнитудным порогом выше $M = 2,0$ в пределах эксплуатируемых участков недр и на наиболее опасных по генерации айсбергов кромках ледниковых покровов.

Метод и программные средства определения вариаций параметров сейсмического режима в зоне архипелага Шпицберген и в Западной Арктической зоне РФ на основе обработки данных сейсмических станций Архангельской сети должны обеспечить определение следующих основных параметров сейсмического режима: пространственно-временное распределение землетрясений, выделившаяся энергия землетрясений, сейсмическая активность и наклон графика повторяемости.

Разрабатываемые новые высокоточные методы и аппаратно-программные средства должны быть предназначены для реализации принципиально новых инструментальных, методических и технологических возможностей в сфере мониторинга и прогноза гидрометеорологической и геофизической обстановки на архипелаге Шпицберген и в Западной Арктической зоне РФ и должны обеспечить:

а) увеличение доли научных фундаментальных и прикладных исследований в общем объеме деятельности российских организаций на архипелаге Шпицберген и формирование на нем современной научно-исследовательской базы;

б) возможность создания на архипелаге Шпицберген центра коллективного пользования с использованием информационно-телекоммуникационной инфраструктуры КВСМ для проведения научных исследований по российским и международным программам;

в) проведение систематических гидрометеорологических и гидрографических мониторинговых работ в интересах ведомств и организаций, ведущих свою деятельность

в Западной Арктической зоне РФ (органы государственной власти, МЧС, Минприроды России, Минтранс России, Минобороны России, Роснефть, Арктикуголь и др.);

г) развитие морских ресурсных исследований, разработку и внедрение новых технологий исследования водных биологических ресурсов в арктических условиях, в том числе в покрытых льдом районах Западной Арктики;

д) проведение в зоне архипелага Шпицберген и в Западной Арктической зоне РФ круглогодичных наблюдений за физическими и химическими процессами, происходящими в окружающей среде, а также определение уровня загрязнения атмосферы, почв, водных объектов, в том числе по гидробиологическим показателям.

Результаты проекта будут использованы при создании экспериментальной информационно-телекоммуникационной инфраструктуры комплексного высокоточного спутникового мониторинга опасных арктических гидрометеорологических и геофизических процессов и явлений в Западной Арктической зоне РФ, предназначенной для подготовки и принятия решений в перспективной системе управления ледовой обстановкой Западной Арктики.

Разрабатываемые методы и средства мониторинга позволят добиться снижения рисков и предупреждения техногенных катастроф, вызванных опасными природными процессами в районах разведки и добычи энергетических сырьевых ресурсов Западной Арктической зоны РФ, обеспечения безопасности навигации по Северному морскому пути, транзитных перевозок в зоне архипелага Шпицберген и в Западной Арктической зоне РФ, а также безопасности трансполярных воздушных маршрутов, выявления и предупреждения экологически опасных загрязнений территории и акватории архипелага Шпицберген и Западной Арктической зоны РФ, вызванных хозяйственной деятельностью российских и международных организаций.

Статья написана при финансовой поддержке Минобрнауки России при выполнении прикладных научных исследований и экспериментальных разработок (ПНИЭР) по теме «Создание новых методов и средств мониторинга гидрометеорологической и геофизической обстановки на архипелаге Шпицберген и в Западной Арктической зоне Российской Федерации» (Соглашение о предоставлении субсидии от 20.04.2014 № 14.610.21.0006, уникальный идентификатор ПНИЭР RFMEFI61014X0006).

V.G. DMITRIEV, A.I. DANILOV

PROSPECTS FOR THE CREATION OF INNOVATIVE TECHNOLOGIES FOR HYDROMETEOROLOGICAL AND GEOPHYSICAL CONDITIONS MONITORING ON SPITSBERGEN AND WESTERN ARCTIC ZONE OF THE RUSSIAN FEDERATION

This article provides basic information about the project “Development of new methods and techniques for monitoring of geophysical and hydrometeorological state of Spitsbergen and Russian West Arctic”, performed as part of the federal target program “Research and development on priority directions of scientific-technological complex of Russia for 2014–2020 years” by group of national scientific and educational organizations. Implementation of the project contributes to strengthening the Russian presence on the Spitsbergen archipelago. The project is designed for 2014–2016 years.

Keywords: Spitsbergen, Svalbard, Western Arctic, hydrometeorological conditions, the geophysical environment, monitoring, ice conditions, iceberg danger, satellite observations, dangerous meteorological and geophysical phenomena, dangerous geodynamic phenomena, seismic activity, pollution, information and telecommunications infrastructure, hardware and software package.

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБНАРУЖЕНИЯ АЙСБЕРГОВ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ИХ ДРЕЙФА В ЗАПАДНОМ СЕКТОРЕ АРКТИКИ

*д-р геогр. наук Е.У. МИРОНОВ, канд. физ.-мат. наук В.Г. СМЕРНОВ,
канд. геогр. наук И.А. БЫЧКОВА, канд. физ.-мат. наук М.Ю. КУЛАКОВ,
вед. программист Д.М. ДЕМЧЕВ*

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, e-mail: mir@aari.ru

Рассматриваются новые технологии обнаружения айсбергов на основе спутниковых радиолокационных изображений высокого разрешения и прогнозирования их дрейфа на основе совместной модели океан–лед AARI-IOCM и региональной атмосферной модели WRF, адаптированной для условий Баренцева и Карского морей.

Ключевые слова: айсберги, радиолокаторы, спутниковые изображения, динамико-термодинамическая модель, Баренцево море, Карское море.

ВВЕДЕНИЕ

Айсберги могут наблюдаться в большинстве районов морей Западной Арктики, и встреча с ними является одной из наиболее реальных и опасных угроз для различных отраслей экономики (Опасные ледовые явления..., 2010). Айсберги и их обломки из-за своей значительной массы и большой осадки представляют серьезную опасность для транспортных и рыболовных судов, ледоколов, нефтегазовых комплексов, включающих стационарные гидротехнические сооружения и трубопроводы, которые планируется воздвигать на шельфе этого региона. В последние годы в связи с активными работами (геологоразведка, сейсмическая съемка, разведочное бурение и др.) по освоению нефтегазовых месторождений на шельфе Баренцева и Карского морей вопрос айсберговой угрозы возник особенно остро. Поэтому мониторинг айсбергов и прогноз их перемещения имеет важное научное и прикладное значение.

Для исследования распространения айсбергов и закономерностей их дрейфа используются различные методы наблюдений, такие, как спутниковый мониторинг, аэрофотосъемка с вертолета или беспилотного летательного аппарата, установка радиомаяка на айсберг. Значительный опыт мониторинга айсбергов имеется у ледовых служб Канады, Дании и Норвегии. Радиолокационные спутниковые изображения высокого разрешения позволяют осуществлять обнаружение айсбергов и их мониторинг, аэрофотосъемка айсбергов позволяет получать морфометрические характеристики их верхней поверхности, а с помощью радиомаяков, установленных на их верхнюю поверхность, можно отслеживать траектории перемещения айсбергов. Эти данные необходимы для статистического анализа параметров дрейфа и верификации математических моделей дрейфа айсбергов.

Задачей настоящей статьи является рассмотрение современных технологий обнаружения айсбергов с использованием радиолокационных спутниковых снимков и прогнозирования дрейфа айсбергов, разработанных в последние годы.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ АЙСБЕРГОВ НА АКВАТОРИИ БАРЕНЦЕВА И КАРСКОГО МОРЕЙ

Потенциальными источниками айсбергов в Баренцевом море являются ледники арктических архипелагов Шпицберген, Земля Франца-Иосифа, Новая Земля и некоторых небольших арктических островов (Атлас..., 1985). Общая площадь современного оледенения этих архипелагов составляет около 70 тыс. км², а объем накопленного льда — более 20 км³. Наибольшими запасами льда обладает архипелаг Шпицберген, где сосредоточено примерно 30 % от объема ледников Западной Арктики. Существует вероятность дрейфа транзитных айсбергов из Арктического бассейна, от выводных ледников Канадского Арктического архипелага. В Карском море основными источниками образования айсбергов являются архипелаги Северная Земля и Новая Земля (Атлас..., 1985).

Распространение айсбергов в морях Западной Арктики неравномерно, и районы, где они наиболее часто встречаются, тяготеют к выводным ледникам. В то же время айсберги могут наблюдаться и на значительном удалении от них. Это обусловлено тем, что вблизи берегов большинства арктических архипелагов наблюдаются большие глубины, что позволяет айсбергам с осадкой киля более 20 м дрейфовать в сторону моря, а не садиться на мель во фьордах и бухтах. Поэтому айсберги и обломки айсбергов дрейфуют практически по всей акватории Баренцева и Карского морей в соответствии с генеральной схемой циркуляции вод и льдов. Плотность распределения айсбергов по акватории арктических морей имеет выраженную сезонную зависимость. Зимой айсберги встречаются относительно недалеко от источника их образования, а летом распространяются на акватории моря, свободной ото льда.

Исторические данные о распространении айсбергов получены в основном на материалах авиационных ледовых разведок с 1928 по 1991 г. (Abramov, 1996; Ледяные образования..., 2006), которые выполнялись нерегулярно и преимущественно в районах судоходных трасс, поэтому они не могут дать объективную оценку распространения айсбергов. Тем не менее, с учетом многолетнего характера наблюдений, эти

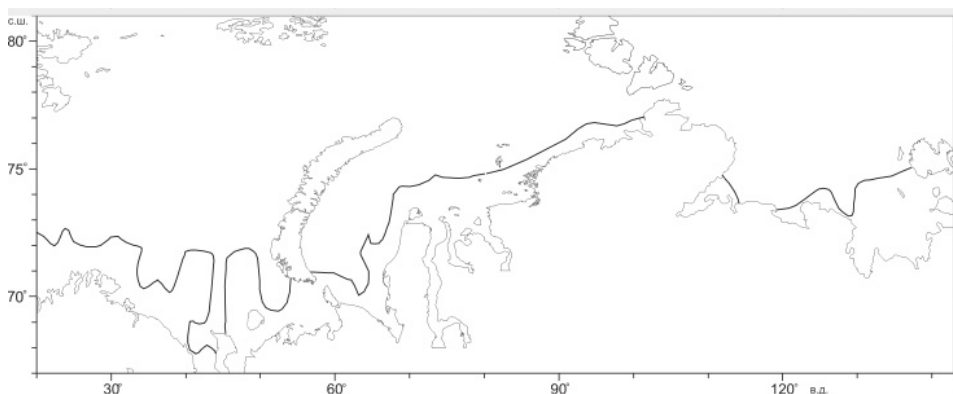


Рис. 1. Южная граница распространения айсбергов в Баренцевом и Карском морях по данным ледовых авиаразведок за период 1928–1991 гг. (Abramov, 1996; Ледяные образования..., 2006).

**Случаи аномального распространения айсбергов
в южной части Баренцева и Карского морей**

Координаты	Дата	Район	Источник
71°00' с.ш. 34,5° в.д.	Апрель 1929 г.	Побережье Мурмана	Визе, 1930
71°28' с.ш. 36°40' в.д.	1942 г.	Юг Баренцева моря	Ледяные образования..., 2006
72°05' с.ш. 46°10' в.д.	Май 2003 г.	Юг Баренцева моря	Наумов и др., 2003
69°30' с.ш. 49°00' в.д.	Май 2003 г.	К северо-западу от о. Колгуев	Наумов и др., 2003
70°30' с.ш. 61°00' в.д.	1961 г.	Юг Карского моря	Abramov, 1996
71°00' с.ш. 60°00' в.д.	?	Юг Карского моря	Abramov, 1996
74°00' с.ш. 70°30' в.д.	?	К северу от о. Белый	Abramov, 1996

данные дают общее представление о возможном характере распространения айсбергов и их повторяемости. На рис. 1 показана южная граница распространения айсбергов.

Специализированные исследования айсбергов, выполненные в последние годы, показали, что возможны аномальные случаи вторжений айсбергов на акватории, где обычно они не наблюдаются. В табл. 1 представлены случаи фиксаций айсбергов в южной части акватории Баренцева и Карского морей, где планируется строительство нефтегазовых комплексов.

Для обнаружения потенциально возможного распространения айсбергов необходимо проводить регулярный спутниковый радиолокационный мониторинг. Для оптимизации заказа радиолокационных изображений целесообразно сочетать его с математическим моделированием дрейфа айсбергов. Такой подход позволит обеспечить оценку айсберговых угроз в различных районах морей Западной Арктики.

**ТЕХНОЛОГИЯ ОБНАРУЖЕНИЯ АЙСБЕРГОВ
НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ДАННЫХ**

Обнаружение айсбергов с помощью спутниковых радиолокаторов основано на том, что обратный РЛ-сигнал от айсберга, как правило, выше, чем интенсивность обратного рассеивания от водной поверхности и ледяного покрова.

Принципиальная возможность обнаружения айсбергов на спутниковых радарных изображениях была показана в 1990-е гг. на примере снимков радиолокатора спутника «Алмаз-1», на которых уверенно обнаруживались айсберги среди припая и сплошных дрейфующих льдов (Александров и др., 1996). Позднее для мониторинга айсбергов были успешно использованы европейские и канадские радиолокационные спутники. Было установлено, что обратный РЛ-сигнал дрейфующего льда существенно изменяется в зависимости от возраста, формы, состояния поверхности и других параметров ледяного покрова. Причем вероятность обнаружения айсбергов с помощью спутниковых средств наблюдения зависит от соотношения размера айсберга и пространственного разрешения аппаратуры, формы и степени разрушенности айсберга, угла визирования, состояния моря. При оптимальных условиях наблюдения спутниковые радиолокаторы позволяют обнаруживать айсберги, размер которых приближается к пространственному разрешению аппаратуры, с вероятностью 90 % (Power et al., 2001). Все же, несмотря на явные преимущества, достаточного распространения на обширных арктических акваториях методы детального спутникового радиолокационного мониторинга айсбергов в 1990-е гг. не нашли. Их широкому использованию препятствовала высокая стоимость снимков.

Совершенствование методов обнаружения айсбергов проводится посредством привлечения архивных данных наблюдений за айсбергами в конкретных районах — учитываются размеры айсбергов, географическое положение, направление дрейфа, период наблюдения. Также используются данные модельных расчетов дрейфа айсбергов для подтверждения факта их обнаружения (Спутниковые методы, 2011).

Выделяют три возможные ситуации наблюдения айсбергов: 1) айсберги на открытой воде, 2) айсберги в дрейфующем льду, 3) айсберги в припае. Для каждой из этих ситуаций необходимы разные методические подходы, позволяющие вести спутниковый мониторинг айсбергов. Наиболее сложной является задача обнаружения айсбергов среди дрейфующего льда.

На радарных снимках айсберги видны на фоне океана как яркие мишени, обычно точечные. При увеличении пространственного разрешения снимков возрастает как точность определения размеров объектов, так и возможность отличия айсбергов от судов, также дающих яркий сигнал. Условия сильного ветра и сильного волнения на поверхности моря ограничивают обнаружение айсбергов, так как при этом увеличивается шумовой сигнал от моря. Однако айсберги, размер которых более чем в два раза превышает размер пикселя, могут быть обнаружены даже на взволнованной водной поверхности.

В технологии обнаружения айсбергов, используемой в настоящее время в ААНИИ, основным информационным источником являются данные спутниковых радиолокаторов высокого разрешения. В связи с отсутствием на орбите доступных широкому пользователю российских радиолокаторов высокого разрешения для разработки технологии мониторинга арктических айсбергов использовалась информация зарубежных радиолокационных спутников — канадского RADARSAT-2, немецких TerraSAR-X и Tandem-X, итальянских спутников COSMO-SkyMed-1-4.

Для мониторинга ледяного покрова и айсбергов вблизи объектов инженерной инфраструктуры на шельфе арктических морей спутниковые данные анализируются совместно с другими доступными источниками информации.

Технологии, применяемые в ААНИИ для обнаружения айсбергов, основаны на оптимальном сочетании спутниковых средств наблюдений, включающих как радиолокационные данные с пространственным разрешением от 3 до 25 м, так и данные оптического спектрального диапазона высокого пространственного разрешения (метры). Такой подход обеспечивает синергетический эффект усвоения данных об объектах мониторинга, полученных с различных дистанционных носителей в разных спектральных диапазонах. Снимок с ИСЗ в видимом диапазоне с высоким разрешением позволяет достоверно идентифицировать айсберг, определить его форму (используя особенности тени или применяя режим стереосъемки), отличить его от торосов, заструг и пр. Снимок в видимом диапазоне может дать больше информации об айсберге по сравнению с радиолокационным; но это преимущество оптической съемки может быть реализовано только в светлый период года и при благоприятной облачной ситуации.

Допустимое рассогласование во времени между анализируемыми снимками с разных космических носителей зависит от задач, решаемых при мониторинге ледяных объектов. Так, при обнаружении айсбергов в припае хорошие результаты обеспечивает комплексирование радиолокационных данных информацией видимого диапазона, полученной со спутников в течение предшествующей недели. Возможность

Процесс нахождения айсбергов начинается с процедур сегментации изображения, основанных на поиске связанных пикселей. На первом этапе тематической обработки изображение разделяется на гомогенные области. Для этого применяется оператор выделения границ σ/μ . Далее в поле полученных значений «сигма-мю» выделяются гомогенные зоны, границей между отдельными гомогенными зонами считается положение пикселей с максимальными значениями σ/μ (зона максимальной гетерогенности). Соседние гетерогенные пиксели считаются таковыми, если значение σ/μ в них превышает пороговое значение T . Пороговое значение определяется по гистограмме значений оператора σ/μ на данном снимке — как локальный максимум в правой краевой части. После установления величины порога σ/μ выполняется второй этап поиска айсбергов на снимках. Для этого применяется метод поиска связанных пикселей при обработке матрицы σ/μ скользящим окном 3×3 элемента. В заключение проводится маркировка выделенных гомогенных областей с выделением фоновых объектов (открытое море, острова, ледяной покров) и объектов мониторинга (айсберги, суда, инженерные сооружения и др.).

Полученные сегменты изображения анализируются с целью идентификации айсбергов. Как потенциальные айсберги рассматриваются пиксели, в которых сигнал выше порогового значения, устанавливаемого как 99 % перцентиль распределения радарного сигнала в данном полигоне. Производится выбраковка случаев ложного обнаружения айсбергов, когда за айсберг может быть принято, например, судно. Главными критериями различия являются разная яркость объектов, разная геометрическая форма и разная скорость перемещения объекта. На радарных снимках высокого разрешения суда легко опознаются благодаря их четким геометрическим контурам и наличию характерной регулярной засветки, обусловленной особенностями сложения когерентных сигналов, используемых в радиолокаторах с синтезированной апертурой. Обработанные данные о пространственном положении и размерах айсбергов экспортируются в формат, усваиваемый программой ArcGIS. Конечному пользователю передаются шейп-файлы с координатами и размерами объектов, а также квик-луки изображений в формате geotif объемом до 5 Мб с нанесенными объектами (рис. 3).

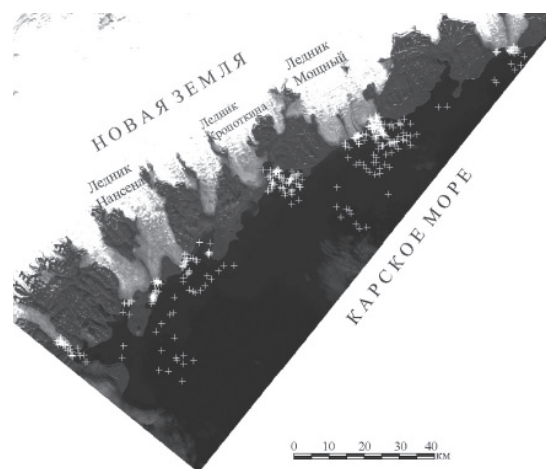


Рис. 3. Пример оперативной информационной продукции об айсбергах Карского моря, подготовленной специалистами ААНИИ для передачи конечному пользователю. Снимок со спутника Landsat-8, 27 августа 2014 г.

Анализ спутниковых наблюдений за последние годы позволяет сделать выводы о тенденциях в развитии айсберговой опасности в конкретных районах Арктики в определенный сезон года. Например, ежегодно на акватории Карского моря по спутниковым данным обнаруживается несколько тысяч айсбергов, при этом происходит некоторое увеличение числа айсбергов у восточного побережья Новой Земли. Основная масса айсбергов концентрируется вблизи выводных ледников, причем наибольшее число айсбергов генерировали ледники Кропоткина и Мощный. Наименьшая плотность айсбергов была близ ледника Средний, где наблюдались лишь единичные обломки айсбергов.

По последовательным спутниковым снимкам в ряде случаев можно оценить скорость дрейфа отдельных айсбергов. При этом, как правило, временной интервал между снимками не должен превышать одни сутки, а отслеживаемый айсберг должен иметь характерную, опознаваемую форму либо находиться в группе совместно перемещающихся айсбергов, образующих характерный рисунок.

Природа обнаруживаемых на спутниковых снимках с одиночной поляризацией мелких яркостных аномалий не всегда может быть трактована однозначно. Эти аномалии могли быть обусловлены айсбергами, но могли иметь и другое происхождение, связанное, например, с проявлением поверхностных течений, атмосферными эффектами, наличием техногенных объектов на водной поверхности. По снимку в одной поляризации, без привлечения дополнительной информации (данные съемки в других диапазонах и иной поляризации) однозначное заключение о природе яркостных аномалий в ряде случаев дать сложно. Поэтому дальнейшее развитие технологий мониторинга айсбергов по спутниковым РЛ-снимкам должно ориентироваться на использование разных поляризаций. Причем надежды на широкое использование в оперативной практике технологий автоматизированного обнаружения айсбергов по РЛ-снимкам с различной поляризацией связаны, в том числе, с реализацией планов вывода на орбиты перспективных радиолокационных спутников с режимом компактной поляриметрической моды. Этот режим, сочетающий широкий пространственный обзор с хорошими классификационными возможностями поляриметрических данных, позволит увеличить эффективность обнаружения айсбергов при одновременном снижении затрат на приобретение поляриметрической информации.

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДРЕЙФА АЙСБЕРГОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ ОКЕАН–ЛЕД AARI–IOSM И РЕГИОНАЛЬНОЙ АТМОСФЕРНОЙ МОДЕЛИ WRF

Уравнение баланса сил, действующих на айсберг, дрейфующий в поверхностном слое воды, можно записать в виде:

$$m \frac{d\vec{W}_i}{dt} = \vec{F}_a + \vec{F}_w + \vec{F}_{if} + \vec{F}_p + \vec{F}_C,$$

где $\vec{W}_i$ — скорость дрейфа айсберга, m — его масса, $\vec{F}_a$ — сила воздействия ветра, $\vec{F}_w$ — сила воздействия течения, $\vec{F}_{if}$ — сила воздействия дрейфующего льда, $\vec{F}_p$ — сила градиента давления, $\vec{F}_C$ — сила Кориолиса, t — время.

Сформулированная задача после представления сил в правой части уравнения известными аналитическими выражениями и эмпирическими параметризациями позволяет численными методами определить скорость, а в дальнейшем и траекторию дрейфа айсберга при известных форсингах. Однако если существует несколько до-

ступных путей получения скорости ветра, то такие параметры, как скорость течения, скорость дрейфа льда и денивеляция поверхности уровня моря, можно получить только путем их расчета в модели совместной циркуляции вод и льдов. С этой целью будем использовать модель *AARI-IOCM* (Кулаков и др., 2012). Эта модель лежит в основе «Метода и технологии расчета и краткосрочного прогноза уровня моря и течений в Северном Ледовитом океане и его морях на основе трехмерной гидродинамической модели совместной циркуляции вод и льдов», получивших в 2012 г. рекомендацию Центральной методической комиссии Росгидромета для использования в оперативной работе ААНИИ. В настоящий момент модель адаптирована к акватории Северного Ледовитого океана (СЛО) и прилегающей акватории Атлантического океана и имеет пространственное разрешение 13,8 км. В качестве внешнего форсинга обычно используются данные об атмосферном давлении на уровне моря и температуре воздуха на высоте 2 м из архива *NCEP/NCAR* для диагностических расчетов или прогностические данные Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF), представленные на сетке $2,5 \times 2,5^\circ$.

Модель была верифицирована по данным радиомаяков ARGOS, установленных на айсберги в Карском море. В качестве примера на рис. 4 показаны фактические траектории по данным четырех радиомаяков и модельные траектории. Результаты расчетов показали, что модель удовлетворительно воспроизводит дрейф айсбергов, однако для улучшения качества прогнозирования необходимо улучшать пространственное разрешение как модели океана, так и полей метеорологической информации.

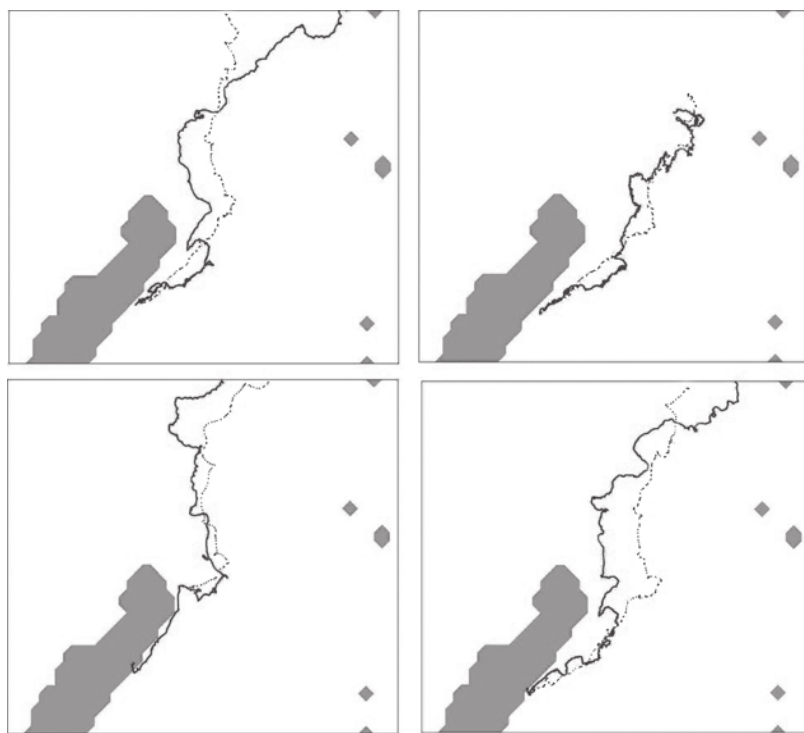


Рис. 4. Сопоставление наблюдаемых (сплошная линия) по данным четырех радиомаяков и рассчитанных по модели (пунктирная линия) траекторий айсбергов.

Для уменьшения пространственного шага модели *AARI-IOCM* использовалась процедура телескопирования, при которой на всей акватории СЛО используется обычный большой шаг (в нашем случае 13,8 км), а на акватории, для которой проводится прогнозирование, в несколько раз меньше. Эта процедура уже реализована для акватории Карского моря, на которой шаг модели в 3 раза меньше.

Для лучшего учета ветрового воздействия целесообразно использовать региональные модели атмосферы, учитывающие локальную топографию и подстилающую поверхность. Исследования по созданию региональных атмосферных моделей для Арктики ведутся в России и США. Наиболее развитой технологически является модель Polar WRF (Bromwich et al., 2009), поэтому для воспроизведения атмосферного форсинга она включена в модельный комплекс расчета айсбергов. В настоящий момент модель Polar WRF адаптирована для района, покрывающего юго-западную часть Карского моря и юго-восточную часть Баренцева моря с горизонтальным разрешением 4 км. Основными отличительными особенностями полярной от стандартной версии WRF являются:

- оптимальное описание энергообмена с использованием модели Noah LSN (Chen, Dudhia, 2001) над поверхностями, покрытыми морским и другими видами льда;
- возможность количественного описания ледяного покрова (сплоченность, толщина льда и снега на льду) в ходе численных расчетов.

Общая схема разработанной в ААНИИ технологии прогнозирования дрейфа айсбергов приведена на рис. 5.

В технологии можно выделить ряд крупных технологических блоков, или составляющих.

Подготовка исходных данных. В этот блок включены процедуры поступления и преобразования входных данных к форматам, позволяющим обеспечить ввод этой информации в модель. К этим данным относятся:

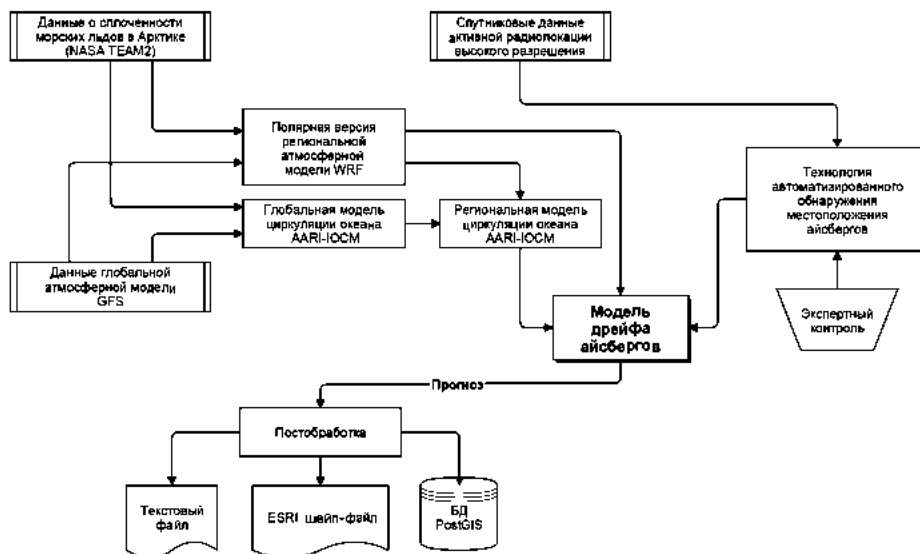


Рис. 5. Схема технологии прогноза дрейфа айсбергов.

– данные глобальной атмосферной модели GFS, с горизонтальным разрешением сетки $0,5 \times 0,5^\circ$. Данные скачиваются ежедневно с официального сайта NOAA: http://nomads.ncdc.noaa.gov/data.php#hires_weather_datasets;

– гридированные данные о сплоченности морских льдов по данным пассивного микроволнового зондирования, с использованием прибора SSMI, на основе алгоритма NASA TEAM (NT2) с сайта: ftp://sidacs.colorado.edu/pub/DATASETS/nsidc0081_nrt_nasateam_seaice/north/.

Расчеты на глобальной модели AARI-IOCM. Производится расчет всех элементов ледово-гидрологического состояния СЛО на период используемого метеорологического прогноза GFS. С временной дискретностью 1 ч выводятся значения полных потоков на границах сеточной области региональной модели AARI-IOCM.

Расчеты на региональной модели WRF. Инициализация Polar WRF происходит раз в сутки в 00 часов по Гринвичу, на основе данных глобальной модели GFS. В качестве данных о подстилающей поверхности используются результаты восстановления сплоченности морского льда на основе данных обработки пассивного микроволнового зондирования. В процессе расчетов выводятся значения атмосферного давления, приведенного к уровню моря, компонент скорости ветра и температуры воздуха на высоте 2 м с временной дискретностью 1 ч. Эти результаты будут использованы для расчетов по региональной модели AARI-IOCM.

Расчет на региональной модели AARI-IOCM. Производится расчет всех элементов ледово-гидрологического состояния на период используемого метеорологического прогноза. С временной дискретностью 6 ч выводятся значения составляющих скорости течения на 8 горизонтах (2,5; 7,5; 15; 25; 40; 62,5; 87,5 и 112,5 м), уровень моря, составляющие скорости ветра, толщина и сплоченность льда, а также составляющие скорости его дрейфа. Все выведенные результаты хранятся в файлах, с названиями, содержащими название параметра и время, которому они соответствуют.

Инициация модели дрейфа айсбергов. На этом этапе формируется файл, содержащий информацию по айсбергам, для которых будут проводиться расчеты. В этом файле содержится информация о количестве айсбергов, их номера, время фиксации координат, координаты, длина, ширина, высота, осадка и масса каждого айсберга, указываются пути к директориям с входной информацией и местам хранения результатов расчетов.

Расчет на модели дрейфа айсбергов. Модель дрейфа айсбергов реализована в лагранжевой постановке, поэтому значения всех необходимых для расчета форсингов ледово-гидрологических параметров интерполируются в точку с координатами айсберга. После расчета величин всех сил, действующих на айсберг, численно решается дифференциальная задача об определении скорости дрейфа айсберга и определяются новые координаты айсберга. После этого вся процедура повторяется и так до достижения времени окончания прогноза. В результате расчетов по модели для каждого айсберга, участвовавшего в расчетах, формируется и записывается в выходной директорий файл, содержащий последовательность координат положений айсберга на каждые 6 часов (временной интервал может быть изменен в любую сторону) на весь период прогноза.

Постобработка результатов расчетов. С помощью скриптов постобработки на языке Python формируются линейные шейп-файлы, которые являются конечным продуктом технологической цепочки. Эти файлы позволяют потребителям инфор-

мации оперативно просматривать результаты расчетов, а также контролировать качество расчетов. Кроме того, ведется параллельная запись в геопространственную базу данных PostGIS.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Айсберги дрейфуют практически по всей акватории Баренцева и Карского морей в соответствии с генеральной схемой циркуляции поверхностных вод. Плотность распределения айсбергов по акватории арктических морей имеет выраженную сезонную зависимость. Зимой айсберги встречаются относительно недалеко от источника их образования, а летом распространяются на акватории моря свободной ото льда.

Анализ исторических данных и специализированные исследования айсбергов, выполненные в последние годы, показали, что возможны аномальные случаи вторжений айсбергов на акватории, где обычно они не наблюдаются. Это относится к южной части акваторий Баренцева и Карского морей, где в ближайшие годы планируется активное строительство нефтегазовых комплексов.

В ААНИИ разработана технология обнаружения айсбергов на основе данных спутниковых радиолокаторов высокого разрешения, в комплексе с информацией оптического диапазона.

Самым важным звеном в создании надежной, независимой от внешних факторов системы информационного оповещения пользователей о наличии айсберговой угрозы в морях Западной Арктики должен стать вывод на орбиту российского радиолокационного спутника высокого пространственного разрешения.

В ААНИИ разработана технология прогнозирования дрейфа айсбергов с использованием модели океан–лед *AARI–IOCM* и региональной атмосферной модели Polar WRF. Технология позволяет в автоматическом режиме выполнять прогноз перемещения айсбергов на срок до 5 суток и представлять результаты в виде шейп-файлов.

Таким образом, разработанные технологии могут стать важными блоками при создании автоматизированной системы управления ледовой обстановки в арктических морях.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России при выполнении прикладных научных исследований и экспериментальных разработок (ПНИЭР) по теме «Создание новых методов и средств мониторинга гидрометеорологической и геофизической обстановки на архипелаге Шпицберген и в Западной Арктической зоне Российской Федерации» (Соглашение о предоставлении субсидии от 20.10.2014 № 14.610.21.0006, уникальный идентификатор ПНИЭР RFMEFI61014X0006).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Александров В.Ю., Лоцилов В.С., Проворкин А.В. Исследование айсбергов и морских льдов в Антарктике по данным РСА спутника «Алмаз-1» // Айсберги Мирового океана / Под ред. И.К. Попова, В.А. Воеводина. СПб.: Гидрометеоздат, 1996. С. 30–36.

Атлас Арктики. М.: Изд. ГУГК, 1985. 204 с.

Визе В.Ю. Айсберги у северных берегов Европы в 1929 г. // Известия Государственного гидрологического института. 1930. № 29. С. 77–84.

Кулаков М.Ю., Махитас А.П., Шутилин С.В. AARI–IOCM — совместная модель циркуляции вод и льдов Северного Ледовитого океана // Проблемы Арктики и Антарктики. 2012. № 2 (92). С. 6–18.

Ледяные образования морей западной Арктики / Под ред. Г.К. Зубакина. СПб.: ААНИИ, 2006. 272 с.

Наумов А.К., Зубакин Г.К., Гудошников Ю.П., Бузин И.В., Скутин А.А. Льды и айсберги в районе Штокмановского газоконденсатного месторождения // Труды РАО-03. Санкт-Петербург, 16–19 сентября 2003 г. СПб., 2003. С. 337–342.

Опасные ледовые явления для судоходства в Арктике / Под ред. Е.У. Миронова. СПб.: ААНИИ, 2010. 320 с.

Спутниковые методы определения характеристик ледяного покрова морей / Под ред. В.Г. Смирнова. СПб.: ААНИИ, 2011. 239 с.

Abramov V. Atlas of Arctic icebergs. Backbone Publishing Company, 1996. 70 p.

Bromwich D.H., Hines K.M., Bai L.-S. Developments and Testing of Polar Weather Research and Forecasting model: 2. Arctic Ocean // J. Geophys. Res. 2009. Vol. 114. D08122, doi:10.1029/2008JD010300.

Chen F., Dudhia J. Coupling an advanced land-surface/hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system, part I, Model implementation and sensitivity // Mon. Weather Rev. 2001. Vol. 129. P. 569–585.

Power D., Youden J., Lane K., Randell C., Flett D. Iceberg Detection Capabilities of RADARSAT Synthetic Aperture Radar // Canadian Journal of Remote Sensing. 2001. Vol. 27. № 5. P. 476–486.

YE.U. MIRONOV, V.G. SMIRNOV, I.A. BYCHKOVA, M.YU. KULAKOV, D.M. DEMCHEV

MODERN TECHNOLOGIES FOR ICEBERG DETECTION AND THEIR DRIFT FORECASTING IN THE WESTERN ARCTIC

New technologies for iceberg detection with the use of SAR high spatial resolution satellite imagery and iceberg drift forecasting based on couple ice-ocean model AARI-IOCM and regional atmosphere model WRF, adopted to the Barents and Kara seas conditions are considered.

Keywords: icebergs, radars, satellite imagery, dynamic-thermodynamic model, Barents Sea, Kara Sea.

МЕТАН В ПРИПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ АРКТИКИ

канд. физ.-мат. наук А.П. НАГУРНЫЙ, д-р. физ.-мат. наук А.П. МАКШТАС,
канд. геогр. наук А.С. МАКАРОВ

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, e-mail: nagurny@aari.ru

Обобщены результаты наблюдений за концентрацией метана в приповерхностном слое атмосферы, выполненных в экспедициях Арктического и антарктического научно-исследовательского института в 2002–2014 гг. Наблюдения проводились на дрейфующих станциях «Северный полюс-36» и «Северный полюс-39» в Центральной Арктике, в Гидрометеорологической обсерватории Тикси, расположенной на берегу моря Лаптева в зоне многолетней мерзлоты и на научно-исследовательской станции «Остров Самойловский» в дельте реки Лены.

Ключевые слова: метан, приземный слой атмосферы, дрейфующая станция, Северный Ледовитый океан.

ВВЕДЕНИЕ

Последние несколько десятилетий осуществляются регулярные наблюдения за изменчивостью концентрации метана в приземном слое арктической атмосферы на станциях мониторинга парниковых газов, расположенных вблизи Северного Ледовитого океана (СЛО). Измерения показали наличие значительных сезонных изменений концентраций метана в северной полярной области. В частности, были зарегистрированы эпизодические интенсивные увеличения концентрации метана в нижнем слое атмосферы на шельфе морей Лаптева и Восточно-Сибирского, достигающие $6\text{--}8 \text{ млн}^{-1}$ (Shakhova et al., 2010), а также вблизи материкового склона СЛО величиной более 4 млн^{-1} (Нагурный, Макштас, 2011). Причиной таких явлений могут быть разрушение газогидратов в шельфовой зоне арктических морей и эрозия осадочных пород, содержащих газогидраты в области материкового склона СЛО, например, в результате действия мутьевых (аналог селевых) потоков, вызванных неустойчивостью склоновых течений, а также геологической активностью в зоне больших перепадов глубин. Повышенный фон концентрации метана в атмосфере центральной части СЛО обусловлен, вероятней всего, биологической активностью в толще морского льда и на его нижней границе (Нагурный и др., 2013).

В настоящей статье представлен обзор результатов измерений концентрации метана в приповерхностном слое атмосферы, выполненных в центральной части СЛО на дрейфующих станциях «Северный полюс-36» (2009–2010 гг.) и «Северный полюс-39» (2011–2012 гг.), а также в Гидрометеорологической обсерватории Тикси (Киселев, Решетников, 2013), где повышенный фон и значительная сезонная изменчивость концентрации метана обусловлены главным образом наличием слоя многолетней мерзлоты. В заключение представлены предварительные результаты измерений

концентрации парниковых газов, выполняемых в летний период ежегодно начиная с 1998 г. ААНИИ и Институтом морских и полярных исследований им. Альфреда Вегенера (Германия) в дельте реки Лены.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ НА ДРЕЙФУЮЩЕЙ СТАНЦИИ СП-36

Дрейфующая станция СП-36 дрейфовала в потоке трансарктического течения. При подходе станции к глубоководному хребту Ломоносова со стороны Канадского бассейна в конце апреля и первой половине мая были отмечены экстремальные концентрации CH_4 , достигающие $4,2 \text{ млн}^{-1}$ (рис. 1). Максимальные концентрации наблюдались непосредственно над глубоководной частью склона хребта, вдоль которого станция дрейфовала с 29 апреля по 15 мая 2009 г. Аналогичные концентрации наблюдались в ходе дрейфа станции над ложем материкового склона шельфа Гренландии (23 июля 2009 г.).

