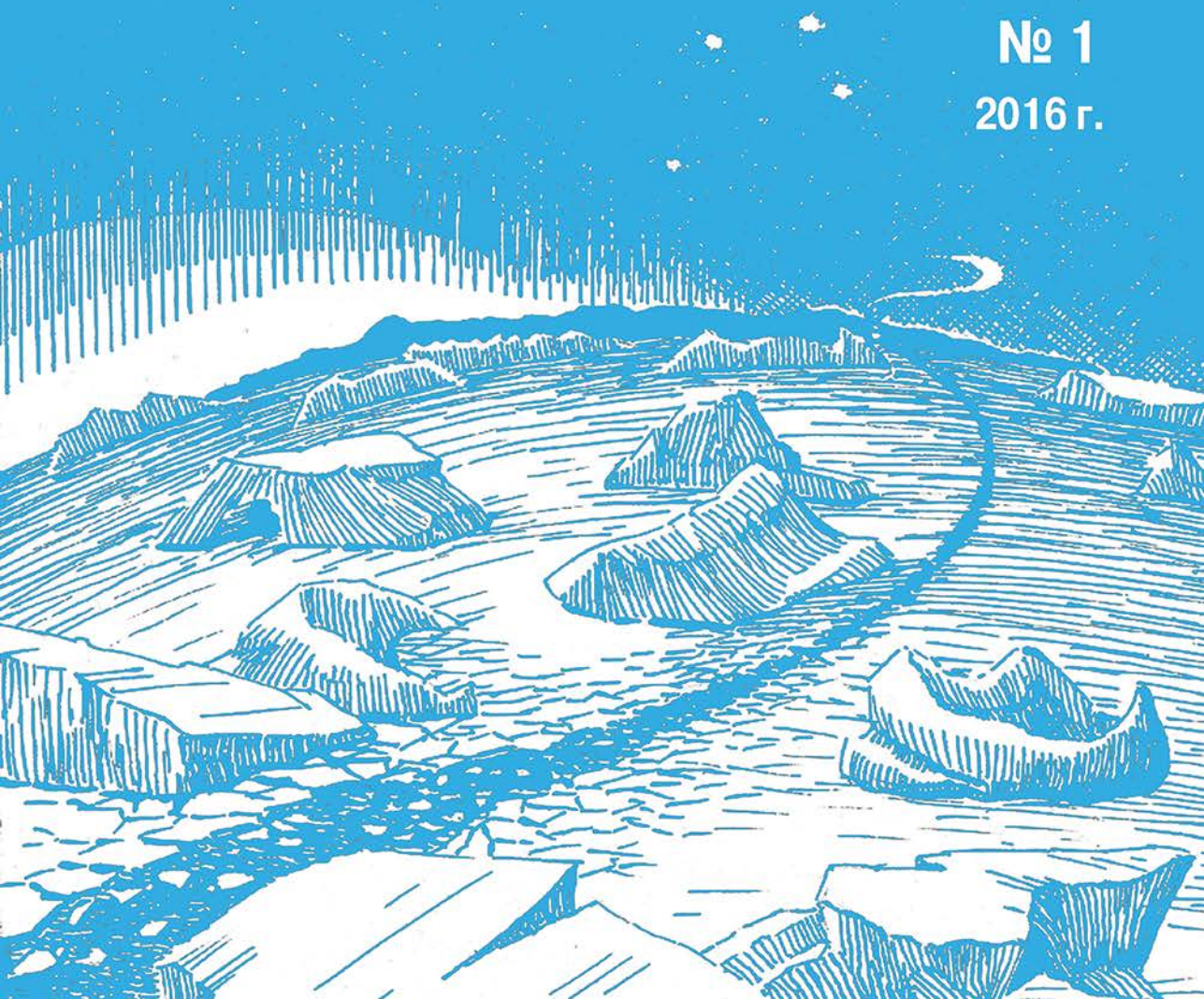


ISSN 0555-2648



ПРОБЛЕМЫ АРКТИКИ И АНТАРКТИКИ

№ 1
2016 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

№ 1 (107)

Издается с июня 1937 г.

Санкт-Петербург
ААНИИ
2016

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)

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

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

д-р. геол.-минерал. наук *Г.Л. Лейченко* (ВНИИОкеангеология)

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. Прокутинский* (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

№ 1 (107)

Свидетельство о регистрации

ПИ № ФС77-35144 от 28 января 2009 г.

Выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи и массовых коммуникаций Журнал включен в перечень рецензируемых научных изданий ВАК (вступивший в силу 1 декабря 2015 г.), 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), 2016

СОДЕРЖАНИЕ

<i>С.Н. Зацепа, Н.А. Дианский, В.И. Журавель, А.А. Изченко, К.А. Коротенко, В.В. Солбаков, В.В. Становой, В.В. Фомин. Моделирование разливов нефти в море для планирования мероприятий по обеспечению экологической безопасности при реализации нефтегазовых проектов.</i>	
Часть 2. Особенности реализации прикладных задач	5
<i>С.В. Попов, П.И. Лунев. Результаты современных отечественных наземных радиолокационных исследований во внутренних районах Восточной Антарктиды...</i>	19
<i>Ю.Н. Орлов, М.Ю. Орлов. Комплексное теоретико-экспериментальное исследование процессов динамического нагружения поликристаллического льда</i>	28
<i>Н.Н.Мельников, А.И.Калашник, Д.В.Запорожец, А.Ю.Дьяков, Д.А.Максимов. Опыт применения георадарных подповерхностных исследований в западной части российского сектора Арктики</i>	39
<i>К.Е. Сазонов. О ледовой ходкости и управляемости крупнотоннажных судов двойного действия в Арктике</i>	50
<i>А.П. Недашковский, Н.И. Савельева, О.А. Морозова, Л.А. Тимохов. Распределение кислорода и дефицита кислорода в атлантических водах в Евразийском суббассейне Северного Ледовитого океана</i>	61
<i>С.М. Сакерин, Д.М. Кабанов, В.С. Козлов, В.В. Польшин, В.Ф. Радионов, Д.Г. Чернов. Сравнительный анализ характеристик атмосферного аэрозоля в полярных районах Северного и Южного полушарий</i>	74
<i>В.А. Рожков, Н.А. Сухих. Изменчивость течений в Печорском море</i>	84
<i>Т.В. Сапелко, М.А. Анисимов, Е.С. Носевич. Палинологические реконструкции разрезов среднего и позднего голоцена побережья Баренцева моря</i>	96

СТРАНИЦЫ ИСТОРИИ

<i>И.Н. Сократова, Л.М. Саватюгин. О подготовке отечественных исследований Антарктиды в середине XX века (К 60-летию Первой Комплексной антарктической экспедиции).....</i>	111
---	-----

CONTENTS

<i>S.N. Zatsepa, N.F. Diansky, V.I. Zhuravel, A.A. Ivchenko, K.A. Korotenko, V.V. Solbakov, V.V. Stanovoy, V.V. Fomin.</i> Simulation of oil spills in the sea for planning measures to ensure environmental safety in oil and gas projects.	
Part II. Features of realization for applied problems	5
<i>S.V. Popov, P.I. Lunev.</i> Results of the recent Russian ground-based radio-echo sounding investigations in the East Antarctic inland.	19
<i>M.Yu. Orlov, Yu.N. Orlov.</i> Complex theoretical and experimental research of dynamic loading of polycrystalline ice.....	28
<i>N.N. Melnikov, A.I. Kalashnik, D.V. Zaporozhets, A.Yu. Dyakov, D.A. Maksimov.</i> Experience in applying georadar subsurface studies at the russian Arctic western sector	39
<i>K.E. Sazonov.</i> On propulsion and maneuvering performance of large-size double-acting vessels in Arctic waters.....	50
<i>A.P. Nedashkovsky, N.I. Savelieva, O.A. Morozova, L.A. Timokhov.</i> Distribution of the dissolved oxygen and aou in the atlantic water of the Arctic ocean.....	61
<i>S.M. Sakerin, D.M. Kabanov, V.S. Kozlov, V.V. Pol'kin, V.F. Radionov, D.G. Chernov.</i> Comparative analysis of atmospheric aerosol in polar regions of the northern and southern hemispheres.	74
<i>V.A. Rozhkov, N.A. Sukhikh.</i> Variability of currents in the Pechora sea	84
<i>T.V. Sapelko, M.A. Anisimov, E.S. Nosevich.</i> Pollen reconstruction during the middle and late holocene in the Barents sea coast	96

PAGES OF HISTORY

<i>I.N. Sokratova, L.M. Savatyugin.</i> About preparation for national Antarctic research in the middle of XX century (on the occasion of 60 years anniversary of The First Multipurpose Antarctic Expedition)	111
--	-----

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗЛИВОВ НЕФТИ В МОРЕ
ДЛЯ ПЛАНИРОВАНИЯ МЕРОПРИЯТИЙ
ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ
ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ НЕФТЕГАЗОВЫХ ПРОЕКТОВ.
ЧАСТЬ 2. ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ***

канд. физ.-мат. наук С.Н. ЗАЦЕПА¹, д-р физ.-мат. наук Н.А. ДИАНСКИЙ^{1,2},
канд. техн. наук В.И. ЖУРАВЕЛЬ³, ст. науч. сотр. А.А. ИВЧЕНКО¹,
д-р физ.-мат. наук К.А. КОРОТЕНКО⁴, канд. физ.-мат. наук В.В. СОЛБАКОВ⁵,
ст. науч. сотр. В.В. СТАНОВОЙ⁶, аспирант В.В. ФОМИН⁷

¹ — Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова, Москва, e-mail: zatsapa@gmail.com

² — Институт вычислительной математики РАН, Москва, e-mail: nikolay.diansky@gmail.com

³ — Научно-методический центр «Информатика риска», Москва, e-mail: v.jouravel@ric.msk.ru

⁴ — Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН, Москва, e-mail: kkorotenko@gmail.com

⁵ — ФИЦ ИУ РАН – ВЦ РАН, Москва, e-mail: solbakov@ccas.ru

⁶ — ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, e-mail: vstanovoy@yandex.ru

⁷ — Московский физико-технический институт (государственный университет), Москва, e-mail: lihar_89@mail.ru

Во второй части статьи отмечены особенности постановки задачи моделирования разливов нефти для (подготовки планов ликвидации разливов нефти в море (ПЛАРН), анализа совокупной экологической выгоды при выборе стратегий реагирования на разливы (АСЭВ) и оценки воздействия на окружающую среду (ОВОС), представлены примеры результатов моделирования. В качестве примера модели нефтяного разлива, обеспечивающей потребности информационного обеспечения ПЛАРН и АСЭВ, в заключительной части статьи приведено описание модели SPILLMOD с набором параметризаций, позволяющих учитывать роль гидрометеорологических условий при использовании в операции ЛАРН скиммеров и боновых заграждений.

Ключевые слова: математическое моделирование, разливы нефти в море, план ликвидации разлива нефти, анализ суммарной экологической выгоды, оценка воздействия на окружающую среду.

При подготовке ПЛАРН, при анализе совокупной экологической выгоды в результате реализации тех или иных стратегий реагирования, при оценке воздействия на окружающую среду необходимо рассматривать множество сценариев распростране-

* Часть 1. Методология см: Проблемы Арктики и Антарктики. 2015. № 4 (106). С. 26–38.

ния нефти в море, обусловленных изменчивостью гидрометеорологических условий и невозможностью заранее предсказать момент будущей аварии. В статье обсуждаются современные возможности математического моделирования для обеспечения информационной поддержки при решении перечисленных прикладных задач (ПЗ). Для анализа сценариев распространения нефти используются различные модели и методы оценки. Рассмотрим особенности формулировок каждой из перечисленных задач и общие вопросы, возникающие при их решении.

Для подготовки ПЛАРН необходимо оценить:

- существует ли угроза уязвимым ресурсам;
- какова вероятность воздействия на области акватории и побережий;
- как быстро следует реагировать, чтобы минимизировать последствия;
- какие технические средства и в каком количестве необходимо предусмотреть

для эффективного реагирования на разлив нефти.

Моделирование должно дать ответ на вопрос о том, насколько планирование ликвидации разливов нефти и готовность к действиям адекватны имеющимся угрозам (Журавель и др., 2013).

Для АСЭВ при реагировании на разливы нефти принципиальным является выбор критериев и приоритетов защиты. В рамках АСЭВ осуществляется:

- оценка угрозы уязвимым ресурсам, в том числе особо охраняемым природным территориям (ООПТ);
- выбор сценариев распространения нефти, приводящих к значительным последствиям;
- расчет распространения разливов для выбранных сценариев с учетом применения технических средств реагирования;
- оценка воздействия разливов на уязвимые объекты в рамках рассматриваемых сценариев с учетом применения различных стратегий реагирования.

Моделирование должно дать ответ на вопрос о том, какие стратегии реагирования следует предусмотреть в ПЛАРНе, чтобы обеспечить защиту ООПТ с минимальными экологическими потерями.

При оценке воздействия на окружающую среду (ОВОС) следует обратить внимание на несколько типов загрязнения среды — поверхностное, внутримассовое, загрязнение берегов и донных отложений. Пленочное загрязнение среды впоследствии может перейти в загрязнение берега, а внутриводное — в донные отложения. Оценка воздействия разливов нефти на окружающую среду проводится в два этапа. На первом этапе следует определить, какие ресурсы в регионе интереса относятся к уязвимым в результате разливов нефти. На втором — оценивается вероятность возникновения высоких уровней загрязнения в районах ценных экологических ресурсов.

Моделирование должно дать ответ на вопрос, где и с какой вероятностью могут возникнуть высокие уровни загрязнения водной среды и побережий, которые могут привести к тяжелым последствиям для экосистем и населения.

Во всех перечисленных выше ПЗ общим вопросом является оценка зоны потенциального воздействия от источников разливов нефти. Размеры этой зоны будут определяться процессами распространения и выветривания нефти. Для их оценки необходимо рассчитать ансамбль возможных сценариев распространения нефти или нефтепродуктов, используя траекторные модели с довольно простыми параметризациями процессов выветривания нефти и взаимодействия с берегом. Расчеты по траекторным

моделям следует проводить до момента времени, когда толщина нефтяной пленки станет пренебрежимо малой, чтобы быть источником загрязнения, как для водной толщи, так и для побережий. Предварительные ансамблевые расчеты сценариев распространения нефти дают основания для анализа возможных ограничений на реагирование при разливах по гидрометеорологическим причинам и для отбора вариантов распространения разливов для более тщательного рассмотрения, в том числе с учетом возможных мер. Для решения этой задачи требуются модели и методы, позволяющие описывать формирование области поверхностного нефтяного загрязнения с максимально возможной подробностью. В качестве примера модели нефтяного разлива, обеспечивающей потребности информационного обеспечения ПЛАРН и АСЭВ, в заключительной части статьи приведено описание модели SPILLMOD (Овсиенко и др., 1999; 2005) с набором параметризаций, позволяющих учитывать роль гидрометеорологических условий при использовании в операции ЛАРН скиммеров и боновых заграждений.

ПЛАРН

Ответ на вопрос — существует ли угроза ресурсам при возникновении ЧС, связанной с разливом нефти в море, — может быть дан при проведении риск-анализа распространения аварийных разливов нефти в море (Зацепа и др., 2014). Математические модели нефтяного разлива, используемые в риск-анализе распространения разливов, должны по возможности адекватно описывать процессы трансформации нефти в морской среде. Но, поскольку речь идет об оценке риска и необходимости моделирования десятков и сотен тысяч сценариев разлива в различных гидрометеорологических условиях, модели должны быть оптимизированы для повышения быстродействия.

При подготовке ПЛАРН информационная поддержка со стороны математического моделирования сводится к определению зоны потенциального воздействия вместе с необходимым комплексом оценок вероятности, масштабов и временных факторов распространения аварийного разлива нефти для каждого из вариантов технической аварии, возможной по результатам анализа технического риска (Зацепа и др., 2015). При подготовке плана ЛАРН необходимо определить состав и необходимое количество технических средств, предназначенных для противодействия распространению разлива нефти. При определении необходимого количества боновых заграждений для различных сценариев технических аварий следует использовать расчеты геометрических характеристик разлива нефти, которые могут быть проведены с учетом неравномерной толщины слоя нефти на поверхности моря.

Как правило, оценка геометрических характеристик разливов проводится для набора скоростей ветра (w) 0 (штилевые условия), 3, 5 (слабые ветра), 7 и 10 м/с

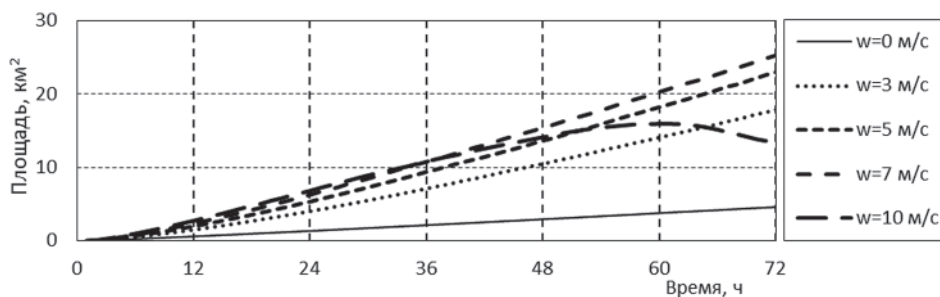


Рис. 1. Эволюция площади нефтяного разлива для различных значений скорости ветра.

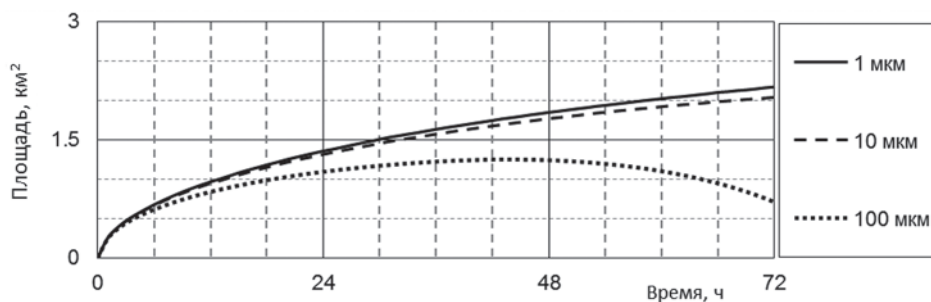


Рис. 2. Эволюция площади нефтяного разлива (400 м^3 дизельного топлива) для различных значений толщины при скорости ветра 7 м/с .

(критическая скорость ветра для операций ЛАРН). На рис. 1 приведен для примера расчет эволюции площади разлива дизельного топлива с толщиной более 10 мкм для нескольких значений скорости ветра*.

Обращает на себя внимание факт немонотонного изменения части площади нефтяного разлива, внутри которой толщина нефти более 10 мкм , при увеличении скорости ветра от умеренного (7 м/с) до сильного (10 м/с). Это связано с удалением нефти с поверхности моря за счет процессов выветривания — испарения и диспергирования.

Подобные оценки носят справочный характер, так как рассчитываются для ветра, не меняющегося в течение трех суток, что представляется несколько искусственным. Тем не менее именно эти оценки наглядно показывают, что в зависимости от ветровой ситуации размеры разлива нефти, в первую очередь продолжительного, могут меняться на порядок и более.

Аналогичные оценки имеют место при расчете размеров областей внутри области нефтяного загрязнения. Результаты расчета, приведенные на рис. 2, показывают, что при скорости ветра 7 м/с «толстая» область нефтяного пятна (толщина более 100 мкм) сначала растет, а затем начинает уменьшаться. Более тонкие части нефтяного slicka эволюционируют подобным образом на существенно больших временных масштабах.

Кроме приведенных результатов моделирования разливов нефти интерес представляют оценки выветривания нефти, в том числе с учетом возможного образования эмульсии, что необходимо для расчета емкостей для промежуточного хранения нефти или нефтепродуктов в ходе операции ЛАРН.

Количество нефти на поверхности моря в каждый момент времени после начала разлива зависит от ветровых условий. На рис. 3 показано, как может меняться объем нефтеводяной эмульсии на поверхности моря, рассчитанный для разлива нефти продолжительностью трое суток и с заданной предельной долей воды в нефти, равной $0,56$, для ансамбля метеорологических сценариев, возможных в северной части Охотского моря в безледный период.

* Все приведенные в работе рисунки подготовлены в демонстрационных целях для обсуждения выходной продукции моделирования разливов нефти по материалам реконструкций гидрометеорологических условий, выполненных авторами в различных проектах по информационному обеспечению планов ЛАРН и проведению АСЭВ.

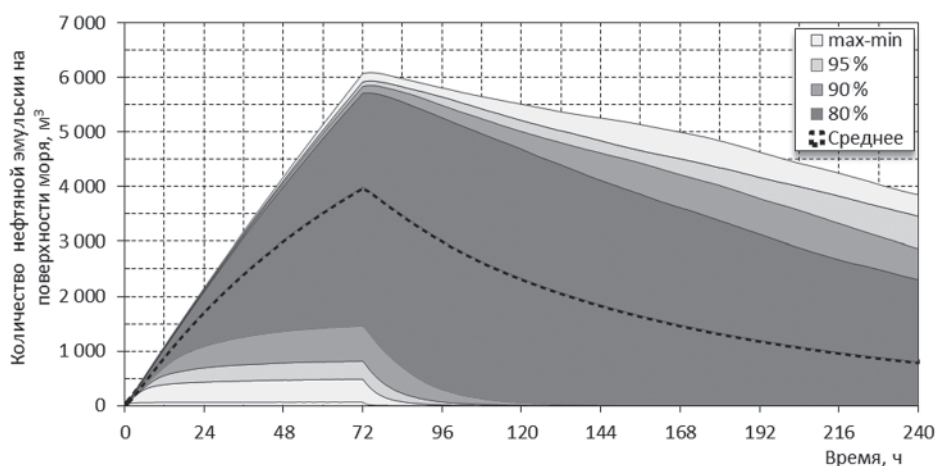


Рис. 3. Пример расчета выветривания нефти с учетом образования эмульсии. Продолжительность сброса 72 ч, объем 4800 м³.

Линии, ограничивающие однотонные области, представляют соответствующие двусторонние процентилю выборки данных. Максимальное выветривание (max) происходит при штормовых ситуациях и имеет малую вероятность реализации. Минимальное выветривание (min) происходит в штилевых условиях. Среднее (по сценариям) значение количества нефти на поверхности моря, показанное на рисунке, примерно соответствует медиане распределения.

Из приведенных данных следует, что при сбросе на поверхность воды 4800 м³ нефти в течение 72 ч количество нефтяной эмульсии может достигать 6000 м³. Количество нефти на поверхности моря уменьшается за счет процессов испарения и диспергирования волнами, но может превысить первоначальный объем сброса при образовании эмульсии типа вода-в-нефти.

АСЭВ

АСЭВ (в англоязычной литературе NEBA — Net Environmental Benefit Analysis) представляет собой процесс принятия решения при выборе методов ликвидации разливов нефти, обеспечивающих наименьшее негативное влияние на окружающую среду.

Анализ суммарной экологической выгоды проводится после определения зоны потенциального воздействия для сценариев разливов нефти и оценки угрозы экологической безопасности для объектов на акватории и на побережье, аналогично тому, как это делается при информационном обеспечении подготовки ПЛАРН. Поскольку разлив нефти представляется случайным событием, то варианты воздействия на окружающую среду могут быть весьма разнообразными. Для АСЭВ можно использовать консервативный подход или выбор сценариев распространения нефти, во время которых негативные последствия для уязвимых объектов окружающей среды максимальны. Выбор этих сценариев производится с учетом «окна возможностей» для операций ЛАРН, т.е. совокупным набором ограничений для немедленного реагирования, обусловленных гидрометеорологическими условиями.

Для каждого из выбранных сценариев распространения разливов рассчитывается базовый вариант, при условии, что никаких мер по локализации и ликвидации

разлива нефти в море не проводится. Для этого варианта (т.н. режим «мониторинг») рассчитывается количество нефти, достигающее береговой зоны, и оценивается протяженность загрязненной береговой полосы. На следующем этапе результаты моделирования ранжируются, чтобы определить сценарии распространения нефти с наибольшими экологическими последствиями и отличающиеся по метеоусловиям, чтобы проанализировать в дальнейшем эффективность стратегий реагирования для каждой метеорологической ситуации. Если в будущем разлив нефти все же случится, то заранее проведенный АСЭВ позволит сделать выбор стратегии реагирования более обоснованным.

После выбора представительных метеорологических сценариев, как правило, сравнению подвергаются стратегии реагирования, предполагающие механический сбор нефти с помощью локализации нефтяного пятна боновыми заграждениями и с использованием различных нефтесборных систем, применением химических диспергентов или комбинации этих методов.

Для расчета эффективности стратегий ЛАРН должны быть разработаны и применены дополнительные модели процессов, описывающие воздействие на разлив технических средств локализации, сбора и ликвидации разливов на поверхности моря.

Приведем пример расчетов распространения разлива нефти для оценки стратегий реагирования и принятия решения о целесообразности использования диспергентов, реализованный авторами в одном из проектов. Анализу подвергались следующие варианты реагирования:

- а) мониторинг — осуществление слежения за пятном нефти (без применения средств);
- б) сбор механическими средствами (боны и скиммеры);
- в) совместное применение механических средств сбора и использование нанесения диспергентов с борта судна;
- г) совместное применение механических средств (М), нанесения диспергентов с судов (D), использования вертолета с внешней подвеской для нанесения диспергентов (H).

При моделировании были приняты во внимание исходные данные о возможном времени начала аварии (1), продолжительности светлого времени суток (2), месте сдачи собранной в море нефти (3), времени, необходимом для швартовых операций (4), времени, необходимом для погрузки диспергента на внешнюю подвеску вертолета (5), скорости судов при механическом сборе нефти (6), эффективности скиммеров (7), ширине захвата (8), скорости судна при обработке диспергентом (9), эффективности диспергента (10), ширине полосы обработки при использовании штанг (11), скорости судов на переходе в порт (12), скорости вертолета с пустой корзиной (13), скорости вертолета при обработке пленки нефти (14), ширине обработки с воздуха (15) и другие.