Можно предположить существование нескольких источников метана в СЛО: биогенный метан, образующийся в поверхностных слоях осадков; биогенный метан, синтезированный во всей толще донных осадков; газогидраты в придонном слое океана; непосредственное выделение литосферных газов, не перешедших в форму газогидратов. Первые два источника, как правило, равномерно распространены в пространстве, и интенсивность их невелика. Они способны лишь несколько повысить концентрацию CH_4 в пределах придонных слоев воды. Последние два источника распределены в пространстве неравномерно, а их интенсивность может быть самой разной величины, вплоть до залповых выбросов. Единичный объем газогидрата может содержать 160–180 объемов CH_4 . Плотность газогидрата метана ниже плотности воды и льда и составляет примерно 900 кг/м^3 . Устойчивые газогидраты метана существуют при определенных термобарических условиях, типичных для 90 % дна океанов и морей. В глобальном масштабе внутримерзлотные залежи содержат лишь незначительную часть ресурсов газа, которые связывают с природными газогидратами. В морях СЛО зона стабильности газогидратов соответствует интервалу глубин от дна до глубины 300–400 м. Именно в этом интервале была обнаружена основная масса природных газогидратов метана (Макогон, 2003).

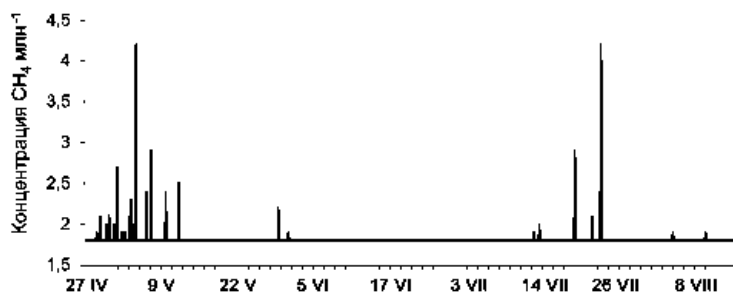


Рис. 1. Распределение концентрации CH_4 по маршруту дрейфа станции «Северный полюс-36» с 26 апреля по 15 августа 2009 г. в периоды, когда она превышала среднюю по земному шару величину $1,8 \text{ млн}^{-1}$.

Метан, попавший в воду, переносится путем диффузии и пузырьковым способом. Диффузия CH_4 в воду является медленным процессом. Далее растворенный CH_4 переносится океаническими течениями, для которых характерное время вертикального переноса от дна до поверхности составляет десятилетия, так как характерные вертикальные скорости, за исключением редких случаев проникающей глубоководной конвекции, когда вертикальный обмен возрастает на несколько порядков (Нагурный, Попов, 1985), имеют порядок 10 см/сут. За это время CH_4 большей частью успевает окислиться.

Пузырьковый перенос значительно интенсивнее диффузионного. В глубоководной части СЛО этот процесс может обеспечить вынос CH_4 к нижней поверхности морского льда, если объем пузырьков достаточно велик. Вертикальные скорости наиболее крупных из них могут достигать величины 0,5–1 м/с. Это означает, что метан с глубины 4–3 км может достигнуть нижней кромки морского льда примерно за один час.

Можно предположить и возможность всплытия крупных моноблоков газогидратов метана (благодаря их положительной плавучести), если они освободились от донных осадков в результате, например, эрозии рельефа дна, вызванной мутьевыми потоками и неустойчивостью склоновых течений. Отмеченные на дрейфующей станции СП-36 аномалии концентрации CH_4 в приледном слое атмосферы, вероятнее всего, обусловлены подъемом крупных метановых пузырей со дна океана. Эти аномалии соответствуют в одном случае положению станции над глубоководной частью склона хребта Ломоносова со стороны котловины Макарова, в другом — над ложем материкового склона Гренландии. Подобные аномалии CH_4 в районах больших глубин, вероятно, свидетельствуют о наличии литосферных источников газов, которые, проникая в донные осадки, образуют полости в виде смеси газа и газогидрата метана. Образование крупных газовых пузырей возможно не только в результате эрозии рельефа дна, но и в результате разрушения газогидратов при изменении условий их стабильного существования, например в случае изменений геотермальных условий на дне океана. Последнее характерно для различного рода геологически активных разломов океанической и материковой части земной коры вблизи больших перепадов глубин.

Метан, попавший на нижнюю границу морского льда, подвергается более интенсивному аэробному окислению, которое сопровождается выделением сравнительно большого количества тепла (814 кДж/моль O_2). Это, возможно, способствует некоторому изменению реологических свойств ледового покрова и прежде всего прочностных характеристик льда, что должно отразиться на процессах торошения, образования трещин, разводий и каналов. В летнее время это может повлиять на процессы интенсификации таяния льда.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ НА ДРЕЙФУЮЩЕЙ СТАНЦИИ СП-39

Дрейф СП-39 проходил над западной частью Канадской котловины вблизи поднятия Альфа, смещаясь в направлении острова Элсмери (Канада), не достигая материкового склона Канадского шельфа. С момента открытия станции (30 сентября 2011 г.) общий дрейф составил 1730 км, генеральный дрейф 570 км. В течение дрейфа станция не покидала центральной части СЛО. Общее количество дней наблюдений — 332. На рис. 2 представлены среднесуточные значения концентрации метана за весь период наблюдений.

Максимальное значение концентрации метана по данным трехминутного осреднения зафиксировано 1 мая 2012 г. и составило $2,032 \text{ млн}^{-1}$, а минимальное

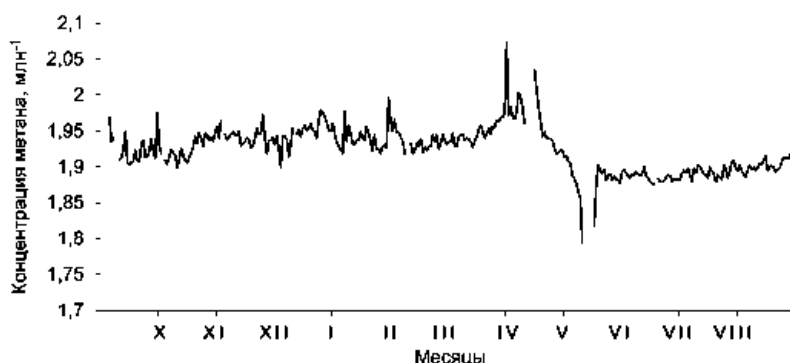


Рис. 2. Среднесуточные значения концентрации метана в приледном слое атмосферы на ледовой дрейфующей станции «Северный полюс-39» в период с 1 октября 2011 г. по 7 сентября 2012 г.

значение наблюдалось 31 мая 2012 г. и составило $1,685 \text{ млн}^{-1}$. Среднее значение концентрации метана в приледном слое за весь период наблюдений — $1,925 \text{ млн}^{-1}$. Как видно из рисунка, можно выделить два режима фонового значения метана. Первый, с высоким значением концентрации ($1,940 \text{ млн}^{-1}$), соответствует периоду полярной ночи (с ноября по март), второй, с меньшим значением ($1,893 \text{ млн}^{-1}$), соответствует полярному дню (с мая по сентябрь). Переход от одного режима к другому занимает один месяц — с середины апреля по середину мая. Разность фоновых значений концентрации составляет 47 млрд^{-1} .

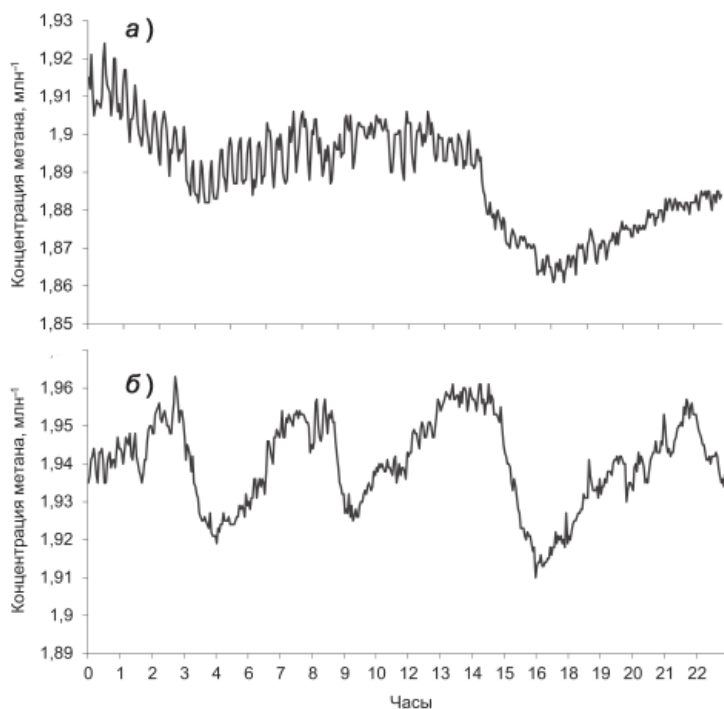


Рис. 3. Внутрисуточные изменения концентрации метана в приледном слое атмосферы на дрейфующей станции «Северный полюс-39» (а — 20 июня 2012 г.; б — 7 апреля 2012 г.).

Анализ внутрисуточных изменений концентрации метана показал, что в период дрейфа наблюдались ее изменения с периодами, близкими к полусуточному приливу (рис. 3а) и его гармоники с шестичасовым периодом (рис. 3б). При этом размах изменения концентрации метана на частоте полусуточного прилива достигал 40 млрд^{-1} .

Для выявления наличия океанических приливов использовались данные GPS-наблюдений за координатами станции и предположение, что дрейф станции отслеживает приливные движения. Анализ данных подтвердил присутствие полусуточного прилива в случае, представленном на рис. 3а, и наличие его шестичасовой реверсивной гармоники в случае, представленном на рис. 3б.

На рисунке 3а можно также отметить более короткие колебания концентрации метана с периодом порядка 20 мин, характерным для внутренних волн, распространяющихся в верхнем распресненном слое СЛО. Этот слой хорошо развит в летнее время, когда тает морской лед (на станции СП-39 лед начал интенсивно таять в начале июня). Следует отметить, что движения подледного слоя вод различных масштабов вызывают деформации морского льда, способствующие развитию трещин, разводей, каналов или торосов в ледовом покрове, тем самым облегчая или затрудняя (при сжатии льда) газообмен между приледным слоем атмосферы, нижней границей морского льда и верхним слоем океана. Проявление колебаний концентрации метана в приледном слое атмосферы на частоте океанических приливов и внутренних волн верхнего слоя океана свидетельствует о том, что источники метана находятся вблизи нижней границы ледового покрова и в самом льду.

Сравнение внутригодовой изменчивости среднемесячных значений концентрации метана за 2012 г. на станциях мониторинга парниковых газов (www.esrl.noaa.gov), расположенных вблизи СЛО, с данными измерений на дрейфующей станции СП-39 показало (рис. 4), что среднемесячные значения концентрации метана на станциях мониторинга во все месяцы меньше, чем на дрейфующей станции. При этом в момент максимума концентрации метана на СП-39 превышение концентрации относительно станции Барроу составило 60 млрд^{-1} в среднемесячных величинах. Следует отметить, что на всех станциях мониторинга и особенно на дрейфующей станции в центральной части СЛО прослеживается сезонный ход с максимумом в зимний период и амплитудой, составившей на СП-39 величину 79 млрд^{-1} .

Полученный результат можно объяснить существованием источников метана в верхнем слое воды и на нижней границе морского льда, а также в самой толще льда.

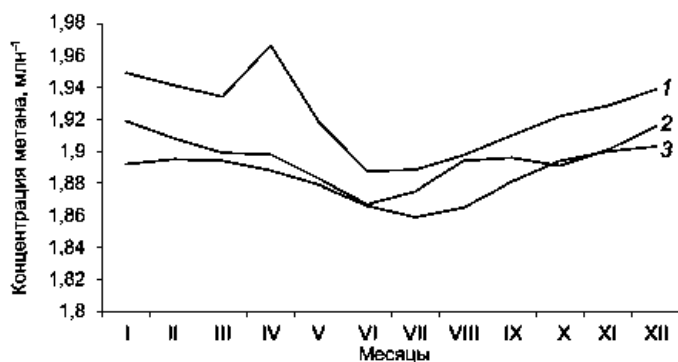


Рис. 4. Изменение среднемесячных значений концентрации метана в приледном слое атмосферы на дрейфующей станции «Северный полюс-39» (1), Барроу (2), Цепелин (3).

Какова природа этих источников? Возможно, что эти источники связаны с геологической активностью или разрушением газогидратов на дне океана. Однако для геологических факторов, так же как и для океанической адвекции растворенного метана, сезонный ход не является типичным. Одним из возможных факторов, способных объяснить особенности изменения концентрации метана в центральной части СЛО, является биологическая активность в морском ледяном покрове (Мельников, 2005; Леин, Иванов, 2009).

Биологическая активность в морском льду наблюдалась давно, но о масштабах биологической продуктивности в целом для СЛО известно немного. Особенно большой продуктивностью обладают инфильтрационные льды, которые имеют небольшую толщину и подвержены большой сезонной изменчивости. В таких льдах, притопленных снежным покровом, морская вода поднимается по капиллярам и трещинам к границе лед–снег. На этой границе, когда имеются условия для фотосинтеза, а температура близка к 0 °С, образуется большое количество водорослей (так называемые бурые льды), масса которых намного превышает массу биологических продуктов в подледном слое. Следует попутно отметить, что в последние годы благодаря потеплению Арктики и уменьшению средней толщины морского льда отмечается увеличение биологической продуктивности (Нагурный, 2009).

В полярную ночь на нижней границе морского льда и в его толще, т. е. в условиях дефицита растворенного кислорода и отсутствия фотосинтеза, преобладают процессы микробной генерации метана. Происходит нечто зеркальное сибирским озерам и болотам, при этом роль дна играет нижняя граница морского льда. Росту концентрации метана способствует также инверсионный характер распределения температуры в пограничном слое полярной атмосферы, достигающий максимума высоты и мощности в марте (Nagurny, 1995). Развитый инверсионный слой, как правило, ослабляет вертикальный обмен метана с вышележащими слоями атмосферы. Исследования термической структуры нижнего километрового слоя атмосферы на станции СП-39, выполненные с помощью метеорологического температурного профилемера МТП-5Р, разработанного НПО АТТЕХ, показали, что инверсионный слой практически постоянно присутствовал в холодный период года. Его высота составляла от ста до восьмисот метров. Летом, в результате радиационного прогрева подстилающей поверхности, инверсий практически не наблюдалось.

С наступлением полярного дня (апрель) начинают действовать процессы фотосинтеза. Благодаря насыщению верхнего слоя океана тальми водами, обогащенными кислородом, усиливаются процессы подледной микробной метанотрофии. Следует отметить, что в Мировом океане более 80 % метана окисляется микроорганизмами. В экспериментах с радиоактивным метаном в природных экосистемах микробный процесс окисления метана происходит при температурах близких к 0 °С, т. е. температуре таяния поверхности льда (Леин, Иванов, 2009). Появление больших участков открытой воды в летний сезон усиливает процессы поглощения метана из атмосферы. Поглощение происходит распресненными тальми водами, которые не могут быть изначально насыщены метаном по природе своего происхождения.

Сток метана происходит и в приледном слое атмосферы в результате фотохимических процессов, которые особенно интенсивны в присутствии прямых солнечных лучей. Не обладая высокой реактивной способностью, молекулы метана взаимодействуют с активными молекулами гидроксила ОН, атомами возбужденного кислорода

и атомами галогенов Cl, Br и др. в реакции замещения углерода в молекуле метана (Кароль, Киселев, 2004). При этом следует отметить, что избыток галогенов характерен для верхних слоев океана с его высокой соленостью и биологическими продуктами. Атомы галогенов попадают в приледный слой атмосферы при деформациях льда и обрушении ветровых волн на открытых участках воды (Нагурный, 1989).

Если иметь в виду резкий переход в режиме изменения концентрации метана (рис. 4), когда интенсивное уменьшение его концентрации начинается с началом полярного дня, но раньше времени интенсивного таяния морского ледяного покрова (июнь), то следует признать важность фотохимических процессов в балансе изменения количества метана в приледном слое атмосферы. Необходимо учитывать также, что над ледяным покровом с очень высоким альбедо интенсивность коротковолновой радиации может быстро возрастать (переоблучение пограничного слоя атмосферы).

В работе (Нагурный, Макштас, 2013) была выполнена приблизительная оценка максимальной величины генерации CH_4 морским льдом СЛО в течение года. Она не превышает значение 2,7 Мт метана в год. Наиболее вероятна оценка 1,5 Мт в год. Эта величина составляет 15 % от общего количества метана, генерируемого всем Мировым океаном (10 Мт) (Кароль, Киселев, 2004), что представляется существенной величиной, учитывая малую площадь морского льда СЛО относительно общей площади Мирового океана.

НАБЛЮДЕНИЯ В ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ ТИКСИ

Россия располагает пятью постоянно действующими станциями, на которых выполняются измерения метана: Черский ($68^\circ 51'$ с.ш., $161^\circ 53'$ в.д.), Териберка ($69^\circ 12'$ с.ш., $35^\circ 06'$ в.д.), Новый Порт ($67^\circ 41'$ с.ш., $72^\circ 52'$ в.д.), Тикси ($71^\circ 5'$ с.ш., $128^\circ 9'$ в.д.) и Воейково ($59^\circ 57'$ с.ш., $30^\circ 6'$ в.д.). При этом регулярные наблюдения за метаном в ГМО Тикси, расположенной на берегу моря Лаптевых, были начаты летом 2010 г. совместно Финским метеорологическим институтом и Главной геофизической обсерваторией им. Воейкова при технической поддержке ААНИИ.

Местоположение российских станций позволяет выделить местные особенности поведения концентрации метана. Одну из них (Териберка, Кольский полуостров) можно рассматривать как фоновую, другую (Новый Порт, полуостров Ямал) — в качестве станции, данные измерений на которой позволяют контролировать техногенные выбросы парниковых газов на близко расположенных месторождениях природного газа и нефти, а третью (Воейково) — как станцию в окрестности крупного мегаполиса. Особый интерес вызывают станции Новый Порт и Тикси, находящиеся в зоне сплошной многолетней мерзлоты с множеством небольших термокарстовых озер, накладывающей отпечаток на формирование поля концентрации метана (Киселев, Решетников, 2013).

Результаты многолетних измерений концентрации CH_4 как функции долготы места (от побережья п-ова Таймыр до устья р. Индигирки), обзор которых приведен в работе (Киселев, Решетников, 2013), показали, что максимальные значения концентраций метана наблюдались в области, близкой к долготе расположения ГМО Тикси. Измеренные на акватории моря Лаптевых концентрации CH_4 , на 25–30 % выше фоновых значений.

По результатам двухмесячных непрерывных наблюдений на этой станции в 2011 г.: среднемесячная концентрация CH_4 составила 1909 ± 30 млрд⁻¹ в июле и 1959 ± 42 млрд⁻¹ в августе; максимальная амплитуда колебаний концентрации CH_4 достигала 140 млрд⁻¹ при максимальном значении концентрации 2008 млрд⁻¹ в июле и

около 300 млрд⁻¹ при максимальном значении 2150 млрд⁻¹ в августе. Максимальное значение приходилось на вторую половину августа, характеризующуюся и максимальными дневными температурами приземного слоя воздуха. Анализ возможных причин столь значительных расхождений результатов мониторинга в этом регионе содержится в работе (Решетников, Ивахов, 2012).

ИЗМЕРЕНИЕ ПОТОКОВ МЕТАНА НА НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ СТАНЦИИ «ОСТРОВ САМОЙЛОВСКИЙ»

Начиная с 1998 г. ААНИИ ежегодно проводит в летний период в дельте реки Лены совместно с Институтом морских и полярных исследований им. Альфреда Вегенера (Германия) натурные исследования. После визита Президента Российской Федерации Владимира Владимировича Путина на базу экспедиции по его поручению была построена научно-исследовательская станция «Остров Самойловский», открытая летом 2013 г. Остров расположен в области резко континентального климата, со среднегодовой температурой воздуха (–14,7 °С) и малым количеством осадков в летний период (137 мм). Мощность мерзлоты достигает 500–600 м, а мощность деятельного слоя составляет 50–70 см.

Научно-исследовательские работы в дельте р. Лены направлены на изучение причин и механизмов климатических изменений, которые происходили и происходят в природной среде системы моря Лаптевых на протяжении последних 10 тыс. лет. На базе экспедиции, расположенной на острове Самойловский в центре дельты р. Лены, ведутся наблюдения за различными компонентами природной среды — характеристиками приземного слоя атмосферы, мерзлотой и ландшафтами, которые позволяют расшифровать изменения, произошедшие в дельте р. Лены. Важное значение имеют многолетние наблюдения (с 2002 г.) за эмиссией парниковых газов — метана и углекислого газа из вечной мерзлоты.

Измерения эмиссии метана осуществляются с использованием системы датчиков для пульсационных наблюдений EDDY, которая была установлена в центре восточной части острова (Wilk et al., 2008). В районе исследований распространен ландшафт полигональной тундры, характеризующийся большим количеством некрупных озер изометрической формы, глубиной 1–1,5 м и специфической растительностью, представленной гидрофильными видами *Arex aquatilis*, *Carex chordorrhiza* и *Carex rariflora* и мхами *Drepanocladus revolvens*, *Meesia triquetra*, *Aulacomnium turgidum*. Основные результаты измерений представлены на рис. 5.

По сравнению с тремя другими районами Арктики, где выполняются наблюдения с помощью системы EDDY в Арктике (Аляска, Гренландия и север Финляндии), эмиссия метана на о. Самойловский была относительно низкой, вероятно из-за чрезвычайно холодной вечной мерзлоты, ограниченного метаногенеза в субстрате и относительно большого распространения незатопляемых и умеренно влажных поверхностей (Sachs et al., 2008). Как известно, температура почвы и турбулентность в пограничном слое атмосферы являются одними из основных факторов, контролирующих поток метана. Зависимость потока метана от атмосферной турбулентности и адвекции в районе наблюдений определяется значительным распространением открытых водоемов в ландшафте полигональной тундры и демонстрирует тесную связь с глубиной протаивания и зеркалом грунтовых вод, которые часто идентифицируются как основные причины, определяющие величину потока метана при краткосрочных наблюдениях с использованием методики наблюдений камерным методом (chamber

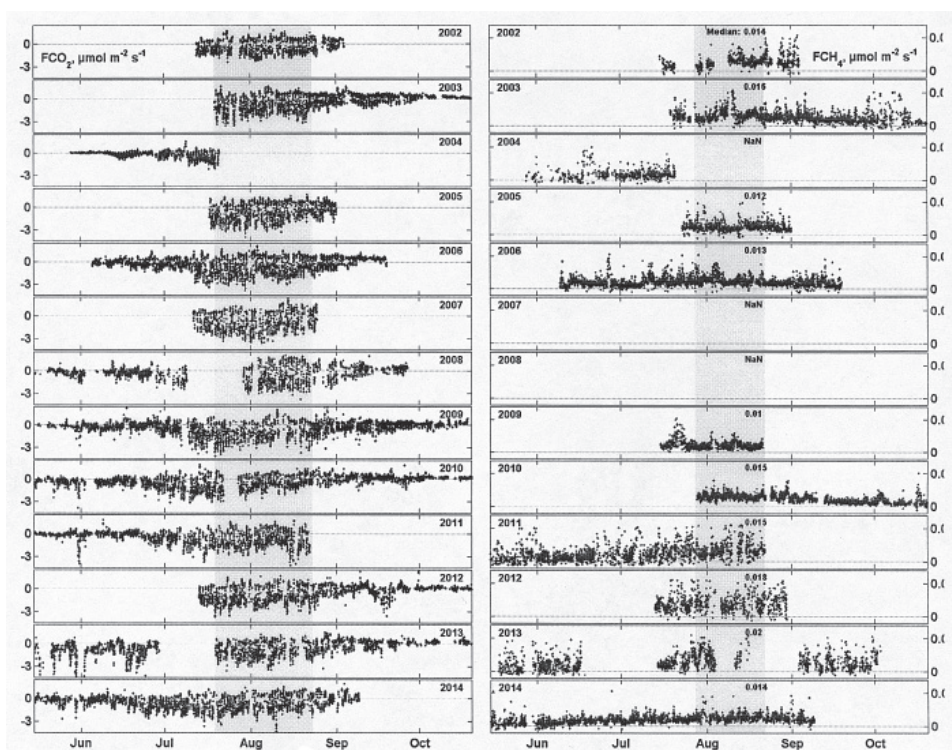


Рис. 5. Потоки (мкмоль·м⁻²·с⁻¹) диоксида углерода (CO₂ — слева) и метана (CH₄ — справа) в дельте реки Лены (Kutzbach, Wilk, в печати).

technique). Однако было обнаружено, что они не оказывают существенного влияния на осредненные результаты измерений при долгосрочных наблюдениях.

Соотношения между потоком метана и температурой почвы, найденные во время измерений в весенне-летний период, экстраполировались для оценки величины эмиссии метана в зимний период. По данным наблюдений она может быть оценена в 35 % от годового потока. Столь значительная величина эмиссии зимой обусловлена медленным промерзанием тундровых почв в начале зимы, длительным холодным периодом (октябрь–май) и, как правило, умеренным потоком метана в летний период. В целом эмиссия метана в ландшафте влажной полигональной тундры была низкой как в отношении ежедневных летних потоков (30 мг·м⁻²·день⁻¹), так и эмиссии метана за год (3,15 г·м⁻²). Причинами этого, как и предполагалось, являются очень низкая температура вечной мерзлоты в исследуемом регионе, песчаный состав почвы и малое количество питательных веществ в почвах (Sachs et al., 2010). В то же время в балансе потоков парниковых газов в тундре метан составляет 14 % от потока CO₂ и является важным компонентом формирования радиационного режима атмосферы, учитывая его высокую радиационную способность.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Отмечено несколько случаев аномальных значений концентрации CH₄ в приземном слое атмосферы СЛО. Все случаи аномальных значений концентрации CH₄ наблюдались в момент дрейфа станции над склоном глубоководного хребта Ломо-

носова со стороны котловины Макарова и материковым склоном Гренландии, при подходе станции к районам значительных перепадов глубин.

Фоновые значения концентрации метана в приледном слое атмосферы центральной части Северного Ледовитого океана оказались выше концентрации на станциях мониторинга парниковых газов, расположенных на прилегающих участках суши.

Выявлены особенности сезонного хода изменения концентрации метана в СЛО, имеющего характер двух режимов. Один — с повышенным фоновым значением во время полярной ночи и второй — с пониженным фоновым значением с период полярного дня. Переход от одного режима к другому осуществляется сравнительно быстро, в течение апреля–мая.

В масштабах внутрисуточных изменений концентрации метана на станции СП-39 отмечаются колебания на частотах полусуточного прилива и внутренних волн в верхнем слое океана. Это может свидетельствовать о существовании приледных источников метана, а также источников, расположенных на нижней границе льда и в его толще. Среди механизмов, описывающих природу источников и стоков метана в центральной части Северного Ледовитого океана, можно выделить генерацию метана микроорганизмами в толще морского льда и на его нижней границе. Этот процесс преобладает в период полярной ночи. В летний период преобладают процессы, связанные с фотохимическим разрушением метана в приледном слое атмосферы, микробной метанотрофией, а также поглощением метана из атмосферы распресненными тальными водами.

Комплекс измерений содержания метана на российских полярных станциях дает основу для проведения оценок объемов его эмиссии в районах вечной мерзлоты.

Работа выполнена в рамках темы ЦНТП Росгидромета 1.5.3.2 при частичной поддержке Российской-германской лаборатории морских полярных исследований им. О.Ю. Шмидта и гранта РФФИ 14-05-00677 «Вклад размораживания многолетнемерзлого грунта Сибири в эмиссию метана в атмосферу при потеплении климата Арктики».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Кароль И.Л., Киселев А.А. Атмосферный метан и глобальный климат // Природа. 2004. № 7. С. 47–52.
- Киселев А.А., Решетников А.И. Метан в Российской Арктике: результаты наблюдений и расчетов // Проблемы Арктики и Антарктики. 2013. № 2 (96). С. 5–15.
- Леин А.Ю., Иванов М.В. Биохимический цикл метана в океане. М.: Наука, 2009. 576 с.
- Макогон Ю.Ф. Природные газовые гидраты: распространение, модели образования, ресурсы // Российский химический журнал. 2003. Т. 48. № 3. С. 70–79.
- Мельников И.А. Экосистемы морского льда и верхнего слоя океана в условиях глобальных изменений в Арктике // Биология моря. 2005. Т. 30. Вып. 1. С. 3–10.
- Нагурный А.П., Попов А.В. Интенсивное поднятие глубинных и донных вод и их формирование на поверхности в районе Гренландской котловины // Метеорология и гидрология. 1985. № 7. С. 70–75.
- Нагурный А.П. Деформации морского льда как источник приледного аэрозоля по данным экспедиции на атомном ледоколе «Сибирь» (май–июнь, 1987 г.) // Доклады АН СССР. 1989. Т. 308. № 3. С. 582–584.

- Нагурный А.П. Климатические тенденции в изменении толщины многолетнего морского льда в Арктическом бассейне (1970–2005 гг.) // Метеорология и гидрология. 2009. № 9. С. 72–78.
- Нагурный А.П., Махитас А.П. Измерение выбросов метана в приледный слой атмосферы на дрейфующей ледовой станции «Северный полюс-36» (2009 г.) // Проблемы Арктики и Антарктики. 2011. № 1 (87). С. 22–28.
- Нагурный А. П., Махитас А.П., Соколов В.Т. Результаты измерения концентрации метана в приледном слое атмосферы на дрейфующей ледовой станции СП-39 (2011–2012 гг.) // Проблемы Арктики и Антарктики. 2013. № 4 (98). С. 5–13.
- Решетников А.И., Ивахов В.М. Результаты непрерывных наблюдений за концентрацией метана на станции Тикси (сравнение с данными наблюдений на шельфе моря Лаптевых) // Труды Главной геофизической обсерватории. 2012. Вып. 566. С. 257–269.
- Nagurny A.P. Space-time distribution of temperature inversions in the Arctic atmospheric boundary layer // Annals Geophysical. 1995. Vol. 13. P. 1087–1092.
- Sachs T., Wilk C., Boike J., Kutzbach L. Environmental controls on ecosystem-scale CH₄ emission from polygonal tundra in the Lena river delta, Siberia // Journal of Geophysical Research – Biogeosciences. 2008. Vol. 113. G00A03.
- Sachs T., Giebel M., Boike J., Kutzbach L. Environmental controls on CH₄ emission from polygonal tundra on the micro-site scale in the Lena river delta, Siberia // Global Change Biology. 2010. Vol. 16 (11). P. 3096–3110.
- Shakhova N., Semiletov I., Salyuk A., Yusupov V., Kosmach D., Gustafsson O. Extensive Methane Venting to the Atmosphere from Sediments of the East Siberian Arctic Shelf // Science. 2010. Vol. 27. P. 1246–1250.
- Wilk C., Kutzbach L., Sachs T., Wagner D., Pfeiffer E.-M. Methane emission from Siberian arctic polygonal tundra: EDDY covariance measurements and modeling // Global Change Biology. 2008. Vol. 14 (6). P. 1395–1408.

A.P. NAGURNY, A.P. MAKSHITAS, A.S. MAKAROV

METHANE IN THE ATMOSPHERIC SURFACE LAYER IN THE ARCTIC

The results of methane concentration observations in the atmospheric surface layer, carried out in expeditions of the Arctic and Antarctic Research Institute in 2002–2014 years are summarized. The observations were executed at the drifting stations “North Pole-36” and “North Pole-39” in the Central Arctic, at Hydrometeorological Observatory Tiksi, located on the shore of the Laptev Sea in the permafrost zone, and on the research station “Island Samoilovsky” in the delta of the Lena River.

Keywords: methane, atmospheric surface layer, drifting station, the Arctic Ocean.

ТЕХНОЛОГИИ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ДРЕЙФУЮЩЕГО ЛЬДА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЛЕДОВОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ НА ШЕЛЬФЕ ЗАМЕРЗАЮЩИХ МОРЕЙ

д-р техн. наук А.В. БОГОРОДСКИЙ¹, д-р физ.-мат. наук Г.А. ЛЕБЕДЕВ²

¹ — ОАО «Концерн «Океанприбор»», Санкт-Петербург, e-mail: mail@oceanpribor.ru

² — Государственный морской технический университет, Санкт-Петербург

Рассматриваются возможные варианты построения системы гидроакустического мониторинга опасных ледяных образований на границах «зоны экстренного отключения» плавучей нефтегазовой платформы от подводного оборудования. Для обеспечения защиты платформы от ледовых угроз предлагается система, основу которой составляют высокочастотные многолучевые гидролокаторы (эхолоты, эхоледомеры) для зондирования поверхности океана, из которых формируются стационарные или подвижные «акустические рубежи». Приводится состав средств, обеспечивающих работоспособность системы гидроакустического мониторинга, для различных вариантов построения акустических рубежей. Рассматриваются особенности канала распространения акустических сигналов, характерные для замерзающих морских акваторий.

Ключевые слова: ледовые угрозы, мониторинг, гидроакустика, нефтегазовая платформа.

ВВЕДЕНИЕ

Начавшиеся в 70-х годах прошлого века исследования и эксперименты по бурению нефтяных скважин на шельфе канадского сектора Арктики к настоящему времени перешли в стадию промышленного освоения углеводородных месторождений, находящихся на шельфе замерзающих морей, объемы и темпы которого, вероятно, будут возрастать, а география расширяться. Операции по морскому бурению дна проводились в сложной ледовой обстановке в диапазоне глубин от 3 м в северном Каспии до 1200 м в Центральном арктическом бассейне (район хребта Ломоносова) (Kenneth, 2010). Добыча нефти производилась как среди айсбергов в акватории Большой Ньюфаундлендской банки, так и в покрытом многолетними льдами море Бофорта, что продемонстрировало приемлемую ледовую безопасность использованных технологий добычи. В то же время опыт разведки и добычи углеводородного сырья в замерзающих акваториях показывает, что широко применяемые технологии обнаружения и мониторинга морского льда (спутниковые, судовые, авиационные) не всегда обеспечивали своевременное обнаружение опасных ледяных образований (ОЛО), что создавало реальные угрозы для платформ и подводного оборудования скважин (Kenneth, 2010). Поэтому дальнейшие работы по совершенствованию технологии обнаружения, мониторинга и параметризации (оценки морфометрических характеристик) ледяных образований (ЛО) представляются актуальными как в

научном, так и в практическом аспектах. По мнению некоторых исследователей, перспективная технология, которая способна обеспечивать высокие, вне зависимости от метеоусловий и времени суток, вероятности обнаружения ледяных образований любых типов, их параметризацию и определение элементов дрейфа должна будет базироваться на использовании существенно более широкого комплекса разнородных систем и средств наблюдения (Kenneth, 2010; Богородский, Лебедев, 2009, 2012). В этом смысле исследование возможностей применения существующих и перспективных гидроакустических методов и средств освещения ледовой обстановки для обеспечения ледовой защиты морских нефтегазовых платформ представляется перспективным, и работы в этом направлении уже ведутся (Kenneth, 2010; Богородский, Лебедев, 2009). Данная публикация является продолжением этих работ. В ней рассматриваются возможные варианты построения системы гидроакустического мониторинга дрейфующего ледяного покрова, базирующиеся на использовании как известных, широко применяемых на практике, так и перспективных гидроакустических и подводно-технических средств.

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ, СТОЯЩИЕ ПЕРЕД СИСТЕМАМИ ЗАЩИТЫ ОТ ЛЕДОВЫХ УГРОЗ

Главная цель создания системы защиты морских плавучих нефтегазодобывающих платформ от ледовых угроз — это обеспечение ледовой безопасности морской нефтегазодобычи в любых ледовых условиях, которые вследствие широкой географии морских нефтегазовых месторождений могут быть весьма многообразными. Однако с точки зрения обеспечения ледовой безопасности все многообразие ледовых условий можно свести к двум основным типам: условия, предполагающие наличие в акватории дрейфующих айсбергов и ледяного покрова, и условия, характеризуемые наличием только дрейфующего ледяного покрова без айсберговой опасности. Несмотря на то, что как в одной, так и в другой ситуации необходимо решать общую задачу защиты сооружений от ОЛО, защита от опасного морского ледяного покрова и защита от айсбергов имеют свою специфику, в связи с чем общая задача распадается на две частные, каждую из которых целесообразно рассматривать отдельно. Такой подход обусловлен тем, что основная цель защиты от айсбергов состоит в возможно большем снижении вероятности столкновения айсберга с сооружениями и оборудованием, в то время как защита от морского дрейфующего льда, вообще говоря, имеет целью снизить до приемлемых значений механические воздействия льда на эти объекты. В этой связи за рубежом ведутся работы по совершенствованию сразу двух технологий, которые в англоязычных публикациях именуются как “iceberg management” и “sea ice management”, что можно перевести как «управление айсбергами» и «управление морским ледяным покровом» (Kenneth, 2010). Учитывая принципиальную общность целей и задач, стоящих перед системами защиты от ледовых угроз (или системами обеспечения ледовой безопасности), авторы данной работы применяют общий термин «защита от ледовых угроз», понимая под ним совокупность действий, цель которых состоит в том, чтобы избежать механического воздействия ОЛО на сооружения или снизить воздействия на них до безопасных значений. Применительно к гидроакустическим методам и средствам мониторинга ЛО эти действия включают, но не ограничивают необходимость осуществлять:

– обнаружение, параметризацию (оценку морфометрических характеристик), прогнозирование векторов дрейфа ледяного покрова и айсбергов и слежение за ними;

– своевременную выдачу информации о ЛО в систему более высокого уровня с целью оценки степени угроз от ОЛО и принятия решения о последующих действиях системы.

АКУСТИЧЕСКИЙ РУБЕЖ КАК СПОСОБ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА

Все известные на сегодняшний день концепции мониторинга ЛО построены, так или иначе, по зональному принципу, предусматривающему разделение пространства вокруг сооружения на концентрические круговые зоны (зоны наблюдения и зоны безопасности) различного радиуса (Богородский, Лебедев, 2009; Ice and Iceberg Management..., 2008; Kenneth, 2010). Исходя из зонального принципа, в работе (Богородский, Лебедев, 2009) был предложен рубежный метод организации гидроакустического мониторинга ЛО. Его суть состоит в том, что для адекватной реакции системы защиты от ледовых угроз на меняющуюся ледовую обстановку система должна получать необходимую информацию о дрейфующих в зонах мониторинга ЛО периодически, но обязательно в те моменты, когда ЛО пересекают воображаемую линию (рубеж), определяемую границами зон мониторинга. Наименования, количество и протяженности этих зон в разных концепциях различны, однако т.н. «зона экстренного отключения» (радиус ~ 1800 м) платформы от подводного оборудования присутствует во всех концепциях. Технологии гидроакустического мониторинга ОЛО на границах этой зоны и являются предметом рассмотрения в рамках данной работы.

Будем рассматривать типичную для морской нефтегазодобычи ситуацию, при которой в некоторой точке акватории шельфа замерзающего моря с глубинами места 30... 300 м находится стоящая на якорях плавучая нефтегазовая платформа (охраняемое гидротехническое сооружение) или буровое судно, ведущие бурение дна или добычу углеводородов. Буровое судно может удерживаться над скважиной не якорями, а системой динамического позиционирования. В случае преодоления ОЛО границы «зоны экстренного отключения» и появления непосредственной угрозы его воздействия на сооружение, возможно экстренное безопасное разъединение трубного става, трубопроводов и кабелей, связывающих надводную и подводную части бурового и добычного оборудования, и последующий отвод платформы или бурового судна от скважины. В непосредственной близости от платформы находятся суда технического флота, способные разрушать участки ледяного покрова, которые по результатам параметризации и оценки угроз классифицируются как ОЛО.