На рис. 4 показан пример расчета количества собранной/удаленной нефти при применении средств удаления нефти с поверхности моря по варианту реагирования «г» в рамках АСЭВ в сценарии технической аварии (ТА), при которой в море сбрасывается порядка 2000 т нефти в течение 72 ч. В примере было промоделировано развитие аварийной ситуации, когда в борьбе с разливом нефти были задействованы механические средства сбора (нефтесборщик), два судна с различным оборудованием для нанесения диспергента, вертолет с подвесной корзиной для обработки нефтяного пятна с воздуха.

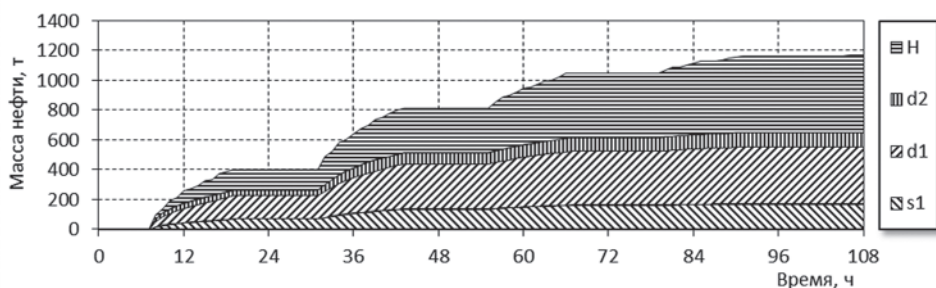


Рис. 4. Пример расчета эффективности различных средств борьбы с разливом. Н — удаление нефти с поверхности моря с использованием вертолета; d1 и d2 — удаление нефти с поверхности судами с оборудованием для нанесения диспергентов; s1 — сбор нефти судном с навесной системой траления нефти.

На рисунке видны области с нулевой эффективностью удаления нефти с поверхности моря, соответствующие темному времени суток. Результаты расчетов демонстрируют тенденцию к уменьшению эффективностей нефтесборных систем и эффективности судов с оборудованием для нанесения диспергентов со временем за счет уменьшения толщины пленки нефти на поверхности моря. Проведенное моделирование показывает, что, начиная со вторых суток после аварии при метеоусловиях, использованных на рис. 5, наибольшую эффективность удаления нефти с поверхности демонстрирует вертолет с подвеской для обработки диспергентом пятна нефти.

На рис. 5 показана эволюция массы нефти на поверхности моря при реализации описанных выше стратегий реагирования для сценария ТА, и приведен временной ход модуля скорости ветра. Как следует из приведенных данных, в силу значительного объема разлива, на поверхности моря нефть остается продолжительное время, несмотря на естественное выветривание и применение различных средств противодействия.

Результативность применения стратегий реагирования приведена в табл. 1. Результаты моделирования показывают, что эффективность всех средств реагирования значительно уменьшается со временем, и причина заключается в быстром уменьшении толщины пленки нефти за счет растекания и деформации поверхностного нефтяного slickа полем течений. В рассмотренном варианте только стратегия реагирования «г» с применением вертолета в дополнение к судну-нефтесборщику и судам с системами нанесения диспергентов позволила исключить загрязнение берегов (рис. 5, табл. 1).

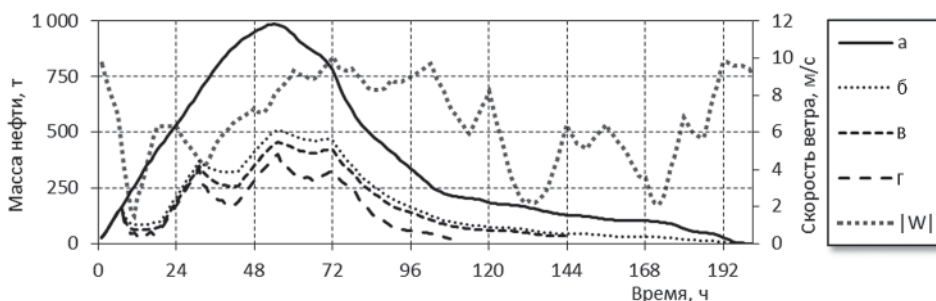


Рис. 5. Пример расчета баланса массы нефти на поверхности в сценарии распространения нефти при различных вариантах реагирования.

Эффективность реагирования с применением различных стратегий

Вариант реагирования	Результат применения стратегии
а) в условиях мониторинга	Время достижения берега 132 ч, масса на берегу на 8 сутки составила 121 т, протяженность загрязненной береговой линии составила 40 км. Количество диспергированной в водную толщу нефти — 1368 т, испарившейся — 536 т.
б) в условиях применения механических средств	Масса нефти на берегу составила 28 т, протяженность загрязненной береговой линии составила 36 км. Количество диспергированной в водную толщу нефти — 714 т, испарилось — 450 т. Собрано 856 т нефти.
в) в условиях применения механических средств + диспергирование (борт судна)	Масса нефти на берегу 9 т, протяженность загрязненной береговой линии составила 11 км. Количество диспергированной в водную толщу нефти — 1339 т, испарилось — 437 т. Собрано 235 т и диспергировано диспергентами 716 т нефти.
г) в условиях применения механических средств + диспергирование (борт судна + вертолет)	Загрязнение берегов не прогнозируется. Количество диспергированной в водную толщу нефти — 1444 т, испарилось — 415 т. Собрано — 172 т и диспергировано диспергентами 998 т нефти.

ОВОС

Нефтяной разлив в море приводит к загрязнению атмосферы, водной толщи, морской поверхности и морского дна, а также берегов. Для отдельно взятого метеорологического сценария можно рассчитать внутриводную концентрацию диспергированной или растворенной нефти $C_{oil}^k(x, y, z)$ (k — номер метеорологического сценария) в каждый момент времени после разлива. Поле концентрации определяется положением источника сброса, продолжительностью его действия и интенсивностью, полем течений в море и характеристиками турбулентного перемешивания в районе распространения нефти.

В отличие от пятна нефти на поверхности моря область внутримассового загрязнения имеет большие размеры и принципиально трехмерна, однако, вследствие положительной плавучести капель нефти, загрязнение в большинстве случаев будет сконцентрировано в верхнем слое моря.

Задачу ОВОС можно сформулировать как оценку риска или вероятности возникновения в данной области пространства/акватории концентраций нефтепродуктов выше заданных значений, оценку средних значений объемов загрязненных вод и среднего времени существования этих воздействий (время экспозиции) для набора пороговых значений концентрации. Предельные значения концентраций зависят от чувствительности конкретных гидробионтов к нефтяному загрязнению. Кроме концентрации нефтепродуктов, в заданных точках акватории можно рассчитывать и другие основанные на ней функционалы, если подобная информация будет востребована. Вероятность возникновения высоких уровней загрязнения в отличие от вероятности появления нефти на поверхности моря для задач ПЛАРН не следует дифференцировать по времени, прошедшему после аварии. Таким образом, выходную продукцию моделирования распространения нефти для ОВОС должны представлять собой карты вероятности возникновения высоких уровней загрязнения морской сре-

ды для различных типов уязвимых ресурсов, а также табличные данные об объемах загрязненной воды и времени их существования.

В отличие от рассматриваемых в рамках подготовки ПЛАРН сбросов нефти с максимальными объемами и интенсивностью, обеспечивающих защиту в случае более «легких» вариантов аварий, для ОВОС следует проводить расчеты для сценариев сбросов с меньшими объемами, но имеющими значительно более высокую вероятность реализации.

Существуют виды гидробионтов, которые совершают случайные миграции, и для них возможность нахождения в некоторой области акватории носит случайный характер, то же самое относится и к малочисленным видам. В этом случае вероятность воздействия может быть оценена как произведение вероятности возникновения высоких уровней загрязнения, вероятности возникновения технической аварии определенного уровня и вероятности появления в заданной области акватории уязвимых морских организмов.

Зоны потенциального воздействия при ОВОС необходимо рассчитывать по сценариям распространения внутримассового загрязнения до момента разбавления загрязненного объема воды до безопасных концентраций.

Определенной оптимизацией вычислений может стать фильтрация сценариев распространения нефти по поверхности моря по оценке выветривания slicka и «отсев» сценариев, развивающихся, например, в штилевых условиях; другой возможностью оптимизации проводимых расчетов является сужение области расчета вероятности воздействия до отдельных районов, прилегающих к особо охраняемым природным территориям (ООПТ). В общем случае номенклатура характеристик, необходимых для расчетов ущерба морской биоте, должна быть определена на стадии изучения фоновых характеристик окружающей среды, насыщенной морскими организмами.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ В МОДЕЛИ SPILLMOD

Модель SPILLMOD описывает процессы физико-химической трансформации разлива нефти на поверхности моря. В основе математической постановки задачи лежат осредненные по вертикальной координате уравнения Навье–Стокса для тонкого слоя легкой жидкости на поверхности более тяжелого субстрата. Особенность постановки и реализации модели SPILLMOD заключается в том, что решение задачи ищется в области, которая сама является искомой величиной. Приведем необходимые сведения об основных уравнениях модели и постановке задачи в целом.

Рассматривается двумерная область $\Omega(x, y)$ с границей $d\Omega$. Нефть или нефтепродукт занимает подобласть $\Omega' \in \Omega$. В подобласти $\Omega'' \in \Omega'$ действует источник, обеспечивая поток нефтепродуктов — Q_0 на поверхность моря. Область Ω ограничена кусочно-линейной функцией, аппроксимирующей береговую контур. Основные уравнения модели для области Ω' представляются в следующем виде:

$$h \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \nabla) \mathbf{u} \right) = -hg' \nabla h - \beta \left((\mathbf{u} - (\mathbf{u}_d + \mathbf{u}_c)) \right) \left(\mathbf{u} - (\mathbf{u}_d + \mathbf{u}_c) \right), \quad (1)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \nabla(h\mathbf{u}) = - \frac{Q_e + Q_{n-d} + Q_{ch-d} - Q_0 + Q_{sc}}{\rho_0}, \quad (2)$$

где ρ_0 — плотность нефти; $\mathbf{u}$ — вертикально осредненная скорость движения нефти; $\mathbf{u}_d$ — скорость поверхностного дрейфового течения, задаваемая параметрически;

$\mathbf{u}_c$ — скорость течения неветрового происхождения; рассчитанная по модели течений или определенная экспериментальным путем; h — толщина нефти; β — коэффициент трения; Q_e — поток массы за счет испарения; Q_{n-d} — поток массы за счет естественного диспергирования; Q_{ch-d} — поток массы за счет химического диспергирования; Q_0 — поток нефти на поверхность от источника разлива; Q_{sc} — поток нефти с поверхности за счет применения скиммерных систем; $g' = g(\rho_w - \rho_o)/\rho_o$ — редуцированное ускорение силы тяжести; ρ_w — плотность воды.

Если граница области $\Omega'(t, x, y)$ есть $L(t, x, y)$ и $L = L_1(t, x, y) \cup L_2(x, y)$, где L_1 — свободная граница и L_2 — контактная (твердая) граница, система уравнений (1)–(2) должна быть дополнена кинематическим граничным условием:

$$L1: R_t + \mathbf{u} \nabla R = 0, \quad (3)$$

где $R(t, x, y) = 0$ — уравнение свободной границы; и динамическим условием:

$$L1: h(x, y) = 0. \quad (4)$$

Соотношение (3) справедливо, когда перемещение границы обусловлено динамическими факторами. В некоторых случаях граница области может изменяться за счет удаления нефти с поверхности как под действием природных факторов — за счет испарения и диспергирования волнами, так и в ходе операций по борьбе с разливом нефти.

На твердой границе L_2 (если таковая присутствует) должно выполняться условие непротекания:

$$L_2: \mathbf{u}_n = 0, \quad (5)$$

где $\mathbf{u}_n$ — нормальная к L_2 компонента $\mathbf{u}$.

В начальный момент времени распределение толщины $h(x, y, 0)$, поле скорости $\mathbf{u}(x, y, 0)$ и область $\Omega'(0)$ предполагаются известными. Требуется определить $h(x, y, t)$, $\mathbf{u}(x, y, t)$ и $\Omega'(t)$ при $t > 0$.

Постановку задачи необходимо дополнить параметризациями потоков нефти с поверхности моря за счет различных процессов (Овсиенко, 2005). Здесь обратим внимание, что параметрически описываются потоки с единицы поверхности нефтяного пятна, а общее количество нефти, удаленное из пятна в единицу времени, будет зависеть от величины потоков и площади пятна, от точности определения которой зависит результат.

При расчетах разлива нефти с учетом установки боновых заграждений граница $L = L_1(t, x, y) \cup L_2(x, y)$ области Ω' «дополняется» участком $L_3(t)$, ограничивающим движение нефти.

Границы $L_3(t)$ представляют собой один или несколько контуров (боны), вообще говоря, движущихся, трансформирующихся под действием течений в верхнем слое моря как многозвенная гибкая нить, закрепленная в конечных точках.

На границе $L_3(t)$ задается условие ограниченного пропускания, зависящего от эффективности удержания нефти в боновой системе в конкретных гидрометеорологических условиях.

$$L_3: \mathbf{u}_n = \mathbf{u}_{bn}, \quad (6)$$

$$L_3: Q_b = (1 - E_b) \rho h (\mathbf{u}_d + \mathbf{u}_c - \mathbf{u}_b) \cdot \mathbf{n}, \quad (7)$$

где Q_b — поток нефти через бон; E_b — эффективность удержания нефти боном, зависящая от типа бона и гидрометеорологических условий; $\mathbf{u}_b$ — скорость границы

(бона); $\mathbf{n}$ — единичный вектор нормали к элементу бона; $\mathbf{u}_n$ — скорость движения нефти, нормальная к ближайшему участку бона.

При натурных испытаниях эффективности бонов в различных гидрометеорологических условиях определяются специальные параметры: $\mathbf{u}_{fl}$ — скорость течения начала пропуска (first loss speed), при которой бонны начинают пропускать нефть, и $\mathbf{u}_{cl}$ — критическая скорость течения (critical loss speed), после превышения которой бонны считаются малоэффективными. Указанные величины зависят от параметров ветрового волнения.

Эффективность E_b удержания нефти боновыми системами параметризуется как

$$E_b = \begin{cases} 1, (\mathbf{u}_d + \mathbf{u}_c) \cdot \mathbf{n} < u_{fl} \\ 1 - \frac{(\mathbf{u}_d + \mathbf{u}_c) \cdot \mathbf{n} - u_{fl}}{u_{cl} - u_{fl}}, u_{fl} \leq (\mathbf{u}_d + \mathbf{u}_c) \cdot \mathbf{n} < u_{cl} \\ 0, (\mathbf{u}_d + \mathbf{u}_c) \cdot \mathbf{n} \geq u_{cl}. \end{cases} \quad (8)$$

Если в операции ЛАРН принимает участие скиммер или судно-нефтесборщик, то отток (сбор) нефти из нефтяного слика в области действия скиммерной системы $\Omega_{sc}(t, x, y)$ параметризуется как:

$$\Omega_{sc} : Q_{sc} = P_{100} \cdot E_{sc}(H_s, h), \quad (9)$$

где P_{100} — «паспортная» производительность скиммерной системы; $E_{sc}(H_s, h)$ — эффективность работы в конкретных гидрометеорологических условия и в зависимости от толщины пленки нефти h ; H_s — высота значительных волн (significant wave height).

Ниже перечислены параметры, определяющие эффективность сбора нефти.

Максимально возможная скорость сбора нефти, при данной толщине нефти, скорости перемещения и ширины захвата скиммерной системы (*Encounter Rate (ER)*, м³/ч) определяется как $ER = W_h V_{sc}$, где W — ширина полосы захвата скиммерной системы; h — толщина нефти; V_{sc} — скорость перемещения скиммерной системы.

Эффективность сбора (E_{sc}) — доля нефти, собранная скиммером, по отношению к максимально возможной зависит от параметров слика, скорости сбора и параметров окружающей среды.

Объем нефти (эмульсии), собираемый скиммером в единицу времени (*Oil/Emulsion Recovery Rate (ORR)*):

$$OPR(\text{м}^3/\text{ч}) = ER(\text{м}^3/\text{ч}) \cdot E_{sc}, \quad (10)$$

$$E_{sc} = P_{wave} \cdot P_h, \quad (11)$$

$$P_{wave} = \begin{cases} 1, H_s < H_{cr-sc} \\ 1 - \frac{H_s - H_{cr-sc}}{H_{l-sc} - H_{cr-sc}}, H_{cr-sc} \leq H_s < H_{l-sc} \\ 0, H_s \geq H_{l-sc} \end{cases}$$

где H_{cr-sc} — критическое значение высоты волны, после которого эффективность работы скиммерной системы падает; H_{l-sc} — пороговое значение высоты волны, после превышения которого скиммер малоэффективен.

$$P_h = \begin{cases} 1, h > h_{cr-sc} \\ 1 - \frac{h_{cr-sc} - h}{h_{cr-sc} - h_{l-sc}}, h_{l-sc} \leq h < h_{sr-sc} \\ 0, h < h_{l-sc}, \end{cases} \quad (12)$$

где h_{cr-sc} — критическое значение толщины пленки нефти, при котором начинаются ограничения эффективности действия скиммерной системы; h_{l-sc} — пороговое значение толщины пленки, после которого эффективность работы скиммерной системы равна нулю. Используемые в модели SPILLMOD параметризации эффективности действий средств сбора нефти построены по результатам испытаний бонов и скиммеров (Fingas, 2004).

Некоторым упрощением задачи, в ряде случаев приемлемым, можно считать распространение области действия скиммерной системы $\Omega_{sc}(t, x, y)$ на всю область нефтяного пятна. Такой подход эффективен, когда в операции участвуют несколько судов с навесной системой траления и их позиционирование в конкретный момент времени неизвестно. В этом случае удаление нефти с поверхности моря техническими средствами рассчитывается «добавлением» к обычным потокам нефти с поверхности моря (испарение и диспергирование волнами) дополнительных «потоков» за счет действия скиммеров и химических диспергентов. Величина этих потоков будет определяться гидрометеорологическими условиями, состоянием пятна нефти и графиком применения средств сбора, так как в ночное время операции по локализации разливов нефти не проводятся, а состояние моря и толщина пленки нефти существенно изменяют эффективность реагирования.

Для решения задачи в модели SPILLMOD используется оригинальная вычислительная технология. Объект моделирования (нефтяной разлив) представляется как ансамбль лагранжевых частиц, каждая из которых обладает набором параметров, таких как пространственные координаты $\{x_i, y_i\}$, скорость $\{u_i, v_i\}$, масса $\{m_i\}$, фракционный состав $\{c_i^k\}$, где i — номер частицы в ансамбле, c_i^k — концентрация k -ой фракции. Начальное состояние задано, если известны все параметры частиц. Прямоугольная эйлерова сетка «натягивается» на лагранжевы ансамбль частиц, так чтобы все частицы содержались внутри сеточной области. После этого скорость нефти $\mathbf{u}(x, y, t)$ и ее толщина $h(x, y, t)$ определяются в эйлеровом представлении на сетке «С» по классификации Аракавы. Расчетная сетка, используемая в данной технологии, не вполне эйлерова, так как реконструируется на каждом временном шаге в зависимости от конфигурации частиц и отличается от традиционного эйлерова представления о фиксированных точках пространства. Как только сетка построена, все свойства среды (скорость движения нефти $\mathbf{u}(x, y, t)$ и ее толщина $h(x, y, t)$) определяются как сеточные функции. Толщина h_{ij} подсчитывается как сумма масс отдельных частиц, отнесенная к площади ячейки, занятой частицами:

$$h_{i,j} = \frac{\rho_0}{\gamma \Delta x \Delta y} \sum_k^{N_{ij}} m_k, \quad (13)$$

где γ — часть площади ячейки, занятая частицами; m_k — масса k -ой частицы; N_{ij} — количество частиц в (i, j) -ой ячейке $\Delta x; \Delta y$ — размер ячейки по двум горизонтальным координатам соответственно. В качестве метода восстановления скорости с частиц

на сетку в SPILLMOD используется линейная регрессия, имеющая более высокий порядок точности в отличие от метода «ближайшего узла», использовавшийся в оригинальном методе PIC (Harlow, 1964).

После того как сеточные функции определены, полный вычислительный цикл может быть представлен как последовательность нескольких шагов. На первом шаге проводится расчет промежуточных значений $\mathbf{u}_{int}(x, y, t)$ и $h_{int}(x, y, t)$ в соответствии с уравнениями (1) и (2) без адвективных членов и пренебрегается всеми эффектами, связанными с движением среды. На этом шаге характеристики среды определены в эйлеровом представлении. На втором шаге проводится интерполяция значений скорости с узлов сетки на частицы и расчет новых значений массы частиц, меняющихся из-за процессов выветривания или в ходе операции ЛАРН. В конце этого шага все характеристики среды полностью определены в лагранжевом представлении. Третий шаг представляет перенос всех свойств частиц через границы эйлеровой сетки и определение новых значений $h_{i,j}$ и $\mathbf{u}_{i,j}$ на «эйлеровой» сетке, построенной с учетом новой конфигурации частиц. В конце этого шага характеристики объекта моделирования переносятся с лагранжевой сетки на эйлерову.

Важно отметить, что границы области, в которой ищется решение задачи, не фиксированные. При определенных условиях часть границы области, которая рассматривалась как контактная, может стать подвижной (свободной). Например, когда нефть отходит от берега под действием ветра. И, наоборот, кинематическое условие, реализующееся на подвижной границе, при подходе к берегу или бону трансформируется в условие непротекания. Это означает, что граничные условия в задаче определяются в ходе моделирования путем проверки условий на каждом шаге. Таким образом, модель SPILLMOD может быть отнесена к классу гибридных моделей, в которых решение уравнений гидродинамики с помощью традиционных конечно-разностных схем дополняется элементами имитационного моделирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье обсуждаются вопросы, возникающие при подготовке методами математического моделирования информации о распространении разливов нефти на поверхности моря для целей составления планов ЛАРН, проведения АСЭВ и ОВОС. Перечисленные задачи имеют мультидисциплинарный характер, а математическое моделирование — единственный инструмент для оценки наличия и степени угрозы уязвимым ресурсам, позволяющий проанализировать возможные стратегии действий для минимизации последствий аварии. Моделирование не ограничивается проведением расчетов по моделям нефтяного разлива, но предполагает обязательный анализ результатов и на каждом этапе сопровождается оценками и комментариями экспертов. В работе показаны примеры использования математических моделей для информационной поддержки планирования операций по локализации и ликвидации аварийных разливов нефти в море, получения данных для проведения процедуры АСЭВ и расчета параметров, необходимых для расчета ущерба морским гидробионтам в рамках ОВОС.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Русского географического общества в рамках научных проектов № 13-05-41214 РГО_а, № 14-07-00513, № 14-07-00434 и № 15-07-04871.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Журавель В.И., Журавель И.В.* Количественная оценка риска и ограничение последствий выбросов. URL: <http://www.ogirussia.com/issues/article/issue-article-17-2013> [Дата обращения 12.07.2015].
- Зацева С.Н., Дианский Н.А., Журавель В.И., Солбаков В.В., Становой В.В., Фомин В.В.* Моделирование разливов нефти в море для планирования мероприятий по обеспечению экологической безопасности при реализации нефтегазовых проектов. Часть 1. Методология // Проблемы Арктики и Антарктики. 2015. № 4 (106). С. 27–39.
- Зацева С.Н., Ивченко А.А., Журавель В.И., Солбаков В.В., Становой В.В.* Анализ риска распространения аварийных разливов нефти на примере Обской губы Карского моря // Арктика: экология и экономика. 2014. № 3 (15). С. 30–45.
- Овсиенко С.Н., Зацева С.Н., Ивченко А.А.* Моделирование разливов нефти и оценка риска воздействия на окружающую среду // Труды ГОИН. 2005. Вып. 209. С. 248–271.
- Fingas M.* Weather Windows for Oil Spill Countermeasures // Report for Prince William Sound Regional Citizens' Advisory Council (PWSRCAC). January 2004. Anchorage, Alaska.
- Harlow F.H.* The particle-in-cell Computing Method in fluid dynamics // Meth. Comput. Phys. 1964. Vol. 3. P. 319–343.
- Ovsienko S., Zatsepa S., Ivchenko A.* Study and modelling of behavior and spreading of oil in cold water and in ice conditions // Proceeding to the 15th International conference on port an ocean engineering under Arctic conditions, 1999. P. 848–857.

*S.N. ZATSEPA, N.A. DIANSKY, V.I. ZHURAVEL, A.A. IVCHENKO,
K.A. KOROTENKO, V.V. SOLBAKOV, V.V. STANOVY, V.V. FOMIN*

SIMULATION OF OIL SPILLS IN THE SEA FOR PLANNING MEASURES TO ENSURE ENVIRONMENTAL SAFETY IN OIL AND GAS PROJECTS. PART II. FEATURES OF REALIZATION FOR APPLIED PROBLEMS

In the second part of the article, peculiarities of the oil spills modeling for applied problems are marked, and some examples of simulation results are submitted. As an example of a oil spill model, which able to ensure the needs of information support of applied problems, the description of model SPILLMOD is presented in the final part of the article. Also a set of parameterizations allowing to take into account the role of hydrometeorological conditions for use skimmers and booms in oil spill response operations are described.

Keywords: mathematical modeling, oil spills in sea, oil spill response plans, analysis of total environmental benefits, environmental impact assessment.

РЕЗУЛЬТАТЫ СОВРЕМЕННЫХ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ НАЗЕМНЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВО ВНУТРЕННИХ РАЙОНАХ ВОСТОЧНОЙ АНТАРКТИДЫ

д-р геол.-минерал. наук С.В. ПОПОВ, геолог П.И. ЛУНЕВ

Полярная морская геологоразведочная экспедиция (ФГУНПП «ПМГРЭ»), Санкт-Петербург, e-mail: spopov67@yandex.ru

В статье сделан обзор современных отечественных наземных дистанционных исследований, выполненных с целью изучения внутренних районов Восточной Антарктиды и подледникового озера Восток. Наземные радиолокационные исследования выполнялись по маршрутам вдоль трасс следования санно-гусеничных походов «Мирный–Восток» и «Прогресс–Восток». Результаты этих работ позволили выявить основные особенности подледного ландшафта и ледникового покрова в региональном масштабе. Помимо этого, было выявлено два подледниковых водоема: озера Пионерское и Комсомольское. Работы в районе озера Восток позволили построить комплект карт мощности ледникового покрова, глубин озера и подледной топографии, а также установить береговую линию озера. В пределах его акватории выявлено 11 островов, а вокруг озера Восток выявлено 56 незначительных по размерам подледниковых водоемов. Имеющиеся данные указывают на то, что озеро Восток представляет собой изолированную систему.