Стационарный донный акустический рубеж

Рассмотрим один из возможных вариантов реализации системы гидроакустического мониторинга ледяного покрова, основу которого составляют высокочастотные многолучевые гидролокаторы для зондирования поверхности океана, пространственно и информационно объединенные в т.н. стационарный донный акустический рубеж вокруг охраняемого сооружения (рис. 1). Такого рода замкнутый донный акустический рубеж целесообразно применять в условиях, когда возможны резкие и трудно предсказуемые изменения скорости и направления дрейфа ледяного покрова, т.е. когда лед может приближаться к платформе или судну с любых направлений. В этой связи ледовая обстановка должна постоянно контролироваться в любой точке площади замкнутого кольца, внутренний радиус которого R_6 примем равным рассто-

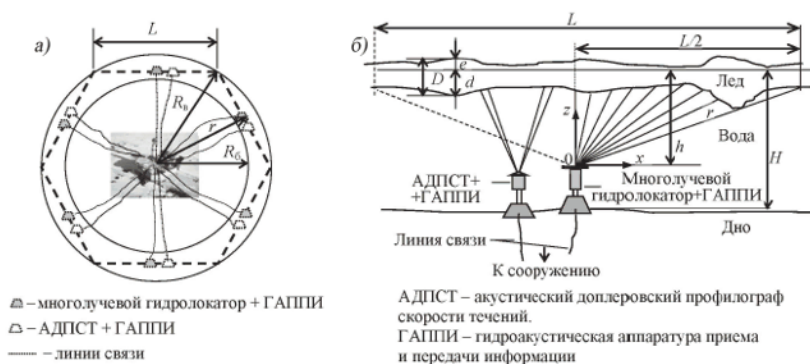


Рис. 1. Примерная схема расположения элементов стационарного донного акустического рубежа (а) и схема применения гидроакустических средств, входящих в его состав (б).

янию до ближней границы «зоны экстренного отключения» охраняемого сооружения (~ 1800 м), а его внешний радиус R_0 — расстоянию до дальней границы этой зоны.

При этом протяженность кольца в радиальном направлении должна быть такой, чтобы даже при максимально возможных скоростях дрейфа время прохождения ЛО через него было бы достаточным для того, чтобы система гидроакустического мониторинга имела возможность получить, обработать и передать в центр управления (ЦУ) необходимую информацию о ледяном покрове, а ЦУ мог принять решение о дальнейших действиях системы защиты.

По данным работ (Ice and Iceberg Surveillance..., 2008; Kenneth, 2010) для экстренного безопасного разъединения трубного става и коммуникаций, связывающих надводную и подводную части бурового и добычного оборудования, и начала отхода платформы или бурового судна от скважины необходимо около 15 или 30 мин. В своих расчетах мы будем ориентироваться на большее из значений этого интервала времени. Примем также, что необходимо затратить еще 10 мин на параметризацию ЛО с помощью гидроакустических средств, передачу информации в ЦУ и принятие центром решения о дальнейших действиях системы защиты. Тогда, предположив, что в течение указанных выше периодов времени направление и скорость дрейфа ледяного покрова не меняются, значения R_0 и r (см. рис. 1) можно рассчитать с помощью следующих выражений:

$$R_0 \text{ (м)} = 1800 \text{ (с)} \cdot v_{\text{дн}} \text{ (м/с)}; r = (1800+600) \cdot v_{\text{дн}} = 2400 \text{ (с)} \cdot v_{\text{дн}} \text{ (м/с)}, \quad (1)$$

где $v_{\text{дн}}$ — наибольшая наблюдавшаяся скорость дрейфа ледяного покрова.

Если совокупность зон обзора L акустического рубежа представляет собой правильный многоугольник, как это представлено на рисунке 1а, то количество n сторон L такого многоугольника определяется значением отношения r/L , где r — радиус окружности, вписанной в многоугольник (Бронштейн, Семендяев, 1981). Для нашего случая $r/L = (2400 \cdot v_{\text{дн}})/L$. Исходя из практических и экономических соображений, количество гидролокаторов в акустическом рубеже, определяемое значением n , должно быть минимально необходимым. Однако чем меньше значение n , тем более протяженную зону обзора L должен обеспечивать каждый многолучевой гидролокатор в реальных гидролого-акустических условиях его работы, которые зависят от времени года, ледовой обстановки, глубины акватории и др. Предположим, что в состав рубежа должно входить не более $n = 12$ гидролокаторов. Далее для рас-

четов воспользуемся данными, приведенным в (Ice and Iceberg Management..., 2008; Ice and Iceberg Surveillance..., 2008), согласно которым внезапно изменяющаяся по направлению скорость дрейфа льда в Баренцевом море может достигать 1,3 м/с (вероятность не превышает 1 % в течение года) при среднем значении скорости дрейфа 0,2 м/с. Тогда, вычислив r/L и используя (Бронштейн, Семендяев, 1981), найдем, что при $v_{\text{др}} = L \cdot 1,3 \text{ м/с} = 1677 \text{ м} \approx 1700 \text{ м}$.

При обзоре неровных поверхностей, к которым относится и морской ледяной покров, могут возникать непросматриваемые участки поверхности, находящиеся в зонах акустической тени, протяженность которых зависит от морфометрических характеристик неровностей и углов скольжения α акустических лучей, падающих на эту поверхность (Басс, Фукс, 1972). Практика показывает, что при углах скольжения α больших или равных среднему углу наклона $\bar{\gamma}$ неровностей затенение поверхности неровностями незначительно, вследствие чего его можно не учитывать и считать обзор беспропускным. Наиболее крупные неровности характерны для восторощенных участков ледяного покрова. Если средний угол наклона (ската) подводной части торосов $\bar{\gamma}$ принять равным $26,5^\circ$ (Богородский, Гаврило, 1984) и воспользоваться соотношением $\tan \alpha = 2h/L$ (см. рис. 2), то получим, что беспропускный обзор поверхности восторощенного льда возможен в полосе обзора, протяженность которой (обозначим ее L_0) можно оценить из неравенства

$$L_0/2 \leq 2,0h. \quad (2)$$

Опыт эксплуатации серийных гидроакустических средств освещения ледовой обстановки из-под воды показывает, что при соотношении $L/2 \approx 2,5h$ наблюдаемое самозатенение поверхности еще не настолько велико, чтобы существенно снизить информативность гидролокационного изображения обследуемой поверхности.

При обзоре нижней поверхности ровного (без наслоений и торосов) льда соотношение (2) может быть увеличено. Однако каковы реальные границы этого увеличения, пока неясно. Отказавшись от условия (2), можно изменить геометрию обзора многолучевого гидролокатора, произвольно увеличив отношение $L/2h$. При этом большая часть полосы обзора (обозначим ее L_3) $L_3/2 = L/2$ $L_0/2$ может оказаться затененной рельефом нижней поверхности льда. В этой связи реальные возможности предложенного в работе (Kenneth, 2010) способа увеличения протяженности полосы обзора за счет установки антенны многолучевого гидролокатора под некоторым углом наклона θ_0 относительно горизонта (см. рис. 2.) требуют экспериментального подтверждения.

При установке гидролокатора в донном модуле можно считать, что $h \approx H$. В этом случае при локации нижней поверхности многолетнего или толстого восторощенного однолетнего льда значение $L = L_0 = 1700 \text{ м}$ можно реализовать при глубинах места $H \geq 425 \text{ м}$. В табл. 1 приведено минимально необходимое количество гидролока-

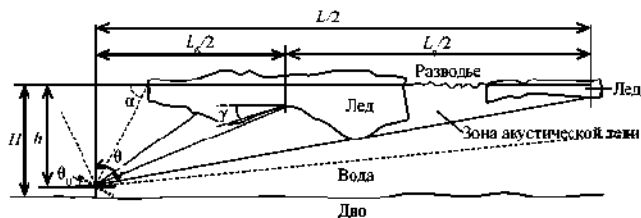


Рис. 2. К определению протяженности зон обзора $L_0/2$ и $L_3/2$.

**Минимально необходимое количество многолучевых гидролокаторов
для построения донного акустического рубежа**

$v_{\text{дн}}, \text{ м/с}$	1,3 м/с				0,2 м/с				
$H, \text{ м}$	60	90	200	340	20	50	90	200	340
$L, \text{ м}$	300	450	1000	1700	100	250	450	1000	1700
n	64	48	20	12	32	12	7	4	3
$R_0, \text{ м}$	2340				360				

торов донного акустического рубежа, обеспечивающих выполнение условия $L/2 \approx 2,5h$ при различных глубинах акватории и двух значениях скорости дрейфа — наибольшей и средней. Из табл. 1 видно, что при $v_{\text{дн}} = 1,3 \text{ м/с}$ количество многолучевых гидролокаторов на акватории глубиной менее 340 м становится недопустимо большим, в то время как при $v_{\text{дн}} = 0,2 \text{ м/с}$ оно остается приемлемым и для глубин 50 м.

Разрешающая способность гидролокаторов в полосе обзора ухудшается пропорционально дальности и на краях полосы может характеризоваться значениями в десятки метров. Так, при ширине крайнего луча статического веера ХН приемной антенны многолучевого гидролокатора, равной $3 \times 3^\circ$, размер элемента разрешения в плоскости, перпендикулярной плоскости веера, на дальности 850 м будет равен 44 м. В настоящее время неясно, достаточна ли подобная разрешающая способность и какой она должна быть для того, чтобы гидролокационная информация о ледяном покрове могла эффективно использоваться центром управления.

В работе (Kenneth, 2010) отмечается, что разрешающая способность гидролокатора порядка $1 \times 1 \text{ м}$ представляется целесообразной для обнаружения «самых важных деталей нижней поверхности льда». Однако обеспечить с помощью донных многолучевых гидролокаторов подобную разрешающую способность в плоскости, перпендикулярной плоскости веера ХН, на дальностях в несколько сотен метров вряд ли возможно.

В качестве многолучевых гидролокаторов акустического рубежа могут быть использованы многолучевые эхолоты (МЭЛ) с плоскими или выпуклыми фазированными антенными решетками. МЭЛ позволяет выполнять вычисление координат z, x (см. рис. 1) точек пересечения лучей r веера парциальных характеристик направленности с нижней поверхностью льда в системе прямоугольных координат $x, 0, z$, связанных с приемной антенной МЭЛ, и графически отображать функцию $z(x)$. Резкое уменьшение координаты z при каком-либо значении координаты x является признаком наличия в этой области льда с большой осадкой d . Отечественный опыт практического применения МЭЛ для решения задач мониторинга ледяного покрова и, в частности, для оценки его морфометрических характеристик пока отсутствует. За рубежом опубликованы результаты работ иностранных исследователей, использовавших МЭЛ “GeoSwath”, Kongsberg EM 2000 и “Echoscope” для локации нижней поверхности ледяного покрова (CodaOctopus, 2008; GeoAcoustics, 2008; Wadhams et al., 2006), которые К. Johannessen Eik (2010) считает обнадеживающими. Так, Wadhams и Doble (2008) утверждают, что с помощью МЭЛ можно уверенно различать однолетний и многолетний льды, а также классифицировать характер поверхности разводий по признаку «вода–лед». О результатах оценки других характеристик ледяного покрова, в частности морфометрических, не сообщается.

Достоверность информации о морфометрических характеристиках дрейфующего ледяного покрова может быть существенно повышена, если гидроакустические средства донного акустического рубежа обеспечат получение данных не только о характере функции $z(x)$, но также об осадке d и толщине D льда в полосе обзора (см. рис. 1), т.е. будут обеспечивать функцию эхоледомера. Однолучевые эхоледомеры были и остаются незаменимым инструментом для долговременных наблюдений и измерений осадки и толщины льда. Обычно они используются в донном варианте на заглублениях 50... 200 м от поверхности и озвучивают ограниченный ее участок диаметром не более 10 м. Однако, несмотря на относительную простоту конструкции и небольшую стоимость однолучевых эхоледомеров, их использование в качестве основного средства донного акустического рубежа вряд ли целесообразно вследствие малой полосы обзора. В этой связи перспективным решением представляется разработка и использование в составе донного акустического рубежа многолучевых или интерферометрических (фазовых) акусто-гидростатических эхоледомеров, технический облик и принцип действия которых описаны в патентах (Богородский, 2013а; Богородский, 2013б) соответственно.

Для оценки параметров дрейфа ледяного покрова в составе донного рубежа могут быть использованы гидроакустические измерители скорости и направления движения. В качестве такого средства целесообразно использовать АДПСТ (см. рис. 1), имеющий режим измерения составляющих вектора скорости дрейфа ледяного покрова. Количество АДПСТ в составе акустического донного рубежа должно быть минимально необходимым для репрезентативной оценки поля скорости дрейфа в акватории.

Работоспособность рассматриваемой выше системы гидроакустического мониторинга ледяного покрова будет также зависеть от возможностей системы связи (приемопередающая аппаратура + канал распространения сигналов) обеспечить бесперебойный и качественный обмен информацией между гидролокаторами рубежа и ЦУ. Учитывая необходимость обеспечения высоконадежной связи, представляется целесообразным иметь кроме основной еще и резервную связную систему. При размещении центра управления на охраняемом сооружении это можно реализовать, применив в системе гидроакустического мониторинга как гидроакустическую (ГАППИ + гидроакустический канал распространения сигналов), так и кабельную системы связи, несмотря на определенные сложности, возникающие при прокладке и эксплуатации кабельных трасс в замерзающих акваториях. Применительно к обсуждаемой схеме построения донного акустического рубежа система связи должна обеспечивать передачу необходимой информации о параметрах ледяного покрова в «зоне экстренного отключения», т.е. на дальностях $r \leq 3,0$ км при нахождении источника информации на глубинах $h \leq 350$ м.

Если ледовые условия в районе охраняемого сооружения характеризуются наличием устойчивого коридора однонаправленного дрейфа льдов, система гидроакустического мониторинга ледяного покрова может быть реализована в одном из двух, отличающихся друг от друга вариантов (см. рис. 3). Вариант первый нами уже рассмотрен выше — это стационарный донный акустический рубеж, но не замкнутый вокруг охраняемого сооружения, а перекрывающий часть коридора дрейфа льда с опасных для охраняемого сооружения направлений (см. рис. 3а).

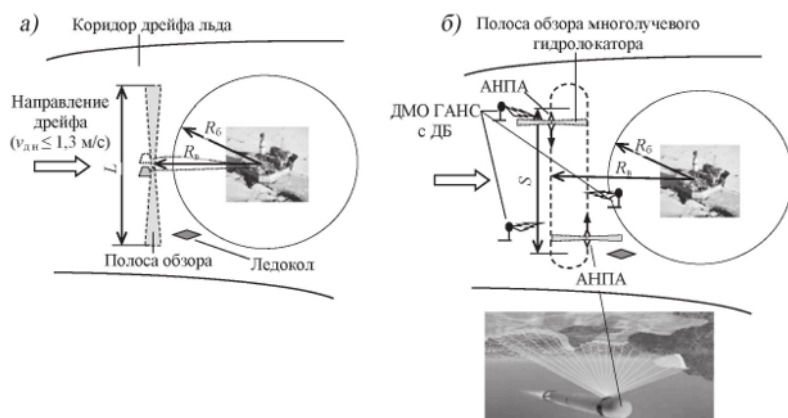


Рис. 3. Возможные варианты построения системы гидроакустического мониторинга дрейфующего льда при наличии устойчивого коридора дрейфа: *а* — стационарный донный акустический рубеж; *б* — подвижный акустический рубеж на базе АНПА.

Подвижный акустический рубеж

Второй вариант построения системы — создание подвижного акустического рубежа, перекрывающего часть коридора дрейфа льда и располагающегося выше по направлению дрейфа (по течению) на дальности R_v от охраняемого сооружения, как это показано на рис. 3б.

В качестве подвижного элемента такого рубежа может использоваться автономный необитаемый подводный аппарат (АНПА). Подвижный акустический рубеж целесообразно применять при больших (более 400 м) глубинах акваторий и при относительно небольшой ($v_d \approx 0,2 \text{ м/с}$) скорости дрейфа льда, что обусловлено ограниченными скоростными возможностями АНПА, поисковые скорости хода которых, как правило, находятся в пределах 3... 5 узлов (1,5... 2,5 м/с). Разумеется, применение АНПА возможно и в более мелких акваториях при условии, что глубина хода аппарата обеспечит не только приемлемые условия работы установленных на нем гидроакустических средств, но и навигационную безопасность самого АНПА при маневрировании подо льдом, неровности которого (кили торосов) могут иметь осадку 20 м и более. Кроме одного из типов многолучевых гидролокаторов или однолучевого эхоледомера, который в этом варианте использования может быть весьма эффективен, и системы гидроакустической связи, необходимо применение гидроакустических средств, обеспечивающих высокоточную навигацию АНПА на всех этапах его подводного плавания. В этой связи система автономной навигации аппарата, скорее всего, не сможет обойтись без навигационного эхолота и гидроакустического абсолютного лага. В качестве одного из возможных средств позиционирования аппарата и коррекции его системы автономной навигации можно предложить гидроакустическую навигационную систему (ГАНС) с донными маяками-ответчиками (ДМО). Так, по мнению авторов работы (Матвиенко и др., 2009), отечественный и зарубежный опыт в этой области показывает экономическую и техническую целесообразность решения этой задачи путем оборудования акватории, где должна осуществляться работа АНПА, системой стационарных источников навигационных сигналов с дальностью действия, не меньшей максимального размера акватории.

Таковыми источниками могут быть изображенные на рис. 3б три ДМО ГАНС с длинной базой (ДБ).

Полезная нагрузка, которую могут нести аппараты среднего класса, весьма ограничена, в связи с чем на этих аппаратах могут размещаться только высокочастотные гидролокационные средства, имеющие существенно меньшие дальности действия, чем многолучевые гидролокаторы донного акустического рубежа. Если считать, что в отсутствие айсбергов глубины погружения 30... 40 м являются вполне достаточными для безопасной эксплуатации АНПА подо льдом, полоса обзора многолучевого гидролокатора L , исходя из условия $L/2 \approx 2,5h$, будет иметь протяженность 150... 200 м, что вполне реализуемо с помощью высокочастотных МЭЛ или многолучевых и интерферометрических эхоледомеров. Согласно (1) при скорости дрейфа 0,2 м/с $R_6 = 360$ м, а $R_в = 480$ м. Предположим, что для создания подвижного акустического рубежа используются два АНПА, движущихся из противоположных точек замкнутой траектории навстречу друг другу на глубине 40 м со скоростью 1,5 м/с каждый. Траектория вытянута вдоль рубежа протяженностью $S = 2R_6 = 720$ м, и ее дальняя от сооружения ветвь находится на расстоянии $R_в = 480$ м (см. рис. 3б). Тогда многолучевые гидролокаторы, установленные на АНПА, обеспечат за 340 с ($\approx 5,5$ мин) обследование нижней поверхности льда вдоль рубежа $S = 2R_6 = 720$ м в полосе обзора шириной 300 м. За 340 с ледяной покров при скорости дрейфа 0,2 м/с пройдет путь 68 м. Темп поступления гидролокационной информации от АНПА о параметрах ледяного покрова должен выбираться исходя из возможности беспрерывного обзора нижней поверхности льда. Так, при ширине полосы обзора 200 м, скорости хода аппаратов 1,5 м/с и ширине парциальной характеристики направленности гидролокатора $3 \times 3^\circ$ гидролокационная информация может обновляться с частотой не выше 0,3 Гц.

Применительно к обсуждаемой схеме построения подвижного акустического рубежа система связи должна обеспечивать передачу и прием большого объема разнородной по своему характеру информации. Кроме гидролокационной информации о дрейфующем ледяном покрове от АНПА в центр управления необходимо передавать информацию о позиции аппарата на траектории, его параметрах движения и положении в пространстве. От центра управления на АНПА должны передаваться сигналы управления, обеспечивающие его функционирование по заданной программе.

В ледовых условиях, характеризующихся малыми и очень малыми скоростями дрейфа льдов ($v_{дн} < 0,1$ м/с) и внезапными изменениями направления дрейфа, вызванными изменением направления ветра, система гидроакустического мониторинга дрейфующего ледяного покрова может быть построена на основе использования одного АНПА, движущегося по замкнутой траектории вокруг охраняемого сооружения (см. рис. 4). При скоростях дрейфа $v_{дн} < 0,1$ м/с R_6 может иметь протяженность не более 180 м, а $R_в$ – не более 240 м.

При скорости АНПА 2,5 м/с время его пробега по окружности радиуса $R = (R_6 + R_в)/2$ составит не более 530 с. За это время максимальное радиальное перемещение ледяного покрова не превысит 53 м. Таким образом, при протяженности полосы обзора многолучевого гидролокатора 200 м обнаруженные на ее внешней границе ОЛО будут периодически (в данном случае не менее трех раз) попадать в зону обзора гидролокатора прежде, чем они достигнут ближней границы «зоны экстренного отключения» с наиболее опасного направления. Учитывая невысокую при малых скоростях дрейфа динамику изменения ледовой обстановки вокруг охраняе-

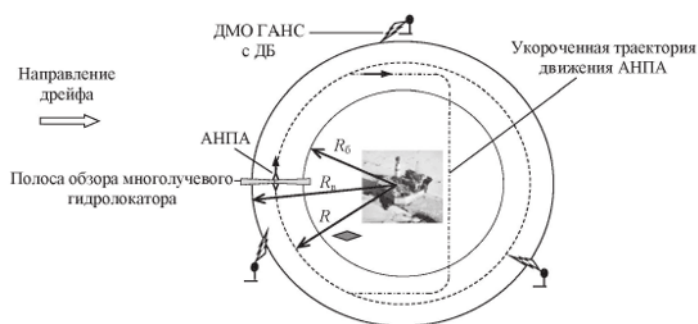


Рис. 4. Схема построения системы гидроакустического мониторинга дрейфующего ледяного покрова при малых и очень малых скоростях дрейфа.

мого сооружения, частота обновления информации о параметрах ледяного покрова, поступающая от многолучевого гидролокатора, может быть существенно снижена. При наличии надежного прогноза о параметрах дрейфа протяженность траектории движения может быть существенно уменьшена путем оперативного изменения ее геометрической формы («срезания») в тех областях зоны мониторинга, где ледовые угрозы в данный момент маловероятны. Создание промышленной технологии применения АНПА как элемента системы гидроакустического мониторинга ледяного покрова находится на начальной стадии, хотя определенные обнадеживающие результаты имеются. Так, АНПА Maridan Martin 150, Autosub и Gavia выполняли обследование ледяного покрова в ходе подледных экспериментальных работ (CodaOctopus, 2008; Wadhams, Doble, 2008; Wadhams et al., 2004).

Акустические особенности канала распространения сигналов

Возможности реализации необходимых дальностей действия многолучевых гидролокаторов и гидроакустических систем связи, точности и дальности позиционирования подводных объектов, а следовательно, и работоспособность рассмотренных систем мониторинга существенно зависят от гидролого-акустических параметров канала распространения сигналов. Сезонные и пространственные мезо- и микромасштабные изменения вертикального распределения скорости звука (ВРСЗ) в окраинных морях СЛО и других морских замерзающих акваториях могут существенно отличаться от среднестатистических характеристик, усредненных на больших площадях и временных интервалах. Так, при ВРСЗ, наблюдаемом в зимний период в районах Штокмановского газоконденсатного месторождения (ШГКМ) с глубинами ≈ 250 м, вряд ли возможно эффективно использовать многолучевые гидролокаторы в донном варианте установки. При зимней структуре ВРСЗ их эффективная работа возможна в диапазоне глубин с положительным градиентом скорости звука. В этой связи в составе гидроакустических средств как стационарного донного, так и подвижного акустических рубежей должна быть система измерения скорости звука (ИСЗ), обеспечивающая возможность построения эпюры ВРСЗ, а также расчет и отображение лучевой картины в канале распространения сигнала непосредственно в акватории работы гидротехнического сооружения.

Работа всех гидроакустических средств как стационарного, так и подвижного акустических рубежей происходит в поле технических шумов, создаваемых механизмами охраняемого сооружения, судами технического флота, а также шумов, связанных с разрушением и движением ледяного покрова. Данные по спектральному составу,

уровням давления и пространственным характеристикам акустических помех, создаваемых нефтегазодобывающими платформами подо льдом в различных режимах их работы (развертывание и монтаж, бурение, добыча, перекачка и т.д.), практически отсутствуют, что затрудняет априорную корректную оценку помехосигнальной обстановки в канале распространения акустических сигналов.

Морской ледяной покров оказывает существенное влияние на параметры распространения акустических сигналов, в частности значительно увеличивает потери при распространении. В последнее десятилетие за рубежом активно проводятся работы по созданию и натурной отработке акустических моделей ледяного покрова и моделей акустических эффектов, возникающих при распространении сигналов вдоль его неровной границы (Alexander et al., 2012). У нас в стране (Минаев и др., 2013) и за рубежом (Novem et al., 2008) проводятся экспериментальные исследования каналов передачи информации в покрытых льдом акваториях. Результаты этих работ указывают на возможность передачи разнородной информации пакетных сообщений различного объема (включая файлы изображений), NMEA сообщений в реальном масштабе времени, видеоконференции с передачей видеоряда по гидроакустическому каналу на горизонтальных дальностях по крайней мере 500 м и глубинах 11–18 м.

Состав основных средств системы гидроакустического мониторинга дрейфующего ледяного покрова

Рекомендуемый состав средств системы гидроакустического мониторинга в целом и варианты ее реализации представлены на схеме рис. 5.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

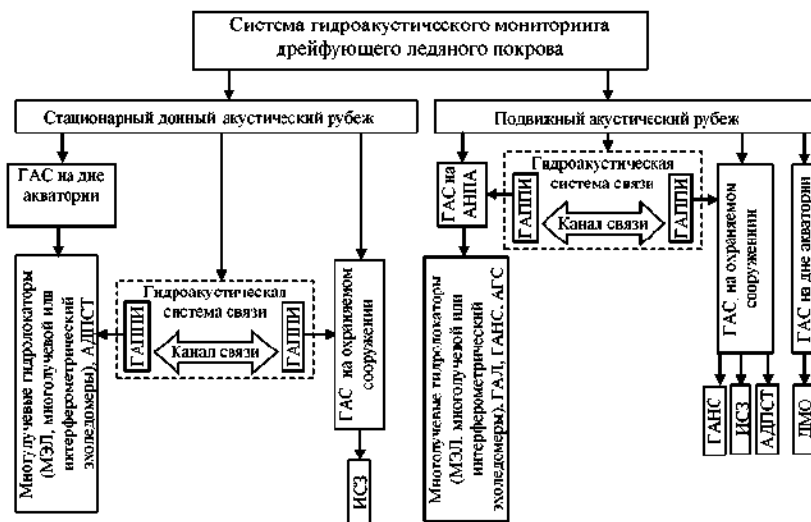


Рис. 5. Гидроакустические средства (ГАС) системы гидроакустического мониторинга дрейфующего ледяного покрова при различных вариантах ее построения.

Идея использования гидроакустических технологий для обеспечения ледовой безопасности морских сооружений, хотя и возникла давно, находится пока на концептуальной стадии своей реализации. Вероятно, такое положение в значительной степени определяется мнением многих специалистов по морской нефтегазодобыче,

полагающих, что существующие технологии продемонстрировали приемлемый уровень безопасности, а разработка, внедрение новых технологий мониторинга потребуют больших и, может быть, экономически не оправданных финансовых затрат, а также усложнят и без того непростую и дорогостоящую технологию морской нефтегазодобычи. Основания для таких сомнений, конечно, есть, поскольку уже сейчас ясно, что предлагаемые системы гидроакустического мониторинга не будут универсальными в смысле своей работоспособности и эффективности в акваториях с разными глубинами, в различных гидрологических и ледовых условиях. В этой связи их реальная перспектива развития видится не в том, чтобы заместить, но дополнить существующие технологии мониторинга ЛО и тем самым не только сохранить, но существенно повысить достигнутый уровень ледовой безопасности морской нефтегазодобычи в условиях постоянно растущих темпов и расширяющейся географии освоения шельфа замерзающих морей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Басс Ф.Г., Фукс И.М. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности. М.: Наука, 1972. 424 с.
- Богородский А.В., Лебедев Г.А. Основные принципы построения системы гидроакустического мониторинга опасных ледяных образований на шельфе замерзающих морей для обеспечения безопасной эксплуатации гидротехнических сооружений // Проблемы Арктики и Антарктики. 2009. № 1 (81). С. 69–79.
- Богородский А.В., Лебедев Г.А. Результаты моделирования дальней гидролокации айсбергов в Баренцевом море // Гидроакустика. 2012. Вып. 15 (1). С. 53–61.
- Богородский В.В., Гаврило В.П. Лед. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 384 с.
- Бронштейн И.Н., Семдяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. М.: Наука, 1981. 720 с.
- Матвиенко Ю.В., Рылов Р.Н., Буренин А.В., Войтенко Е.А., Моргунов Ю.Н. Экспериментальные исследования особенностей подводной дальнометрии в шельфовой зоне Японского моря // Подводные исследования и робототехника. 2009. № 2 (8). С. 44–49.
- Минаев Д.Д., Негода В.В., Леоненков Р.В., Корытко А.С. Результаты экспериментальных исследований цифрового гидроакустического канала передачи информации в мелководном районе при наличии ледового покрова // Подводные исследования и робототехника. 2013. № 2 (16). С. 56–64.
- Патент № 126122 РФ МПК G01B 17/02. Эхоледомер / А.В. Богородский (РФ). 10 с. Опубл. 20.03.2013 г., бюл. № 8. (а).
- Патент № 2500985 РФ МПК G01B 17/02. Способ дистанционного определения осадки, толщины и высоты льда / А.В. Богородский (РФ). 10 с. Опубл. 10.12.2013 г., бюл. № 34. (б).
- Alexander P., Duncan A., Bose N. Modelling sound propagation under ice using the Ocean Acoustics Library's Acoustic Toolbox // Proceedings of Acoustics 2012 - Fremantle. 21–23 November 2012, Fremantle, Australia. P. 1–7.
- CodaOctopus, “Real-time 3D Acoustic Imaging”, CodaOctopus technical specification. URL: http://www.codaoctopus.com/3d_ac_im/index.asp#, cited Dec. 2008, [дата обращения 07.04.2012 г.].
- GeoAcoustics, 2008, “GeoSwath ROV/AUV Swath Bathymetry with co-reistered Side Scan for Survey ROV's & AUV's”, GeoAcoustics specification sheet. URL: <http://www.geoacoustics.com/specifications.htm#GeoSwath>, cited Dec. 2008, [дата обращения 07.04.2012 г.].
- Hovem J.M., Shefeng Y., Xueshan B., Hefeng D. “Modelling Underwater Communication Links”, Sensor technologies and Applications, 2008, SENSORCOMM'08. Second International Conference on, Cap Esterel, France. 2008. P. 679–686.

Ice and Iceberg Management Philosophy // Shtokman Development Aktiengesellschaft, RU-SH1-50-F001-051201. 23/Dec/2008. P. 1–5.

Ice and Iceberg Surveillance Plan // Shtokman Development Aktiengesellschaft, Ref: SH1-30-0940-000024. P. 14.

Kenneth J. Eik. Ice Management in Arctic Offshore Operations and Field Developments // Thesis for the degree of philosophiae doctor. Trondheim, 2010. P. 24–33.

Wadhams P., Doble M.J. Digital terrain mapping of the underside of sea ice from a small AUV // Geophysical Research letters. 2008. Vol. 35. L01501, doi: 10.1029/2007GL031921.

Wadhams P., Wilkinson P.J., Kaletsky A. Sidescan sonar imagery of the winter marginal ice zone obtained from an AUV // J. Atmos. Oceanic Technol. 2004. Vol. 21. P. 1462–1470.

Wadhams P., Wilkinson J.P., McPhail S.D. A New View of the Underside of Arctic Sea Ice // Geophys. Res. Lett. 2006. Vol. 33. L04501, doi:10.1029/2005GL025131.

A.V. BOGORODSKIY, G.A. LEBEDEV

TECHNOLOGIES OF HYDROACOUSTIC MONITORING OF DRIFTING ICE FOR PROVIDING ICE SAFETY OF HYDRAULIC ENGINEERING CONSTRUCTIONS ON THE SHELF OF THE FREEZING SEAS

Possible variants of arrangement of system of hydroacoustic monitoring of dangerous ice formations on boundaries of “emergency disconnection zone” of offshore oil and gas platform from the underwater equipment are considered. For maintenance of platform protection from ice threats the system which is based on high-frequency multi beam sonars (multi beam echo sounders, ice profilers) for sounding of ocean surface which are used to create stationary or mobile “acoustic frontiers” is offered. The configuration of means providing operability of system of hydroacoustic monitoring, for various variants of arrangement of “acoustic frontiers” is given. Features of underwater acoustic channel typical for freezing sea water areas are considered.

Keywords: ice threats, monitoring, underwater acoustic, oil and gas platform.

ЛЕДОВИТОСТЬ КАРСКОГО МОРЯ В ВАРИАЦИЯХ КЛИМАТА АРКТИКИ

канд. геогр. наук В.Е. БОРОДАЧЕВ, канд. хим. наук И.В. БОРОДАЧЕВ

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, e-mail: aaricoor@aari.ru

В статье выполнен анализ долговременных колебаний ледовитости Карского моря, связанных с вариациями климата Арктики. Показано, что ее «вековое» понижение определяется глобальным потеплением климата, величина тренда которого составляет $+0,01355$ град/год. Открыто парадоксальное явление — закономерное понижение ледовитости в северо-восточной части моря до второй декады июля затем резко сменяется на ее повышение при сохранении глобального потепления климата Арктики. В долговременных колебаниях ледовитости выделен крупномасштабный цикл, характерный для обеих частей Карского моря, формирование которого обусловлено циклическими изменениями климата Арктики. Показано, что процессы похолодания и потепления Арктики определили резко разграниченные периоды накопления и сокращения площади льдов в летний период в Карском море. Несомненно, что процессы взаимодействия ледяного покрова, охватывающего такую небольшую по площади акваторию, как Карское море, с климатом Арктики относятся к планетарным.

Ключевые слова: морской лед, ледовитость, климат, Карское море

«ВЕКОВОЕ» Понижение ледовитости Карского моря в условиях глобального потепления климата Арктики

Нет сомнения в том, что ледовитость арктических морей на протяжении ее длительной истории испытывала периоды своего сокращения и увеличения, связанные с подобными периодами похолодания и потепления климата Земли. Еще в 1944 г. В.Ю. Визе (Визе, 1944) обратил внимание на потепление Арктики в 1920–1930 гг., объяснив его результатом усиления общей циркуляции атмосферы. В 1976 г. В.Ф. Захаров (Захаров, 1976) показал, что за потеплением Арктики последовало ее похолодание, наступившее после 1940-х гг. Важный вывод в его исследовании состоял в утверждении о неравномерности распределения областей похолодания по территории Арктики. При этом автор выявил зависимость изменения отдельных элементов ледового режима от похолодания Арктики. В 2004 г. Е.У. Миронов (Миронов, 2004), на основе анализа 96-летнего ряда средней величины ледовитости Баренцева моря за апрель–август, выделил четыре периода в ее колебаниях продолжительностью от 12 до 39 лет, с рассчитанными для них линейными уравнениями трендов. Им было подчеркнуто, что периоды ледовитости изменялись синхронно с температурой воздуха в Баренцбурге, температурой воды на разрезе Кольского меридиана и числом дней с глубокими циклонами. В 2007 г. И.Е. Фролов с группой ученых (Фролов и др., 2007), на основе использования современных методов спектрального анализа, привели более объективные доказательства существования 10-, 20- и 50–60-летних

циклов в колебаниях площади льдов Арктики, показав при этом, что причинами изменения климата Земли являются естественные факторы. Авторы отметили влияние внешних и внутренних факторов на климатические изменения состояния ледяного покрова и предположили, что в формировании 10–20-летних циклов заметную роль играет солнечная активность. В долговременных колебаниях природных явлений и процессов ученые выделили два периода (1933–1961 и 1984–2005 гг.), характерных для «теплых» лет, и один период (1962–1983 гг.) был отнесен к «холодным» годам. О наличии различных периодов и циклов в многолетних колебаниях ледовитости и площадей ледяных массивов отмечали многие отечественные ученые (Алексеев, 2003; Беязо, 1999; Бородачев, 2014; Визе, 1944; Волков, Слепцов-Шевлевич, 1971; Захаров, 1976; Зубакин, Бузин, 2009; Карклин, 1973; Фролов и др., 2007). При этом везде под периодом понималось время преобладания знака аномалий ледовитости.

Развивая идеи дифференцирования ледовитости на составляющие природные периоды и циклы, авторы настоящей статьи выделили в долговременных ее колебаниях наиболее значимые циклы и показали природу их формирования, зависимость от вариаций климата Арктики. При этом если климат в данном случае представлен среднегодовой температурой Арктики (Беязо, 1999; Дмитриев и др., 2011; Карклин, Ковалев, 1994; Фролов и др., 2007), то ледовитость ограничивалась площадью льдов, распределенных на акватории Карского моря. Следовательно, рассмотренные ниже процессы носят макромасштабный характер. В долговременных колебаниях ледовитости Карского моря прежде всего обращает на себя внимание устойчивая тенденция к ее понижению, проявляющаяся в изменениях ее трендов с июня по сентябрь включительно на протяжении 1938–2011 гг., которые хорошо описываются линейными уравнениями. В табл. 1 приведены уравнения трендов аномалий ледовитости юго-западной части для каждой декады. До сих пор долговременные колебания ледовитости исследовались в основном по данным августа, что снижало их информативность, поскольку терялись региональные особенности ее сезонной изменчивости.

Первая особенность в «вековых» колебаниях ледовитости вытекает из того, что углы наклона линейных трендов относительно оси абсцисс в летний сезон сначала уменьшаются (с третьей декады июня по вторую декаду июля при одновременном снижении средних декадных значений аномалий ледовитости), а затем резко увеличиваются в третьей декаде июля с 2 до 16° (табл. 1). Аналогичная особенность в из-

Таблица 1

Уравнения линейных трендов аномалий ледовитости юго-западной части Карского моря

Месяц, декада	Уравнение	R^2	Наклон тренда	Год пересечения
VI ₃	$\Delta L = -0,172\tau + 340,8$	0,101	9° 53'	1981
VII ₁	$\Delta L = -0,055\tau + 109,5$	0,005	3° 11'	1991
VII ₂	$\Delta L = -0,033\tau + 65,4$	0,000	1° 58'	1981
VII ₃	$\Delta L = -0,317\tau + 626,0$	0,057	16° 00'	1976
VIII ₁	$\Delta L = -0,266\tau + 526,0$	0,048	15° 10'	1977
VIII ₂	$\Delta L = -0,230\tau + 453,8$	0,069	13° 10'	1973
VIII ₃	$\Delta L = -0,085\tau + 168,4$	0,014	5° 00'	1981
IX ₁	$\Delta L = -0,052\tau + 104,0$	0,011	3° 09'	2000

менении линий наклона относительно оси абсцисс присуща аномалиям ледовитости в северо-восточной части моря, где они увеличиваются с 0 до 7°. Эта особенность характерна для Карского моря, но она отсутствует в Баренцевом море (Бородачев, 2014), на режим которого обогревающее влияние оказывает Северная Атлантика и Северо-Атлантическое течение. Отсюда вытекает, что природные условия в обеих частях Карского моря в третью декаду июля отличались от других декад предшествующего периода. Действительно, например, в юго-западной части моря распределение ледовитости в эту декаду на исследуемом ряду лет характеризовалось наибольшей рассеянностью (Бородачев, 1998), при этом площадь редких и разреженных льдов достигала своих максимумов, как среднее линейное отклонение, так и дисперсия. В этой декаде впервые произошло полное очищение моря ото льдов, что случилось в 1945 г. В табл. 2 приведены данные о количестве лет и вероятности полного очищения юго-западной части Карского моря.

Таблица 2

Количество лет и вероятность полного очищения юго-западной части Карского моря

Декада	VII ₃	VIII ₁	VIII ₂	VIII ₃	IX ₁
$\sum n_i$	1	4	13,5	27	42
P_i	0,015	0,059	0,212	0,412	0,676

Приведенные данные отражают закономерное увеличение числа лет с полным очищением этой части моря ото льдов в течение летнего сезона. Более того, отмечаемый рост лет ($\sum n_i$) вполне может быть выражен периодическим законом изменения, который можно аппроксимировать синусоидой (1):

$$\sum n_i = k \sin(x + 270^\circ). \quad (1)$$

Именно для третьей декады июля характерно аномально высокое количество лет (20) с низкой ледовитостью (< 30 %). Это в четыре раза больше, чем во второй декаде, и, видимо, связано с сокращением в два раза количества лет с высокой ледовитостью (> 70 %) и ускоренным развитием процессов резкого ее расслоения в указанную декаду. Аналогичные процессы происходили в северо-восточной части моря, но с меньшей интенсивностью. Таким образом, обнаружено неизвестное ранее явление: естественный процесс летнего понижения ледовитости и сближения линий наклона ее трендов с линиями средней многолетней ледовитости (осью абсцисс) в Карском море в третьей декаде июля вдруг оказался нарушенным неожиданным сдвигом в сторону их резкого отстранения с увеличением угла наклона. Вместе с тем этот процесс не нарушил общую закономерность «векового» понижения ледовитости. Обратимся к графику (рис. 2) изменения аномалий среднегодовой температуры воздуха в Арктике с 1900 по 2010 г. (Дмитриев и др., 2011), на котором нанесены тренды периодов потепления и похолодания Арктики. Мы позволили себе воспользоваться упомянутым графиком, чтобы найти тренд повышения аномалий температуры воздуха за весь исторический период. Ниже приведено линейное уравнение глобального повышения аномалий температуры воздуха в Арктике

$$\Delta T_i = 0,01355 \tau - 26,49, \quad (2)$$

где ΔT_i (°C) — аномалия температуры воздуха в i -й год, τ — искомый год.

Расчет показал, что тренд глобального потепления воздуха в Арктике оказался равным 0,01355 град/год. В работе (Фролов и др., 2007) тренд потепления оказался равным 0,0097 град/год. Следовательно, за 110 лет климат Арктики потеплел на 1,5 °C.

Таким образом, связь аномалий ледовитости любой декады, рассчитанных по линейным уравнениям (табл. 1), с аномалиями температуры воздуха Арктики для любого искомого года определяется новым уравнением:

$$\Delta L_i = k\Delta T_i + C. \quad (3)$$

Для третьей декады июля, например, расчет проводится по уравнению:

$$\Delta L_{VII} = -23,4 \cdot \Delta T + 6.$$

Вторая из наиболее ярких особенностей в долгосрочных колебаниях аномалий ледовитости состоит в отклонении ориентации линий ее трендов в северо-восточной части моря от вышеописанных. Несмотря на глобальное потепление климата Земли в XX–XXI столетиях, линейные тренды аномалий ледовитости в северо-восточной части моря с третьей декады июля из отрицательных перешли к положительным. В качестве иллюстрации к изложенному ниже приведен рис. 1.

Это весьма неожиданное, скорее всего парадоксальное явление, обнаружение которого свидетельствует о резком замедлении процесса таяния льдов в августе–сентябре в 1960–1980-е гг. и сокращения их площади, с одной стороны, а с другой стороны, подтверждает выводы о сложности картины распространения климата по Арктике. Оно расходится также с общепризнанным фактом — существованием лишь отрицательной тенденции в изменении площади льдов в арктических морях в XX–XXI столетиях (Алексеев, 2003; Бородачев, 2014; Визе, 1944; Захаров, 1976; Миронов, 2004; Фролов и др., 2007). Здесь необходимо пояснение. Аномалия ледовитости для каждого года любой декады рассчитывается по конкретному линейному уравнению, которое отражает положение линии тренда относительно линии средней ледовитости или оси абсцисс. Угол взаимного положения этих линий в принципе зависит от соотношения величины аномалии начального (ΔL_N) и конечного (ΔL_K) года исследуемого периода. При $\Delta L_N > \Delta L_K$ линия будет иметь отрицательный знак — ледовитость уменьшается. При $\Delta L_N < \Delta L_K$ линия тренда станет положительной — ледовитость растет. Именно такая ситуация возникла в северо-восточной части Карского моря в августе и сентябре, что позволило сформулировать правило: знаки при коэффициенте и свободном члене линейного уравнения четко отражают тенденцию в изменении ледовитости. Отрицательный знак при коэффициенте и положительный знак при свободном члене уравнения показывают, что в этот период происходило понижение ледовитости. Наоборот, при положительном знаке коэффициента и отрицательном знаке свободного члена уравнения в долговременных колебаниях ледовитости в данный период будет

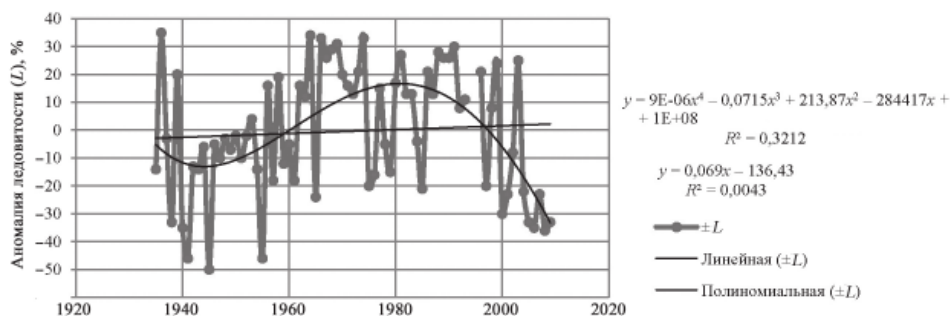


Рис. 1. Долговременные колебания ледовитости северо-восточной части Карского моря во второй декаде августа.

наблюдаться рост ледовитости. В настоящее время уже никого не удивляет, что климат Земли непрерывно меняется. Многочисленными исследованиями доказано, что эти изменения имеют циклический характер, и, как показал Х.И. Абдусаматов (Абдусаматов, 2009), они протекают параллельно с изменением радиуса Солнца и вариациями солнечной постоянной. При этом существует корреляция между циклическими вариациями солнечной постоянной и такими же циклическими изменениями климата Земли. Выявленные закономерности относятся также к климату Арктики. А поскольку ледяной покров Северного Ледовитого океана является продуктом взаимодействия атмосферы и океана, значит, климатические изменения оказывают непосредственное влияние на долговременные колебания ледяного покрова. Полученное выражение (3) показывает, что «вековое» понижение ледовитости на столь малой акватории, как Карское море, определяется глобальным потеплением климата Земли. Поэтому можно предположить, что тренд понижения ледовитости скорее всего представляет результат воздействия восходящей ветви двухвекового климатического цикла (Абдусаматов, 2009).

МАКРОМАСШТАБНЫЙ ЦИКЛ В ДОЛГОСРОЧНЫХ КОЛЕБАНИЯХ ЛЕДОВИТОСТИ КАРСКОГО МОРЯ, СФОРМИРОВАННЫЙ ПРОЦЕССАМИ ПОХОЛОДАНИЯ И ПОТЕПЛЕНИЯ АРКТИКИ

Глобальное потепление климата Земли, как утверждает ряд ученых, вызвано небывало высоким уровнем потока солнечной энергии. Многие сходятся к мысли о влиянии на климат Земли непрерывно растущего содержания углекислого газа в атмосфере планеты, создающего парниковый эффект. В 2009 г. Х.И. Абдусаматов (Абдусаматов, 2009), не соглашаясь с этой точкой зрения, все же отметил, что существует четкая связь между концентрацией углекислого газа и глобальной температурой. Тем не менее автор утверждал, что ледяной покров в Арктике растет темпами, необъяснимыми с точки зрения приверженцев идеи глобального потепления, вызванного человеческой деятельностью. Однако чуть ранее, в 2007 г., И.Е. Фролов с коллегами (Фролов и др., 2007) убедительно показали, что основными причинами изменения климата Арктики являются естественные факторы циклической природы. Действительно, в природе Арктики отмечались как периоды потепления, так и периоды похолодания. Как правило, они чередовались (рис. 2). Такое чередование периодов хорошо описывается выделенным нами крупномасштабным циклом в колебаниях

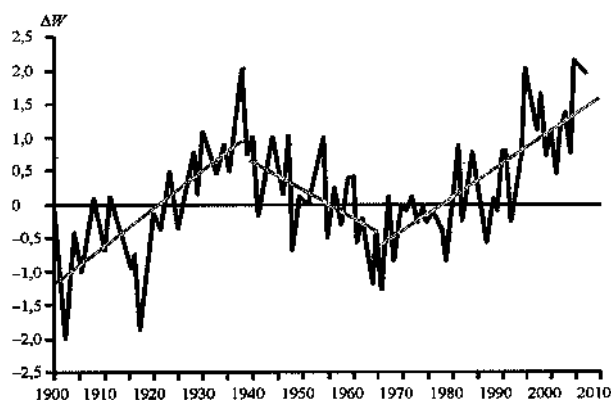


Рис. 2. Изменения аномалий среднегодовой температуры воздуха в Арктике с 1900 по 2010 г.

аномалий ледовитости Карского моря, продолжительностью 60 лет и амплитудой 48 %. Это вторая по значимости структурная организационная форма в колебаниях аномалий ледовитости, вслед за первой — трендом их векового понижения. Ветвь роста цикла оказалась продолжительностью 28 лет (с 1938 по 1966 г.), а ветвь спада — 32 года (1966–1998 гг.). При этом уточним терминологию цикла. Под ветвью его роста принят линейный тренд длиной от года наступления максимума отрицательной аномалии ледовитости до года наступления максимума ее положительной аномалии. Следовательно, ветвь роста проходит две стадии: стадию роста, находящуюся в области преобладания отрицательных аномалий ледовитости (от максимально отрицательной до нулевой), и стадию роста, продолжающуюся в области преобладания ее положительных аномалий (от нулевой аномалии до максимальной положительной). Ветвь спада аномалий ледовитости представляет линейный тренд длиной от года с максимальным значением положительной аномалии до года с максимально отрицательной ее аномалией. Эта ветвь также проходит две стадии, но только в обратном вышеописанному порядке.

Столь подробное объяснение сути цикла приведено с целью исключения возможных разнотолков в определении данного термина. Кроме того, под термином «ветвь роста» надо понимать линейный тренд в период развития процесса, направленный на замедление сокращения ледовитости. Он не представляет увеличение аномалий за счет «нарастания» льда. Поскольку в дальнейшем речь пойдет о росте аномалий ледовитости в летний период, необходимо ответить на вопрос, за счет чего этот рост происходит. В научной литературе объяснения по этому поводу отсутствуют. Попытаемся восполнить этот пробел. Прежде всего рост величины аномалии ледовитости за декаду равен разности аномалий и декадного приращения. Обратимся к выражениям аномалий ледовитости (в дальнейшем в сочетании «аномалия ледовитости» для упрощения слово ледовитость будет исключаться) по двум смежным декадам:

$$\Delta L_j = N_i - L_j, \Delta L_{j+1} = N_{i+1} - L_{j+1}.$$

Найдем их разность:

$$(L_i - L_{j+1}) - (N_j - N_{j+1}) = \Delta L_j - \Delta L_{j+1}.$$

Отсюда находим:

$$\Delta L_{j+1} = \Delta L_j + [(N_j - N_{j+1}) - (L_i - L_{j+1})],$$

или:

$$\delta = (N_j - N_{j+1}) - (L_i - L_{j+1}), \quad (4)$$

где N_j и N_{j+1} — средние многолетние значения ледовитости за j -ю и $j+1$ -ю декады; L_i и L_{j+1} — ледовитость за i -ю и $i+1$ -ю декады; ΔL_j и ΔL_{j+1} — аномалии за j -ю и за $j+1$ -ю декаду $\delta = \Delta L_{j+1} - \Delta L_j$. Все величины даны в процентах.

В формуле (4) выражена закономерность приращения декадных аномалий в течение лета при сезонном уменьшении их средних значений. Итак, обе ветви крупномасштабного цикла изменения аномалий, представленные трендами, имеют собственные линейные уравнения для каждой декады лета. Полагая, что повышение ледовитости вызывается синхронными понижениями температуры воздуха, рассчитаем уравнение ее тренда, воспользовавшись аномалиями среднегодовой температуры воздуха в Арктике (Дмитриев и др., 2011).

По выделенным на рис. 2 трендам найдем их линейные уравнения для ветвей роста и спада температуры воздуха:

$$\Delta T = -0,05\tau_1 + 97,8 \text{ (для периода с 1938 по 1966 г.),} \quad (5)$$

$$\Delta T = 0,0409\tau_2 - 81 \text{ (для периода с 1966 по 2011 г.),} \quad (6)$$

где τ_1 и τ_2 — искомые годы на линиях трендов.

Рассчитав по уравнениям (5) и (6) искомые годы и включив их в уравнения аномалий ледовитости для ветвей их роста и спада получим соответствующие уравнения связи между ΔL и ΔT . При этом, если линейные уравнения для ветвей понижения и роста температуры воздуха крупномасштабного цикла остаются неизменными для обеих частей моря, то уравнения аномалий ледовитости для каждой части моря различны и их следует определить по данным, рассчитанным по линейным уравнениям соответствующих трендов. В качестве примера результата связи расчета аномалий ледовитости с аномалиями температуры воздуха ниже приводятся уравнения их трендов для первой декады июля по северо-восточной части моря (7):

$$\Delta L_1 = 9,648 - 6,84\Delta T; \Delta L_2 = -32,2\Delta T + 14,0, \quad (7)$$

где ΔL_1 и ΔL_2 — аномалии на восходящей и нисходящей ветвей цикла, %.

Характерно, что крупномасштабный климатический цикл (Бородачев, 1998, 2014) формирует также изменения сроков взлома припая в юго-западной части Карского моря. Например, в период похолодания Арктики (1938–1966 гг.) в районе полярной станции о. Белый отмечалось постепенное запаздывание сроков взлома припая (ΔD), что видно из уравнения:

$$\Delta D = 0,846\tau - 1652, \quad (8)$$

а в период потепления наблюдались более ранние сроки взлома припая:

$$\Delta D = -0,6\tau + 1191,6. \quad (9)$$

Поскольку в летнее время льды не образуются, а тают и разрушаются, полученные линейные уравнения отражают природную зависимость ледовитости от температуры воздуха на уровне трендов и четко выделяют периоды похолодания и потепления Арктики. Общая формула связи аномалий с температурой воздуха (3) и приведенный пример расчета (7) отражают предложенные гипотезы влияния климата на долговременные колебания ледовитости. И все же подчеркнем, что эти гипотезы и выводы базируются на данных, рассчитанных по уравнениям линейных трендов. Тем не менее рис. 3 (Фролов и др., 2007) подтверждает наши выводы.

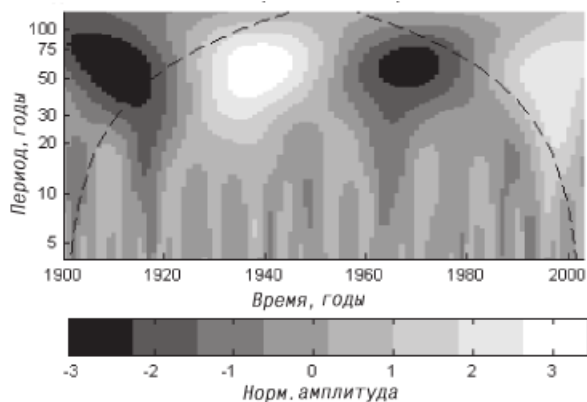


Рис. 3. Временный вейвлет-спектр аномалий среднегодовой температуры воздуха в зоне 75–85° с.ш. в XX в. (Фролов и др., 2007).

Центры чередующихся ядер потепления и похолодания климата Арктики, представленные на рисунке, практически близки к годам расположения минимумов и максимума крупномасштабного цикла. Примечательно, что продолжительность ветви понижения площади сократившихся за лето льдов (ПСЛ) (39 лет) длиннее ветви ее роста (33 года), ограниченную в данном случае 2008 годом (см. рис. 1). Однако скорость понижения ПСЛ ($V = 0,74$ %/год или $3,7$ тыс. км²/год) в 1,7 раза ниже скорости ее роста ($1,27$ %/год или $6,3$ тыс. км²/год). Дополнительно надо отметить, что параллельно выявленному крупномасштабному циклу изменения аномалий совершались долговременные колебания температуры воды на разрезе Кольского меридиана (Бородачев, 2014). Интересно заметить, что колебания аномалий более мелкого масштаба, наложенные на линейные тренды ветвей крупномасштабного цикла, в конце июля с 1938 по 1966 г. стали происходить с постепенно затухающей амплитудой на фоне общего повышения ледовитости. Затем с 1966 по 2011 г. наступил второй столь же длительный природный период колебаний аномалий ледовитости, но уже с их возрастающей амплитудой и повышенным уровнем отрицательных аномалий. Общий характер отмеченной особенности долговременных колебаний ледовитости напоминает гармонические колебания, у которых амплитуда и начальная фаза являются не постоянными величинами, а меняющимися функциями времени. Однако фактическое разнообразие в распределении величин аномалий ледовитости далеко от идеала, что не позволяет пока найти метод решения поставленной задачи. Кстати, упомянутый выше последний период колебаний с возрастающей амплитудой аномалий продолжается до настоящего времени, но есть основание предполагать изменение его ориентации в дальнейшем (Абдусаматов, 2009; Дмитриев и др., 2011; Фролов и др., 2007). Итак, чтобы рассчитать аномалию ледовитости за декаду любого года в период ее спада, нужно сначала определить аномалию температуры воздуха за этот же год по формуле (7), а затем полученное значение ΔT вставить в формулы соответствующего уравнения.

СОКРАЩЕНИЕ ПЛОЩАДИ ЛЬДОВ В КАРСКОМ МОРЕ

Площадь сократившихся за лето льдов представляется разницей между площадями максимальной и минимальной величин в их среднегодовом выражении. При этом если максимальная площадь принимается равной площади каждой части моря, то минимальная площадь ограничена сроком наступления нового ледообразования или временем полного очищения ото льдов. Поэтому в юго-западной части моря незначительные площади редких и разреженных льдов сохранились лишь в 13 годах за период с 1940 г. по 2011 г., а до нового ледообразования в этом районе остаточные льды сохранились только в 8 годах. Средняя многолетняя площадь сократившихся льдов в юго-западной части составляет 325 тыс. км². Сокращение площади льдов в северо-восточной части Карского моря происходило существенно замедленное, чем на его юго-западе, и в значительной степени определялось вариациями климата Арктики. Прежде всего, в долговременных колебаниях ПСЛ четко проявилась общая тенденция в изменении площади — ее устойчивое сокращение в XX — начале XXI вв. (рис. 4).

На рис. 4 показано, что линия тренда площади льдов, сократившихся за лето в северо-восточной части Карского моря, носит отрицательный знак. Это означает, что в XX — начале XXI вв. происходило постепенное уменьшение ПСЛ. Главная особенность в долговременных колебаниях ПСЛ хорошо выражена кривой полиномиального тренда. Она показывает, что практически до конца 1930-х гг. площадь

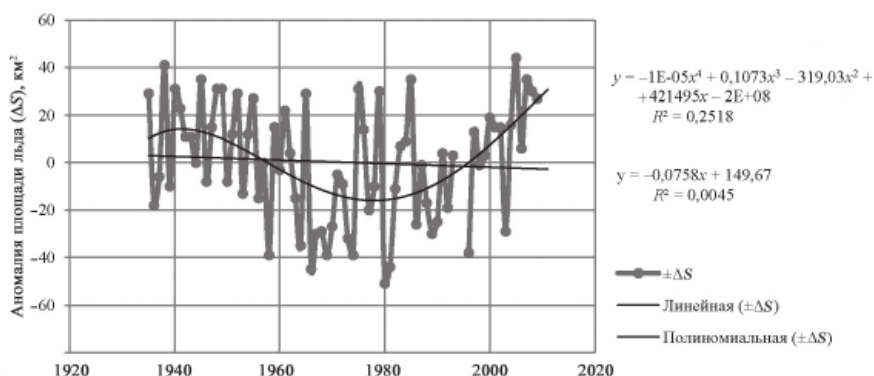


Рис. 4. Долговременные колебания аномалий среднегодовой площади сократившихся льдов в летний сезон.

сокращавшихся льдов увеличивалась. В последовавшие затем годы наступила длительная эпоха понижения среднегодовой площади льдов, сокращавшихся в летний сезон в северо-восточной части моря, которая по гипотезе полиномиального тренда, закончилась в 1976 г. Этот процесс накопления льдов за период с 1938 по 1976 г. может быть успешно выражен линейным уравнением тренда роста площади льдов в северо-восточной части моря, связанного с резким похолоданием климата Арктики. В доказательство приводится линейное уравнение связи между ПСЛ и температурой воздуха, рассчитанными по их линейным трендам:

$$\Delta S = 21,9\Delta T + 3. \quad (10)$$

Характерно, что выявленный линейный тренд изменения ПСЛ за указанный период близко соответствует тренду, представляющему выше ветвь роста крупномасштабного цикла ледовитости в этой части моря. После 1976 г., являющегося переломным, эпоха накопления льдов в Карском море сменилась на эпоху ежегодного сокращения их площади, которая продолжается до сих пор (рис. 4). Примечательно, что продолжительность ветви понижения ПСЛ (39 лет) длиннее ветви ее роста (33 года), ограниченной в данном случае 2008 годом (см. рис. 1). Однако скорость понижения ПСЛ ($V = 0,74$ %/год или $3,7$ тыс. $\text{км}^2/\text{год}$) в $1,7$ раза ниже скорости ее роста ($1,27$ %/год или $6,3$ тыс. $\text{км}^2/\text{год}$). Продолжительность этих двух эпох в долгосрочных колебаниях ПСЛ неодинакова. Есть вероятность того, что в ближайшие годы может наступить начало нового похолодания климата Арктики, в крайнем случае — климата Карского моря. Убедительные доводы в пользу этого изложены в работах Х.И. Абдусаматова (2009) и А.А. Дмитриева с коллегами (2011). Ежегодные аномалии ПСЛ в период ее непрерывного увеличения рассчитываются по уравнению линейного тренда:

$$\Delta S = 25,3 \Delta T - 14. \quad (11)$$

Окончательные расчеты показали, что в Карском море за летний сезон ежегодно исчезают льды площадью 618 тыс. км^2 , или $74,5$ % от площади моря. Конечно, было бы необходимым оценить взаимодействие процессов изменения площади льдов с гидрометеорологическими процессами, развивавшимися над Карским морем. Но для этого не хватает качественных натурных материалов в должном количестве. Между тем анализ показал, что процесс уменьшения площади исчезающих за лето льдов в течение 1938–1976 гг. коррелирует с процессом неуклонного понижения повторяе-

мости W-формы, отражающей степень активности зональных процессов по атлантико-европейскому сектору (Дмитриев и др., 2011). Более того, в 1976 г. отмечался минимум площади сократившихся льдов за лето в Карском море, и в этот же год был достигнут абсолютный минимум за 120 лет повторяемости W-формы атмосферной циркуляции. Но, как доказывается выше, долговременные колебания ПСЛ зависят от вариаций климата, т.е. температуры воздуха Арктики. Отсюда открывается цепочка соподчиненных процессов: снижение (повышение) повторяемости W-формы атмосферной циркуляции приводит к понижению (повышению) температуры воздуха Арктики, что вызывает уменьшение (увеличение) ПСЛ. Однако такое соподчинение ледово-синоптических процессов воспринимается пока на уровне гипотезы, а не доказательной теории. В развитии и углублении данного направления исследований открывается обширное поле деятельности для пытливых и целеустремленных умов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абдусаматов Х.И.* Солнце диктует климат Земли // СПб.: Изд-во «Логос», 2009. 197 с.
- Алексеев Г.В.* Исследования изменений климата Арктики в XX столетии // Тр. ААНИИ. 2003. Т. 446. С. 6–21.
- Белязо В.А.* Планетарные циклы в колебаниях атмосферной циркуляции и их проявление в некоторых процессах Арктики // Тр. ААНИИ. 1999. Т. 441. С. 46–51.
- Бородачев В.Е.* О периодическом характере изменения площади льдов некоторых возрастных видов // Тр. ААНИИ. 1985. Т. 396. С. 68–75.
- Бородачев В.Е.* Лды Карского моря. СПб.: Гидрометеиздат, 1998. 182 с.
- Бородачев В.Е., Бородачев И.В.* К вопросу о климатических периодах и циклах ледовитости Баренцева моря // Экспресс-информация. 2014. Вып. 40. 56 с.
- Визе В.Ю.* Основы долгосрочных ледовых прогнозов для арктических морей // Тр. ААНИИ. 1944. Т. 190. 273 с.
- Витинский Ю.И.* Солнечная активность. М.: Наука, 1983. 192 с.
- Волков Н.А., Слепцов-Шевлевич Б.А.* О цикличности в колебаниях ледовитости арктических морей // Тр. ААНИИ. 1971. Т. 303. С. 5–305.
- Дмитриев А.А., Белязо В.А., Гудошников Ю.П.* Ритмические колебания земных природных процессов и их гравитационная обусловленность. СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2011. 231 с.
- Захаров В.Ф.* Похолодание Арктики и ледяной покров арктических морей. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 95 с.
- Зубакин Г.К., Бузин И.В.* Характеристика многолетних изменений параметров климатической системы Баренцевоморского региона и возможный механизм ее развития // Тр. ААНИИ. 2009. Т. 450. С. 67–80.
- Карклин В.П.* 22-летние колебания поля атмосферного давления в умеренных и высоких широтах в зимнее время // Тр. ААНИИ. 1973. Т. 307. С. 133–141.
- Карклин В.П., Ковалев Е.Г.* Влияние солнечной активности на формирование крупных аномалий ледовитости арктических морей // Тр. ААНИИ. 1994. Т. 432. С. 28–35.
- Кириллов А.А., Спичкин В.А.* Методика прогноза распределения льдов в юго-западной части Карского моря // Тр. ААНИИ. 1973. Т. 307. С. 79–82.
- Миронов Е.У.* Ледовые условия в Гренландском и Баренцевом морях и их долгосрочный прогноз. СПб.: ААНИИ, 2004. 314 с.

Николаев Ю.В., Саруханян Э.И. Применение метода главных компонент в изучении много-летних колебаний ледовитости арктических морей // Тр. ААНИИ. 1973. Т. 307. С.103–111.

Оль А.И. Проявление 22-летнего цикла солнечной активности в климате Земли // Тр. ААНИИ. 1969. Т. 289. С. 116–131.

Фролов И.Е., Гудкович З.М., Карклин В.П., Ковалев Е.Г., Смоляницкий В.М. Климатические изменения ледовых условий в арктических морях Евразийского шельфа // Проблемы Арктики и Антарктики. 2007. Вып. 75. С. 149–160.

V.E. BORODACHEV, I.V. BORODACHEV

KARA SEA ICE EXTENT AND THE ARCTIC CLIMATE VARIATIONS

This article provides an analysis of the long-term fluctuations of the Kara Sea ice extent associated with the Arctic climate variations. It has been shown that its secular ice extent downgrade is determined by the global warming, which trend magnitude $+0,01355$ grad/year. A paradoxical phenomenon is found out — a natural decrease in ice extent in the north-eastern part of the sea up to the second 10-days period of July with further abrupt change to increase in ice extent with remaining background global warming of the Arctic. A large-scale cycle, typical of both parts of the Kara Sea, is revealed in the long-term fluctuations of the ice extent, the formation of the cycle is due to cyclical changes in the Arctic climate. It is shown that the processes of cooling and warming of the Arctic have defined sharply delineated periods of accumulation and reduction the summer ice area in the Kara Sea. There is no doubt that the processes of interaction between the ice covering such a small area of the Kara Sea and climate in the Arctic are planetary.

Keywords: sea ice, ice extent, climate, Kara Sea.

СПОСОБ ПРИВЕДЕНИЯ ЕЖЕЧАСНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА УРОВНЕМ МОРЯ К ОДНОРОДНЫМ РЯДАМ С ПОМОЩЬЮ КАЛИБРОВКИ ПРИЛИВОВ

д-р геогр. наук Г.Н. ВОЙНОВ^{1,2}

¹ — ФГБУ Государственный океанографический институт, Санкт-Петербургское отделение, Санкт-Петербург

² — ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, e-mail: voinovgn@mail.ru

Изложены основные принципы контроля и корректировки многолетних ежечасных наблюдений за уровнем моря. Основу нового способа составляет калибровка квазиприливного компонента прилива на основе модели прилива в конкретном пункте. Отмечена эффективность метода при оценке качества материалов наблюдений за уровнем моря и приведении временных рядов в базах данных к однородным массивам. С помощью нового способа получены устойчивые оценки составляющих волн приливов на ряде пунктов с сомнительными исходными материалами наблюдений.

Ключевые слова: приливы, гармонические постоянные, калибровка приливов

ВВЕДЕНИЕ

В конце XX и начале XXI века мы видим появление нового направления в классическом гармоническом анализе приливов — анализ прилива многолетних временных рядов с применением расширенных версий расчета по методу наименьших квадратов (МНК) на современных компьютерах. В настоящее время сняты практически все технические и программные ограничения применения МНК, связанные ранее с выполнением суперрасширенного гармонического анализа приливов на рядах длительностью 30 и более лет и разной дискретностью измерений (Войнов, 1999, 2011а, 2011б, 2011в, 2013; Crawford, 1995; Foreman et al., 2009; Muller, 2011; Ray, 2001; Woodworth, 2010).

Однако достоверные результаты таких анализов в виде временных рядов средних месячных и/или средних годовых оценок амплитуд и фаз (углов положений) основных и второстепенных волн прилива и, в особенности, тонкая структура отдельных групп прилива с нодальным разрешением по частоте $360^\circ/(19 \text{ г} \cdot 365 \text{ сут} \cdot 24 \text{ ч})$ напрямую и исключительно зависят от качества наблюдений, соответствия их условиям однородности.

Известно, что база первичных данных уровня моря в арктических морях, имеющаяся в ВНИИГМИ-МЦД, не приведена к условию однородности и не имеет оценки качества наблюдений за уровнем моря (Войнов, 1999, 2011в, 2013). Конечно, это весьма сложная и трудно решаемая проблема. Производство наблюдений за уровнем в арктических морях сопряжено с серьезными затруднениями вследствие суровых климатических условий, отсутствия почти повсеместно капитальных сооружений

для наблюдений, плохой и морально устаревшей приборной базы. В наблюдениях встречается много пропусков в периоды становления припайного льда и в периоды его разрушения. Время измерений на каждом пункте многократно менялось по распоряжению руководства Гидрометслужбы или региональных УГМС. Состояние реперов и качество нивелировок оставляет желать лучшего.

Наличие на ряде станций годовых серий наблюдений, показывающих при обработке существенное занижение или аномальное завышение амплитуды основных волн прилива (Войнов, 2011б, 2013), привело нас к гипотезе об основной причине этого широко распространенного явления (наряду с другими, обсуждаемыми в (Войнов, 2011б, 2013; Woodworth, 2010)). Производство всего комплекса научных наблюдений за уровнем моря часто по природным условиям было просто невозможно. Здесь мы имеем в виду программу обязательных четырехсрочных измерений уровня моря по рейке футштока, необходимых для развязки мареограмм. На большинстве станций в лучшем случае это делалось 1–2 раза в сутки (в летний период, как правило, чаще). Одного или двух измерений в сутки было недостаточно для точной развязки мареограмм. Отсюда возник артефакт в виде искажения масштаба ленты самописца (мареограммы). Как следствие, кривая ежечасных наблюдений в мезомасштабном диапазоне колебаний приобретала уменьшенный или увеличенный вид. Однако можно скорректировать амплитуду и величину прилива в целом при наличии эталонных качественных серий наблюдений и восстановить ряды наблюдений во всем диапазоне колебаний уровня моря.

В 90-е гг. XX в. в ААНИИ был разработан новый методический подход к обработке и анализу данных о морских приливах (Войнов, 1999, 2011а, 2011б). Расширенный гармонический анализ морских приливов по МНК производится по новой методике с включением волн, описывающих сезонную изменчивость основных и мелководных волн. Принципиальное отличие новой версии расширенного гармонического анализа морских приливов состоит в адекватном наблюдением описании сезонной изменчивости приливных колебаний уровня моря для районов с сильно выраженным или аномальным ходом констант волн в годовом цикле (Войнов, 1999, 2011а).

Важным звеном новой методологии, которая была разработана независимо от метода, изложенного в (Crawford, 1995; Ponchaut et al., 2001), но совпадает с ним в основных этапах (кроме описания и оценки сезонного хода и некоторых деталей анализа и контроля), является контроль и коррекция ежечасных наблюдений по остаточному ряду и скользящему гармоническому анализу с оценкой сезонного хода основных волн прилива.

Однако во многих случаях использованной ранее методологии было недостаточно для полного восстановления сомнительных наблюдений в спектре короткопериодных колебаний прилива (от 2 до 29 ч).

Здесь изложено дальнейшее развитие приемов восстановления сомнительных наблюдений с помощью амплитудной калибровки прилива.

НОВЫЙ ПОДХОД МЕТОДА КОНТРОЛЯ И КОРРЕКЦИИ ВРЕМЕННЫХ ЕЖЕЧАСНЫХ РЯДОВ УРОВНЯ МОРЯ С ПОМОЩЬЮ СПОСОБА КАЛИБРОВКИ ПРИЛИВОВ

В итоге выполнения экспериментов по калибровке прилива мы рекомендуем следующую последовательность обработки и гармонического анализа ежечасных наблюдений за уровнем моря для их контроля и коррекции.

1. Создание модели прилива на основе анализа годовых ежечасных серий с хорошим (эталонным) качеством наблюдений.

2. Разделение годового ряда наблюдений на тренд (долгопериодные колебания) и короткопериодный прилив (квазиприливной компонент) с помощью прямого и обратного фильтра низких частот.

3. Расчет предвычисленной годовой серии на требуемый год наблюдений по модели прилива и выделение из нее квазиприливной компоненты с помощью обратного фильтра низких частот.

4. Гармонический анализ по МНК (без астрономической части) последовательно за каждые сутки квазиприливной компоненты наблюдений и квазиприливной компоненты предвычисленного ряда.

5. Визуальный просмотр (ревизия) совмещенных синхронных рядов квазиприливных компонент предвычисления и наблюдений.

6. Гармонический анализ по МНК (без астрономической части) исправленной годовой серии по месячным сериям для квазиприливной компоненты наблюдений и квазиприливной компоненты предвычисленного ряда.

7. Амплитудная калибровка временного ряда квазиприливной компоненты наблюдений.

8. Создание восстановленного (скорректированного) ряда наблюдений как арифметической суммы тренда (пункт 2) и квазиприливной компоненты после калибровки.

9. В заключение производится гармонический анализ годовой и месячных серий восстановленного ряда.

Необходимые пояснения по пунктам.

Пункт 1. В список волн для предвычисления (модель прилива) отбираются только значимые составляющие основных и второстепенных волн в классах от долгопериодного по 1/6-суточный. Критерий значимости рассчитывается по Фурье-анализу остаточных годовых серий. Модель прилива включает волны, адекватно наблюдениям описывающие сезонный ход (изменчивость) прилива. Технология приведена в (Войнов, 2011а, 2011б). Также производится расчет среднего сезонного хода амплитуд и фаз (углов положения) основных волн прилива (M_2 , S_2 , N_2 , K_1 , O_1) на основе годовых серий с эталонными результатами.

Пункт 2. Фильтр низких частот (класса нерекурсивных фильтров) построен нами по технике взвешивания идеального фильтра окном Кайзера (Хэмминг, 1987). Параметр окна Кайзера α задавался равным 10, а число членов окна $m(0)$ равно 240. При таком задании значений параметра и окна уровень 50 % в переходной зоне частотной характеристики приходится на частоту 9,0 град/ч (период 1,66 сут.). Фильтр эффективно подавляет приливные колебания — в полосе непропускания уровень пульсаций не выше -100 dB (0,0000068) ($1\text{dB} = 20\lg(H(q))$, где $H(q)$ — частотная характеристика фильтра). Фильтр практически не искажает колебания с периодом более 1,7 сут. (уровень пропускания выше 80 %). Частотная характеристика этого фильтра дана на рис. 1 вместе с таковой для других известных в океанологии фильтров. Видно по кривым рис. 1, что известные фильтры Дудсона и Гровза имеют плохую частотную характеристику в переходной зоне и большие всплески в полосе непропускания. Фильтр Картрайта имеет более приемлемую кривую в переходной зоне, но при этом пропускает до 4 % на крайней частоте суточных приливов.

При фильтрации ежечасных данных нашим фильтром происходит потеря по 240 значений ряда слева и справа (10 сут. в начале и 10 сут. в конце ряда). Для ком-

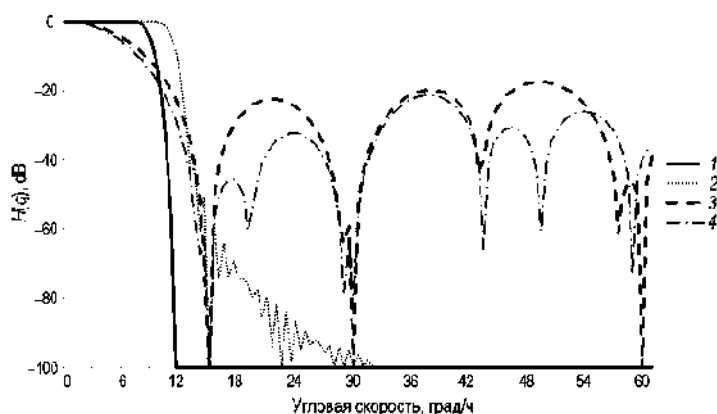


Рис. 1. Частотная характеристика фильтров низких частот: 1 — фильтр низких частот в нашей работе; 2 — фильтр низких частот по Картрайту с $m(0) = 168$; 3 — фильтр низких частот Дудсона (39 весов); 4 — фильтр низких частот Гровза (Д49).

пенсации потери ряда мы дополняем перед фильтрацией временные ряды справа и слева предвычисленными значениями со склейкой рядов на границах.

При использовании фильтра низких частот и обратного фильтра низких частот справедливо тождество: наблюдения $\equiv$ тренд + квазиприливной компонент. Оно соблюдается с точностью задания исходного ряда.

Пункт 3. Как правило, расчет производится по оценкам констант волн, полученных как средние векторные значения за ряд лет. Однако нами выявлен факт индивидуального сезонного хода основных волн прилива в конкретном году, отличающийся от среднего. Поэтому иногда требуется подстройка (по возможности) сезонного хода уровня (непериодические колебания) и сезонного хода (изменчивости) прилива для данного года (Войнов, 2011а, 2011б).

Пункт 4. При гармоническом анализе за сутки (24 ч) выделяются 6 волн: по одной из основных классов прилива — $A_0, K_1, M_2, M_3, M_4, M_6$ (амплитуда волн более высоких классов в арктических морях пренебрежимо мала). Предварительный контроль значений амплитуд и фаз волны M_2 из наблюдений производится по сравнению с таковыми для предвычислений (как эталона) для обнаружения сомнительных величин и соответствующих им участков наблюдений с браком.

Контроль значений амплитуд и фаз волны M_2 (как ведущей в арктических морях, где практически нет акваторий с суточным характером прилива) производится отдельно по рядам этих значений. Отмечаются аномальные значения амплитуд или фаз из наблюдений, которые отсутствуют в предвычислении.

Кривые значений амплитуд и фаз волны M_2 имеют периодичность (в сизигийно-квадратурном цикле) от волн S_2, N_2, K_2 , но она должна быть одинаковой у рядов из наблюдений и предвычислений в идеальном случае отсутствия брака и случайных возмущений уровня и не мешает идентификации отклонений различной природы (см. рис. 2).

Пункт 5. Визуальный просмотр идет с акцентом на сутках с сомнительными результатами из пункта 4, и производится замена их в случае принятия решения о браке на предвычисленные значения. Нарушения, вызванные плохой работой самописца, или фальсификация наблюдений хорошо идентифицируются. Также становятся по-

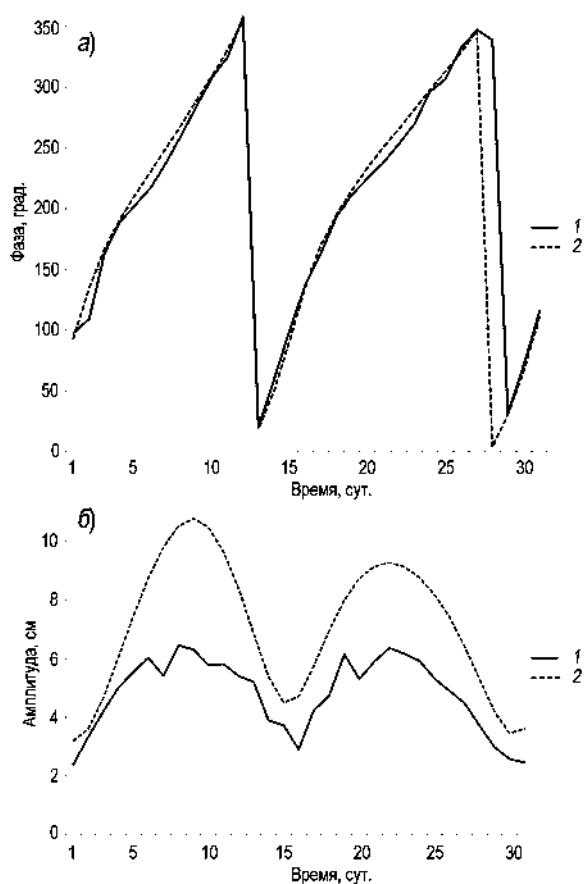


Рис. 2. Кривые фаз (а) и амплитуд (б) волны M_2 за март 1981 г.: 1 — наблюдения, 2 — предвычисления.

нятыми случайные изменения амплитуд и фаз за счет неперiodических колебаний. Они оставляются без изменений.