Ключевые слова: радиолокационное профилирование, Восточная Антарктида, научные санно-гусеничные походы, подледный рельеф, озеро Восток.

ВВЕДЕНИЕ

Отечественные радиолокационные исследования внутренних районов Восточной Антарктиды имеют долгую и славную историю. В нашей стране этот метод появился в 1956 г. в виде предложения, высказанного В.Н. Рудаковым и В.В. Богородским, об использовании радиолокационного зондирования в качестве геофизического метода получения информации о структуре ледника, его мощности и состоянии (Рудаков и др., 1956). Его практическое применение в Антарктиде началось в сезон 9-й САЭ (1963–1965 гг.) в районе обсерватории Мирный с выполнения опытно-методических работ по внедрению этого нового для того времени геофизического метода (Богородский и др., 1965). К концу 1960-х гг. они были завершены и проведено сравнение результатов сейсмических и радиолокационных измерений мощности ледника на участке трассы obs. Мирный – ст. Пионерская протяженностью около 260 км. Расхождение составило 6–7 % (Федоров, 1967), что вполне приемлемо для уровня техники того времени. По-видимому, это было одно из первых сопоставлений подобного рода. Помимо прочего, эти работы подтвердили возможность применения метода радиолокационного зондирования для практического использования. С тех пор было выполнено значительное количество наземных и авиационных отечественных маршрутов в глубь антарктического континента с целью его изучения с использованием радиолокации.

Значимость наземных радиолокационных исследований, выполненных нашей страной в 1960–1980 гг. в ходе научных санно-гусеничных походов (СГП), невозможно переоценить. Именно благодаря им на заре изучения Антарктиды было сформировано первое суждение о континенте в целом, что в итоге позволило создать первый в мире атлас Антарктики (Атлас Антарктики, 1966). Полученные в то время данные о подледном ландшафте, мощности и строении антарктического ледника не потеряли своей значимости и сейчас. Они, наравне с современными, были использованы при составлении современных карт мощности ледника и подледного рельефа в рамках международных проектов BEDMAP и BEDMAP2 (Lythe et al., 2000, 2001).

ИССЛЕДОВАНИЯ В ПОЛОСЕ ТРАСС «МИРНЫЙ–ВОСТОК» И «ПРОГРЕСС–ВОСТОК»

После длительного перерыва, вызванного политическими и экономическими изменениями, происходившими в нашей стране, научные санно-гусеничные походы для изучения внутренних районов Восточной Антарктиды были снова возобновлены в сезон 49-й РАЭ (2003/04 г.). Они осуществлялись совместно с выполнением логистических задач обеспечения внутриконтинентальной станции Восток из обсерватории Мирный, а впоследствии, после переноса базы санно-гусеничных походов на станцию Прогресс, и с нее. Научные исследования в полосе трассы «Мирный–Восток» осуществлялись на протяжении четырех полевых сезонов 2003–2008 гг.; работы в полосе трассы «Прогресс–Восток» были начаты в 2008 г. и продолжались до 2013 г. При этом основным геофизическим методом являлось радиолокационное профилирование, которое часто сопровождалось гляциологическими (совместно с сотрудниками ААНИИ) и геодезическими (совместно с сотрудниками Дрезденского технического университета) исследованиями. Последние осуществлялись в рамках МПГ 2007/08 и международного проекта по изучению подледниковых озер Антарктиды (SALE-UNITED). В ходе радиолокационных исследований были выявлены основные особенности подледной топографии в практически неизученном районе Восточной Антарктиды (рис. 1).

Важность этих работ обусловлена тем, что к их началу (к 2003 г.) имелись лишь общие представления о характере подледного рельефа между станциями Мирный и Восток. Они были основаны на отдельных сейсмических измерениях и оценках мощности ледника по гравиметрическим данным (Грушинский и др., 1972), а также радиолокационным данным, полученным в режиме одиночных зондирований (Шереметьев, 1986). Данные о мощности ледникового покрова и высотах подледного рельефа во внутренних районах Антарктиды между станциями Восток и Прогресс отсутствовали.

Помимо существенного уточнения данных о мощности ледника и подледном ландшафте, современные наземные радиолокационные исследования позволили выявить особенности строения ледникового покрова. По вышеназванным региональным маршрутам было выявлено шесть наиболее контрастных слоев, прослеживаемых на сотни километров. Слоистость антарктического ледника является следствием изменения его физических свойств, обусловленных, в свою очередь, климатическими изменениями и геологическими процессами, такими, в частности, как извержения вулканов (Мачерет, 2006; Corr, Vaughan, 2008; Millar, 1981).

Наземное радиолокационное профилирование осуществлялось с использованием специально изготовленных отечественных ледовых локаторов РЛС-60-98 и

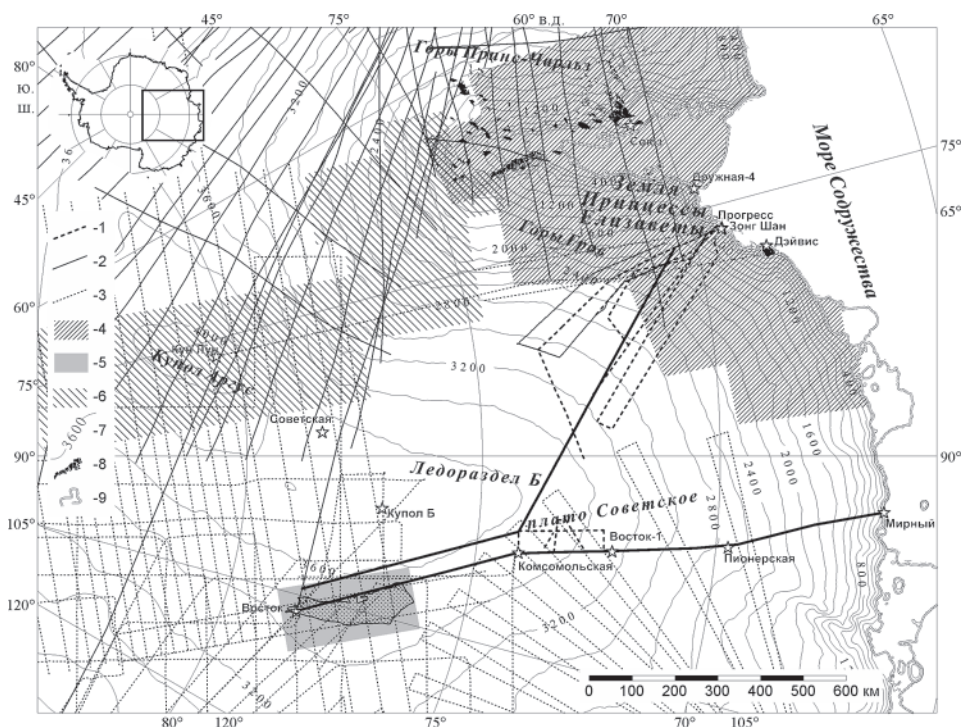


Рис. 1. Схема геофизических исследований, в составе которых выполнялись измерения мощности ледника во внутренних районах Восточной Антарктиды: 1 — маршруты наземных радиолокационных исследований в полосе трасс «Мирный–Восток» и «Прогресс–Восток»; 2 — маршруты отечественных аэрогеофизических исследований; 3 — маршруты зарубежных аэрогеофизических исследований; 4 — площадные отечественные аэрогеофизические съемки в прибрежной части Восточной Антарктиды; 5 — район российских и американских исследований подледникового озера Восток; 6 — площадные зарубежные аэрогеофизические исследования; 7 — изогипсы дневной поверхности в метрах, сечение изолиний 200 м; 8 — выходы горных пород; 9 — береговая линия и граница шельфовых ледников. Обсуждаемые в настоящей работе региональные наземные маршруты показаны утолщенными черными линиями.

РЛС-60-06 с частотой зондирующих импульсов 60 МГц. На начальном этапе работ использовалась транспортная техника на базе АТТ, СТТ-2 и ДТ-30, а впоследствии, начиная с 2007 г., — на базе Kässbohrer Pisten Bully Polar. Одним из важных результатов работ явилось построение разрезов ледникового покрова по региональным маршрутам трасс СГП «Мирный–Восток» (рис. 2) и получение информации о строении ледникового покрова и подледного рельефа в полосе трассы «Прогресс–Восток» (рис. 3) (Лунев, Попов, 2011а, 2011б; Попов и др., 2007).

В полосе трассы между станциями Прогресс и Восток с 2008 г. выполнено около 4000 пог. км наземных радиолокационных профилей. Основным результатом выполненных исследований следует считать полученную информацию о строении ледникового покрова и подледном рельефе практически не изученной ранее территории. В коренном рельефе выявлены региональные орографические области и формы мезорельефа, неизвестные ранее. Также в ходе работ получены материалы, позволяющие предположить, что горы, примыкающие к западному борту озера Вос-

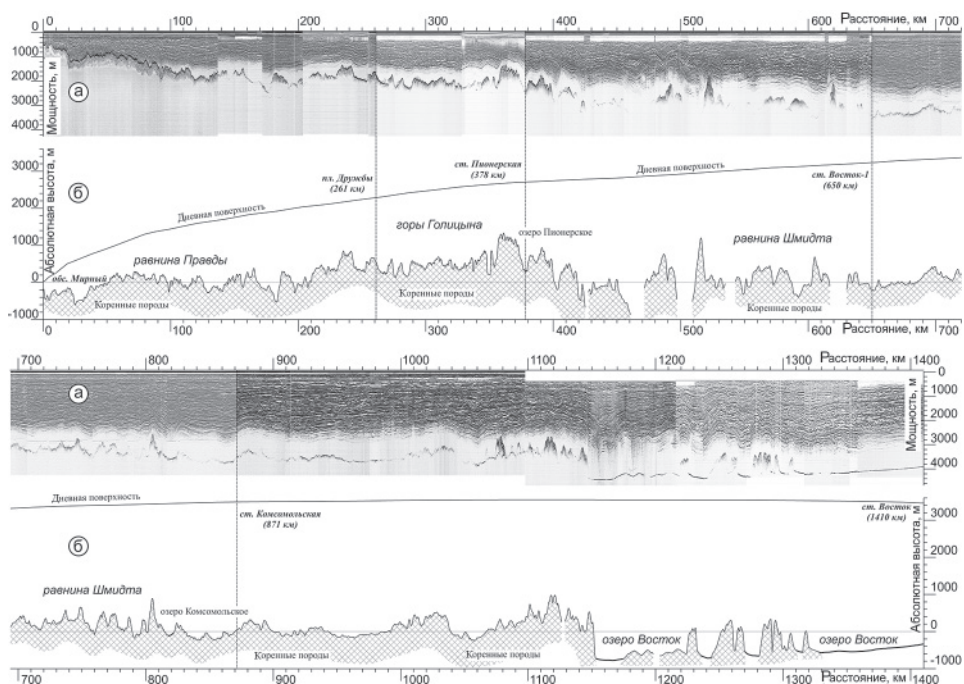


Рис. 2. Временной радиолокационный разрез (а) и разрез ледникового покрова (б) по трассе следования СГП «Мирный–Восток».



Рис. 3. Временной радиолокационный разрез (а) и разрез ледникового покрова (б) по трассе следования СГП «Прогресс–Восток».

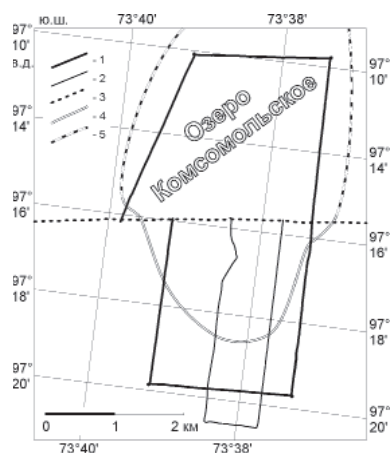


Рис. 4. Радиолокационные маршруты в районе подледникового озера Комсомольское: 1 — трасса следования санно-гусеничного похода; 2 — радиолокационные зондирования сезона 55-й РАЭ; 3 — радиолокационные зондирования сезона 58-й РАЭ; 4 — уверенная граница озера Комсомольское; 5 — предполагаемая граница озера Комсомольское.

ток, характеризуются значительно большими размерами, чем предполагалось ранее, и могут простираются примерно на 500 км в западном направлении. На основе полученных данных в зоне их сочленения с горной системой, примыкающей к восточному борту рифтовой долины Ламберта, выявлена обширная депрессия северо-восточного простираения, соизмеримая по масштабам с крупнейшими региональными геологическими структурами Антарктиды, такими как грабен ледников Ламберта и Эймери и озера Восток.