В монографии В.М. Альтшулера (Альтшулер, 1966) применялся схожий прием, названный им способом фильтрации приливов. В этой работе использовался для анализа адмиралтейский метод анализа приливов за сутки и сравнение производилось с теоретической кривой прилива (потенциала). В нашем способе, с одной стороны, задача упрощается (применяется МНК без астрономии) и не ведется определение гармонических постоянных, что связано с большими усложнениями алгоритма расчета. С другой стороны, задача решается строго, так как сравнение идет с реальным приливом (который сильно расходится с теоретической кривой потенциала).

Пункт 6. Для определения оценок средних значений амплитуд волны M_2 (наблюдения и предвычисления), необходимых для калибровки прилива, следует выбрать период осреднения.

За наименьший оптимальный период анализа нами выбран календарный месяц. Этот период является минимальным для строгого разделения основных волн прилива. Также в пределах месяца можно приближенно считать неизменными константы основных волн прилива в условиях их сезонной изменчивости.

Гармонический анализ месячных серий в нашем способе выделяет 23 волны, разрешаемые по критерию Рэлея. Хотя в дальнейшем используются результаты только для волны M_2 , но список волн сделан полным для точного выделения этой волны (при анализе месячной серии группы волн и отдельные волны влияют друг на друга).

Пункт 7. Коэффициент для калибровки определяется по отношению значений амплитуд волны M_2 между рядами квазиприливных компонент наблюдений и предвычисления по каждому месяцу отдельно.

С целью сохранения естественного сезонного хода амплитуды, который в конкретном году иногда отличается от среднего, рассчитываемого по предвычислению, мы рекомендуем применять калибровку в случае значимого расхождения амплитуд (предвычисление–наблюдения) в каждом месяце. Было бы неоправданным усложнением применять статистические критерии для определения уровня значимости. Но приближенно можно считать значимой разность амплитуд в каждом месяце, превышающую среднюю сезонную изменчивость амплитуды волны M_2 между месяцами. Эта изменчивость сильно варьирует в различных акваториях и в среднем составляет от 5 до 15–20 % величины амплитуды волны M_2 в заданном месяце. Конечно, при этом должны быть заранее известны оценки среднего сезонного хода этой волны.

Пункт 8. При этом мы полагаем, что в масштабе многолетней и синоптической изменчивости колебаний уровня (точнее — на периодах более 1,7 сут.) наблюдения не искажаются. Данный тезис подтверждается на экспериментах, выполненных нами по тестированию и применению способа калибровки.

Пункт 9. Следует полностью методологии, применявшейся ранее (Войнов, 2011а, 2011б). Основным приемом здесь является обязательный контроль остаточного ряда. Также необходима проверка скорректированных значений амплитуд и фаз волны M_2 (иногда других волн) по месячным сериям. Другие полезные комментарии по применению способа калибровки даны ниже в примерах.

ТЕСТИРОВАНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ СПОСОБА КАЛИБРОВКИ

Проверка эффективности способа калибровки была выполнена для станций, где ранее были выявлены сомнительные наблюдения, которые не удалось привести к однородным по прежней методологии (Войнов, 2011б, 2011в). Были привлечены наблюдения с различной величиной и характером прилива и разной степенью выраженности сезонной изменчивости прилива в годовом цикле: с небольшой величиной прилива (случай 1), для наблюдений со средней величиной прилива (случай 2) и для данных с большой величиной прилива (случай 3).

Случай 1. Величина сизигийного прилива составляет 26 см летом и 19 см зимой. Характер прилива смешанный, в основном полусуточный с заметным влиянием суточных волн. Сезонный ход полусуточных волн прилива выражен заметно и имеет классический вид — максимум амплитуд и минимум фаз наблюдается в августе.

По ежечасным наблюдениям за уровнем моря на п/ст остров Голомянный (79° 33' с.ш., 90° 37' в.д.) за 1963–2012 гг. были получены по каждой годовой серии оценки средних годовых и месячных амплитуд и фаз основных и второстепенных волн прилива. В табл. 1 представлены выборочные результаты этих анализов.

По данным этой таблицы виден существенный разброс в значениях средней годовой амплитуды в ряде лет. В основном амплитуды существенно занижены в сравнении с нормой. Объяснить такой разброс какими-либо природными факторами не удастся. Причем видно, что в целом в зимний период (март) занижение амплитуд

Таблица 1

Выборочные результаты гармонического анализа по МНК за разные годы и за месяцы экстремумов (март и август) годовых ежечасных серий за 1963–2012 гг. п/ст остров Голомянный для волны M_2 (H — амплитуда, см, g — угол положения, град. по 0 поясу)

Год	Средняя за год		Март		Август	
	H	g	H	g	H	g
1963 ¹	6,32	218,5	5,57	224,2	8,69	208,7
1965	6,84	219,6	6,21	224,5	9,45	213,2
1968 ¹	5,73	214,0	5,15	216,2	8,61	203,4
1972 ¹	6,44	218,1	4,94	224,2	8,72	208,4
1974	7,61	216,6	8,14	223,1	8,88	211,6
1976	7,67	216,4	6,82	219,4	9,12	209,8
1979	7,45	215,7	6,21	223,0	9,32	203,8
1980	7,55	217,5	6,61	220,2	8,52	207,5
1981 ¹	5,44	217,5	4,64	218,4	7,05	209,8
1985 ¹	4,74	208,5	4,86	206,0	7,18	207,1
1990 ¹	6,02	214,6	5,74	215,9	6,62	208,1
1995 ¹	5,96	211,9	5,00	214,7	7,23	198,3
2000 ¹	5,94	217,8	5,59	219,7	7,10	213,2
2005 ¹	6,54	218,6	5,90	221,5	9,04	209,6
2010 ¹	6,92	218,8	5,59	22,6	9,08	210,0
Средние 1963–1980 гг. ²	7,47	217,5	6,99	221,7	9,00	210,2

Примечания: 1 — занижены оценки амплитуды средней за год и за март и/или август; 2 — средние значения получены для эталонных серий.

наблюдается в большинстве лет (с 1981 г. во всех годовых сериях), а в летний период (август) амплитуды были ближе к норме. Это подтверждает высказанную выше гипотезу о причине этого, конечно, не природного эффекта.

До разработки способа калибровки приведение наблюдений к однородным рядам, например, за 1963, 1968, 1972, а также 1981–1985 гг. и далее по 2012 г. по старой методологии осуществлялось за счет замены сомнительных участков соответственно до 10 или 50 % и более годовой серии на предвычисленные значения, полученные по средним значениям констант волн прилива. С помощью способа калибровки и окончательному контролю остаточного ряда количество замен сомнительных наблюдений снизилось в разы.

Для наглядности ниже показаны фрагменты ключевых этапов способа калибровки. На рис. 2а, б приведены результаты анализа суточных циклов за март 1981 г. (этап 4).

Из поведения кривых на рис. 2а видно, что амплитуды волны M_2 во всех суточных циклах занижены. Обращают внимание отклонения амплитуд наблюдений 6–7, 18–21 марта. В кривых фаз (см. рис. 2б) виден явный сдвиг 28-го и менее выраженный 6–7 и 19–22 марта. Указанные сутки следует проверить по графикам квазиприливных компонент наблюдений и предвычислений. В результате подобной ревизии произведены частичные замены брака 7, 21–22 марта. 28 марта наблюдалось неперiodическое колебание, которое оставлено без изменения.

В таблице 2 даны результаты расчета из 6 этапа нашего способа для 1981 г.

Оценки амплитуд и фаз волны M_2 для месячных серий за 1981 г.
(R — амплитуда, см; r — фаза, град на начало месяца)

Месяц	Предвычисление		Наблюдения	
	R	r	R	r
I	6,972	102,70	6,436	105,44
II	6,864	138,99	5,218	130,29
III	7,002	101,50	4,734	96,88
IV	7,237	137,34	5,494	135,08
V	7,214	149,27	5,619	148,50
VI	7,215	183,69	4,826	181,54
VII	7,872	190,72	5,949	191,13
VIII	8,898	222,57	7,186	220,94
IX	9,046	257,48	6,384	256,26
X	8,135	271,21	5,502	275,59
XI	7,224	311,30	4,666	316,94
XII	6,925	326,18	4,729	333,31

Из данных табл. 2 видно, что различия между амплитудами для квазиприливных компонент прилива в предвычислениях и наблюдениях в каждом месяце значимые (кроме января). Различия между фазами следует отнести к индивидуальной случайной изменчивости данного года. В отношении фаз мы, как правило, применяли корректировку времени в особых случаях. Ее (калибровку времени) мы применяли ранее для срочных наблюдений с помощью прямого и обратного преобразования Фурье.

Здесь нужно различать ошибки фаз (времени) двух видов — ошибка времени пояса и ошибка от неточного хода часов. В первом случае она (ошибка) выявляется по систематическому уходу фазы (времени) с одним знаком по всем или нескольким месяцам. Но в таких случаях (ошибка пояса измерений в 1 ч и более) проще произвести приводку годовой серии к требуемому поясу изначально (переоцифровка ряда). Ошибки времени измерений на периодах менее месяца выявляются и исправляются на этапе 4–5. Ошибки второго вида (уход времени менее 1 ч) отслеживаются на этапе 4 при контроле фаз за сутки из годовых серий наблюдений и предвычислений (см. рис. 2б), но окончательно могут быть идентифицированы уже на последней стадии обработки при контроле остаточного ряда.

Ниже на рис. 3б представлены графики колебаний квазиприливных компонент предвычисленного и наблюденного рядов до и после калибровки. Показан также фрагмент восстановленного ряда. Ход кривой на рис. 3а обнаруживает практически везде (кроме 3–4) занижение величины квазиприливной компоненты наблюдений. Здесь надо сказать о приближенном соответствии прилива, выделенного из наблюдений, предвычислению, так как в нем имеется временами неприливной вклад от сгоно-нагонных возмущений на частоте приливов, и также возможен незначительный вклад от внутренних приливов. Вклад от непериодических колебаний на частоте приливов (с периодом от нескольких часов до суток) может быть определен теоретически или на численной модели, но является совершенно иной проблемой. Можно считать эти вклады несущественными в нашей задаче, поскольку они являются случайными процессами и не оказывают ощутимого влияния на параметры прилива при осред-

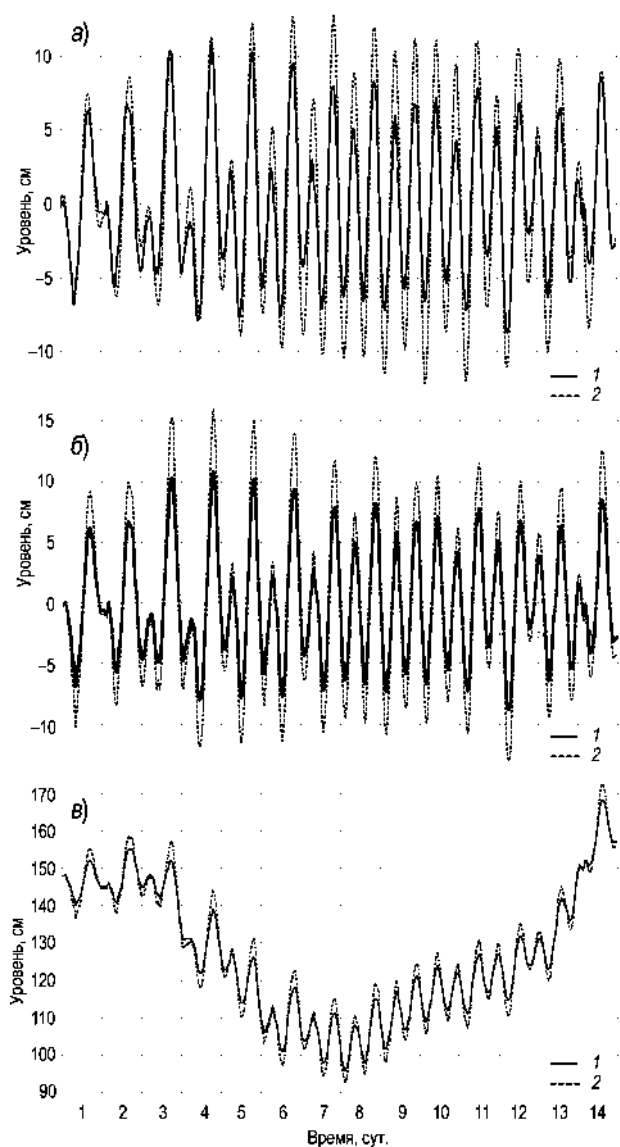


Рис. 3. Квазиприливные компоненты (а) наблюдений (1) и предвычисления (2) за период 1–14 марта 1981 г.; квазиприливной компонент (б) наблюдений до (1) и после (2) калибровки; восстановленные (тренд плюс квазиприливной компонент наблюдений после калибровки) наблюдения (в) и исходные наблюдения: 1 — наблюдения до калибровки, 2 — наблюдения после калибровки.

нении за месяц. По крайней мере проведенные нами эксперименты с калибровкой в различных пунктах подтверждают справедливость положений, лежащих в основе предлагаемого способа.

В таблице 3 приведены результаты гармонического анализа наблюдений за 1981 г. с применением способа калибровки. При этом по контролю остаточного ряда

Оценки амплитуд и углов положений волны M_2 для месячных серий до и после калибровки (п/ст остров Голомянный, 1981 г.)
(H — амплитуда, см; g — угол положения, град в 0 поясе)

Месяц	Наблюдения исходные		После калибровки	
	H	g	H	g
I	6,25	225,0	6,70	221,2
II	5,21	210,9	6,89	212,8
III	4,64	218,4	6,89	219,2
IV	5,44	216,7	7,13	218,3
V	5,51	221,7	7,02	221,7
VI	4,66	217,3	7,20	217,9
VII	5,85	216,4	7,75	216,3
VIII	7,05	209,8	8,71	209,6
IX	6,23	209,8	8,96	210,0
X	5,41	217,8	8,02	216,4
XI	4,66	220,3	7,41	221,1
XII	4,70	228,7	6,86	227,3
Средняя за год	5,44	217,50	7,44	217,28

после калибровки было заменено в целом в годовой серии 30 сут. сомнительных участков на предвычисленные значения. В основном эти неверные значения были вызваны плохой работой самописца уровня в зимний период при низких температурах воздуха. Ранее эта годовая серия считалась полностью сомнительной и не принималась к расчету оценок прилива. Средние за год результаты гармонического анализа также стали достоверными.

Случай 2. Величина прилива в сизигию составляет 56 см. Характер прилива правильный полусуточный. Сезонный ход полусуточных волн слабо выражен и имеет классический вид.

В работе (Войнов, 2011б) был выявлен длительный брак в наблюдениях на п/ст мыс Болванский Нос (пролив Карские Ворота) начиная с 1974 г. В наблюдениях за

Таблица 4

Оценки амплитуд и углов положений волны M_2 для месячных серий до и после калибровки (п/ст мыс Болванский Нос (пролив Карские Ворота), 1970 г.)
(H — амплитуда, см; g — угол положения, град в 0 поясе)

Месяц	Наблюдения исходные		После калибровки	
	H	g	H	g
I	16,07	347,9	18,10	346,5
II	16,10	357,1	17,85	356,8
III	15,42	356,8	17,79	356,8
IV	15,31	357,7	17,48	357,7
V	15,43	357,5	17,86	357,6
VI	13,65	350,8	18,79	348,6
VII	18,55	342,3	18,81	341,4
VIII	18,93	344,0	19,49	343,0
IX	19,49	340,1	19,49	340,1
X	17,81	343,2	18,80	343,5
XI	17,11	347,4	17,90	346,3
XII	16,65	348,3	17,66	347,8
Средняя за год	16,62	348,95	18,24	348,74

1970 г. также было много сомнительных, но приведение к однородности ранее было выполнено по старому способу.

Из данных табл. 4 видно, что в наблюдениях в зимний период аномально занижена амплитуда волны M_2 . Это привело к сильному занижению оценки амплитуды этой волны за год. Проверка показала, что при применении способа калибровки в остаточном ряду сомнительных значений стало гораздо меньше — всего 10 сут. (вместо 108 сут. по прежней методологии).

Случай 3. Величина сизигийного прилива составляет 309 см. Характер прилива — полусуточный. Сезонный ход слабо выражен в амплитуде и имеет стандартный вид, а в фазе почти не виден и имеет нестандартный ход.

Мы применили способ калибровки к наблюдениям на п/ст Полярное (Баренцево море) к годовой серии за 1993 г. Именно с этого года (точнее с апреля), как было нами установлено в (Войнов, 2013), из-за нарушения в поплавковом устройстве самописца уровня моря в наблюдениях резко увеличилась величина прилива, которая не была связана с реальным явлением. Данный случай интересен необычной ситуацией, когда сомнительные наблюдения, а точнее брак, носили нестандартный характер. Длительное время эта ситуация оставалась нераспознанной, и в итоге наблюдения с 1993 и по 2002 г. (далее мы не имеем информации) стали неоднородными. Казалось, что здесь мало что можно сделать, и оставалось принять ситуацию, как она есть. Но с помощью способа калибровки можно, как показано ниже в табл. 4, и эти наблюдения привести к однородным.

По данным табл. 5 ясно виден ложный эффект увеличения амплитуды волны M_2 , который сохраняется в наблюдениях, выполненных по 2002 г. На основании модели прилива, разработанной по наблюдениям за 1977–1992 гг., и оценки среднего сезонного хода способ калибровки привел к норме значения амплитуд в апреле–декабре 1993 г. Контроль остаточного ряда, выполненный для исправленного ряда, выявил только 50 сут. сомнительных данных вместо всего периода за апрель–декабрь. Результаты анализа исправленной годовой серии показали весьма удовлетворительные оценки во всем спектре прилива.

Таблица 5

Оценки амплитуд и углов положений волны M_2 для месячных серий до и после калибровки (на п/ст Полярное (Баренцево море), 1993 г.)
(H — амплитуда, см; g — угол положения, град в 0 поясе)

Месяц	Наблюдения исходные		После калибровки	
	H	g	H	g
I	111,97	127,0	114,58	126,8
II	113,57	127,2	114,25	126,7
III	111,03	125,2	117,43	125,5
IV	<u>122,15</u>	126,2	116,39	126,9
V	<u>126,72</u>	127,7	116,18	127,4
VI	<u>126,25</u>	127,7	118,60	127,4
VII	<u>128,52</u>	127,0	119,78	127,8
VIII	<u>129,22</u>	126,8	120,56	126,8
IX	<u>130,93</u>	127,8	120,08	127,7
X	<u>128,50</u>	125,3	117,64	126,1
XI	<u>126,66</u>	125,8	114,80	125,6
XII	<u>125,53</u>	125,8	114,60	125,6
Средняя за год	<u>123,21</u>	126,56	116,71	126,67

Примечание. Подчеркиванием выделены сомнительные результаты.

В приведенных выше примерах наблюдения носили в основном полусуточный характер. Способ калибровки применим и к приливам суточного характера. Но в таких случаях совместно с волной M_2 надо опираться на оценки волны K_1 .

Практика применения способа калибровки показывает, что при изучении межгодовых изменений констант прилива может проявляться эффект сглаживания средних годовых оценок амплитуд основных волн прилива (в частности, волны M_2), связанный с заложенными в его основу приемами обработки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный нами способ калибровки прилива показывает в приведенных здесь и других случаях эффективность не только для объективной оценки качества наблюдений за уровнем моря, но и возможности коррекции исходных данных с целью приведения ежечасных наблюдений к однородным рядам.

Способ оказался применим к ранее выявленным сомнительным данным, которые были оставлены без исправлений, так как прежняя методология приводила к очень большой ревизии вследствие существенного отклонения исходных рядов от предвычисленных значений.

Надежность способа калибровки основана на постоянстве оценок констант основных волн прилива. Поэтому следует знать условия наблюдений на исследуемом приливном пункте и учитывать изменения в местах производства наблюдений (модернизация установок для измерения уровня моря, изменения в приборной части измерений), которые могут привести к нарушению условий однородности.

Автор выражает признательность Л. А. Тимохову за полезные замечания, позволившие улучшить содержание работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Альтиулер В.М. Практические вопросы анализа и расчета морских приливов. Л.: Гидрометеоиздат, 1966. 311 с.
- Войнов Г.Н. Приливные явления в Карском море. СПб.: Изд-во Русского географического общества, 1999. 109 с.
- Войнов Г.Н. Гармонический анализ морских приливов с описанием сезонной изменчивости основных суточных, полусуточных и мелководных волн // Тр. ГОИН. 2011а. Вып. 213. С. 169–178.
- Войнов Г.Н. Аномальные суточные приливы третьей степени в Баренцевом и Карском морях // Доклады Академии наук. 2011б. Т. 438. № 2. С. 271–274.
- Войнов Г.Н. Методика контроля и редакции многолетних временных рядов уровня моря // Проблемы Арктики и Антарктики. 2011в. № 4. С. 51–61.
- Войнов Г.Н. О качестве многолетних наблюдений на стационарной сети в прибрежной зоне морей северо-запада и арктических морей России // Тр. ГОИН. 2013. Вып. 214. С. 223–236.
- Хэмминг Р.В. Цифровые фильтры / Пер. с англ. М.: Недра, 1987. 221 с.
- Crawford W.R. A technique for quality control and selection of tidal harmonic constituents // Inter. Hydrogr. Rew. 1995. Vol. LXXII. № 2. P. 135–150.
- Foreman M.G.G., Cherniawsky J.Y., Ballantine V.A. Versatile harmonic tidal analysis: improvements and applications // J. of atmospheric and oceanic technology. 2009. Vol. 26. P. 806–817.
- Muller M. Rapid change in semi-diurnal tides in the North Atlantic // Geophysical research letters. 2011. Vol. 38. L11602. doi: 10.1029/2011gl047312.

Ponchaut F., Lyard F., Le Provost C. An analysis of the tidal signal in the WOCE Sea level dataset // J. atmosph. and oceanic technol. 2001. Vol. 18. P. 77–91.

Ray R.D. Resonant third-degree diurnal tides in the Seas of Western Europe // J. Phys. Oceanogr. 2001. Vol. 31. № 12. P. 3581–3586.

Woodworth P.L. A survey of recent changes in the main components of the ocean tide // Continental shelf research. 2010. Vol. 30. P. 1680–1691.

G.N. VOINOV

TECHNIQUES OF REDUCTION OF THE HOURLY SERIES OF THE SEA LEVEL RECORDS TO UNIFORM SERIES BY MEANS OF CALIBRATION OF THE TIDAL SIGNAL

The basic principles of treatment and correction of long-term hourly sea level records are stated. The basis of a new method is made by calibration of a quasitidal component of the tidal signal on the basis of tidal model in concrete point. Efficiency of a method at an assessment of quality of materials of long-term sea level records and reduction of time series in databases to uniform massifs is noted. By means of a new method steady estimates of the harmonic constants of the constituents on a number of points with doubtful initial materials of sea level records are received.

Keywords: tides, tidal analysis, calibration of the tidal signal, sea level dataset.

ХОЛОДНЫЕ ШЕЛЬФОВЫЕ ВОДЫ МОРЯ ЛАПТЕВЫХ ЛЕТОМ 2013 г.

д-р физ.-мат. наук Л.А. ТИМОХОВ¹, канд. геогр. наук А.Ю. ИПАТОВ¹,
д-р Е. ХЁЛЕМАНН², д-р М. ЯНУТ², д-р Х. КАССЕНС³

¹ — ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, e-mail: ltim@aari.nw.ru

² — Институт морских и полярных исследований им. Альфреда Вегенера (AWI), Германия, e-mail: Jens.Hoelemann@awi.de, markus.janout@awi.de

³ — Институт морских наук (GEOMAR), Германия, e-mail: hkassens@geomar.de

Приводятся общие закономерности распределения температуры и солености в зимний и летний периоды на шельфе моря Лаптевых, осредненные для исторического периода 1950–1993 гг.

По данным российско-германской экспедиции «ЛАПЭК-2013/TRANSDRIFT-XXI» термохалинное состояние моря Лаптевых летом 2013 г. отличалось от климатического как в поверхностном слое, так и в придонном. На шельфе глубже 40 м сохранялась холодная вода с температурой от $-1,51$ до $-1,76$ °C и соленостью от 33,92 до 34,44 ‰. Толщина холодного слоя над бровкой склона шельфа составляла 28–53 м.

Конфигурации объема холодной шельфовой воды на шельфе и за бровкой шельфа на меридиональных гидрологических разрезах, построенных по данным уникальной мезомасштабной U-STD-съемки, указывают на бифуркацию слоя холодной шельфовой воды за бровкой шельфа. Верхняя часть слоя продолжала распространяться на север на горизонтах 40–50 м в Арктический бассейн, а вторая часть слоя сползала по склону шельфа в глубоководную часть бассейна.

Факты, установленные по историческим данным и исследованиям российско-германской экспедиции «ЛАПЭК-2013/TRANSDRIFT-XXI», позволяют сделать вывод о том, что холодные шельфовые воды моря Лаптевых как пополняют холодный нижний халоклин глубоководной части океана, так и служат источником формирования придонного слоя на материковом склоне.

Ключевые слова: море Лаптевых, холодные шельфовые воды, бифуркация слоя холодных шельфовых вод за бровкой шельфа, холодные шельфовые воды как источник пополнения холодного халоклина и донных вод материкового склона.

ВВЕДЕНИЕ

Холодные шельфовые воды составляют значительную часть термохалинной структуры арктических морей. Они выполняют важную роль в процессе вентиляции и обновления придонного слоя, а также занимают важное место в проблеме взаимодействия арктических морей и Арктического бассейна. По мнению многих ученых, шельфовые воды подпитывают слой промежуточных вод между верхним халоклином и подстилающими его водами атлантического происхождения, а в некоторых районах, опускаясь по материковому склону и трансформируясь, служат источником обновления донных вод Арктического бассейна (Никифоров, Блинов, Лукин, 1979; Aagaard, Coachman, Carmack, 1981; Rudels, Anderson, Jones, 1996).

Вместе с тем в научной литературе редко встретишь публикации, посвященные вопросу формирования и распределения в сезонном цикле холодных вод на шельфе арктических морей. Одной из причин такого положения является то обстоятельство, что в зимний период океанографические наблюдения немногочисленны и пространственное разрешение наблюдений, достигающее 150–200 км между станциями, является значительным ограничением для анализа пространственного распределения и вертикальной структуры этого слоя. Исключение составляют три океанографические съемки, выполненные в западной части моря Лаптевых (Головин, 2005; Walsh et al., 2007). Наблюдения в летний период более многочисленны, и пространственное разрешение на океанографических разрезах и площадных съемках в большинстве случаев составляло около 50 км, а в некоторых случаях и меньше. Тем более удивительно, что холодные воды в летний период, как самостоятельная структура гидрологического режима, не привлекли должное внимание исследователей. Поэтому исследования мезомасштабного распределения температуры и солености на океанографических разрезах в море Лаптевых, выполненные летом 2013 г. российско-германской экспедицией «ЛАПЭКС-2013/TRANSDRIFT-XXI» с применением новой технологии зондирования, являются новаторскими и актуальными.

В данной статье по историческим данным приводятся общие сведения о холодных шельфовых водах зимой и летом. Во второй части описывается термохалинное состояние моря Лаптевых летом 2013 г. В третьей части анализируется состояние шельфовых зимних вод в летний период по данным экспедиции 2013 г., описывается структура, приводится детальная конфигурация слоя на океанографических разрезах, даются оценки некоторых характеристик слоя и обсуждается режим холодных вод.

ХОЛОДНЫЕ ВОДЫ НА ШЕЛЬФЕ МОРЯ ЛАПТЕВЫХ ПО ИСТОРИЧЕСКИМ ДАННЫМ

Холодные шельфовые воды образуются зимой в результате конвекции при охлаждении и осолонении морской воды в период образования льда, которое в арктических морях наблюдается с конца сентября до середины мая. Но осолонение поверхностного слоя происходит и до середины июня при наличии льдов вследствие того, что при повышении температуры льда и воздействии солнечной радиации в порах льда возникает гравитационная миграция соли и происходит выделение ее из ледяной колонки в приледный слой морской воды.

На мелководье конвекция чаще всего достигает дна, образуя в зимний период квазиоднородный слой с температурой, близкой к температуре замерзания. По данным океанографических съемок экспедиций «Север» (Фролов и др., 2005), в марте–мае в юго-западной западной части моря Лаптевых гомогенность от поверхности до дна наблюдалась почти всюду в районах с глубинами меньше 40 м (южнее широты 76° с.ш.) в 1965, 1975–1976, 1980–1981, 1983, 1990 гг. В апреле и мае 1965 и 1969 гг. вертикальное распределение температуры и солености практически не менялось от нижней поверхности льда до дна (вертикальные профили 2 и 3 на рис. 1).

В марте и апреле 1976 и 1984 гг. (профили 1 и 4 на рис. 1) в западной части моря конвекция распространилась только до глубины 20 м и соленость в поверхностном слое была на 1–2 ‰ меньше, чем в 1965 и 1969 гг. В центральной части моря Лаптевых, которая и в зимний период подвержена влиянию стока реки Лены, конвективный слой в апреле 1969 г. наблюдался только до глубины 25 м и соленость в слое конвекции была меньше, чем в западной части моря (вертикальный профиль 5 на рис. 1). В более глубоких районах вертикальная структура была более сложной.

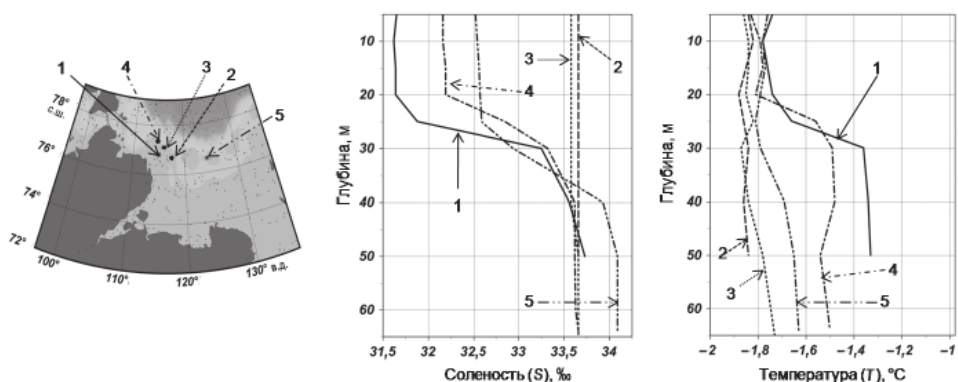


Рис. 1. Вертикальные профили солёности и температуры на шельфе моря Лаптевых в конце зимы по данным наблюдений экспедиций «Север» в различные годы. Дата выполнения и координаты (долгота/широта) океанографических станций следующие: 1 — 27 марта 1976 г., 115,00° в.д., 76,80° с.ш.; 2 — 5 апреля 1965 г., 117,50° в.д., 76,70° с.ш.; 3 — 5 мая 1969 г., 116,00° в.д., 77,20° с.ш.; 4 — 5 апреля 1984 г., 114,80° в.д., 77,40° с.ш.; 5 — 6 апреля 1969 г., 124,30° в.д., 76,60° с.ш.

Общее представление о термохалинной структуре вод на шельфе дают TS -диаграммы на рис. 2, построенные для зимнего (февраль–май) и летнего (июль–сентябрь) сезонов по данным наблюдений в 1950–1993 гг. в западной и центральной частях моря Лаптевых, ограниченных широтами 75–78° с.ш. и долготами 105–130° в.д.

В зимний период (рис. 2а) распределение точек имеет две отличительные области. Вдоль кривой температуры замерзания ($T_{\text{зам}}$) в диапазоне температуры от $T_{\text{зам}}$ до ($T_{\text{зам}} + (0,3...0,4\text{ °C})$) и солёности от 22 до 35 ‰ располагаются точки измерений на

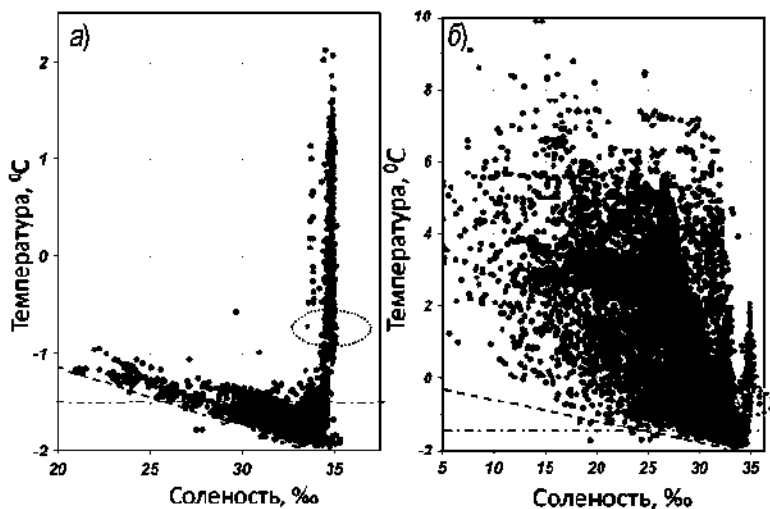


Рис. 2. Температурно-солёностные диаграммы (TS -диаграммы) для зимнего (а) (февраль–май) и летнего (б) (июль–сентябрь) сезонов по данным наблюдений 1950–1993 гг. экспедициями «Север» и «Ледовый патруль» и другими экспедициями в районе моря Лаптевых, ограниченном широтами 75–70° с.ш. и долготами 105–130° в.д. Пунктирной линией обозначена кривая температуры замерзания при данной солёности. Штрих-пунктирной линией показана температура $-1,5\text{ °C}$.

шельфе. Напомним, что температура замерзания при солёности 28 ‰ равна $-1,52\text{ }^{\circ}\text{C}$, а при солёности 34,4 ‰ — $-1,93\text{ }^{\circ}\text{C}$.

В области значений солёности 33–34 ‰ и температуры ниже $-1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ облако точек делает резкий изгиб вверх. Эта группа точек в интервале значений солёности 34,5–35 ‰ и температуры от $-1,5$ до $2,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ относится к склону шельфа и глубоководной части моря, где наблюдаются атлантические воды с температурой выше $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Отметим, что воды халоклина Арктического бассейна определяются на *TS*-диаграмме как совокупность точек с температурой от $-1,5$ до $-1,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ в интервале солёности 33,0–34,5 ‰ (Morison, Steele, Anderson, 1998). Из рис. 2а следует, что в зимний период холодные воды на шельфе имеют более широкий диапазон изменения температуры и солёности. Поскольку установленные по *TS*-диаграмме на рис. 2 интервалы температуры и солёности воды на шельфе совпадают с интервалами температуры и солёности для холодного нижнего халоклина в Арктическом бассейне, то можно заключить, что шельфовые воды западной части моря Лаптевых могут служить одним из источников формирования холодного нижнего халоклина Арктического бассейна (Никифоров, Блинов, Лукин, 1979; Rudels, Anderson, Jones, 1996). Такой же вывод сделан и в работе (Bauch et al., 2011) на основе анализа распределения изотопа кислорода-18.

В летний период разброс точек на *TS*-диаграмме на рис. 2б значительно больший, чем в зимний период. Основная масса точек с температурой ниже $-1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ сосредоточена в интервале солёности от 28,0 до 34,5 ‰. Более легкая вода с солёностью меньше 33 ‰ подвергается значительной трансформации от зимы к лету.

Для получения общих представлений об изменчивости термохалинной структуры с юга на север были построены меридиональные разрезы температуры и солёности по всем историческим данным 1950–1993 гг. в полосе 35 км, выбранной между долготами 112 и 116° в.д. Несмотря на асинхронность данных наблюдений, вошедших в построение разрезов, удастся установить общие закономерности широтного распределения температуры и солёности в зимний и летний периоды на шельфе моря Лаптевых.

В зимний период в южной части разреза от широты 75° 30' до 75° 50' вертикальное распределение температуры и солёности было близким к гомогенности (рис. 3, левая колонка). В остальной части разреза температура слабо повышалась с глубиной, а солёность увеличивалась. Температура водной колонки на шельфе была всюду ниже $-1,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, причем до широты 76,30° с.ш. наблюдаемая температура была равна или на 0,01–0,02° выше температуры замерзания. Солёность в придонной части от южной станции до бровки шельфа изменялась в пределах 33–34 ‰. За бровкой шельфа глубже 80 м температура воды быстро повышается, и на глубине 150 м отмечается присутствие воды атлантического происхождения. Грубое пространственное разрешение не позволяет установить, касается ли атлантическая вода склона шельфа или между дном и атлантической водой по склону шельфа сползает холодная и более плотная шельфовая вода.

В летний период за счет распреснения и нагревания формируется поверхностный слой и сезонный халоклин и совпадающий с ним пикноклин. Но глубже 40 м на шельфе сохраняется холодная вода с температурой ниже $-1,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ и солёностью более 33 ‰ (рис. 3, правая колонка). Обратим внимание на конфигурацию изотермы $-1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, которая начинается в придонной части на широте около 75° с.ш. и фиксируется до бровки склона шельфа. Но затем ветвь воды с температурой ниже $-1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ и солёностью 34–34,3 ‰ продолжается на север на горизонтах 40–50 м. Этот факт

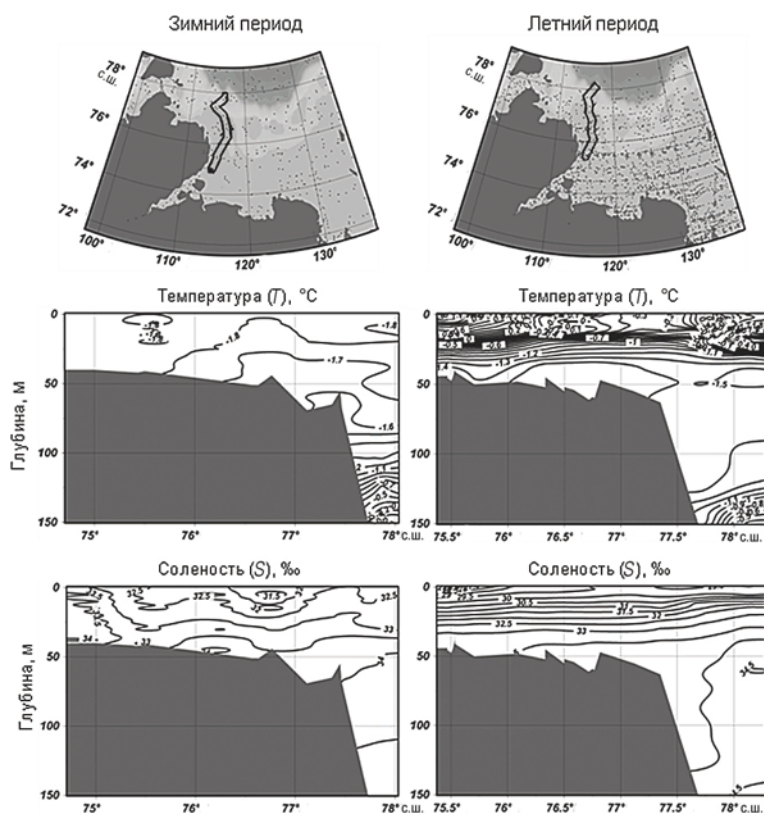


Рис. 3. Распределение океанографических станций и положение разрезов в полосе 35 км (черная линия) (верхний ряд), разрезы температуры (средний ряд) и солёности (нижний ряд) для зимнего (февраль–май, левая колонка) и летнего (июль–сентябрь, правая колонка) периодов, построенные по историческим данным 1950–1993 гг.

может служить указанием на адвекцию в Арктический бассейн шельфовой воды, пополняющей холодный нижний халоклин. При этом солёность воды этой ветви летом близка к солёности шельфовой воды в зимний период, а ее температура к лету повысилась на $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Конфигурация объема воды за бровкой шельфа между изотермами $-1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $-1,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ на глубинах до 100–120 м и особенно опускание изохалины 34 ‰ по склону шельфа до глубины 120 м и затем ее поднятие указывают на сползание холодных шельфовых вод по склону шельфа. Это обстоятельство дает основание полагать, что шельфовые воды в трансформированном виде образуют придонный слой между атлантической водой и дном склона шельфа.

ТЕРМОХАЛИННОЕ СОСТОЯНИЕ МОРЯ ЛЕТОМ 2013 Г.