Радиолокационными исследованиями в ходе работ сезона 49-й РАЭ вдоль трассы следования СГП «Мирный–Восток» (рис. 2), выявлены два подледниковых водоема. Один из них располагается в районе станции Пионерская. Он был назван озеро Пионерское (Попов, Черноглазов, 2006; Попов, Masolov, 2007). В ходе работ сезонов 50–53-й РАЭ (2005–2008 гг.) было выполнено детальное радиолокационное профилирование этой территории. Оно показало, что мощность ледникового покрова изменяется приблизительно от 1450 до 2450 м. Наибольшие значения приурочены к долине, которая располагается в центральной части района. Изменение мощности ледника обусловлено особенностями подледного ландшафта (Попов и др., 2007). Остается только сожалеть, что ввиду переноса транспортного узла на станцию Прогресс и прекращения обеспечения станции Восток с обсерватории Мирный этот интересный с научной точки зрения район больше не изучается.

Второй подледниковый водоем был выявлен в районе 821 км этой трассы (50 км севернее ст. Комсомольская). Длина фрагмента составляет около 3 км. Этот объект был назван озеро Комсомольское (Попов и др., 2007; Попов, Masolov, 2007). В дальнейшем были предприняты усилия с целью его доизучения. В сезон 55-й РАЭ (2009/10 г.) было выполнено три маршрута и определена его восточная граница (рис. 4). В сезон 58-й РАЭ (2012/13 г.) было выполнено пять маршрутов. Их конфигурация предполагала уточнение восточной границы озера и определение западной (рис. 4). Однако его размеры оказались значительно больше, и западная граница озера до сих пор не определена.

ИССЛЕДОВАНИЯ ПОДЛЕДНИКОВОГО ОЗЕРА ВОСТОК

Особняком стоят радиолокационные исследования, выполненные в районе подледникового озера Восток. Оно было открыто в 1993 г. в ходе анализа данных спутниковой альтиметрии (Ridley et al., 1993). Практически сразу после этой публикации началось его планомерное изучение посредством сейсмических зондирований МОВ и наземного радиолокационного профилирования. Последнее выполнялось в период 1998–2008 гг. Цель работ заключалась в определении береговой линии озера Восток и выявлении основных черт подледного ландшафта и строения ледникового покрова. В общей сложности за указанный период было выполнено 5190 пог. км радиолокационных маршрутов (рис. 5а) (Попов и др., 2011, 2012).

Первые два полевых сезона (1998–2000 гг.) радиолокационных работ на озере Восток были посвящены решению методических и технических задач. В результате была принята методика т.н. «управляемого эксперимента». Суть его заключалась в том, что съемка выполнялась зигзагом с пересечением береговой линии, при этом решение о плановом положении маршрутов принималось оперативно на этапе выполнения работ, т.е. корректировалось в зависимости от результатов съемки. Данная методика, с одной стороны, позволила существенно сократить время, необходимое для решения поставленной задачи, а с другой — получить максимально качественный научный результат.

Другим немаловажным результатом опытно-методических работ явилось определение средней скорости распространения электромагнитных волн в теле ледника. Измерения проводились методом наклонных зондирований. Согласно полученным результатам, средняя скорость распространения электромагнитных волн в леднике составляет $168,4 \pm 0,5$ м/мкс; мощность ледника в районе станции Восток составляет 3775 ± 15 м (Попов и др., 2001; Popov et al., 2003). Сейчас, благодаря проникновению в озеро, известно, что мощность ледника по длине керна составляет 3769,3 м (Лукин, 2012), т.е. ошибка измерений составила доли процента. Столь высокая точность проведенных работ свидетельствует о высоком профессионализме их исполнителей.

Главная из поставленных задач (определение береговой линии озера Восток) непосредственно связана с проникновением в него. Требовалось выяснить, является ли озеро изолированным водным телом или нет. Если же оно представляет собой часть подледной гидросферы Антарктиды, то возможно случайное попадание в озеро привнесенных инородных объектов-контаминантов, что, в свою очередь, может привести к негативным последствиям для экосистемы всего континента. В результате проведенных исследований (в том числе и зарубежных) была составлена наиболее подробная и точная карта береговой линии озера (Попов, Черноглазов, 2011), а также подледной топографии (Попов и др., 2011), приведенная на рис. 5. По результатам последней была составлена первая орографическая карта данного региона (Попов, Лунев, 2012). Был сделан обоснованный вывод о том, что озеро Восток является именно изолированным водным телом (Попов, Черноглазов, 2006).

Согласно полученным результатам, площадь водного зеркала подледникового озера Восток составляет 15790 км^2 . Ее высотное положение изменяется в пределах приблизительно от -600 до -150 м. В пределах его акватории выявлено 11 островов общей площадью 365 км^2 . Кроме того, в этом районе было выявлено 56 изолированных подледниковых водоемов, наибольший из которых имеет площадь 129 км^2 . Их средние линейные размеры составляют около 5 км (Попов, Черноглазов, 2006).

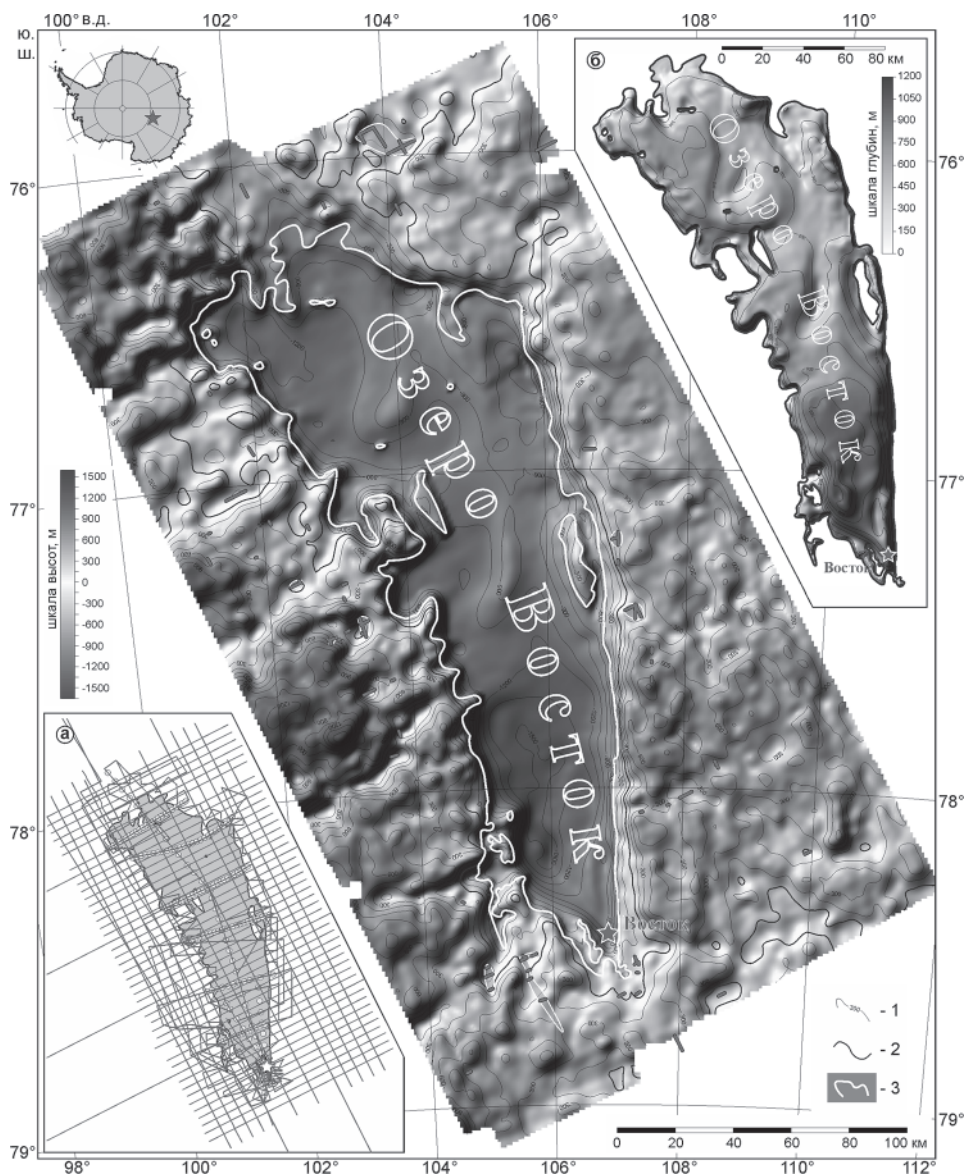


Рис. 5. Коренной рельеф и подледниковые водоёмы в районе подледникового озера Восток: 1 — изогипсы коренного рельефа; сечение изолиний 150 м; 2 — уровень моря; 3 — береговая линия озера Восток; утолщенной линией показаны подледниковые водоёмы. На врезке а приведена схема расположения использованных геофизических данных. Точки — пункты сейсмических зондирований МОВ. На врезке б показаны глубины озера Восток; сечение изолиний 150 м.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение внутренних районов Восточной Антарктиды и подледникового озера Восток является одной из приоритетных задач изучения континента российскими исследователями. Этим работам в нашей стране придается огромное научное значение. При этом среди направлений научных работ геолого-геофизические исследования стоят на первом месте. В сезон 58-й РАЭ (2012/13 г.) были начаты георадарные исследования на станции Восток и во внутренних районах Восточной Антарктиды (Екайкин и др., 2014; Попов, Эберляйн, 2014). Таким образом, комплекс радиолокационных работ расширяется.

Авторы выражают свою признательность сотрудникам Российской антарктической экспедиции за логистическую поддержку выполненных работ. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 14-05-00234-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Атлас Антарктики. Т. 1. М.; Л.: ГУГК. 1966. 238 с.
- Богородский В.В., Рудаков В.Н., Тюльпин В.А. Электромагнитное зондирование антарктического ледника // ЖТФ. 1965. Вып. 6. Т. XXXV. С. 1150–1153.
- Грушинский Н.П., Корякин Е.Д., Строев П.А., Лазарев Г.Е., Сидоров Д.В., Вирская Н.Ф. Каталог гравиметрических пунктов Антарктики // Тр. Астроном. института им. Штернберга. 1972. Т. 72. С. 115–311.
- Екайкин А.А., Липенков В.Я., Попов С.В., Туркеев А.В., Козачек А.В., Владимирова Д.О. Пространственная изменчивость характеристик снежного покрова антарктических мегадюн в районе подледникового озера Восток // Проблемы Арктики и Антарктики. 2014. № 4 (102). С. 78–89.
- Лукин В.В. Путь к изучению вод озера Восток открыт // Проблемы Арктики и Антарктики. 2012. № 1 (91). С. 15–19.
- Лунев П.И., Попов С.В. Основные результаты изучения коренного рельефа Восточной Антарктиды в полосе трассы «Прогресс – Восток» // Материалы Всероссийской научной конференции «Рельеф и экзогенные процессы гор», Иркутск, 25–28 октября 2011 г. 2011а. Т. 1. С. 138–140.
- Лунев П.И., Попов С.В. Строение ледникового покрова и коренной рельеф Восточной Антарктиды в полосе трассы Прогресс – Восток по результатам полевых работ 2010/11 г. (56-я РАЭ) // Российские полярные исследования. 2011б. № 3 (5). С. 14–16.
- Мачерет Ю.Я. Радиозондирование ледников. М.: Научный мир, 2006. 392 с.
- Попов С.В., Эберляйн Л. Опыт применения георадара для изучения строения снежно-фирновой толщи и грунта Восточной Антарктиды // Лед и снег. 2014. № 4 (128). С. 95–106.
- Попов С.В., Масолов В.Н., Лукин В.В., Попков А.М. Отечественные сейсмические и наземные радиолокационные исследования в Центральной Антарктиде накануне Международного полярного года 2007–2008 // МГИ. 2007. Вып. 103. С. 107–117.
- Попов С.В., Лунев П.И. Орография коренного рельефа района подледникового озера Восток (Восточная Антарктида) // Геоморфология. 2012. № 1. С. 81–92.
- Попов С.В., Масолов В.Н., Лукин В.В. Озеро Восток, Восточная Антарктида: мощность ледника, глубина озера, подледный и коренной рельеф // Лед и снег. 2011. № 1(113). С. 25–35.
- Попов С.В., Масолов В.Н., Лукин В.В., Попков А.М. Отечественные сейсмические, радиолокационные и сейсмологические исследования подледникового озера Восток // Лед и снег. 2012. № 4 (120). С. 31–38.
- Попов С.В., Миронов А.В., Шереметьев А.Н., Лучининов В.С. Измерение средней скорости распространения электромагнитных волн в леднике в районе станции Восток // МГИ. 2001. Вып. 90. С. 206–208.