Российско-германская экспедиция «ЛАПЭК-2013/TRANSDRIFT-XXI» в сентябре 2013 г. использовала свободно падающий STD-сенсор Underway CTD для измерения температуры, солёности морской воды, гидростатического давления по ходу движения судна между океанографическими станциями. Технические характеристики зонда производства фирмы Seabird, США таковы: точность измерения температуры — $0,02\text{ }^{\circ}\text{C}$, электропроводности — $0,03\text{ См/м}$, гидростатического давления — 4 дБ, раз-

решение по температуре $0,002\text{ }^{\circ}\text{C}$, по электропроводности $0,0005\text{ См/м}$, по давлению $0,5\text{ дБ}$. Измерения температуры и солености с помощью Underway CTD производились через $2\text{--}10\text{ км}$, что позволило впервые получить на океанографических разрезах мезомасштабную термохалинную структуру толщи моря. На рис. 4 приведено положение океанографических станций и обозначены номера океанографических разрезов (P1–P5). Для анализа вертикальной структуры выбраны мелководные океанографические станции A_2, A_3, A_4 ; станции вблизи бровки шельфа B_2, B_3, B_4 и станции B_2, B_3, B_4 на северной окраине меридиональных разрезов P2, P3 и P4.

В вертикальной колонке морской воды по данным измерений летом 2013 г. выделяются следующие основные структуры: поверхностный слой, халоклин, придонный холодный слой на шельфе, термоклин и атлантические воды в глубоководной части моря.

Поверхностный слой, в котором вертикальные распределения температуры и солености были однородными или квазиоднородными (рис. 3) и градиент плотности слабо менялся по вертикали, занимал верхнюю часть моря до глубины $4\text{--}10\text{ м}$. Температура и соленость воды в слое менялись в пределах соответственно $1,8\text{--}4,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $24\text{--}30\text{ ‰}$ в южной части моря; $0,9\text{--}3,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $28\text{--}30\text{ ‰}$ на бровке шельфа и $0,5\text{--}3,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $28\text{--}31\text{ ‰}$ на севере моря.

Начало слоя халоклина определяется по глубине залегания максимального градиента плотности воды. Халоклин заканчивался на глубинах $30\text{--}40\text{ м}$ на шельфе моря, $40\text{--}60\text{ м}$ на бровке шельфа и $100\text{--}120\text{ м}$ в глубоководной части моря.

Отметим особенность вертикального распределения температуры в верхней части халоклина. На южной станции A_2 отмечалось повышение температуры воды с глубиной с максимумом $2,55\text{ }^{\circ}\text{C}$ на горизонте 12 м . Инверсия температуры на глубинах $10\text{--}19\text{ м}$ наблюдалась также на станциях B_2, B_3 в средней и северной части меридионального разреза P2 и на северной станции B_3 разреза P3, как это видно из вертикальных профилей температуры на рис. 5. Можно предположить, что к моменту выполнения океанографических измерений инверсия температуры образовалась вследствие охлаждения поверхностного слоя после максимального прогрева. На

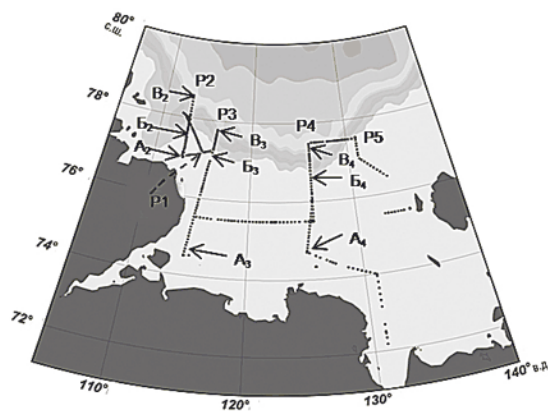


Рис. 4. Схема станций, выполненных экспедицией «ЛАПЭКС-2014/ТРАНСДРИФТ-XXI» в море Лаптевых со 2 по 17 сентября 2013 г. На карте стрелками указаны станции на меридиональных разрезах P2, P3, P4, для которых приводится анализ вертикальных профилей температуры и солености: A_2, A_3, A_4 — станции на шельфе моря; B_2, B_3, B_4 — станции вблизи бровки шельфа; B_2, B_3, B_4 — станции на северной окраине океанографических разрезов.

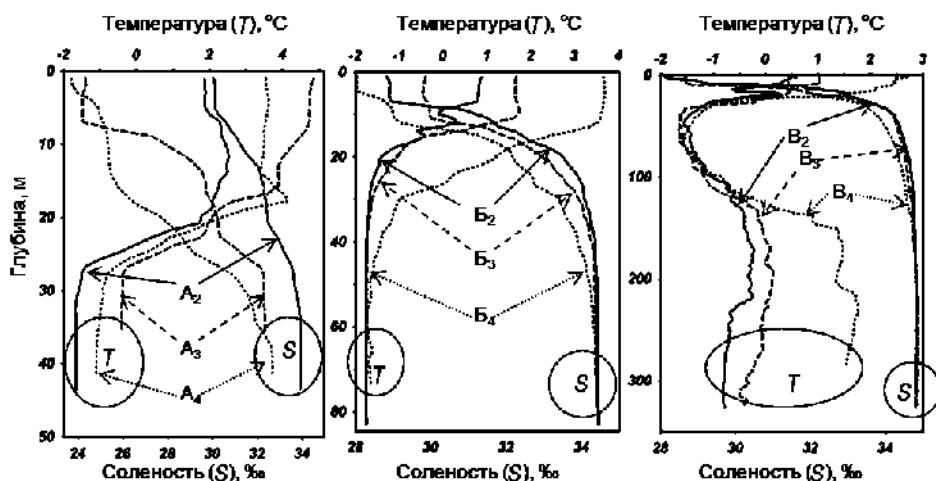


Рис. 5. Вертикальные профили температуры, солёности в различных точках меридиональных океанографических разрезов P2, P3, P4: A_2 , A_3 , A_4 — на шельфе моря на глубинах 50 м; B_2 , B_3 , B_4 — вблизи бровки шельфа на глубинах 70 м; B_2 , B_3 , B_4 — на северных окраинах океанографических разрезов. Положение станций указано на рис. 4.

глубине 21 м наблюдался второй скачок плотности и солёности, а также максимальный градиент температуры воды. Это указывает на то, что в период максимального прогрева моря, происходившего в августе, толщина верхнего слоя достигала 21 м.

Под халоклином на шельфе на станции A_2 в придонной части на глубинах 35–45 м температура и солёность менялись слабо в пределах $-1,67... -1,68$ °C и 33,92–34,01 ‰. Этот 10-метровый слой представляет собой остаток слабо трансформированных шельфовых вод, образовавшихся предыдущей зимой в результате конвекции при охлаждении и увеличении солёности поверхностных вод за счет льдообразования и нарастания толщины льда. На это указывает также малое отличие наблюдаемой температуры от температуры замерзания при данной солёности, разность которых составила 0,21–0,23 °C.

Донный слой толщиной 4–8 м на станциях A_3 и A_4 , расположенных в южной части моря, был довольно однородным по температуре $-0,37... -0,40$ °C и $-1,09$ °C, а солёность менялась в пределах 32,35–32,39 ‰ и 32,62–32,68 ‰. Как видим, характеристики значительно отличаются от таковых на станции A_2 . Вероятно, летние процессы вызвали значительную трансформацию придонного слоя, повысив температуру воды и уменьшив солёность.

На бровке шельфа на разрезе P2 по меридиану 112° в.д. (станция B_2) однородный придонный слой располагался от горизонта 39 м до дна (84 м), температура и солёность в нем менялась от $-1,73$ °C и 34,34 ‰ на верхней границе (39 м) до $-1,75$ °C и 34,45 ‰ у дна. Разность между наблюдаемой температурой и температурой замерзания была равна 0,18 °C и 0, 20 °C соответственно для верхней границы и дна. В придонном 40-метровом слое на станции B_3 температура и солёность менялись от $-1,74$ °C и 34,34 ‰ на верхней границе 43 м до $-1,74$ °C и 34,36 ‰ у дна (72 м). Эти величины были близки к термохалинным характеристикам придонного слоя на бровке шельфа западного разреза P2. На разрезе P4 придонный квазиоднородный слой на бровке шельфа (станция B_4) начинался с глубины 46 м до дна (74 м), температура в нем менялась в пределах $-1,58... -1,73$ °C, а солёность слабо увеличивалась от 34,13 ‰ на

верхней границе до 34,44 ‰ у дна. Характеристики этого слоя несколько отличаются от придонных слоев на станциях B_2 и B_3 .

На глубоководных станциях B_2 , B_3 , B_4 слой холодной воды с отрицательной температурой до $-1,5... -1,7$ °C наблюдался на глубинах от 40 до 60 м, при этом толщина его была меньше, чем на бровке шельфа.

В глубоководной части моря на станциях B_2 , B_3 , B_4 под слоем холодной воды отмечался термоклин (рис. 5). На глубине 161–223 м на станции B_3 были обнаружены атлантические воды с положительной температурой. На станциях B_2 и B_4 на этих глубинах были измерены температуры около $-0,20$ °C, что свидетельствует о залегании на этих горизонтах трансформированной воды атлантического происхождения.

СТРУКТУРА ХОЛОДНОГО СЛОЯ ШЕЛЬФОВЫХ ВОД В ЛЕТНИЙ СЕЗОН

В качестве критерия выделения зимних шельфовых вод в летний период была принята величина температуры воды меньше $-1,5$ °C. По данным наблюдений экспедиции «ЛАПЭКС-2013/TRANSDRIFT-XXI» были построены вертикальные разрезы

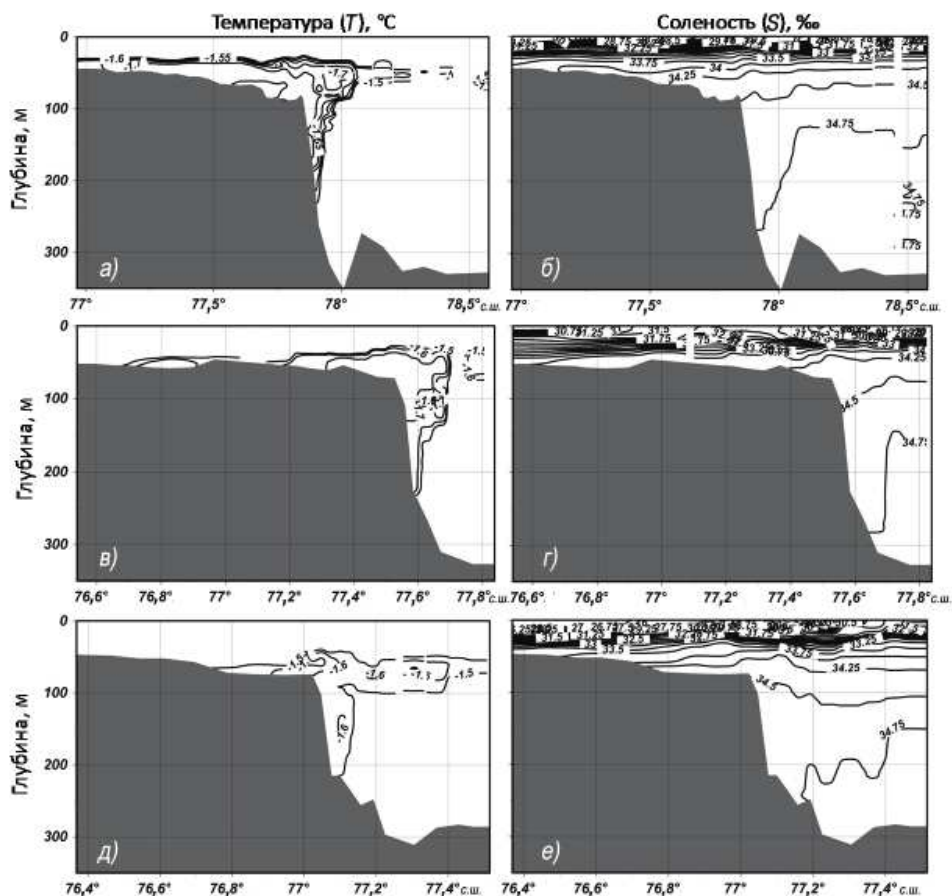


Рис. 6. Конфигурация слоя воды с температурой ниже $-1,5$ °C (а, в, д) и распределение солености (б, г, е) на трех океанографических разрезах P2 (а, б), P3 (в, г) и P4 (д, е) на разрезе 4, по данным экспедиции «ЛАПЭКС-2014/ТРАНСДРИФТ-XXI» в море Лаптевых со 2 по 17 сентября 2013 г. Положение разрезов указано на рис. 4.

температуры и солёности для трех меридиональных океанографических разрезов Р2, Р3, Р4 (рис. 6). Чтобы выделить на рисунке зимние шельфовые воды, изолинии температур на разрезах нанесены в интервале $-1,5... -2,0$ °С. Толщина слоя рассчитана как разность между глубиной залегания нижней границы изолинии $-1,5$ °С или дна и верхней границей изолинии $-1,5$ °С. За начало холодного слоя нами принято место положения южной станции, на которой температура у дна была равна или ниже $-1,5$ °С.

Из рис. 6 видно, что в западной части моря холодный слой начинался на разрезе Р2 в южной части с глубиной 46 м до станции на бровке шельфа с глубиной 78 м. На протяжении 98 км верхняя граница придонного слоя находилась на глубине от 28 до 26 м, а толщина слоя увеличивалась от 15 м до 53 м. Температура, солёность (рис. 6а и 6б) и условная плотность у дна изменялись соответственно $-1,56... -1,75$ °С; $32,63-34,39$ ‰ и $26,252-27,686$ кг/м³.

На разрезах Р3 и Р4 в центральной части моря придонный слой начинался на широтах $76,66-76,79^\circ$ с.ш. Толщина слоя увеличивалась от нуля до 45 м на Р3 и 31 м на Р4 на бровке шельфа. От начала придонного слоя до бровки шельфа температура, солёность и условная плотность у дна изменялись на разрезе Р3 (рис. 6в и 6г) в пределах соответственно $-1,5... -1,74$ °С; $34,19-34,36$ ‰ и $27,523-27,662$ кг/м³, а на разрезе Р4 (рис. 6д и 6е) в пределах соответственно $-1,51... -1,65$ °С, $34,27-34,44$ ‰, $27,581-27,725$ кг/м³.

За бровкой шельфа придонный слой разделился на две ветви, огибая трансформированные воды атлантического происхождения. На разрезах Р2 и Р3 (рис. 6а и 6в) горизонтальная ветвь вытягивалась шлейфом на север, а в конце разрезов слой разрывался на отдельные облака. На разрезе Р4 верхняя ветвь холодного слоя распространялась от бровки шельфа на север на расстояние 53 км, утоньшаяся до 20 м (рис. 6д).

Вторая ветвь сползала по склону шельфа и фиксировалась на Р2 до глубины 262 м на расстоянии 4 км, где температура, солёность и условная плотность у дна были равны соответственно $-1,54$ °С; $34,64$ ‰ и $27,887$ кг/м³. На разрезе Р3 вторая ветвь сползала по склону до глубины 226 м на расстоянии 7 км от бровки. При этом у дна температура и солёность были равны $-1,62$ °С и $34,62$ ‰ соответственно. Сползание холодных вод по склону на Р4 наблюдалось до широты $77,10^\circ$ с.ш. на расстоянии 8,5 км от бровки шельфа, где у дна на глубине 212 м температура, солёность и условная плотность были равны соответственно $-1,58$ °С, $34,56$ ‰ и $27,817$ кг/м³.

Результаты анализа структуры холодного слоя шельфовых вод в летний сезон на разрезах Р1–Р5 (меридиональные разрезы температуры и солёности Р1 и Р5 в статье не приводятся) обобщены в табл. 1.

Южная граница холодного слоя летом 2013 г. условно проходила южнее разрезов Р1 и Р2. На меридиане $115,6^\circ$ в.д. она наблюдалась в точке на широте $76,73^\circ$ с.ш. на глубине 55 м, далее на меридиане 126° в.д. граница была отмечена на широте $76,79^\circ$ с.ш. на глубине 72 м, а в восточной части моря на широтном разрезе Р5 граница зафиксирована на долготе $130,2^\circ$ в.д. на глубине 70 м. Толщина слоя на бровке шельфа была максимальной и составляла 45–53 м в северо-западной части моря и 28–31 м в центральной и восточной окраинах шельфа. Увеличение толщины слоя на разрезах Р1, Р2, Р3 составляло $0,34-0,42$ м на 1 км, или $(3,4-4,2) \cdot 10^{-4}$, а на центральном разрезе Р4 — $8,5 \cdot 10^{-4}$.

Меридиональный разрез Р3 наиболее близко расположен к климатическому разрезу для летнего периода (см. рис. 3 и 4), что позволяет оценить состояние шель-

Таблица 1

**Значения температуры (T °C), солёности (S ‰), и условной плотности (σ кг/м³)
в начале разреза на шельфе, на бровке шельфа и в конце разреза на севере**

Номер разреза	Характеристики	Начало разреза, у дна	Бровка шельфа, у дна	Конец разреза, центр слоя
1	Широта (град., с.ш.)/ долгота (град., в.д.)	77,17/115,04	77,88/113,00	78,09/112,20
	Глубина, м	42	81	46, дно 340
	Толщина слоя, м	15	53	27
	T (°C), S (‰), σ кг/м ³	–1,76; 34,21; 27,540	–1,75; 34,39; 27,686	–1, 59; 34,33; 27,638
2	Широта (град., с.ш.)/ долгота (град., в.д.)	77,03/112,89	77,88/113,00	78,56/113,00
	Глубина, м	44	78	59, дно 328
	Толщина слоя, м	16	52	18
	T (°C), S (‰), σ кг/м ³	–1,65; 33,92; 27,302	–1,75; 34,39; 27,686	–1,57; 34,44; 27,726
3	Широта (град., с.ш.)/ долгота (град., в.д.)	76,73/115,61	77,53/116,12	77,77/116,23
	Глубина, м	55	72	54, дно 327
	Толщина слоя, м	11	45	43
	T (°C), S (‰), σ кг/м ³	–1,66; 34,25; 27,568	–1,74; 34,36; 27,662	–1,67; 34,34; 27,646
4	Широта (град., с.ш.)/ долгота (град., в.д.)	76,79/125,99	77,02/126,00	77,47/126,00
	Глубина, м	72	74	66, дно 286
	Толщина слоя, м	9	31	17
	T (°C), S (‰), σ кг/м ³	–1,51; 34,27; 27,581	–1,65; 34,44; 27,725	–1,61; 34,21; 27,540
5	Широта (град., с.ш.)/ долгота (град., в.д.)	77,50/130,20	77,50/129,90	–
	Глубина, м	70	75	–
	Толщина слоя, м	14	28	–
	T (°C), S (‰), σ кг/м ³	–1,60; 34,33; 27,637	–1,64; 34,34; 27,647	–

фовых вод летом 2013 г. по сравнению со средним климатическим. Холодный слой летом 2013 г. начинался на широте 76,7° с.ш., или на 76 км севернее, температура воды на бровке шельфа и на склоне шельфа была на 0,1–0,3 °C ниже, а солёность примерно на 0,5–0,7 ‰ больше, чем средние температура и солёность в этих местах для периода 1950–1993 гг. За бровкой шельфа холодный слой с температурой ниже –1,5 °C и солёностью 34,25–34,70 ‰ опускался по склону летом 2013 г. до глубины 240 м. На климатическом разрезе на склоне шельфа слой воды с температурой ниже –1,5 °C отсутствует и лишь выделяется слой воды с температурой –1,4... –1,5 °C и солёностью 33,7–34,0 ‰, распространяющийся по склону до глубины 125 м.

Результаты сравнения температур холодного слоя на бровке шельфа позволяют прийти к выводу, что по сравнению со средним климатическим состоянием зимой 2013 г. в западной части моря Лаптевых сформировались более холодные и солёные шельфовые воды. Этому способствовал прежде всего температурный режим над морем Лаптевых. В феврале среднемесячная отрицательная аномалия температуры воздуха доходила до –5 °C, а в январе–марте 2013 г. средняя отрицательная аномалия была равна –1,3 °C (Обзор..., 2014). Более северное положение на шельфе изолинии

температуры $-1,5^{\circ}\text{C}$ летом 2013 г. можно объяснить следующим. Ледовитость в западной части моря Лаптевых в 2013 г. была меньше, чем в 1950–1993 гг., и летние процессы таяния протекали интенсивно. Поэтому придонный слой южнее широты $76,70^{\circ}$ с.ш. летом 2013 г. подвергся большей трансформации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. По историческим данным за 1950–1993 гг. в зимний период в западной части моря Лаптевых наблюдалась температура холодных шельфовых вод ниже $-1,5^{\circ}\text{C}$, и до широты $76,30^{\circ}$ с.ш. температура была равна или на $0,01$ – $0,02$ градуса выше температуры замерзания. При этом холодные воды на шельфе имели более широкий диапазон изменения температуры и солёности, чем воды халоклина Арктического бассейна. Из анализа *TS*-диаграмм следует, что шельфовые воды западной части моря Лаптевых могут служить одним из источников формирования холодного нижнего халоклина Арктического бассейна.

2. Термохалинное состояние моря Лаптевых летом 2013 г. отличалось от климатического как в поверхностном слое, так и придонном. В придонном слое в западной части моря отмечалась аномально низкая температура, а солёность в западной и восточной частях моря была больше средней климатической. На шельфе глубже 40 м сохранялась холодная вода с температурой от $-1,5$ до $-1,76^{\circ}\text{C}$ и солёностью от 33,92 до 34,44 ‰. Изотерма $-1,5^{\circ}\text{C}$ начиналась в придонной части на широте около 75° с.ш. и наблюдалась до бровки склона шельфа. Толщина холодного слоя над бровкой склона шельфа составляла 28–53 м.

3. Конфигурации объема холодной шельфовой воды на шельфе и за бровкой шельфа на меридиональных гидрологических разрезах, построенных по данным уникальной мезомасштабной U-STD-съемки летом 2013 г., указывают на бифуркацию слоя холодной шельфовой воды за бровкой шельфа. Верхняя часть слоя с температурой ниже $-1,5^{\circ}\text{C}$ и солёностью 34–34,3 ‰ распространялась на север на горизонтах 40–50 м. Вторая часть слоя сползала по склону шельфа в глубоководную часть бассейна.

4. Факты, установленные по историческим данным и исследованиям российско-германской экспедиции «ЛАПЭКС-2013/TRANSDRIFT-XXI», позволяют сделать вывод о том, что холодные шельфовые воды моря Лаптевых как пополняют холодный нижний халоклин глубоководной части океана, так и служат источником формирования придонного слоя между атлантическими водами и дном на материковом склоне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Головин П.Н. Особенности формирования и стока плотных шельфовых вод (каскадинга) в районе материкового склона котловины Нансена в море Лаптевых // Метеорология и гидрология. 2005. Т. 11. С. 44–62.

Никифоров Е. Г., Блинов Н. И., Лукин В. В. Некоторые результаты экспедиционных исследований по программе «ПОЛЭКС–Север-76» / «ПОЛЭКС–Север-76». Ч. 1. Л.: Гидрометеиздат, 1979. С. 129–148.

Обзор гидрометеорологических процессов в Северном Ледовитом океане. 2014. СПб.: ААНИИ, 2014. 116 с.

Фролов И.Е., Гудкович З.М., Радионов В.Ф., Тимохов Л.А., Широков А.В. Научные исследования в Арктике. Т. 1. Научно-исследовательские дрейфующие станции «Северный полюс». СПб.: Наука, 2005. 267 с.

Aagaard K., Coachman L.K., Carmack E.C. On the halocline of the Arctic Ocean // *Deep Sea Res., Part A*. 1981. Vol. 28. P. 529–545.

Bauch D., Dmitrenko I.A., Wegner C., Hölemann J., Kirillov S.A., Timokhov L.A., Kassens H. Exchange of Laptev Sea and Arctic Ocean halocline waters in response to atmospheric forcing // *J. Geophys. Res.* 2009. Vol. 114. C05008, doi:10.1029/2008JC005062.

Morison J. H., Steele M., Anderson R. Hydrography of the upper Arctic Ocean measured from the nuclear submarine USS Pargo // *Deep-Sea Res. Pt. I*. 1998. Vol. 45. P. 15–38.

Rudels B., Anderson L.G., Jones E.P. Formation and evolution of the surface mixed layer and halocline of the Arctic Ocean // *J. Geophys. Res.* 1996. Vol. 101(C4). P. 8807–8821. doi:10.1029/96JC00143.

Steele M., Boyd T. Retreat of the cold halocline layer in the Arctic Ocean // *J. Geophys. Res.* 1998. Vol. 103. P. 10419–10435.

Walsh D., Polyakov I., Timokhov L., Carmack E. Thermohaline structure and variability in the eastern Nansen Basin as seen from historical data // *J. Mar. Res.*, 2007. Vol. 65. № 5. P. 685–7144.

L.A. TIMOKHOV, J. HÖLEMANN, A.YU. IPATOV, M. JANOUT, H. KASSENS

COLD SHELF WATERS OF THE LAPTEV SEA IN THE SUMMER OF 2013

The general regularities of temperature and salinity distribution are given to the winter and summer periods on the shelf of the Laptev Sea, average for historical period 1950–1993.

According to the Russian-German expedition of “LAPEX-2013/TRANSDRIFT-XXI” the termohaline condition of the Laptev Sea in the summer of 2013 differed from climatic as in a surface layer, and bottom layer. On the shelf more deeply than 40 m cold water with a temperature from -1.51°C to -1.76°C and salinity from 33,92 to 34,44 remained. Thickness of a cold layer over a of the shelf brow was in range 28–53 m.

Configurations of volume of cold shelf water on the shelf and behind a shelf brow on the meridional hydrological sections constructed according to unique mesoscale U-STD observation indicate bifurcation of a layer of cold shelf water behind a shelf brow. The top part of a layer continued to extend to the north on the horizons of 40–50 m to the Arctic basin, and the second part of a layer slipped on a shelf slope in deep-water part of the basin.

The facts established according to historical data and researches of the Russian-German expedition of “LAPEKS-2013/TRANSDRIFT-XXI” allow to make a decision that cold shelf waters of the Laptev Sea as fill up cold lower halocline of a deep ocean, and formations of a bottom layer of maginal slope are a source.

Keywords: the Laptev Sea, cold shelf waters, bifurcation of a layer of cold shelf waters behind a shelf brow, cold shelf waters as a source of supplying a cold halocline and bottom water of maginal slope.

**ДОЛГОПЕРИОДНАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ТЕМПЕРАТУРЫ
АТЛАНТИЧЕСКИХ ВОД ВО ФЬОРДАХ ОСТРОВА
ЗАПАДНЫЙ ШПИЦБЕРГЕН В ПЕРИОД ПЕРВОГО (1920–1940 гг.)
И СОВРЕМЕННОГО ПОТЕПЛЕНИЯ В АРКТИКЕ**

инженер Д.И. ТИСЛЕНКО^{1,2} канд. геогр. наук Б.В. ИВАНОВ^{2,1}

¹ – Санкт-Петербургский государственный университет, *d_tis@inbox.ru*

² – ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, *e-mail: b_ivanov@aari.ru*

В последние десятилетия климат нашей планеты претерпевает серьезные изменения. Наиболее заметные климатические изменения наблюдаются в Арктическом регионе, они получили название «Арктическое усиление». Это проявляется в уменьшении площади многолетних льдов в 2007 и 2012 гг., повышении температуры промежуточных атлантических вод, повышении приземной температуры воздуха. В данной работе проведен анализ долгопериодной изменчивости температуры трансформированных атлантических вод (ТАВ) во фьордах острова Западный Шпицберген (Ис-фьорд, Грен-фьорд, Хорнсунн, Конгс-фьорд, Бельсунн) в период первого (1920–1940 гг.) и современного (1990–2010 гг.) потепления в Арктике. Показано, что данным периодам соответствует повышение температуры в слое ТАВ и приземной температуры воздуха (ПТВ) для района архипелага Шпицберген.

Ключевые слова: Арктика, Шпицберген, изменения климата, атлантические воды

ВВЕДЕНИЕ

Арктика составляет важную часть планетарной климатической системы, связанную с другими частями посредством переноса тепла и влаги в атмосфере и океане. Формирование и вынос распресненных поверхностных вод из центральной части Арктического бассейна в значительной степени влияют на распространение морских льдов, термохалинную циркуляцию в примыкающих районах Северной Атлантики, а также на региональный и глобальный климат (Алексеев, 2003; Никифоров, Шпайхер, 1980).

В XX и в первом десятилетии XXI века в Арктике наблюдались два периода значительного потепления. Первый приходится примерно на 1920–1940 гг., а второй на 1980–2010 гг. (Алексеев и др., 1998; Алексеев, Иванов, 2003; Polyakov et al., 2002; 2003; 2004). Первое потепление Арктики (1920–1940 гг.) привлекло внимание исследователей еще в первой половине прошлого века. В.Ю. Визе в статье «Причины потепления Арктики» (1937 г.) охарактеризовал потепление Арктики в 1920–1930 гг. как наиболее сильное по своим размерам климатическое колебание, зарегистрированное на тот момент с помощью регулярных метеорологических наблюдений (Визе, 1937).

В районе архипелага Шпицберген (пролив Фрама, фьорды) происходит поступление теплых и соленых атлантических вод (АВ) в центральную часть Арктического бассейна (ЦАБ) Северного Ледовитого океана. Регулярный мониторинг АВ во фьордах

острова Западный Шпицберген позволяет с количественной стороны оценить цикличность их поступления во внутренние районы АБ. В качестве удобного индикатора наблюдаемых изменений можно рассматривать среднегодовую температуру воды в слое АВ, поступающих в заливы архипелага.

Цель данного исследования — оценка долгопериодной изменчивости температуры атлантических вод во фьордах острова Западный Шпицберген (Ис-фьорд, Конгс-фьорд, Хорнсунн и Бельсунн) в период первого (1920–1940 гг.) и современного (1990 – настоящее время) потепления в Арктике.

РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЙ

Архипелаг Шпицберген — один из обширных полярных архипелагов, расположенный в Северном Ледовитом океане, между 74° и 81° северной широты, 10° и 35° восточной долготы. Циркуляция вод, омывающих архипелаг, определяется четырьмя основными течениями: Западно-Шпицбергенским течением (ЗШТ), Восточно-Шпицбергенским течением, Прибрежным течением и течением Южного мыса. Океанологические условия во фьордах связаны с характеристиками течений вокруг архипелага. Теплые и соленые воды поступают во фьорды с ЗШТ, являющимся северным ответвлением Норвежского течения (Hanzlick, 1993; Rudels et al., 2000; Cottier et al., 2005). Для анализа долгопериодной изменчивости термической структуры вод во фьордах архипелага Шпицберген были отобраны океанологические станции, выполненные в заливах: Ис-фьорд, Конгс-фьорд, Хорнсунн и Бельсунн.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

Выбор заливов Ис-фьорд, Конгс-фьорд, Хорнсунн и Бельсунн обусловлен их географическим положением (непосредственный контакт с водами ЗШТ) и тем обстоятельством, что именно эти фьорды в наибольшей степени, по сравнению с другими районами архипелага, обеспечены данными глубоководных океанографических наблюдений.

Измерения океанографических характеристик в этих фьордах начались в конце XIX в. Массив данных на начальном этапе работы представлял собой набор океанологических станций (более 600), выполненных с 1876 по 2012 г. с различными по продолжительности перерывами между наблюдениями. Для большинства станций имелись данные по следующим океанологическим параметрам: глубина (стандартные горизонты), температура и соленость. Источники информации — архив Всероссийского научно-исследовательского гидрометеорологического института (ВНИИГМИ МЦД, г. Обнинск), архив данных Норвежского Полярного института, база данных «Северных морей», созданная в отделе взаимодействия океана и атмосферы ГНЦ ААНИИ (Кораблев и др., 2007), и данные Института океанологии Польской академии наук.

Так как большая часть наблюдений выполнялась в летние месяцы (июль – сентябрь), то для анализа изменчивости термохалинной структуры вод использовались станции, выполненные именно в этот период года. В результате были отобраны 317 океанографических станций за 1901–2009 гг., из которых наблюдениями обеспечен только 41 год (рис. 1).

Также в работе были использованы данные наблюдений за приземной температурой воздуха, собранные Норвежским Метеорологическим институтом. Временной ряд охватывает период времени с 1898 по 2013 г. (Nordli et al., 2014). Он был получен путем объединения наблюдений, проводившихся в поселке Лонгйирбюэн

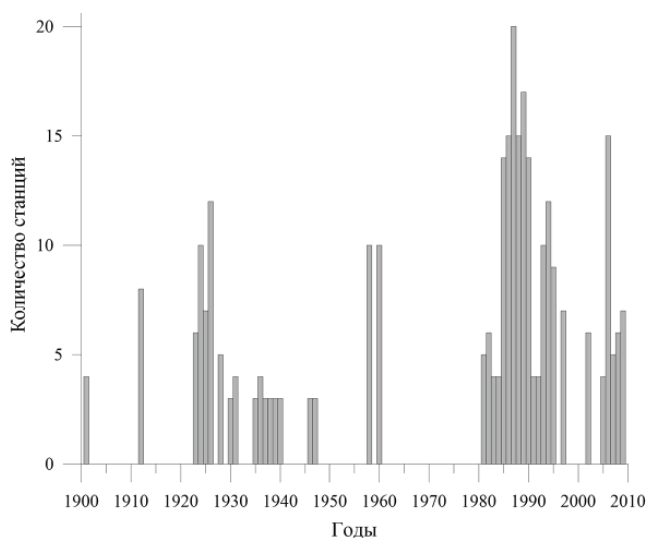


Рис. 1. Распределение океанографических станций по годам.

(административная столица Шпицбергена) и во временных пунктах наблюдений (экспедиции охотников, геологов и т.п.) в данной части архипелага. Временной ряд был сформирован с использованием специальных методов интерполяции для заполнения имеющихся пропусков (Nordli et al., 2014). Для совместного анализа использовались средние месячные данные для вышеуказанного промежутка времени.

МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ

В ходе выполнения работы были использованы различные методы обработки данных. Предваряя описание этих методов, необходимо указать критерии для выделения атлантической водной массы (АВ). АВ имеют следующие характеристики: температура $> 3^{\circ}\text{C}$, соленость $> 34,9\text{‰}$. Трансформированная атлантическая водная масса (ТАВ) имеет температуру и соленость в пределах -3°C и $34,7\text{--}34,9\text{‰}$. Она является продуктом смешения собственно АВ и местных поверхностных водных масс фьордов, образующихся там в различные сезоны года (Cottier et al., 2005).

На первом этапе производился отбор океанографических станций, имеющих одновременные измерения температуры и солености. Далее выбирались года, в течение которых в период июль–сентябрь было выполнено не менее трех океанографических станций. На втором этапе вычислялись средние значения температуры в слое ТАВ. Осреднение проводилось для каждой отдельной станции в пределах конкретного года.

Для анализа изменчивости среднегодовой температуры в слое ТАВ были рассчитаны также аномалии данной величины относительно среднего значения температуры за весь временной ряд (с 1901 по 2009 г.). При сравнительном анализе многолетней изменчивости температуры в слое ТАВ и приземной температуры воздуха использованы нормированные отклонения, которые представляют собой отношение аномалии, рассчитанной для каждого года, к среднеквадратическому отклонению соответствующего параметра. Таким образом, получены безразмерные величины, которые можно сравнивать между собой. Данный метод был впервые использован

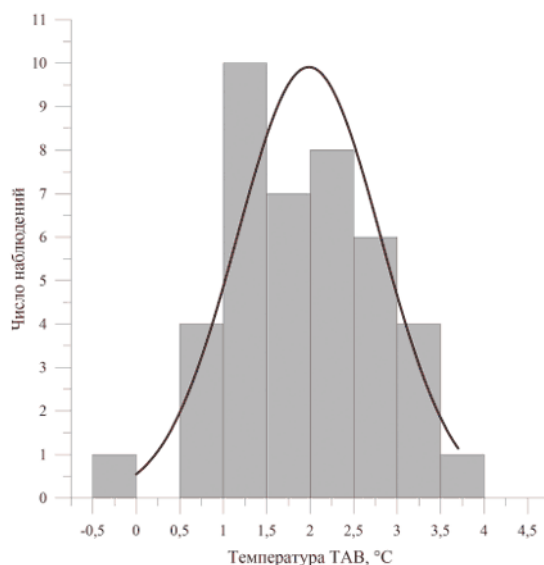


Рис. 2. Гистограмма распределения среднегодовых значений ТАВ и кривая нормального распределения (черная линия).

для анализа долгопериодной изменчивости температуры атлантических вод в работе (Алексеев, 2003).

Анализ многолетней изменчивости характеристик ТАВ осуществлялся путем расчета линейных трендов (уравнений линейной регрессии) и вычисления коэффициентов детерминации, которые характеризуют долю дисперсии, описываемую полученным уравнением. Для этого была проверена гипотеза о нормальности распределения среднегодовых значений температуры воды в слое ТАВ (рис. 2) и оценена статистическая значимость коэффициента корреляции и трендов. Оценка статистической значимости коэффициентов корреляции и линейных трендов, а также проверка гипотезы о нормальности распределения проводилась в соответствии с работой (Рожков, 2002).

Проверка гипотезы о нормальности распределения значений временного ряда ТАВ выполнена с использованием «W-теста» Шапиро–Уилка (Рожков, 2002). Результаты проверки позволяют заключить, что анализируемое распределение не отличается от нормального. Все уравнения линейной регрессии, полученные в ходе исследования, являются статистически значимыми на уровне $P < 0,05$. Исключение составляют тренды для приземной температуры воздуха в январе и декабре, которые статистически значимы на уровне $P < 0,15$.

ДОЛГОПЕРИОДНАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ТЕМПЕРАТУРЫ АТЛАНТИЧЕСКИХ ВОД ВО ФЬОРДАХ ЗАПАДНОГО ШПИЦБЕРГЕНА

Временная изменчивость ТАВ во фьордах архипелага Шпицберген характеризуется следующими особенностями. Первичный анализ указывает на общее увеличение средней температуры летнего сезона в слое ТАВ для всего исследуемого периода (рис. 3). В терминах линейного тренда увеличение температуры воды составляет 0,15 градуса за десятилетие, причем уравнение линейной регрессии является статистически значимым на уровне $P < 0,05$. Коэффициент детерминации составляет 0,37, то есть линейный тренд описывает не более 37 % общей дисперсии анализируемого

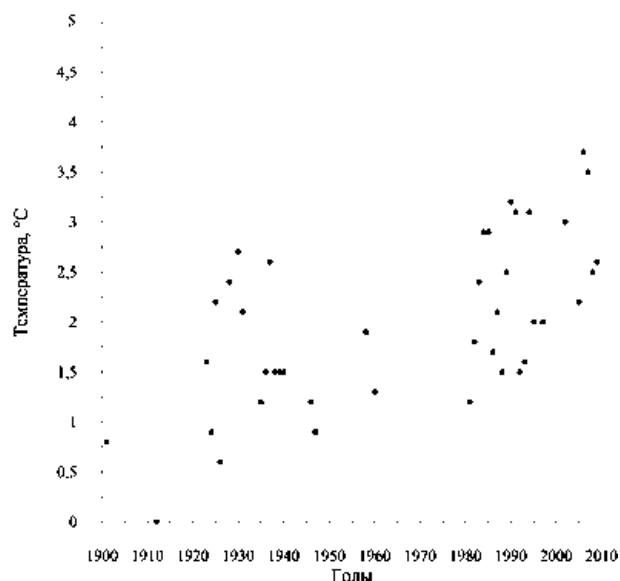


Рис. 3. Временная изменчивость летней температуры воды в слое ТАВ, представленная в виде линейного тренда, во фьордах острова Западный Шпицберген.

временного ряда, и это, по-видимому, в первую очередь объясняется значительной межгодовой изменчивостью характеристик ТАВ.

Средняя многолетняя температура воды в слое ТАВ за период 1901–2009 гг. составляет 2,0 °C. Отклонения температуры воды от средней многолетней (рис. 4) показывают два периода с положительными аномалиями температуры в слое ТАВ. Первый период приходится на 1920–1940 гг. (хорошо известное первое потепление Арктики). Второй период приходится на 1983–2009 гг. — этот период в научной литературе обозначается как так называемое быстрое потепление Арктики (Polyakov et al., 2002). На второй период приходится абсолютный максимум среднегодовой температуры воды в слое ТАВ, составляющий 3,7 °C, и в терминах отклонений от среднего современное потепление является более мощным.

В ходе анализа долгопериодной изменчивости характеристик ТАВ во фьордах острова Западный Шпицберген были рассчитаны аномалии среднегодовой температуры воды в слое распространения ТАВ. Среднее многолетнее значение температуры ТАВ

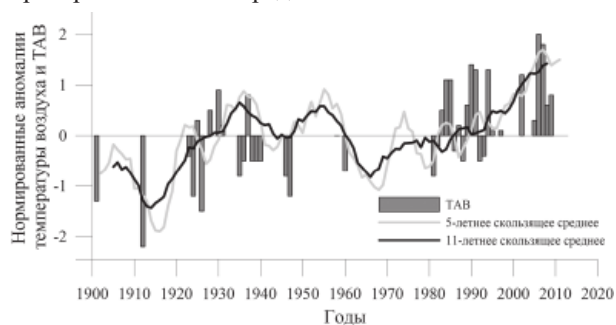


Рис. 4. Нормированные отклонения от средней температуры воздуха и температуры воды в слое ТАВ во фьордах Западного Шпицбергена.

для всего временного ряда составило 2,0 °С. Из представленных на рис. 3, 4 графиков можно сделать следующие выводы. Во-первых, выделяются два периода с положительными аномалиями среднегодовой температуры воды в слое ТАВ. Первый период приходится на 1920–1940 гг., а второй на 1983–2009 гг. Во-вторых, в терминах отклонений от среднего современное потепление является более мощным по сравнению с первым. Максимальные значения отклонений за период современного потепления составили 1,8 °С и 1,6 °С градуса и наблюдались в 2006 и 2007 гг. соответственно.

ДОЛГОПЕРИОДНАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПРИЗЕМНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА

Следуя основополагающим методологическим подходам (Алексеев, 2003; Визе, 1937), наряду с исследованием характеристик атлантических вод во фьордах архипелага Шпицберген проведено исследование особенностей долгопериодной изменчивости приземной температуры воздуха (ПТВ) как одной из важнейших характеристик термического режима атмосферы.

Временной ряд средних месячных значений ПТВ покрывает период с 1898 по 2013 г. (Nordli et al., 2014). Общий линейный тренд показывает увеличение ПТВ на архипелаге Шпицберген на 2,6 °С градуса за указанный период.

Также проведен анализ величины потепления в районе архипелага Шпицберген для каждого месяца года в отдельности (см. табл. 1). Рассчитаны коэффициенты линейного тренда, которые являются характеристикой средней скорости изменения температуры на рассматриваемом отрезке времени.

Таблица 1

Оценки линейного тренда ПТВ, осредненной за год и по сезонам за 1898–2013 гг.

Месяц	I*	II	III	IV	V	VI	VII
Коэффициент линейного тренда, (градус /10 лет)	0,207	0,522	0,475	0,377	0,286	0,087	0,149
Месяц	VIII	IX	X	XI	XII*	Год	
Коэффициент линейного тренда, (градус /10 лет)	0,109	0,198	0,160	0,401	0,194	0,260	

Примечание. * — месяцы, для которых уравнения линейной регрессии не являются статистически значимыми на уровне $P < 0,05$.

Линейные тренды средних месячных ПТВ положительны для всех месяцев года, причем наибольшее потепление отмечается в феврале, марте, апреле и ноябре (0,4–0,5 градуса/10 лет).

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДОЛГОПЕРИОДНОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ТЕМПЕРАТУРЫ ТАВ И ПТВ В РАЙОНЕ АРХИПЕЛАГА ШПИЦБЕРГЕН

Для сравнительного анализа многолетней изменчивости температуры воды в слое ТАВ и ПТВ применен метод сопоставления нормированных аномалий каких-либо характеристик (Алексеев, 2003).

Многолетняя изменчивость нормированных отклонений ПТВ вследствие сильной межгодовой изменчивости представлена в виде графиков, полученных при использовании фильтров 5- и 11-летнего скользящего среднего (см. рис. 4).

При первом потеплении Арктики (1920–1940 гг.) положительные аномалии температуры воды наблюдаются в 1925–1930 гг., а положительные аномалии ПТВ смещены на

промежуток 1930–1940 гг. Для современного потепления характерны значительные положительные нормализованные отклонения температуры воды в слое ТАВ на протяжении всего периода с 1980 по 2009 г. Временной ход ПТВ в виде 5- и 11-летнего скользящего среднего для данного периода показывает, что с 1980 по 1990 г. заметных аномалий (ни положительных, ни отрицательных) не наблюдалось, а существенные нормализованные аномалии температуры воздуха наблюдаются только с середины 1990-х гг.

Следует отметить, что наличие больших пропусков во временном ряду для среднегодовых значений температуры воды в слое ТАВ не позволяет достаточно точно судить о степени корреляции (взаимосвязи) между представленными характеристиками. Однако имеет место общая тенденция изменчивости, особенно для современного периода — это увеличение температуры воды в слое ТАВ и ПТВ. Можно предположить наличие общего внешнего источника наблюдаемых изменений обеих величин. Выявить признаки запаздывания одного процесса от другого по имеющимся данным затруднительно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате анализа долгопериодной изменчивости температуры в слое ТАВ в заливах Западного Шпицбергена и ПТВ установлено:

- увеличение среднегодовой температуры для периода 1901–2009 гг. составляет 0,15 °C/10 лет;

- существование двух пиков потепления: 1920–1930-е гг. и с 1980-х гг. по настоящее время;

- современное потепление (1980 – настоящее время) является более мощным по сравнению с первым потеплением (по продолжительности, по скорости потепления и по максимальным температурам);

- увеличение среднегодовой ПТВ для периода 1898–2013 гг. составило 0,26 градуса/10 лет, причем наибольшее потепление отмечается в феврале, марте, апреле и ноябре.

Сравнительный анализ временного хода нормированных аномалий температуры воды в слое ТАВ и ПТВ в районе арх. Шпицберген показал наличие квазисинхронной изменчивости указанных характеристик. Предположительно причиной данного явления может считаться внешний источник.

Работа выполнена в рамках раздела 1.5.3.3 тематики ЦНТП Росгидромета и при финансовой поддержке Минобрнауки России при выполнении прикладных научных исследований и экспериментальных разработок по теме «Создание новых методов и средств мониторинга гидрометеорологической и геофизической обстановки на архипелаге Шпицберген и в Западной Арктической зоне Российской Федерации» (Соглашение о предоставлении субсидии от 20.11.2014 №14.610.21.0006, уникальный идентификатор ПНИЭР RFMEFI61014X0006) и российско-норвежского проекта «Океанографические условия в фьордах архипелага Шпицберген на примере заливов Грен-фьорд и Билле-фьорд» (Арктический Университет г. Тромсё – Санкт-Петербургский государственный университет).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алексеев Г.В. Исследования изменения климата Арктики в XX столетии // Труды ААНИИ. 2003. Т. 446. С. 6–19.

Алексеев Г.В., Булатов Л.В., Захаров В.Ф., Иванов В.В. Тепловая экспансия атлантических вод в Арктическом бассейне // Метеорология и гидрология. 1998. №7. С. 69–78.

- Алексеев Г.В., Иванов Н.Е. Региональные особенности потеплений в Арктике в 1930-е и 1990-е годы // Труды ААНИИ. 2003. Т. 446. С. 4–47.
- Визе В.Ю. Причины потепления Арктики // Сов. Арктика. 1937. № 1. С. 10–19.
- Кораблев А.А., Пнюшков А.В., Смирнов А.В. Создание океанографической базы данных для мониторинга климата в Североевропейском бассейне Арктики // Труды ААНИИ. 2007. Т. 447. С. 85–108.
- Никифоров Е.Г., Шнайхер А.О. Закономерности формирования крупномасштабных колебаний гидрологического режима Северного Ледовитого океана. Л.: Гидрометеониздат, 1980. 269 с.
- Рожков В.А. Теория и методы статистического оценивания вероятностных характеристик случайных величин и функций с гидрометеорологическими при мерами. СПб.: Гидрометеониздат, 2002. 780 с.
- Cottier F., Tverberg V., Inall M., Svendsen H., Nilsen F., C. Griffiths. Water mass modification in an Arctic fjord through cross-shelf exchange // J. Geoph. Res. 2005. Vol. 110. P. 348–364.
- Hanzlick D. The West Spitsbergen Current: Transport, forcing and variability // Ph. D. Thesis. University of Washington (Seattle). 1993. 127 p.
- Nordli Ø., Przybylak R., Ogilvie A., Isaksen K. Long-term climate variations on Svalbard using early instrumental observations // Polar Research. 2014. Vol. 33, <http://dx.doi.org/10.3402/polar.v33.21349>
- Polyakov I.V., Alekseev G.V., Bekryaev R.V., Bhatt U., Colony R., Johnson M.A., Karklin V.P., Makshtas A.P., Walsh D., A.V. Yulin. Observationally based assessment of polar amplification of global warming // Geophys. Res. Lett. 2002. Vol. 29. P. 1878–1898.
- Polyakov I.V., Bekryaev R.V., Alekseev G. V., Bhatt U., Colony R., Johnson M., A.P. Makshtas. Variability and trends of air temperature and pressure in the maritime Arctic, 1875–2010 // J. of Climate. 2003. Vol. 16. P. 2067–2077.
- Polyakov I.V., Alekseev G.V., Timokhov L.A., Bhatt U., Colony R., Simmons H., Walsh D., Zakharov V.F. Variability of the Intermediate Atlantic Water of the Arctic Ocean over the Last 100 Years // J. of Climate. 2004. Vol. 17. P. 4485–4497.
- Rudels B., Meyer R., Fahrbach E., Ivanov V.V., Østerhus S., Quadfasel D., Schauer U., Tverberg V., Woodgate R. Water mass distribution in Fram Strait and over the Yermak Plateau in summer 1997 // Annales Geophysics. 2000. Vol. 18. P. 687–705.

D.I. TISLENKO, B.V. IVANOV

LOND-TERM VARIABILITY OF ATLANTIC WATERS TEMPERATURE IN THE FJORDS OF SPITSBERGEN IN CONDITIONS OF MODERN WARMING

In last decades, the climate of our planet is undergoing major changes. The most notable climatic changes observed in the Arctic region, which are called “Arctic amplification.” This is a decrease in the area of multi-years ice in 2007 and 2012, the temperature rises of intermediate Atlantic waters, increasing surface temperature. In this paper, an analysis of long-period variability of temperature transformed Atlantic waters (TAW) in the fjords of the West-Spitsbergen island (Isfjorden, Grønfjorden, Hornsund, Kongsfjorden and Bellsund) in the first period (1920–1940) and modern (1990–2010) warming in the Arctic. It is shown that the data corresponds to the periods of rise in temperature in the layer of the TAW and surface air temperature (SAT) for the area of the Svalbard.

Keywords: Arctic, Spitsbergen, climate variability, Atlantic waters.

СТРАНИЦЫ ИСТОРИИ

УДК 061.62(09)(98)

Поступила 6 марта 2015 г.

ПЕРВЫЕ ШАГИ ААНИИ В АНТАРКТИКЕ

рук. РАЭ В.В. ЛУКИН

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, e-mail: lukin@aari.ru

Арктический и антарктический НИИ в широких кругах часто называют «штабом» двух полюсов. Однако истинный смысл такого названия прославленный центр полярной науки нашей страны получил только 25 июня 1958 г., когда Распоряжением Совмина СССР была создана Межведомственная комиссия по изучению Антарктики, а Арктический научно-исследовательский институт (АНИИ) Главного управления Северного морского пути (Главсевморпуть) Министерства морского флота СССР (Минморфлота) был переименован в Арктический и антарктический НИИ (ААНИИ). Несмотря на это, ученые нашего института более 20 лет до этого события проявляли значительный интерес к организации научных исследований южной полярной области. Настоящая статья посвящена истории создания и проведения 1-й Комплексной антарктической экспедиции Академии наук СССР, а также обзору первого этапа советских рекогносцировочных исследований этого региона планеты, в которых принимали участие специалисты ААНИИ. Данному периоду советских исследований Антарктики было посвящено четырехтомное исследование А.В. Нудельмана «Советские экспедиции в Антарктику» (1955–1963 гг.), изданное в Академии наук СССР (Нудельман, 1959, 1960, 1962, 1965), а также монографии Л.М. Саватюгина и М.А. Преображенской, подготовленные в ААНИИ (Саватюгин, Преображенская, 1999, 2000, 2001, 2004, 2009). Однако в них, в силу определенных обстоятельств, не приводятся сведения о директивных и нормативно-правовых документах, изданных в руководящих государственных органах СССР в отношении организации и проведения советских антарктических исследований. Во многом именно эти документы позволяют понять причины принятия важных государственных решений о создании национальной антарктической экспедиции нашей страны, элементах ее дальнейшего развития и соответствующих структурных преобразованиях. Настоящая статья позволяет восполнить существующие информационные пробелы в истории начального этапа антарктических исследований СССР.

В период подготовки мероприятий Второго Международного полярного года 1932–1933 гг. сотрудники Всесоюзного арктического института Р.Л. Самойлович, М.М. Ермолаев и А.Ф. Лактионов подготовили проект Первой Советской антарктической экспедиции. Ее предполагалось

провести на судах китобойной флотилии «Алеут» (г. Петропавловск на Камчатке). На одном из промысловых судов этой флотилии планировалось выполнять морские океанографические, метеорологические и геомагнитные наблюдения, а на о. Петра Первого в Тихоокеанском секторе Антар-

ктики предполагалось создать зимовочную станцию с продолжительностью работ один год (Ермолаев, Дибнер, 2005). Однако отсутствие в те годы дипломатических представительств СССР в странах Южного полушария не позволило организовать bunkering судов топливом и пресной водой, а также снабжение продовольствием в портах южной части Тихого океана (Новая Зеландия, Чили). В связи с этим данный проект не был реализован.

В 1941 г. в институтском научном журнале «Проблемы Арктики» были опубликованы две статьи А.Ф. Лактионова «Гидрологический режим Антарктических вод» (№ 3) и «Льды антарктических вод» (№ 4), которые были написаны по материалам антарктических экспедиций Британского научного комитета «Дискавери», созданного Правительством Великобритании и работавшего с 1925 по 1939 г. (Лактионов, 1941а, 1941б). За эти годы британские ученые совершили 13 морских экспедиций во все районы Южного океана, а собранные в них материалы многие годы продолжали служить в качестве наиболее представительной базы данных по морским районам Антарктики. Это были первые научные публикации в Арктическом институте, посвященные проблемам Антарктики.

В 1945 г. в юбилейном докладе директора АНИИ, Героя Советского Союза Виктора Харлампиевича Буйницкого, посвященном 25-летию создания института, было сделано предложение об организации на побережье Антарктиды специализированной геофизической обсерватории (Буйницкий, 1945). Даже в трудные послевоенные годы специалисты нашего института продолжали планировать очень смелые и оригинальные экспедиции в южную полярную область. Впоследствии, когда деятельность В.Х. Буйницкого была подвергнута жесткой критике, а он был обвинен в космополитизме и впоследствии освобожден от должности директора института, его проект антарктической экспедиции использовался оппонентами в качестве одного из аргументов «тлетворного влияния западной науки». Находясь в опале, В.Х. Буйницкий все же опубликовал значи-

мый научный труд «Природа Антарктики» в системе познавательных брошюр, издаваемых Всесоюзным обществом «Знание» (Буйницкий, 1952). Примечательно, что в этом труде он пользовался исключительно американскими и британскими научными публикациями, доступ к которым был в то время ограничен для широкого круга читателей. Это косвенно свидетельствует о том, что В.Х. Буйницкий мог получить негласное задание о подготовке справки по природе Антарктики, т.к. в руководящих кругах страны в это время уже обсуждалась идея создания Советской антарктической экспедиции.

Среди отечественных специалистов широко распространено мнение, что СССР начал регулярные исследования в Антарктике исключительно с целью реализации научных задач программы Международного геофизического года (МГГ) 1957–1958 гг. Как известно, программа МГГ была разработана и представлена сообществу Международным советом научных союзов (МСНС), а СССР в послевоенные годы еще не был его членом. Это обстоятельство не давало возможности нашей стране официально принять участие в осуществлении международной программы МГГ (Berguno, 2006). В послевоенный период различные министерства и ведомства СССР стали проявлять серьезный интерес к практическим и политическим вопросам, характерным для этого периода в южной полярной области планеты. В первую очередь эти вопросы занимали МИД СССР, Минрыбпром СССР, Минобороны СССР и Минморфлот СССР. В конце ноября 1946 г. в Антарктику направились суда советской китобойной флотилии «Слава», а начиная с летнего сезона 1947/48 г. в ее составе стала работать научная группа, представленная специалистами Государственного океанографического института и Всесоюзного научного института рыбного хозяйства и океанографии. Специалисты этих московских НИИ проводили первые советские океанографические, метеорологические и гидробиологические исследования в Южном океане (Лукин, 2014). Геополитические

причины интереса СССР к Антарктике в то время заключались в противодействии заявленным в одностороннем порядке территориальным претензиям Австралии, Аргентины, Великобритании, Новой Зеландии, Норвегии, Франции, Чили на «суверенные» сектора этих государств в Южном полярном регионе. Границами этих секторов служили меридианы, сходящиеся в точке Южного географического полюса, и различные широтные круги, проходящие по морским акваториям антарктических вод. В Конгрессе США продолжительное время обсуждался вопрос об аналогичной заявке на «американский сектор Антарктики», расположенный в Тихоокеанской части Антарктики, однако это не было поддержано правительством США. США, как лидер международного западного сообщества, после окончания Второй мировой войны посчитали необходимым определить правовой режим этой области Земли в соответствии со своими интересами. В качестве правовой модели управления этой территорией предлагалось использовать принцип кондоминиума, успешно зарекомендовавший себя в г. Берлине после победы антигитлеровской коалиции над фашистской Германией в мае 1945 г. (Трофимов, 1990). Для реализации этого предложения Государственный Департамент США планировал организовать в конце 1948 г. в г. Вашингтоне международную Антарктическую конференцию, для участия в которой приглашались правительственные делегации Австралии, Аргентины, Великобритании, Новой Зеландии, Норвегии, Франции и Чили. Данная конференция не состоялась из-за отказа принять в ней участие делегаций Норвегии и латиноамериканских стран. Советскую делегацию на эту конференцию не пригласили, что подчеркнуло настоятельную необходимость для СССР заявить международному сообществу о своей практической заинтересованности в решении антарктических вопросов. Уязвимость нашей позиции заключалась в отсутствии советской научной деятельности на шестом континенте в это время. Морские научные исследования

в рамках работы китобойной флотилии «Слава» не принимались во внимание нашими зарубежными коллегами. Поэтому на первом этапе обсуждения начала регулярных советских исследований в Антарктике наиболее активную позицию заняли советские общественные организации, лидером среди которых стало Всесоюзное географическое общество (ВГО), возглавляемое в то время академиком Л.С. Бергом. В своем докладе на общем собрании ВГО в феврале 1949 г. он заявил, что СССР в своих научных исследованиях продолжает основываться на выдающихся открытиях наших соотечественников, совершенных в различные исторические периоды. В отношении антарктических исследований — это в первую очередь великое географическое открытие шестого континента моряками Русской южно-полярной экспедиции на шлюпах «Восток» и «Мирный» под командованием Ф.Ф. Беллинсгаузена и М.П. Лазарева, ставшее главным географическим открытием начала XIX века. В то же время Л.С. Берг подчеркивал все возрастающую научную активность в рамках деятельности советской китобойной флотилии «Слава» и планов освоения Антарктиды, предложенных В.Х. Буйницким (Берг, 1949). Хорошо известно, что сотрудники АНИИ во все времена принимали активное участие в разнообразной деятельности ВГО, и поэтому они горячо поддержали принятое этой общественной организацией решение в отношении Антарктики.

Официальная позиция советского правительства в отношении Антарктики была обнародована 9 июня 1950 г. в Меморандуме, который был разослан правительствам Австралии, Аргентины, Великобритании, Новой Зеландии, Норвегии, США, Франции (в то время СССР не имел дипломатических отношений с Чили). В этом документе сообщалось, что СССР категорически возражает против любого рассмотрения антарктических вопросов без участия официальных представителей нашего государства, обосновывались практические интересы СССР в использовании ресурсов Антарктики на основе правового

подхода к открытию Антарктиды российской экспедицией под руководством Ф.Ф. Беллинсгаузена и М.П. Лазарева в 1819–1821 гг., а также утверждалось, что любое обсуждение вопросов политико-правового регулирования деятельности международного сообщества в этом регионе должно проводиться с участием всех заинтересованных государств (Слевич, 1968).

МИД СССР в это время продолжало осуществлять внимательный мониторинг развития антарктической проблематики на внешнеполитической арене (Молодцов, 1951). Острое военно-политическое противостояние в первые годы «холодной» войны между США и СССР усугубляло эту ситуацию, тем более что США серьезно опасались возможности высадки Советской антарктической экспедиции на побережье Антарктиды с помощью судов флотилии «Слава». Одновременно в Совмине СССР начались предварительные обсуждения возможности организации Советской антарктической экспедиции, с чем, вероятно, и была связана публикация В.Х. Буйницкого. Наибольший интерес к созданию Советской антарктической экспедиции (САЭ) в это время проявляли Минрыбхоз СССР, Минморфлот СССР, Минобороны СССР, МГБ СССР и АН СССР, которые серьезно анализировали зарубежную активность в Антарктике и прогнозировали возможную попытку изоляции деятельности в ней нашей страны.

22 декабря 1954 г. Президент Академии наук СССР А.Н. Несмеянов, министр морского флота СССР В.Г. Бакаев, министр рыбной промышленности СССР А.А. Ишков и исполняющий обязанности начальника Главного управления Гидрометслужбы при Совете Министров СССР М.Е. Иванов направили письмо в адрес Первого Секретаря ЦК КПСС Н.С. Хрущева с предложением об организации Советской антарктической экспедиции. Полагалось, что целесообразно сочетать исследовательские работы антарктической экспедиции и станций с проведением мероприятий Международного геофизического года 1957–1958 гг. (МГГ) и вести их по следующим разделам:

1. Метеорологические и геофизические исследования для изучения циркуляции атмосферы в Антарктике, геомагнитных явлений и поведения ионосферы в Южном полушарии, а также накопление данных по гравиметрии и сейсмологии.

2. Комплексное океанографическое изучение Антарктики морскими судами экспедиции в связи с задачами мореплавания, развитием советского китобойного промысла и изысканием новых районов для китобойного промысла с учетом развития районов его применения.

3. Исследование геологического строения Антарктиды и ее структурного положения в земной коре, а также геологии дна южнополярных вод.

4. Изучение ледяного покрова Антарктиды и шельфовых ледников, а также выяснение общих закономерностей циркуляции льдов в южнополярных водах, в частности, в районах китобойного промысла.

5. Разработка методов аэронавигации в высоких широтах Антарктики в целях накопления опыта советскими летчиками для полетов в любых условиях земного шара.

Содержательная часть этого письма была разработана в различных министерствах и ведомствах СССР, проявлявших наибольший интерес к началу отечественных антарктических исследований на регулярной основе. В разработке практических планов этой экспедиции принимали участие специалисты, имеющие богатый опыт полярной работы, полученный в Арктике. От Арктического НИИ наибольший вклад в этом направлении был сделан М.М. Сомовым, Е.С. Короткевичем и П.К. Сенько.

13 июля 1955 г. Совмин СССР принял Постановление об организации Комплексной антарктической экспедиции Академии наук СССР. На Академию наук СССР была возложена разработка научной программы экспедиции, а на Главсевморпуть Минморфлота СССР — ее логистическое обеспечение. С этой целью в Главсевморпути была создана оперативная группа управления Комплексной антарктической экспедиции. Постановлением Президиума Академии наук СССР от 12 августа

1955 г. № 445 и Приказом Минморфлота СССР от 20 августа № 225/л заместитель директора АНИИ, Герой Советского Союза Михаил Михайлович Сомов был назначен начальником Первой Комплексной антарктической экспедиции Академии наук СССР (КАЭ). Кроме него, в состав этой экспедиции были включены следующие сотрудники АНИИ: Авраменко Станислав Андреевич (плотник), Булавкин Валентин Михайлович (младший научный сотрудник), Емельянов Алексей Александрович (плотник), Ефимов Александр Михайлович (повар), Короткевич Евгений Сергеевич (начальник геолого-географического отряда), Лепешкин Николай Семенович (плотник), Палеев Николай Романович (врач), Сенько Павел Кононович (начальник геофизического отряда), Смирнов Александр Александрович (химик), Совалков Леонид Иванович (младший научный сотрудник), Сытинский Александр Дмитриевич (геофизик), Фирсов Петр Павлович (плотник), Якубов Константин Михайлович (заместитель начальника базы).

Полная численность экспедиции составляла 228 человек. Личный состав экспедиции был представлен специалистами из 64 советских научно-исследовательских, образовательных, производственных, транспортных, оборонных, строительных организаций и предприятий, а также отечественных средств массовой информации. Таким образом, нельзя сказать, что сотрудники нашего института представляли наибольшую группу от научно-исследовательских организаций нашей страны, принимавших участие в работах 1-й КАЭ. Однако они занимали различные руководящие должности: начальника экспедиции, начальников геолого-географического и геофизического отрядов.

Президиум Академии наук СССР своим Постановлением от 16 сентября 1955 г. учредил Совет по антарктическим исследованиям. Его председателем был назначен вице-президент АН СССР, академик И.П. Бардин.

18 ноября 1955 г. Президиум Академии наук СССР своим Постановлением № 600

«О подготовке и плане проведения Комплексной антарктической экспедиции АН СССР» определил основные цели КАЭ:

- изучение влияния атмосферных процессов в Антарктике на общую циркуляцию атмосферы Земли;

- исследования основных закономерностей перемещения антарктических вод и связи их с общей циркуляцией вод Мирового океана;

- составление физико-географического описания Антарктиды и современных ледников Антарктики, геологической характеристики и истории антарктической области, биогеографической и гидрографической характеристики Антарктики;

- изучение особенностей геофизических явлений в Антарктике;

- изучение сырьевой базы и изыскание новых районов для советского китобойного промысла;

- изучение методов аэронавигации в Антарктике.

Одной из главных задач было определено создание береговой экспедиционной базы Мирный и выполнение рекогносцировочных работ по возможности создания внутриконтинентальных станций Восток и Советская, расположенных в районе Южного геомагнитного полюса и Полюса относительной недоступности соответственно.

Примечательно, что среди основных целей экспедиции Президиум Академии наук СССР даже не упоминает о подготовке к проведению мероприятий по осуществлению программы МГТ в 1957–1958 гг. Дело в том, что в эти же сроки в МСНС обсуждалась заявка Академии наук СССР о вступлении в эту международную организацию и решение МСНС еще не было опубликовано.

Структурно три первые КАЭ состояли из морской и континентальной частей. Начальником морской части 1-й КАЭ был назначен заместитель директора Института океанологии АН СССР член-корреспондент Владимир Георгиевич Корт, континентальной части — Михаил Михайлович Сомов. В первые годы работы нашей отечественной антарктической экспедиции должность

начальника экспедиции совмещалась с должностью начальника континентальной части экспедиции. Судовое обеспечение 1-й КАЭ осуществлялось с помощью дизель-электроходов «Обь» (капитан И.А. Ман) и «Лена» (капитан А.И. Ветров) и рефрижератора № 7 (капитан М.А. Цыганков).

13 февраля 1956 г. сотрудники 1-й КАЭ открыли на берегу моря Дейвиса первую советскую антарктическую обсерваторию Мирный (66° 33' ю.ш., 92° 01' в.д., высота 35 м над уровнем моря). Ее начальником стал М.М. Сомов. Эта экспедиция выполнила первые санно-гусеничные походы в глубь Антарктиды. В результате 27 мая 1956 г. на удалении 375 км от Мирного была открыта первая внутриконтинентальная станция Пионерская (69° 44' ю.ш., 95° 31' в.д., высота 2741 м над уровнем моря), а 15 октября 1956 г. с помощью авиации в Оазисе Бангера — станция Оазис (66° 16' ю.ш., 100° 45' в.д., высота 29 м над уровнем моря). Первыми начальниками этих станций стали А.М. Гусев (Московский государственный университет.) и Н.П. Русин (Главная геофизическая обсерватория). 2-ю КАЭ возглавил еще один заместитель директора АНИИ, Герой Социалистического Труда Алексей Федорович Трешников. Главной задачей этой экспедиции было открытие внутриконтинентальной станции Восток, расположенной в районе Южного геомагнитного полюса. Согласно существовавшим на тот момент теоретическим представлениям, эта точка находилась в географических координатах 78° 30' ю. ш., 107° 00' в. д. Станция Восток была открыта 16 декабря 1957 г. с помощью целой серии внутриконтинентальных санно-гусеничных походов (СГП), заключительный из которых возглавил от станции Комсомольская А.Ф. Трешников. Станция Восток была открыта на Антарктическом плато в точке с координатами 78° 28' ю.ш., 106° 48' в.д. на высоте 3480 м над уровнем моря. Первым начальником Востока стал гляциолог АНИИ Вячеслав Григорьевич Аверьянов. Примечательно, что станция Восток была открыта над глубокоководной частью подледникового озера Восток, о существовании

которого в 1957 г. никто в мире не имел даже гипотетических соображений. Остановись санно-гусеничный поезд за 10 км до или за 14 км после заключительной точки своего движения, коллективу нашей станции не суждено было бы осуществить в начале XXI века выдающееся географическое открытие и технологическое достижение — экологически чистое вскрытие этого подледникового озера. Для создания станции Восток потребовалось организовать промежуточную внутриконтинентальную транспортную базу. Она была создана с помощью вышеназванных СГП 6 ноября 1957 г. и была названа Комсомольская (74° 06' ю.ш., 97° 30' в.д., высота 3498 м над уровнем моря). Ее первым начальником был С.В. Пелевин.

Реализация научных программ 2-й КАЭ проводилась на станциях Мирный, Восток, Комсомольская, Оазис и Пионерская.

Во 2-й КАЭ работало 14 сотрудников АНИИ (Суворов В.С., Шакиров Н.М., Аверьянов В.Г., Лепешкин Н.С., Демский И.К., Аралов Д.П., Загорский В.А., Рунов В.М., Смирнов А.А., Шестериков Н.П., Федоров В.И., Гордиенко П.А., Шильников В.И.) из 387 участников экспедиции. Судовое обеспечение работ 2-й КАЭ осуществлялось дизель-электроходами «Обь» (капитан И.А. Ман) и «Лена» (капитан А.И. Ветров) и теплоходом «Кооперация» (капитан А.С. Янцелевич). Руководителями морской части 2-й КАЭ были океанолог АНИИ И.В. Максимов и гидрограф Главного управления навигации и океанографии Минобороны СССР О.А. Борщевский.

В 3-й КАЭ (начальник — один из руководителей Главсевморпути, Герой Советского Союза Евгений Иванович Толстиков) научные программы выполнялись на станциях Мирный, Восток, Комсомольская, Оазис, Пионерская, Полюс Недоступности и Советская. Судовое обеспечение экспедиции осуществлялось с помощью дизель-электрохода «Обь» (капитан И.А. Ман) и теплохода «Кооперация» (капитан А.С. Янцелевич). В этой экспедиции работало 16 сотрудников АНИИ (Васильев А.Г., Емельянов А.А., Жандар-

мов А.П., Извеков М.В., Кибалин А.П., Кулаков Ю.М. Майзеров П.Н., Мустафин Н.В., Николаев Г.Б., Острекин М.Е., Силин Г.М., Сорокин П.В., Цветков П.А., Чернов Б.С., Шестериков Н.П., Шильников В.И.) из 321 участника экспедиции. Основной экспедиционно-логистической задачей 3-й КАЭ было создание на Полюсе относительной недоступности (82° ю.ш., 55° в.д.) отечественной внутриконтинентальной станции Советская. Определение места расположения точки Полюса относительной недоступности в Антарктиде является достаточно сложной и неоднозначной задачей из-за значительной ежегодной изменчивости конфигурации ее ледяных берегов. Так, в конце XX в. специалисты Британского института им. Р. Скотта определяли географические координаты этой точки как $85^{\circ} 50'$ ю.ш., $65^{\circ} 47'$ в.д., специалисты организации Poles.com считают, что данный Полюс находится в точке $82^{\circ} 53'$ ю.ш., $55^{\circ} 04'$ в.д., а специалисты Британской Антарктической службы — в точке $83^{\circ} 50'$ ю.ш., $65^{\circ} 43'$ в.д. Все эти координаты определены с использованием современных спутниковых данных и высокоточных карт береговой линии Антарктиды. Вполне понятно, что во второй половине 1950-х гг. ученые не располагали всей этой информацией, поэтому положение Полюса относительной недоступности в Антарктиде определялось на основе тех скудных информационных ресурсов, которыми к этому времени обладало международное антарктическое сообщество.

23 декабря 1957 г. в район места расположения будущей станции Советская был выполнен рекогносцировочный полет на самолете Ил-12, командиром которого был В.М. Перов, штурманом — Б.С. Бородин. В этом полете принимали участие начальник 2-й КАЭ А.Ф. Трёшников и начальник 3-й КАЭ Е.И. Толстиков. По результатам барометрических высотных измерений было установлено, что Полюс относительной недоступности находится на высоте 3719 м над уровнем моря. 26 декабря 1957 г. со станции Мирный вышел СГП в составе 10 тягачей. В задачу похода входило мате-

риально-техническое обеспечение внутриконтинентальных станций Комсомольская и Восток и открытие станции Советская. 15 января 1958 г. СГП прибыл на станцию Комсомольская и после кратковременного отдыха и ремонта транспортной техники 8 тягачей направились на станцию Восток. После возвращения на станцию Комсомольская 3 января СГП в составе 8 тягачей двинулся в юго-западном направлении к Полюсу относительной недоступности с целью открытия на нем станции Советская. Этот поход возглавил начальник 3-й КАЭ Е.И. Толстиков. 10 февраля 1958 г. в точке с координатами $78^{\circ} 24'$ ю.ш., $87^{\circ} 35'$ в.д. на высоте 3570 м над уровнем моря было начато строительство станции Советская, которая официально была открыта 16 февраля 1958 г. Начальником станции был назначен В.К. Бабарыкин (Центральная аэрологическая обсерватория). 18 февраля СГП в составе 6 машин вышел в обратный путь через станции Комсомольская и Пионерская и 5 марта 1958 г. прибыл в Мирный. Изменение местоположения станции Советская от фактического нахождения Полюса относительной недоступности было связано с невозможностью продолжать СГП в условиях наступающей антарктической осени, характеризующейся резким понижением температуры воздуха во внутриконтинентальных районах Антарктиды. В то же время наша страна выполнила свое обещание перед научным международным сообществом о проведении наблюдений непосредственно в районе Полюса относительной недоступности. 14 декабря 1958 г. с помощью санно-гусеничного похода под руководством геофизика Ю.Н. Авсюка (Институт физики Земли АН СССР) в точке с координатами $82^{\circ} 07'$ ю.ш., $55^{\circ} 02'$ в. д., на высоте 3719 м над уровнем моря была открыта сезонная станция Полюс Недоступности. Она проработала до 26 декабря 1958 г., а ее коллектив вернулся на станцию Мирный с помощью санно-гусеничного похода.

31 декабря 1958 г. с борта д/э «Обь» сотрудниками ЦАО был осуществлен первый запуск геофизической ракеты М-6, который

символизировал начало периода высотного ракетного зондирования атмосферы в Антарктике советскими учеными. В этот же день завершалась программа МГГ.

Примерно в эти же сроки в Москве рассматривались предложения о создании Антарктического НИИ Академии наук СССР, в котором предполагалось обобщать и анализировать натурные данные, собранные советскими исследователями по программе МГГ. Решающую роль в переименовании АНИИ в Арктический и антарктический НИИ сыграло письмо и. о. директора АНИИ П.А. Гордиенко и секретаря парткома института Л. Балакшина, направленное в начале 1958 г. в Ленинградский обком КПСС о нецелесообразности создания нового НИИ по полярной тематике. Авторы письма указывали на существующий научный потенциал АНИИ, опыт его полярных экспедиций и предлагали объединить исследования по обоим полярным регионам планеты в едином научно-исследовательском институте — ААНИИ. Это предложение было поддержано в ЦК КПСС. В результате 25 июня 1958 г. вышеуказанным Распоряжением Совмина СССР Арктический НИИ был переименован в Арктический и антарктический НИИ. После возвращения из Антарктиды участников 1-й КАЭ в августе 1957 г. в Арктическом НИИ был создан отдел антарктических исследований, который возглавил М.М. Сомов. Этот факт свидетельствует о том, что антарктическими исследованиями в нашем институте стали заниматься почти за год до его переименования в Арктический и антарктический НИИ. 4 апреля 1958 г. Президент Академии наук СССР академик А.Н. Несмеянов и министр морского флота СССР В.Г. Бакаев направили письмо в ЦК КПСС с предложением продлить программу советских научных исследований Антарктики после завершения МГГ. Авторы письма указали, что «полученные в результате проведенных советских исследований Антарктики сведения будут полезны при решении в международных органах вопроса о дальнейшей судьбе Антарктиды и исключат возможность повторения ошибки

в оценке ее потенциала, как это было в свое время с Аляской». Также предлагалось начиная с 1959 г. приступить к внутриконтинентальным исследованиям Восточной Антарктиды с целью выяснения одного из основополагающих вопросов международного научного сообщества: является ли Антарктида единым материком или представляет собой архипелаг, состоящий из островов различных размеров? Одновременно предлагалось приступить к геологическому изучению районов Антарктиды, перспективных на полезные ископаемые, и завершить крупномасштабное изучение строения и структуры Южного океана с помощью океанографических и гидрографических исследований акваторий морей Уэдделла, Беллингаузена и Амундсена. Это предложение было рассмотрено руководством страны, и Советская антарктическая экспедиция продолжила свою деятельность в Антарктике на постоянной основе.

25 июня 1958 г. Совмин СССР опубликовал Распоряжение о передаче полномочий по управлению КАЭ от Академии наук СССР в Главсевморпуть Минморфлота СССР. Этим же документом была создана Межведомственная комиссия по изучению Антарктики при Президиуме АН СССР. Ее первым председателем был назначен академик Г.А. Авсюк. Этим же Распоряжением Арктический НИИ Главсевморпути был переименован в Арктический и антарктический НИИ и в его структуру была передана роль по организации подготовки и проведения очередных КАЭ.

28 июля 1958 г. Приказом заместителя министра морского флота Ю.В. Савинова в ААНИИ было создано отделение антарктических исследований с отделом организации и координации научных исследований. Кроме того, в структуре института на самостоятельном балансе была организована Комплексная антарктическая экспедиция с антарктическими станциями Мирный, Восток, Советская, Комсомольская, Оазис, Беллингаузен, Лазарев. Предложение по созданию новой советской антарктической станции Беллингаузен было сделано заместителем директора АНИИ Игорем

Владиславовичем Максимовым 24 мая 1958 г. на заседании Ученого совета Арктического НИИ. На этом заседании рассматривался отчет о результатах работ 2-й КАЭ ее начальника А.Ф. Трёшников и научные планы деятельности 4-й КАЭ, начальником морской части которой предполагался И.В. Максимов. Станцию Беллинсгаузен предлагалось построить на Земле Александра Первого на побережье морей Беллинсгаузена или Амундсена в период проведения морской экспедиции 4-й КАЭ. Одновременно планировалось провести научный санно-гусеничный поход со станции Восток через Южный географический полюс к этой новой береговой станции. Однако этим планам не суждено было осуществиться. Станция Беллинсгаузен была открыта на о. Ватерлоо (о. Кинг-Джордж), входящем в архипелаг Южно-Шетландских островов, только 22 февраля 1968 г. Во многом причинами задержки открытия станции Беллинсгаузен стали вопросы общего резкого сокращения финансирования КАЭ начиная с 1959 г. и постройки ранее не запланированной станции Молодежная на Земле Эндерби. Она была открыта 1 января 1961 г. на базе бывшего геолого-географического полевого лагеря нашей экспедиции. Это потребовало отвлечения дополнительных финансовых средств. В дальнейшем станция Молодежная стала крупнейшей базой советских антарктических исследований.

Общие затраты Правительства СССР на подготовку и проведение мероприятий программы МГГ, в том числе и КАЭ, в 1955–1958 гг. составили 486 млн руб., при этом по годам это финансирование составляло: 1956 г. – 118 млн руб., 1957 г. – 169 млн руб., 1958 г. – 147 млн руб. Рассмотрев сложившуюся ситуацию и предложенные АН СССР и Минморфлотом СССР планы работ 4-й КАЭ 1958–1960 гг., ЦК КПСС поручил 25 сентября 1958 г. Совмину СССР рассмотреть вопрос о сокращении финансирования завершения программы МГГ и ее возможного продолжения – Года Международного геофизического сотрудничества, а также целевых ассигнований

на проведение КАЭ. 16 октября 1958 г. в ЦК КПСС было направлено письмо за подписями А.Н. Косыгина, А. Афанасьева, А. Зверева, А. Несмеянова, В. Белоусова, А. Золотухина, В. Лебедева, в котором предлагались следующие мероприятия по сокращению вышеназванных проектов МГГ и, соответственно, программы КАЭ на 1959 г. с 132 млн руб. в 1958 г. до 65 млн руб. в 1959 г. С этой целью предлагалось:

- исключить из программы работ КАЭ две морские комплексные океанографические экспедиции (в районах моря Беллинсгаузена и в районе Земли Королевы Мод);
- исключить организацию новой советской станции на побережье моря Беллинсгаузена;
- сократить объем научных исследований на станциях Мирный и Восток;
- сохранить в 1959 г. деятельность трех постоянно действующих антарктических станций.