- Попов С.В., Черноглазов Ю.Б. Об открытии подледникового озера в районе станции Пионерская (Восточная Антарктида) // МГИ. 2006. Вып. 100. С. 165–167.
- Попов С.В., Черноглазов Ю.Б. Подледниковое озеро Восток, Восточная Антарктида: береговая линия и окружающие водоемы // Лед и снег. 2011. № 1. С. 13–24.
- Рудаков В.Н., Пасынков В.В., Швайштейн З.И., Богородский В.В. Способ измерения толщины ледяного покрова. Авторское свидетельство № 225 460 от 18.04.1956.
- Федоров Б.А. Применение активной радиолокации для изучения антарктических ледников // Бюлл. САЭ. 1967. № 62. С. 19–24.
- Шереметьев А.Н. Измерение толщины и скорости движения ледникового покрова в районе маршрута Мирный – Комсомольская – купол «В» // Тр. САЭ. 1986. Т. 78. С. 127–132.
- Corr H.F.J., Vaughan D.G. A recent volcanic eruption beneath the West Antarctic ice sheet // Nature Geoscience. 2008. Vol.1. P. 122–125. doi:10.1038/ngeo106.
- Fretwell P., Pritchard H.D., Vaughan D.G., etc. BEDMAP 2: improved ice bed, surface and thickness datasets for Antarctica // The Cryosphere. 2013. Vol. 7 (1). P. 375–393.
- Lythe M.B., Vaughan D.G. and the BEDMAP Consortium. BEDMAP- bed topography of the Antarctic, 1:10 000 scale map. BAS (Misc) 9. Cambridge: British Antarctic Survey, 2000.
- Lythe M.B., Vaughan D.G. and the BEDMAP Consortium. BEDMAP: A new ice thickness and subglacial topographic model of Antarctica // J. of Geophysical Research, 2001. Vol. 106. № B6. P. 11335–11351.
- Millar D.H.M. Radio-echo layering in polar ice sheets and past volcanic activity // Nature. 1981. Vol. 292. P. 441–443.
- Popov S.V., Masolov V.N. Forty-seven new subglacial lakes in the 0° – 110° E sector of East Antarctica // J. Glaciol. 2007. Vol. 53. № 181. P. 289–297.
- Popov S.V., Sheremet'ev A.N., Masolov V.N., Lukin V.V., Mironov A.V., Luchininov V.S. Velocity of radio-wave propagation in ice at Vostok station, Antarctica // J. Glaciol. 2003. Vol. 49. № 165. P. 179–183.
- Ridley J.K., Cudlip W., Laxon W. Identification of subglacial lakes using ERS-1 radar altimeter // J. Glaciol. 1993. Vol. 73. № 133. P. 625–634.

S.V. POPOV, P.I. LUNEV

RESULTS OF THE RECENT RUSSIAN GROUND-BASED RADIO-ECHO SOUNDING INVESTIGATIONS IN THE EAST ANTARCTIC INLAND

Overview of the Russian remote sensing investigations in the East Antarctic inland and the subglacial Lake Vostok is described in the paper. Ground-based radio-echo sounding was carried out along the logistic traverse routes “Mirny – Vostok” and “Progress – Vostok”. The main features of the subice landscape and the ice sheet were revealed. Besides, two subglacial lakes were discovered there. They were named as Komsomolskoe Lake and Pionerskoe Lake. Bedrock topography, the depth of the lake, ice thickness and other maps were compiled on the results of the geophysical investigations in the Lake Vostok. The lake coastal line was also detected. Eleven islands and 56 small water caves were discovered in the Lake Vostok area. All the geophysical data are pointed the lake is completely isolated.

Keywords: radio-echo sounding, East Antarctica, scientific traverses, subice relief, Lake Vostok.

КОМПЛЕКСНОЕ ТЕОРЕТИКО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДИНАМИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ЛЬДА

канд. физ.-мат. наук Ю.Н. ОРЛОВ, канд. физ.-мат. наук М.Ю. ОРЛОВ

Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск,
e-mail: orloff_m@mail.ru,

Представлены результаты исследования процессов динамического нагружения поликристаллического льда. Разработаны физико-математическая модель поведения льда при ударно-взрывных нагрузках и численный метод расчета напряженно-деформированного состояния с учетом эволюции деформационных картин и областей его разрушения. Проведены натурные эксперименты по взрыву речного льда зарядом взрывчатого вещества (ВВ) в полиэтиленовой оболочке. Проведен лабораторный эксперимент по соударению сферического ударника с ледяными преградами. Численно решена задача о внедрении стального сферического ударника в лед при низких скоростях.

Ключевые слова: лед, эксперимент, взрыв, расчет, майна, деформация, разрушение.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время поисковые научно-исследовательские работы по изучению поведения льда при динамических нагрузках являются крайне актуальными. Это объясняется необходимостью развития транспортных связей в северных регионах нашей страны, увеличением добычи природных ископаемых в Заполярье, постоянной борьбой с ледовыми заторами на сибирских реках, отработкой ракетного вооружения в ледяных пустынях Арктики, разработкой новых видов защит летательных аппаратов от микрометеоритов и частиц космического мусора.

Основная сложность исследований определена в прошлом веке Ф. Мальгредом, С. Канн, Н. Маэно, В. Богородским и др. и заключается в том, что такой древнейший природный материал, как лед (сегодня известно более 15 его разновидностей), мало изучен в условиях динамического нагружения. Прежде всего это объясняется его сложной внутренней структурой, особенностями кристаллической решетки, аномальными пластическими свойствами, многократными фазовыми переходами в процессе деформирования и т.д. С точки зрения разрушения лед вообще может не иметь аналогов. Проблемы прочности и разрушения таких тел только начинают разрабатываться, поэтому картина разрушения льда при динамических нагрузках остается мало изученной (Трайд, 1983).

Анализ научно-технической и патентной литературы указывает на необходимость разработки физико-математических моделей поведения льда при ударно-взрывных нагрузках. В настоящее время, согласно публикационной активности, наиболее известной моделью следует считать феноменологическую модель, созданную в

Национальном космическом агентстве США (Carney, 2006). Однако модель имеет ряд недостатков, указанных самими авторами, и к тому же привязана к определенным баллистическим экспериментам. Учитывая сложную структуру льда, скудную экспериментальную базу (некоторые экспериментальные данные вообще не согласуются между собой), отсутствие моделей разрушения льда, можно утверждать, что адекватной физико-математической модели поведения льда при динамических нагрузках все еще нет.

Целью работы являлось комплексное экспериментально-теоретическое исследование процессов разрушения льда при динамическом нагружении. В плане экспериментальных исследований изучено состояние заснеженного и бесснежного ледяных покровов после подрыва в воде эмульсионного ВВ, а также процесс соударения сферического ударника с ледяными цилиндрами в дозвуковом диапазоне скоростей удара. Теоретически исследованы процесс взрывного нагружения однофазного льда зарядом ВВ и процесс нормального соударения сферического ударника в диапазоне до 325 м/с.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Ежегодно по ледовой тематике выходит более 1400 статей (данные Всемирной сети Интернет), однако полноценных работ по исследованию ударно-волнового и взрывного нагружения льда значительно меньше. При этом количество исследований за рубежом на порядок больше, чем в нашей стране. Ситуация осложняется отсутствием государственной поддержки исследований и возобновлением американской программы “SCICEX”, в рамках которой идет сбор научных данных новейшими надводными и подводными средствами военно-морского флота. Об этом факте неоднократно было упомянуто, в том числе в (Орлов и др., 2013).

Очевидно, что через некоторое время отставание российских научных коллективов в этом направлении будет еще заметней и от некоторых важнейших ледовых проектов придется отказаться вовсе. Поэтому необходимо создавать новые модели поведения льда при динамическом нагружении и, как альтернативу эксперименту, развивать численные методы расчета напряженно-деформированного состояния льда с учетом эволюции деформационных картин и областей разрушения. Необходимы надежные экспериментальные данные по ударно-волновому и взрывному нагружению льда для апробации разрабатываемых средств математического моделирования.

В НИИ прикладной математики и механики Томского госуниверситета более 25 лет ведутся поисковые научно-исследовательские работы по исследованию динамического нагружения льда. Модифицирована физико-математическая модель поведения льда при ударно-волновых и взрывных нагрузках. Разработан численный метод расчета его напряженно-деформированного состояния с учетом фрагментарного разрушения, а также накоплены научные данные (теоретические и экспериментальные) о поведении льда при ударе и взрыве (Глазырин и др., 2008; Горельский и др., 2012; Глазова и др., 2013).

Создание физико-математической модели деформирования и разрушения льда является крайне сложной научно-технической задачей. В НИИ прикладной математики и механики по инициативе авторов организована мобильная лаборатория «Взрывное разрушение природных материалов», объектом исследования которой является пресноводный лед. За последние три года проведены более 10 экспедиций, и как следствие появилась возможность создания одноименной реляционной базы данных. Разрабатываемая база данных должна стать основой для выявления некоторых

механизмов и закономерностей процесса взрывного нагружения льда и апробации новых методов математического моделирования.

ПЕРВЫЕ ИТОГИ РАБОТЫ МОБИЛЬНОЙ ЛАБОРАТОРИИ «ВЗРЫВНОЕ РАЗРУШЕНИЕ ПРИРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ»

Два года назад были проведены первые натурные испытания по взрывному нагружению речного льда. Эксперименты совпали с весенними противопаводковыми мероприятиями МЧС на реке Томи. Экспериментальная площадка выбрана практически на фарватере реки Томи в районе коммунального моста. При первичном осмотре дефектов ледяного покрова (полыньи и разводьев) в радиусе 5 м не обнаружено. Глубина реки в данном месте более 7 м, а ширина около 500 м. Течение воды не являлось значительным. Температура воды $+4^{\circ}\text{C}$. Объект исследования — речной лед средней толщины.

На рис. 1 показаны результаты натурных испытаний весной 2013 г. Диаметр лунки для закладки ВВ получился 16 см. В качестве ВВ использовался заряд Эмул-ласт АС-30-ФП-90 в полиэтиленовой оболочке (тротилловый эквивалент по теплоте взрыва 0,82). Заглубление в воду незначительное. Масса ВВ составляла 4 кг, длина заряда 70 см. Подрыв ВВ осуществлялся в воде при помощи детонирующего шнура ДШЭ-12 ГОСТ 6196-78 по классической схеме. Ледяной покров в районе экспериментальной площадки был заснеженным, толщина снега не менее 10 см. Толщина льда составила 80 см.

Лунка для закладки эмульсионного ВВ изображена на рис. 1а. На рис. 1б показана взрывная майна на расстоянии ~ 6 м. Фотографии сделаны научным сотрудником НИИ ПММ Г.Н. Богомоловым со спасательного катера через 10 минут после взрыва. Отметим, что в радиусе нескольких метров были замечены крупные фракции льда размерами в поперечном сечении 65–75 см. Внутри майны присутствовал мокрый снег и небольшие осколки льда. Вода была видна невооруженным глазом. На поверхности ледяного покрова возле майны образовалась горка высотой ~ 35 см. Радиальных трещин, распространяющихся от эпицентра взрыва в разные направления, на поверхности льда не обнаружено. Качественно был оценен радиус выброса осколков льда, который составил около 5 м. Не исключено, что небольшие куски льда под действием продуктов детонации были выброшены значительно дальше.

На рис. 2 показаны результаты прошлогодних натурных испытаний по взрыву льда. Диаметр лунки равнялся 11 см, а масса эмульсионного ВВ составила 8 кг (использовались два заряда по 4 кг каждый). Объект исследования — бесснежный ледяной покров, толщиной 70 см. Площадка для эксперимента выбрана за городом практически в центре реки. Схема эксперимента не менялась.



Рис. 1. Эксперимент по взрыву речного льда: а — диаметр до взрыва; б — взрывная майна на расстоянии 6 м; в — измерение диаметра майны после взрыва.

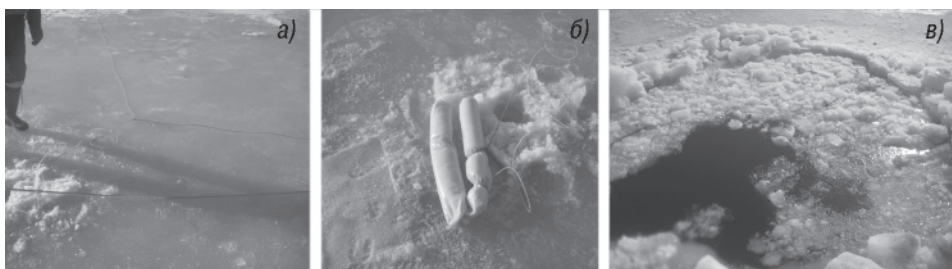


Рис. 2. Эксперимент по взрыву речного льда в 2014 г.: *а* – место будущей майны; *б* — ледяной покров до взрыва; *в* — образовавшаяся после взрыва майна.

На рис. 2*а* показано место будущей майны. Рис. 2*б* иллюстрирует состояние ледяного покрова до взрыва (фото сделано со спасательного катера). После взрыва во льду образовалась майна диаметром 400–430 см, напоминающая форму окружности (рис. 2*в*). Продуктами детонации образовано большое число маленьких осколков льда, которые можно наблюдать внутри и рядом с майной. Больших фрагментов льда (более 100 см) обнаружено не было. Радиус выброса осколков был больше, чем при подрыве заснеженного льда. Радиальных трещин на поверхности ледяного покрова также выявлено не было.

Сопоставляя результаты экспериментов, можно заключить следующее. Из-за оттепели в первом эксперименте лед более пористый, поэтому наблюдалась одна картина разрушений. В первом случае взрыв сопровождался образованием незначительного количества осколков льда. Во втором случае речной лед был менее пористый, а его прочностные характеристики несколько выше. Поэтому картины разрушений отличались и преобладало хрупкое разрушение. В результате действия продуктов детонации образовывалось множество фракций льда, среди которых отмечены небольшие осколки (15 см). В обоих экспериментах форма взрывной майны была близка к окружности. Состояние кромки льда также отличалось.