Указанные мероприятия с учетом первоначальных предложений по сокращению ассигнований на деятельность КАЭ позволили сократить расходы с 83,6 млн руб. в 1958 г. до 35 млн руб. в 1959 г. Кроме того, предлагалось сократить расходы в иностранной валюте на проведение экспедиций с 713 тыс. инвалютных рублей в 1958 г. до 107 тыс. инвалютных рублей в 1959 г. Академии наук СССР, Минморфлоту СССР, ГУГМС при Совмине СССР и МИД СССР с целью планомерного проведения советских научных исследований в Антарктике поручалось подготовить в двухмесячный срок План проведения работ в Антарктике на период с 1959 по 1965 г. К сожалению, архивный поиск документов по содержанию этого Плана в настоящее время не дал позитивных результатов.

Указанные предложения были одобрены в ЦК КПСС, и Совмин СССР в конце октября 1958 г. опубликовал соответствующее распоряжение о сокращении финансирования КАЭ.

После выхода Распоряжения Совмина СССР о переименовании Арктического НИИ Главсевморпути Минморфлота СССР в Арктический и антарктический

НИИ Приказом министра морского флота СССР от 3 июля 1958 г № 175-р поручалось перевести оперативную группу КАЭ из структуры Главсевморпути в ААНИИ до 1 декабря 1958 г. С этой целью в Ленинград сроком на 1 месяц командировались заместитель начальника КАЭ — начальник оперативной группы КАЭ Главсевморпути А.М. Фишкина и главный бухгалтер КАЭ Главсевморпути А.Ф. Уварова, а сроком на 10 дней — экономист-финансист Н.Е. Трофимова и бухгалтеры В.С. Белова и М.И. Мотовилова. Планово-финансовой службе ААНИИ поручалось открыть банковские счета КАЭ в Ленинграде и оформить необходимые документы на ведение самостоятельного баланса экспедиции. Реальное создание оперативной группы КАЭ в ААНИИ состоялось в начале 1959 г., а ее первым руководителем стал заслуженный полярник, заместитель начальника обсерватории Мирный из состава 3-й КАЭ Александр Павлович Кибалин. Вернувшись из Антарктиды весной 1959 г., он приступил к выполнению обязанностей по своей новой должности, совмещая ее с должностью заместителя начальника КАЭ. А.П. Кибалин работал в нашем институте с 1932 г., участвуя в различных арктических и антарктических экспедициях, а в перерывах между ними работая в структуре заместителя директора по общим вопросам.

В конце 1959 г. деятельность оперативной группы КАЭ в структуре ААНИИ была подвергнута весьма жесткой финансовой проверке со стороны Минморфлота СССР. По ее результатам финансовая деятельность нового структурного органа нашего института была признана неудовлетворительной, и А.П. Кибалину был объявлен строгий выговор. При этом комиссия определила, что финансовая деятельность оперативной группы КАЭ проводилась в рамках инструкций и принятых форм, которые использовались оперативной группой КАЭ Главсевморпути в 1955–1958 гг. Однако решение по деятельности ААНИИ в этом направлении было безоговорочно. А.П. Кибалин проработал в вышеназванной должности до конца 1962 г., когда он был

включен в состав 8-й САЭ в должности заместителя начальника экспедиции по хозяйственной части. После ухода А.П. Кибалина в Антарктиду в октябре 1962 г. на должность заместителя начальника САЭ — руководителя оперативной группы САЭ был назначен инженер-механик ААНИИ Хацкель Гершович Буняк.

Во второй половине ноября 1958 г. в Антарктиду направились участники 4-й КАЭ. Ее возглавил опытный полярник, сотрудник администрации Главсевморпути кандидат географических наук Александр Гаврилович Дралкин. Общая численность экспедиции была сильно сокращена до 146 человек против 321 чел. в 3-й КАЭ, из них 13 человек — сотрудники ААНИИ (Буйницкий В.Х., Демский И.К., Жарков В.И., Загорский В.А., Игнатов В.С., Кручинин Ю.А., Лепешкин Н.С., Ниязов Д.А., Ошмарин В.Г., Рукавишников Н.С., Семочкин А.А., Сериков М.И., Шакиров Н.М.). Сокращение численности КАЭ было связано с существенным уменьшением бюджета экспедиции, что было обусловлено завершением исследований по программе МГТ и соответствующим распоряжением Совмина СССР от октября 1958 г. Судовое обеспечение 4-й КАЭ выполнялось д/э «Обь» (капитан А.И. Дубинин) и пассажирским судном «Михаил Калинин» (капитан А.Д. Бородин). Из состава КАЭ была удалена морская исследовательская часть, которая была заменена на небольшой по численности морской отряд, базирующийся на борту д/э «Обь». Научные программы 4-й КАЭ проводились на станциях Мирный, Восток, Комсомольская, Лазарев.

Несмотря на небольшую численность сотрудников ААНИИ в первых отечественных антарктических экспедициях, они продолжали занимать руководящие должности начальников антарктических станций и научных отрядов.

В период проведения 4-й КАЭ 19 марта 1959 г. на шельфовом леднике Лазарева, недалеко от того места, где участники Первой Русской Южно-Полярной экспедиции 28 января 1820 г. увидели ледяной континент, была открыта станция Лазарев. Ее географи-

ческие координаты: 69° 56' ю.ш., 12° 55' в.д., высота над уровнем моря 24 м. Первым начальником станции Лазарев стал географ ААНИИ Юрий Александрович Кручинин.

Д/э «Обь» в январе 1959 г. выгрузил в обсерватории Мирный три новых транспортных гусеничных тягача «Харьковчанка», которые были специально изготовлены для работы в Антарктиде по программам КАЭ на Харьковском заводе транспортного машиностроения им. Малышева. В феврале 1959 г. эти машины осуществили переход на станцию Комсомольская. 6 ноября 1959 г. СГП, состоящий из трех «Харьковчанок» и двух артиллеристских тягачей, начал внутриконтинентальный поход по маршруту станция Комсомольская — станция Восток — Южный географический полюс и обратно. На станцию Восток поезд прибыл 29 ноября. 2 декабря на станцию Восток из Мирного прилетел на самолете Ли-2 начальник 4-й КАЭ А.Г. Дралкин. 9 декабря 1959 г. СГП вышел со станции Восток и 26 декабря прибыл на станцию Амундсен Скотт, расположенную на Южном географическом полюсе. 29 декабря СГП вышел в обратном направлении на станцию Восток, куда прибыл 8 января 1960 г. 13 февраля он прибыл на станцию Мирный.

Три первые КАЭ (1955–1958 гг.) были направлены на создание экспедиционной инфраструктуры по проведению научных мероприятий в рамках программы МГГ 1957–1958 гг. Эта программа завершилась 31 декабря 1958 г. Как уже указывалось, в связи с этим руководящая роль Академии наук СССР в подготовке и реализации программ КАЭ завершилась, и она была передана в Главсевморпуть. В августе 1958 г. в Москве было проведено второе совещание Специального комитета по антарктическим исследованиям. Представители всех стран, ведущих работы в Антарктике, в том числе и СССР, заявили о том, что и после окончания МГГ их страны будут продолжать успешно начатые научные исследования на шестом континенте. В связи с передачей функций организации подготовки и управления проведением очередных антарктических экспедиций начиная с 1959 г. в ААНИИ

численность сотрудников института в составе следующих КАЭ значительно возросла за счет специалистов из научных отделов и вспомогательного технического персонала экспедиций. Кроме того, сотрудники института стали основным кадровым звеном в проведении мониторинговых программ экспедиции по метеорологии, актинометрии, прибрежной океанологии, аэрологии и геофизике.

5-ю КАЭ возглавил старший научный сотрудник ААНИИ, географ Евгений Сергеевич Короткевич. С конца 1959 г. численный состав экспедиции был значительно сокращен, он составил 133 человека, из них 92 — сотрудники ААНИИ. Судовое обеспечение работ экспедиции осуществлялось д/э «Обь» (капитан А.И. Дубинин) и т/х «Кооперация» (капитан В.В. Белошистый). Научные программы 5-й КАЭ проводились на станциях Мирный, Восток и Лазарев.

Еще в сентябре 1955 г. на заседании Специального комитета МГГ в г. Брюсселе советская делегация сообщила о планах организации перелета тяжелых транспортных самолетов из СССР в Антарктиду. Они были реализованы в конце 1961 — начале 1962 гг. в период проведения 6-й КАЭ — САЭ (1960–1962 гг.). Ее начальником был руководитель отдела геофизики ААНИИ Валентин Михайлович Дриацкий. Общая численность экспедиции составляла 131 человек, из них — 88 сотрудники ААНИИ. Научные программы 6-й САЭ проводились на станциях Мирный, Восток, Новолазаревская, а судовое обеспечение — с помощью д/э «Обь» (капитан Н.М. Свиридов).

В период с 15 по 24 декабря 1961 г. советскими летными специалистами был выполнен первый межконтинентальный полет самолетов Ил-18 и Ан-12 по маршруту Москва — Ташкент — Дели (Индия) — Рангун (Бирма) — Джакарта (Индонезия) — Дарвин (Австралия) — Сидней (Австралия) — Крайсчерч (Новая Зеландия) — Мак-Мердо (Антарктика) — станция Мирный (Антарктида) и обратно по тому же маршруту (с 3 по 11 января 1962 г.). Одной из главных задач этого перелета была попытка осуществления материально-технического

снабжения станции Восток с помощью грузового самолета Ан-12. В связи с этим специалистами ОКБ О.И. Антонова были разработаны лыжные шасси для этого типа самолета, которые предварительно испытывались на различных снежных взлетно-посадочных полосах в Арктике. Однако структура снежного покрова в Антарктиде значительно отличалась от структуры снега в Арктике. В результате длина пробега самолета Ан-12 на лыжных шасси в Антарктике значительно превышала расчетные параметры. Это соответствующим образом отразилось на полезной загрузке самолета, что не дало возможности снабдить станцию Восток необходимым объемом дизтоплива. В результате станция Восток в начале 1962 г. была законсервирована. В то же время это был первый опыт применения тяжелых транспортных самолетов в Советской антарктической экспедиции.

18 февраля 1961 г. в Оазисе Ширмахера была открыта станция Новолазаревская ($70^{\circ} 46'$ ю.ш., $11^{\circ} 50'$ в.д., высота над уровнем моря 102 м). Ее первым начальником стал океанолог ААНИИ Владислав Иосифович Гербович. Станция Новолазаревская должна была заменить открытую в 1959 г. станцию Лазарев, находившуюся на шельфовом леднике, который неукротимо сползал в воды Южного океана. В связи с этим дальнейшая деятельность на станции Лазарев становилась опасной для персонала. Оазис Ширмахера находился на удалении 90 км от ледяного барьера в глубь Антарктического континента. Он был открыт немецким пилотом по фамилии Ширмахер в ходе работ Германской антарктической экспедиции 1938–1939 гг. Расположенная в антарктическом оазисе новая советская станция значительно расширяла круг традиционных отечественных антарктических исследований, т.к. они могли быть теперь дополнены практическими работами по лимнологии, микробиологии, зоологии, ботанике, геологии, геоморфологии и палеогеографии.

Знаковым событием 6-й САЭ было проведение геодезического санно-гусеничного похода по маршруту станция Комсомоль-

ская — станция Советская — станция Восток — станция Комсомольская. Поход возглавил военный геодезист Г.Е. Лазарев. Транспортное обеспечение этого СГП проводилось с помощью двух вездеходов «Пингвин» производства ленинградского Кировского завода и тяжелого артиллерийского тягача.

7-ю САЭ (1961–1963 гг.) возглавил А.Г. Дралкин, до этого возглавлявший работы 4-й КАЭ. Общая численность экспедиции составила 127 человек, из них 93 были сотрудниками ААНИИ. Научные программы выполнялись на станциях Мирный, Молодежная, Новолазаревская. 1 января 1963 г. на Земле Эндерби была открыта новая антарктическая станция САЭ — Молодежная. Ее географические координаты — $67^{\circ} 40'$ ю.ш., $45^{\circ} 51'$ в.д., высота над уровнем моря 40 м. Первым начальником станции стал Василий Семенович Сидоров (Главсевморпуть). Он прибыл в Антарктиду для того, чтобы возглавить станцию Восток, но по вышеназванным причинам работа этой внутриконтинентальной станции была временно приостановлена. В связи с этим В.С. Сидоров с коллективом «несостоявшихся восточников» возглавил новую станцию Молодежная. В последующие годы станция Молодежная стала центром отечественных антарктических исследований. Судовое обеспечение работ 7-й САЭ выполнялось с помощью д/э «Обь» (капитан Н.М. Свиридов) и т/х «Кооперация» (капитан В.В. Белошистый).

Работы 8-й САЭ (1962–1964 гг.) выполнялись на станциях Мирный, Восток, Молодежная, Новолазаревская. Общая численность экспедиции составляла 204 человека, из них 107 представляли ААНИИ. В этой экспедиции была введена ее новая структура: она подразделялась на сезонный и зимовочный составы. Первым начальником сезонной 8-й САЭ стал М.М. Сомов, а зимовочной САЭ — океанолог ААНИИ Николай Иванович Тябин. Судовое обеспечение осуществлялось д/э «Обь» (капитан О.И. Воденко) и пассажирское судно «Эстония» (капитан А.М. Оганов).

Сезонный состав 9-й САЭ (1963–1965 гг.) снова возглавлял М.М. Сомов, а

зимовочный состав — П.К. Сенько. Общая численность экспедиции составляла 190 человек, из них 116 являлись сотрудниками ААНИИ. В эту экспедицию были возобновлены работы на станции Восток. В период с 3 января по 21 марта 1964 г. был выполнен еще один уникальный СГП по маршруту станция Восток — Полюс недоступности — станция Молодежная. Его возглавил научный сотрудник МГУ А.П. Капица. СГП выполнялся на двух снегоходах «Харьковчанка» и одном тяжелом артиллерийском тягаче. Основной научной программой этого СГП были сейсмические измерения толщин ледяного покрова и определение характера коренного подледного рельефа Восточной Антарктиды. Именно в начале января 1964 г. в районе станции Восток было проведено сейсмическое зондирование методом отраженных волн, которое через 30 лет, в 1994 г., легло в основу географического открытия подледникового озера Восток. Общая протяженность трассы этого СГП составила 3300 км.

Руководителями 10-й САЭ (1964–1966 гг.) стали сотрудник ААНИИ, геофизик, Герой Советского Союза Михаил Емельянович Острекин (сезонный состав) и ледоисследователь ААНИИ Иван Григорьевич Петров (зимовочный состав). Общая численность экспедиции составляла 146 человек, из них 110 являлись сотрудниками ААНИИ. Работы экспедиции проводились на станциях Мирный, Восток, Молодежная и Новолазаревская, а судовое обеспечение осуществлялось с помощью д/э «Обь» (капитан Н.М. Свиридов) и т/х «Эстония» (капитан В.Я. Бехтер).

Программы работ 11-й САЭ (1965–1967 гг.) возглавили кораблестроитель ААНИИ Дмитрий Дмитриевич Максutow (сезонная экспедиция) и географ ААНИИ Леонид Иванович Дубровин (зимовочная экспедиция). Общая численность экспедиции составляла 190 человек, 117 из них — сотрудники ААНИИ. Впервые в судовом обеспечении работ КАЭ-САЭ участвовал танкер «Фридрих Энгельс», который доставил дизельное и авиационное топливо в стационарные емкости ГСМ, построенные

на станциях Мирный и Молодежная. Научные программы экспедиции выполнялись на станциях Мирный, Восток, Молодежная, Новолазаревская.

Работы 12-й САЭ проводились в период с 1966 по 1968 г. Начальником ее сезонного состава был П.К. Сенько, а зимовочного состава В.И. Гербович, оба сотрудника ААНИИ. Общая численность экспедиции составляла 198 человек, из них 119 — сотрудники ААНИИ. Научные исследования и работы, как и прежде, выполнялись на станциях Мирный, Восток, Молодежная, Новолазаревская, а судовое обеспечение осуществлял д/э «Обь» (капитан Э.И. Купри). В сезонный период 12-й САЭ специалистами Военно-топографической службы Минобороны СССР были начаты широкомасштабные геодезические работы по созданию геодезического базиса между станциями Молодежная и Новолазаревская для его дальнейшего использования в расчетах спутниковой триангуляционной сети в Антарктиде.

В период с 29 декабря 1966 г. по 26 марта 1967 г. был проведен внутриконтинентальный научный СГП по маршруту Молодежная — Полюс Недоступности — американская внутриконтинентальная станция Плато — станция Новолазаревская. Поход возглавил ледоисследователь ААНИИ И.Г. Петров. Транспортное обеспечение СГП осуществлялось двумя «Харьковчанками» и тяжелым артиллерийским тягачом. Общая протяженность трассы похода составила 3411 км. В походе выполнялись гляциологические, геофизические и метеорологические исследования.

Работы и исследования 13-й САЭ проводились в 1967–1969 гг. Начальником сезонного состава был директор ААНИИ А.Ф. Трёшников, а зимовочного состава — океанолог ААНИИ Владимир Александрович Шамонтёв. Общая численность экспедиции составляла 220 человек, из них 138 — сотрудники ААНИИ. Впервые в практике судового обеспечения работ САЭ принимало участие научно-исследовательское судно ААНИИ «Профессор Визе» (капитан И.А. Ман). Начальником

этого рейса был прославленный полярный исследователь 1930-х гг., участник легендарного дрейфа станции «Северный полюс-1», руководитель ГУГМС при Совмине СССР, Герой Советского Союза Евгений Константинович Федоров. Кроме НИС «Профессор Визе» в судовом обеспечении работ экспедиции принимал участие д/з «Обь» (капитан Э.И. Купри).

22 февраля 1968 г. в этой экспедиции на о. Ватерлоо (о. Кинг-Джордж) в архипелаге Южные Шетландские острова была открыта пятая по счету советская антарктическая станция Беллинсгаузен ($62^{\circ} 12' \text{ ю.ш.}, 58^{\circ} 58' \text{ з.д.}$, высота над уровнем моря 16 м). Ее первым начальником стал известный полярный исследователь, сотрудник оперативной группы САЭ ААНИИ Арнольд Богданович Будрецкий. Эта станция дополнила активно действующие советские антарктические станции Мирный, Молодежная, Новолазаревская и Восток.

В программу 13-й зимовочной САЭ были включены новые виды наблюдений по приему фотоизображений земной поверхности с искусственных спутников Земли (ИСЗ) с целью их использования для составления топографических карт Антарктиды. Эта аппаратура была привезена геодезистами Дрезденского технического университета (ГДР) и была установлена на станции Мирный.

В этой же экспедиции на станциях Мирный, Восток и Молодежная были построены астрономо-геодезические пункты для выполнения наблюдений методами спутниковой геодезии. Данный вид программы выполнялся специалистами военно-топографической службы Минобороны СССР.

14-ю САЭ (1968–1970 гг.) возглавил Д.Д. Максutow. Он же возглавлял станцию Мирный в зимовочный период. Общая численность экспедиции составляла 284 человека, из них 145 — сотрудники ААНИИ. В судовом обеспечении работ 14-й САЭ приняли участие д/з «Обь» (капитан Э.И. Купри), т/х «Вытегралес» (капитан Б.В. Печенов), еще одно научно-исследовательское судно ААНИИ «Профессор Зубов» (капитан П.И. Таиров) и танкер «Эльбрус» (капитан

В.В. Синельников). Начальником рейса на НИС «Профессор Зубов» был назначен еще один «папанинец», радиоспециалист, директор НИИ гидрометеоприборостроения, Герой Советского Союза Эрнест Теодорович Кренкель. Научные наблюдения и работы экспедиции проводились на станциях Мирный, Молодежная, Восток, Новолазаревская и Беллинсгаузен.

25 июня 1969 г. на станции Молодежная был введен в эксплуатацию новый комплекс высотного зондирования атмосферы и была запущена геофизическая ракета М-100, позволяющая выполнять геофизические и метеорологические измерения слоя атмосферы с высоты 100 км до поверхности Земли.

Руководителями 15-й САЭ (1969–1971 гг.) были П.К. Сенько (сезонный состав) и В.И. Гербович (зимовочный состав). Общая численность экспедиции составляла 274 человека, из них 146 — сотрудники ААНИИ. Работы экспедиции выполнялись на пяти круглогодично действующих станциях Мирный, Беллинсгаузен, Восток, Молодежная и Новолазаревская. Судовое обеспечение экспедиции выполнялось д/з «Обь» (капитан Э.И. Купри) и НИС «Профессор Визе» (капитан Э.Н. Троицкий). В зимовочный период на станциях этой экспедиции Мирный и Молодежная был начат регулярный прием изображений морских льдов, континентальных участков Антарктиды и структуры облачности с ИСЗ. На станциях Новолазаревская и Беллинсгаузен были развернуты два новых астрономо-геодезических пункта. Таким образом, триангуляционная спутниковая геодезическая сеть стала насчитывать пять постоянно действующих станций, наблюдения на которых осуществлялись специалистами военно-топографической службы Минобороны СССР.

Так завершился первый, рекогносцировочный этап деятельности КАЭ–САЭ. Руководителями 15 первых КАЭ–САЭ были 25 человек, из них 19 человек представляли АНИИ – ААНИИ. За эти годы в Антарктиде работали 11 антарктических станций (Мирный, Пионерская, Оазис, Восток, Комсомольская, Советская, Полюс

Недоступности, Лазарев, Новолазаревская, Молодежная, Беллинсгаузен). За 15 экспедиций их начальниками были 62 отечественных специалиста, представлявшие различные научные организации СССР, из которых 42 человека являлись специалистами АНИИ – ААНИИ.

Рассмотрим далее структурные изменения, происходившие в нашем институте за 60-летний период отечественных антарктических исследований начиная с 1955 г.

Как уже говорилось, в августе 1957 г. в АНИИ был создан отдел антарктических исследований, который возглавил начальник 1-й КАЭ М.М. Сомов. В 1958 г. он был назначен заместителем директора института по антарктическим исследованиям. В этом же году в ААНИИ было создано отделение антарктических исследований и отдел организации и координации научных исследований. Первыми сотрудниками отдела стали: П.К. Сенько, И.В. Максимов, Л.И. Дубровин, Л.В. Долганов, Л.И. Ескин, Е.Б. Леонтьев, Г.В. Коновалов, А.Д. Сытинский, А.Д. Кошелева, О.П. Герт, И.П. Иванова, Г.П. Пескова, Л.С. Лаврентьев, Н.Н. Русанова. 1 декабря 1958 г. оперативная группа КАЭ была переведена из Главсевморпути (г. Москва) в ААНИИ (Ленинград). В мае 1959 г. сотрудник ААНИИ А.П. Кибалин был назначен заместителем начальника КАЭ — руководителем оперативной группы КАЭ. В 1960 г. к личному составу отдела организации и координации научных исследований добавились: Герой Советского Союза М.Е. Острекин, Я.П. Кобленц, В.М. Рогачев, Н.И. Филиппов, Т.В. Филиппова, А.И. Дмитриев, Н.А. Корблев, В.В. Комова, Л.И. Анищенко.

15 декабря 1960 г. министром морского флота СССР В. Бакаевым была утверждена новая структура ААНИИ, в которой отдел географии был переименован в отдел арктической и антарктической географии.

В 1961 г. Комплексная антарктическая экспедиция была переименована в Советскую антарктическую экспедицию (САЭ).

В 1961 г. руководителем отделения антарктических исследований стал М.Е. Острекин, а М.М. Сомов оставался заместителем директора по научной работе

в Антарктике — начальником КАЭ. В оперативной группе КАЭ были введены две должности бухгалтеров, которые обеспечивали бухгалтерский учет и начисление заработной платы участникам очередных экспедиций.

16 декабря 1960 г. Президиум Академии наук СССР принял постановление № 1067 о создании первого советского Атласа Антарктики, в котором должны были быть обобщены материалы наблюдений отечественных и зарубежных антарктических экспедиций.

7 февраля 1961 г. по Распоряжению министра морского флота В. Бакаева ААНИИ было предписано в отделении антарктических исследований создать сектор Атласа Антарктики. Приказом директора ААНИИ №46-р он был создан 18 апреля 1962 г. в составе 10 человек, и его возглавил Е.С. Короткевич.

В 1962 г. состав бухгалтерской группы САЭ был расширен до трех человек, а другие антарктические подразделения института оставлены без изменения.

Окончательно вопрос о передаче организационно-административных функций экспедиции в Ленинград из Москвы был решен 18 мая 1963 г., когда Постановлением Совмина СССР «О возложении на Главное управление гидрометеорологической службы при Совете Министров СССР работ по изучению гидрометеорологического режима и гидрометеорологическому обеспечению мореплавания и авиации в районах Арктики и Антарктики» № 549 ААНИИ вместе с Советской антарктической экспедицией был переведен в ведение Главного управления Гидрометслужбы при Совмине СССР (ГУГМС). В связи с этим в структуре штатного расписания ГУГМС было введено новое управление — Арктическое и антарктическое управление. Его первым руководителем был назначен Ю.А. Хабаров. Перевод организационно-административных функций по управлению работами САЭ в Гидрометеорологическую службу страны вызвал определенную озабоченность у представителей академической науки, которые полагали, что в результате этого процесса наша национальная ан-

тарктическая экспедиция потеряет свою комплексность и межведомственность. В связи с этим 26 декабря 1964 г. академик-секретарь географо-геологического отделения АН СССР Д.И. Щербаков направил письмо в ЦК КПСС с предложением о передаче функций научного руководства работами САЭ от ГУГМС Академии наук СССР. Однако это предложение не нашло поддержки, и с 1963 г. по настоящее время всеми работами и исследованиями нашей страны в Антарктике руководит Гидрометеорологическая служба, при этом полностью сохраняется комплексность исследований и межведомственный характер организации экспедиций.

В 1963 г. в связи с переводом ААНИИ в структуру ГУГМС при Совмине СССР изменился и порядок проведения капитального строительства в Антарктиде. Если в структуре Главсевморпути эти работы выполнялись специализированными строительными предприятиями данного Главного управления, то при переходе ААНИИ в другое ведомственное подчинение этот порядок должен был быть изменен. По существующим правилам одно юридическое лицо, в нашем случае ААНИИ, не могло совмещать в себе функции заказчика и подрядчика капитального строительства. В связи с этим руководитель ГУГМС при Совмине СССР, академик Е.К. Федоров обратился 29 сентября 1963 г. к заместителю министра финансов СССР с просьбой о согласовании организации в структуре ААНИИ строительно-монтажного участка (СМУ) на самостоятельном балансе и с правом юридического лица. После согласования с Минфином СССР, Приказом руководителя ГУГМС при Совмине СССР в 1963 г. был создан Строительно-монтажный участок, который занимался вопросами капитального строительства в Антарктиде. Наибольшую активность СМУ в Антарктике проявил в 1970–1980-е гг., когда были полностью перестроены все капитальные сооружения служебно-жилого фонда, постоянных хранилищ ГСМ, складов, научных измерительных комплексов на советских антарктических станциях.

В 1964 г. отдел арктической и антарктической географии вновь был переименован в отдел географии.

Приказом ГУГМС при Совмине СССР от 02.12.1964 г. № 619/К 9 декабря 1964 г. по состоянию здоровья М.М. Сомов был освобожден от должности заместителя директора по научной работе в Антарктике — начальника САЭ и на эту должность был назначен Е.С. Короткевич, который проработал в этой должности до 1989 г. М.М. Сомов продолжал работать в отделе антарктических исследований в должности старшего научного сотрудника.

В 1965 г. закончился срок действия Межведомственного Плана мероприятий по деятельности КАЭ–САЭ в Антарктике на период с 1959 по 1965 г. Этот План, как упоминалось выше, был разработан во исполнение предложения Сомова СССР, поддержанного ЦК КПСС. В связи с необходимостью определения стратегических задач дальнейшего развития деятельности САЭ 9 марта 1966 г. Совмин СССР опубликовал Постановление «О мерах по дальнейшему развитию советских исследований в Антарктике» №184-59. Основными целями деятельности САЭ на последующий период стало решение ресурсных задач в использовании Антарктики. В первую очередь это касалось расширения отечественного рыбного промысла в антарктических водах и геологоразведочных работ на Антарктическом континенте и в окружающих его морях Южного океана. Для практической поддержки этого вида деятельности требовалось значительное повышение уровня гидрометеорологического, гидрографического и топогеодезического обеспечения ресурсных задач экспедиции. С геополитической точки зрения предлагалось создать сеть советских антарктических станций по всему периметру Антарктиды, включая ее западную часть. Во многом задачи открытия новых станций в тихоокеанском секторе были связаны с необходимостью развития спутниковой геодезической триангуляционной сети, которая в этом случае охватывала всю территорию Антарктиды. На существующих антарктических стан-

циях предлагалось развить современные на тот период времени технологии сбора информации о состоянии окружающей среды, в том числе ракетное зондирование атмосферы, прием информации с искусственных спутников Земли о состоянии подстилающей поверхности и выполнение работ по спутниковой геодезии (Лукин, 2014). На завершении первого рекогносцировочного этапа, во исполнение требований данного Постановления, в феврале 1968 г. на о. Ватерлоо была создана советская антарктическая станция Беллинсгаузен.

В 1966 г. и в 1969 г. были изданы первый и второй тома Атласа Антарктики, авторский коллектив которого в 1971 г. был удостоен Государственной премии СССР. ААНИИ в этом коллективе был представлен Е.С. Короткевичем.

Осенью 1970 г. ААНИИ торжественно отмечал 50-летие со дня образования института. К этой юбилейной дате сотрудники института Николай Александрович Корнилов и Иван Григорьевич Петров за большие заслуги в деле освоения и изучения Антарктики были удостоены звания Героя Социалистического Труда.

Антарктическая проблематика нашего института не ограничивалась вопросами научной и экспедиционной деятельности, а также их административного управления. Начиная с 1959 г. сотрудники ААНИИ стали привлекаться для экспертного обсуждения создания правового режима международного управления Антарктикой. 2 мая 1958 г. Государственный Департамент США разослал правительствам Австралии, Аргентины, Бельгии, Великобритании, Новой Зеландии, Норвегии, СССР, Франции, Чили, ЮАС и Японии ноту с приглашением для участия в Международной конференции по Антарктике, которую предлагалось созвать в г. Вашингтоне в 1959 г. На этот раз Правительство США надеялось избежать некоторых организационных ошибок, допущенных в 1948 г. при попытке созвать первую Антарктическую конференцию. Круг участников новой конференции на этот раз ограничивался правительствами стран, направивших свои национальные

экспедиции в Антарктику для выполнения проектов программы МГТ в 1957–1958 гг.

Срыв Антарктической конференции 1948 г. был связан с тем, что правительства Аргентины, Чили и Норвегии опасались возможной ликвидации их государственного суверенитета на заявленные в первой половине XX в. территориальные претензии в южной полярной области при организации международного кондоминиума управления Антарктикой под руководством США. В 1958 г. Государственный Департамент США подчеркивал сохранение ранее заявленных правительствами Австралии, Аргентины, Великобритании, Новой Зеландии, Норвегии, Франции и Чили территориальных претензий в Антарктике, но одновременно предлагал «заморозить» эти претензии. При этом США напоминали возможным участникам будущей конференции о географических открытиях в Антарктике, ранее сделанных гражданами США и правительственными экспедициями этой страны. Одновременно сообщалось, что Правительство США сохраняет за собой право на заявление территориального суверенитета в Антарктике.

В ответной ноте Правительства СССР от 2 июня 1958 г., переданной в Государственный Департамент США через Посольство СССР в г. Вашингтоне, поддерживалось предложение США о созыве Международной конференции по вопросам Антарктики. Правительство СССР подчеркивало, что итогом такой конференции должен стать Международный договор об Антарктике. Основными принципами этого договора должны стать:

- мирное использование Антарктики с полным запретом военной деятельности в регионе;

- свобода научных исследований и обмена информацией между Сторонами Договора.

В отношении территориальных претензий в Антарктике Правительство СССР указывало на необходимость отрицания подобных претензий, ранее заявленных в одностороннем порядке, а также напоминало о первенстве в географическом

открытии Антарктиды в 1820–1821 гг., сделанном моряками Русской южно-полярной экспедиции под командованием Ф.Ф. Беллинсгаузена и М.П. Лазарева. Советское правительство предлагало расширить круг участников конференции от 12 государств-исполнителей программы МГТ в Антарктике до всех заинтересованных сторон.

После обмена официальными нотами начался продолжительный период согласования проекта Договора и формата проведения Антарктической конференции по дипломатическим каналам.

Конференция была открыта 15 октября 1959 г. в столице США г. Вашингтоне. В ней принимали участие делегации правительств 12 стран, принявших участие в выполнении работ по программам МГТ в Антарктике в 1957–1958 гг., как это и предлагали организаторы этого международного форума — Государственный Департамент США. Делегацию Правительства СССР на конференции возглавил Первый заместитель Министра иностранных дел СССР Василий Васильевич Кузнецов. В качестве эксперта в советскую делегацию был включен начальник 1-й КАЭ, заместитель директора ААНИИ по Антарктике М.М. Сомов. Конференция завершилась 1 декабря 1959 г. подписанием текста Договора об Антарктике, который стал основным актом международного права по управлению этим южным полярным регионом планеты. Основными принципами этого Договора стали: мирное использование региона, всесторонняя поддержка международного сотрудничества и свобода научных исследований. Антарктида была провозглашена безъядерной зоной. Ранее заявленные территориальные претензии в Антарктике были сохранены при условии «замораживания» достигнутого на 1 декабря 1959 г. уровня государственного суверенитета стран, заявивших территориальные претензии. Никакие новые территориальные претензии не должны приниматься. Провозглашался принцип свободы обмена информацией и возможность проведения инспекции деятельности Сторон Договора

в Антарктике. Дальнейшее развитие политических и правовых принципов Договора предлагалось осуществлять в рамках периодически созываемых Консультативных совещаний. Решения таких совещаний могли приниматься только теми Сторонами Договора, которые имеют постоянно действующую антарктическую станцию или экспедицию. Все решения принимаются исключительно на принципе консенсуса (отсутствие аргументируемых возражений). Договор открыт для присоединения любых стран — членов ООН и не имеет срока действия.

Первое Консультативное совещание было проведено в столице Австралии, г. Канберре с 10 по 24 июля 1961 г. В составе советской делегации на этом совещании принял участие М.М. Сомов. В последующих КСДА до начала 1970-х гг. сотрудники ААНИИ участия не принимали.

Таким образом, ААНИИ с конца 1959 г. реально возглавил работы по организации и проведению очередных Советских антарктических экспедиций, одновременно проводя научные исследования по изучению метеорологического, океанографического и геофизического режима Антарктики. Большой вклад в исследовательские проекты нашей страны в этом регионе вносили географы и гляциологи нашего института. В то же время следует отметить, что антарктические исследования СССР продолжали сохранять комплексную и межведомственную структуру, которая была создана в 1955 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Берг Д.С.* Русские открытия в Антарктике и современный интерес к ней // *Известия ВГО.* 1949. № 2. С. 137–148.
- Буйницкий В.Х.* Основные итоги и перспективы научно-исследовательских работ Арктического института // *Доклады юбилейной сессии 1920-XXVMT.* М.; Л.: Изд-во Главсевморпути, 1945. 15 с.
- Ермолаев А.М., Дибнер В.Д.* Михаил Михайлович Ермолаев. Жизнь исследователя и ученого. СПб.: Эпиграф, 2005. 597 с.

- Лактионов А.Ф. Гидрологический режим Антарктических вод // Проблемы Арктики. 1941. № 3. С. 56–73.
- Лактионов А.Ф. Льды антарктических вод // Проблемы Арктики. 1941. № 4. С. 43–52.
- Лукин В.В. Российская антарктическая экспедиция на рубеже веков. Связь времен и поколений // Проблемы Арктики и Антарктики. 2014. № 1 (99). С. 22–40.
- Лукин В.В., Корнилов Н.А., Дмитриев Н.К. Советские и российские антарктические экспедиции в цифрах и фактах (1955–2005 гг.). СПб.: ААНИИ, 2006. 455 с.
- Молодцов С.В. Современное международно-правовое положение Антарктики. М.: Изд-во юридической литературы, 1954. 48 с.
- Нудельман А.В. Советские экспедиции в Антарктику, 1955–1959 гг. М.: Изд-во Академии наук СССР, 1959. 128 с.
- Нудельман А.В. Советские экспедиции в Антарктику, 1958–1960 гг. М.: Изд-во Академии наук СССР, 1960. 105 с.
- Нудельман А.В. Советские экспедиции в Антарктику, 1959–1961 гг. М.: Изд-во Академии наук СССР, 1962. 149 с.
- Нудельман А.В. Советские экспедиции в Антарктику, 1961–1963 гг. М.: Наука, 1965. 271 с.
- Саватюгин Л.М., Преображенская М.А. Российские исследования в Антарктике. Т. I. Первая – двадцатая советская антарктическая экспедиция. СПб.: Гидрометеониздат, 1999. 337 с.
- Саватюгин Л.М., Преображенская М.А. Российские исследования в Антарктике. Т. II. Двадцать первая – тридцатая советская антарктическая экспедиция. СПб.: Гидрометеониздат, 2000. 287 с.
- Саватюгин Л.М. Российские исследования в Антарктике. Т. III. Тридцать первая САЭ – сороковая РАЭ. СПб.: Гидрометеониздат, 2001. 335 с.
- Саватюгин Л.М. Российская наука в Антарктике. М.: Издательский дом «Городец», 2004. 304 с.
- Саватюгин Л.М., Преображенская М.А. Российские исследования в Антарктике. Т. IV. Сорок первая – пятидесятая Российская антарктическая экспедиция. СПб.: ААНИИ, 2009. 380 с.
- Слевич С. Ледяной материк сегодня и завтра. Л.: Гидрометеониздат, 1968. 287 с.
- Стратегия развития деятельности Российской Федерации в Антарктике на период до 2010 года и на более отдаленную перспективу. М.: Росгидромет, 2011. 20 с.
- Таубер Г.М. Основные черты климата и погоды // Антарктика. Ч. II. Л.: Гидрометеониздат, 1956. 148 с.
- Berguno H. The Intellectual sources of the Antarctic Treaty // Boletín Antártico Chileno, 2-nd SCAR Workshop on the History of Antarctic Research. Chile. 2006. P. 11–17.

**ПАМЯТИ Г.К. ЗУБАКИНА
(1940–2015)**



26 мая 2015 г. после тяжелой болезни ушел из жизни Геннадий Константинович Зубакин.

Геннадий Константинович родился 8 сентября 1940 г. в г. Хабаровске. В 1957 г. окончил среднюю школу, после чего два года работал слесарем в дорожных мастерских Львовской железной дороги. В 1959 г. Геннадий Константинович поступил на Арктический факультет ЛВИМУ, после окончания которого по специальности океанология с 1965 по 1970 г. прошел путь от инженера до заместителя начальника Тиксинского радиометцентра. Годы работы в Тиксинском управлении Гидрометслужбы сделали молодого специалиста настоящим полярником и хорошим специалистом в выбранной профессии.

В 1970 г. Геннадий Константинович поступил в аспирантуру Гидрометцентра СССР и уже через три года защитил кандидатскую диссертацию. С 1973 г. Геннадий Константинович работал в нашем институте, сначала в его Мурманском филиале старшим научным сотрудником, руководителем лаборатории, а с 1989 г. — в Ленинграде. Эти годы были отмечены плодотворной научной работой по изучению морей Западной Арктики, итогом которой стала защита докторской диссертации в 1989 г.

По его инициативе была создана лаборатория «Арктик-шельф», которая за эти годы стала одним из ведущих подразделений института в разработке шельфовых проектов. При его участии и под его руководством были выполнены изыскательские и проектные работы по крупнейшим российским шельфовым проектам, таким как Варандейский терминал, МЛСП «Приразломное», Штокмановское ГКМ, строительство завода по сжижению газа в Сабетте, работы по освоению Салмановского месторождения и др. Г.К. Зубакин являлся одним из идеологов разработки Российской системы управления ледовой обстановкой для обеспечения шельфовых проектов.

Начиная с курсантских лет и за годы научной деятельности Г.К. Зубакин принимал участие в различных арктических экспедициях, во многих из которых был руководителем. После себя Геннадий Константинович оставил многочисленные статьи, монографии, а главное, учеников, которые продолжают начатое им дело в шельфовых проектах.

Светлая память о Геннадии Константиновиче Зубакине сохранится в наших сердцах.

Сборник научных статей
ПРОБЛЕМЫ АРКТИКИ И АНТАРКТИКИ
№ 2 (104)

Подписано в печать 21.06.2015
Формат 70×100 1/16
Тираж 200

Печать офсетная
Печ. л. 7,5
Заказ № 0334690

Типография ООО «Супервэйв Групп»
188681, Ленинградская область, Всеволожский район, пос. Красная Заря, д. 15