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ЛЬДА ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ

Описание поведения льда при динамических нагрузках проводится с позиции феноменологической макроскопической теории механики сплошных сред на основе фундаментальных законов сохранения. Лед моделировался упруго-пластической, пористой, сжимаемой средой с учетом свойств прочности, ударно-волновых явлений и фрагментарного разрушения. Упруго-пластическое течение задается уравнениями Прандтля–Рейса при условии текучести Мизеса. Уравнение состояния было определено функцией Уолша, его основным достоинством является широкая доступность фигурирующих в нем постоянных. Действие взрывного нагружения задается в приближении модели мгновенной детонации заряда взрывчатого вещества (ВВ). Уравнение состояния продуктов детонации описывается политропой Ландау–Станюковича. (Орленко, 2014).

В расчетах лед был однофазным, с усредненными физико-механическими характеристиками, взятыми из общедоступной литературы (Богородский, 1980). Основные физико-механические характеристики льда были следующие: начальная плотность $\rho_0 = 0,92 \text{ г/см}^3$, скорость звука $C_0 = 3020 \text{ м/с}$, модуль сдвига $G = 3,2 \text{ ГПа}$, предел текучести $\sigma_f = 0,022 \text{ ГПа}$, откольная прочность $\sigma_k = 0,01 \text{ ГПа}$, удельная работа

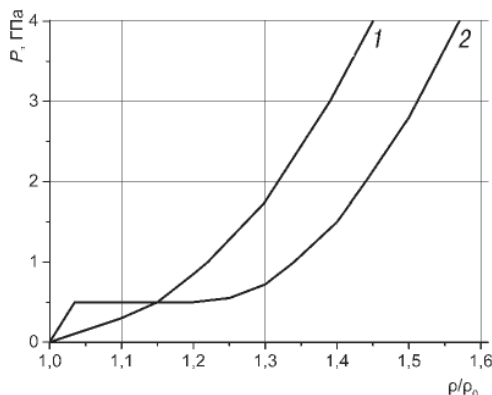


Рис. 3. Ударная адиабата воды и льда: 1 — вода, 2 — лед.

сдвиговых пластических деформаций $A_p = 0,5$ кДж/кг, эквивалентная пластическая деформация $\varepsilon_{eq} = 2,0$.

Уравнение состояния льда принято в виде:

$$P(\rho) = B(\rho/\rho_0 - 1)(\rho/\rho_0)^2,$$

где $B = 8,4$ ГПа, $\rho_0 = 0,92$ г/см³.

Уравнение состояния воды в виде полинома:

$$P(\rho) = 0,0225(\rho/\rho_0 - 1) + 0,085(\rho/\rho_0 - 1)^2.$$

На рис. 3 приведена ударная адиабата воды и льда. Ударная адиабата воды близка к графику степенной функции, причем после достижения относительной плотностью значения 1,35 кривые становятся параллельными.

В качестве основного инструмента исследований использовался численный лагранжев метод, расчетная часть которого дополнена механизмами расщепления расчетных узлов и разрушения расчетных элементов. Оригинальность метода заключается в новом способе выделения поверхностей разрывов сплошности материалов, который не накладывает серьезных ограничений на решение современных динамических много-контактных задач механики деформируемого твердого тела. Модель разрушения льда является детерминированной, допускает появление новых свободных поверхностей и совместное образование разрушений по типу отрыва и сдвига (Герасимов и др., 2007).

Достоверность результатов численного моделирования установлена путем решения ряда тестовых задач и сравнением с известным аналитическим решением, а также экспериментальными данными. Экспериментальные данные были получены на уникальном баллистическом стенде с высокоточными приборами регистрации в НИИ прикладной математики и механики. Отдельные эксперименты специально были проведены в ЦНИИ им. А.Н. Крылова (Санкт-Петербург). В лабораторном эксперименте исследован процесс внедрения стальной сферы в лед в дозвуковом диапазоне. Сравнение результатов лабораторного и численного экспериментов свидетельствует в пользу разработанного численного метода расчетов (Глазырин и др., 2008).

ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ДИНАМИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ЛЬДА

Для более детального изучения процесса взрывного нагружения льда был смоделирован натурный эксперимент, проведенный в 2013 г. Объект исследования —



Рис. 4. Численное моделирование подрыва льда, расположенного на водной подложке. Толщина льда 80 см, масса закладки ВВ 4 кг. Размер майны $d \sim 210$ см.

a — исходная конечно-элементная модель системы «Лед – ВВ – Вода»; *б* — текущая конфигурация системы «Лед – ВВ – Вода», $t = 5$ мс; *в* — конечная конфигурация системы «Лед – ВВ – Вода», $t = 10,7$ мс.

ледяная преграда толщиной 80 см, расположенная на водной подложке. Взрывчатое вещество с необходимыми параметрами помещалось непосредственно подо льдом.

На рис. 4 изображены расчетные конфигурации подрыва льда в моменты времени 0, 5 и 10,7 мс. На этих изображениях видно, что наиболее обширные разрушения при взрывном нагружении происходят на свободной поверхности льда. Эти разрушения вызваны растягивающими напряжениями, возникающими при выходе волны сжатия на поверхность льда. Образовавшаяся майна (полынья) размером примерно 210 см. Размер этот приблизительный. Точность определяется размером расчетных элементов, так как отрывные разрушения происходят по границе элементов. В данном разбиении поперечное сечение элементов составило 10×10 см.

На рис. 5*а* приведен график распределения скорости свободной поверхности льда в радиальном направлении для двух моментов времени. В момент времени 1 мс график гладкий, скорость плавно меняется от максимальной на куполе (105 м/с) до нуля на периферии. В момент времени 10,7 мс график кусочно-непрерывный. Такой эффект получается от того, что лед в процессе деформации отламывается кусками, по мере того как возникают разрушающие напряжения. Каждый кусок теряет связь с соседней областью, но сохраняет приобретенную им до этого скорость. В свою очередь оставшийся лед до момента разрушения продолжает тормозиться соседними областями. В итоге получается именно такое распределение скоростей.

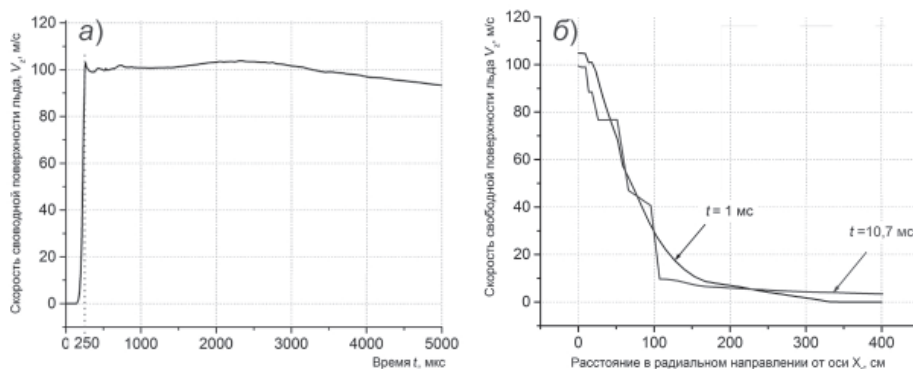


Рис. 5. Распределение скорости поверхности льда: *a* — распределение осевой скорости поверхности льда в радиальном направлении для моментов времени 1 и 10,7 мс; *б* — изменение осевой скорости льда во времени в центре купола.

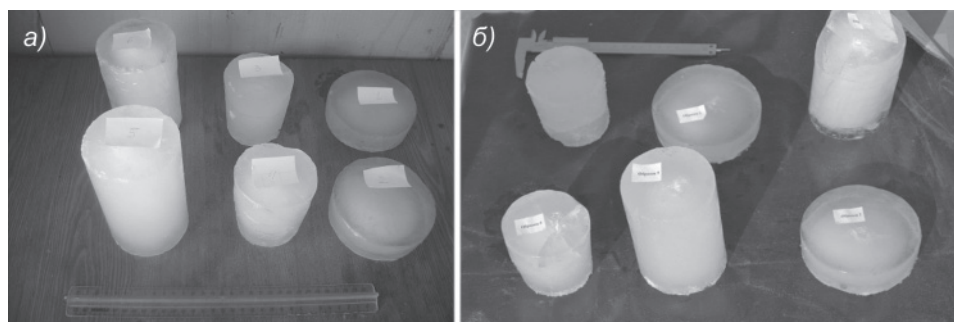


Рис. 6. Ледяные цилиндры до (а) и после (б) соударения.

На рис. 5б приведен график скорости осевой точки свободной поверхности льда, т.е. точки на вершине купола, образованного взрывом. В момент времени 250 мкс эта точка приобретает скорость, равную примерно 105 м/с и впоследствии практически не изменяющуюся. Расхождение между результатами натурного и вычислительного экспериментов составило не более 5 % (Орлова, 2014).

Далее проведен лабораторный эксперимент по соударению сферического ударника с ледяным цилиндром. Для проведения физического эксперимента были подготовлены шесть цилиндров льда, которые получались путем заморозки пресной воды в естественных условиях при температуре -14°C в течение более 72 ч. Объектами исследования являлись цилиндры с разной высотой и диаметром (рис. 6). В качестве ударника были выбран стальной шарик с медной оболочкой диаметром 4,5 мм. Начальная скорость ударника составляла 155 ± 5 м/с, масса — 3,55 г. Процесс взаимодействия проходил по нормали. В процессе эксперимента фиксировались глубина внедрения ударника и диаметр кратера. Отметим, что кратер имел форму усеченного конуса, вершина которого располагалась ближе к тыльной поверхности. Во всех экспериментах процесс кратерообразования сопровождался выбросом льда с лицевой поверхности цилиндра. Диаметр откольной тарелки измерен не был. После удара во льду присутствовали кольцевые трещины отрыва, при этом лед разрушался только в области контакта с «ударник – мишень» независимо от высоты цилиндра.

Результаты проведенных экспериментов по соударению сферического ударника с ледяными цилиндрами приведены в табл. 1. При проведении эксперимента образец № 3 был разрушен.

Установлена следующая закономерность процесса внедрения сферического ударника. Полученная глубина кратера была почти в 2 раза больше, чем первоначальная.

Таблица 1

Результаты лабораторных экспериментов

Номер образца	Диаметр цилиндра, мм	Высота цилиндра, мм	Глубина кратера, мм	Диаметр кратера, мм
1	114,5	38,4	7,9	17,5
2	114,5	42	8,4	16,0
3	78,6	93	—	—
4	78,6	92,1	8,1	15,0
5	86,3	140,3	8,2	19,0
6	84,0	135,4	8,1	18,0

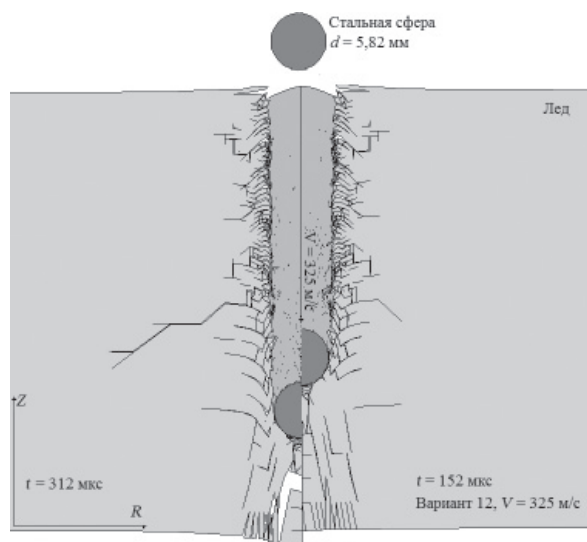


Рис. 7. Расчитанные конфигурации «сферический ударник – ледяной блок» для моментов времени 312 мкс (слева) и 152 мкс (справа).

чальный диаметр ударника. Диаметр образовавшегося во льду кратера был почти в 3 раза больше, чем диаметр ударника.

Далее предпринята попытка смоделировать процесс соударения компактного ударника со льдом с целью детального изучения процесса разрушения льда. Физическая постановка задачи о внедрении ударника в поликристаллический лед формулируется как контактное взаимодействие сферического ударника с ледяным цилиндром. Диаметр сферы $d = 5,82$ мм. Материал ударника — сталь ШХ-15. Преграда — ледяной цилиндр (диаметр 60 мм, высота 45 мм). Серия вычислительных экспериментов состояла из 12 вариантов, в каждом последующем начальная скорость удара V_0 увеличивалась на 25 м/с. Диапазон изменения начальной скорости варьировался от 50 до 325 м/с. На контактной границе ударника и преграды задано условие скольжения. Расчеты проведены в осесимметричном случае при помощи специально разработанной в Томском госуниверситете программы для ЭВМ (10).

Детальный анализ процесса внедрения сферического ударника в лед позволил выявить следующие закономерности (рис. 7). Первые очаги разрушения начинают формироваться во льду в зоне контакта «ударник – мишень» уже на первой микросекунде. Отмечено уплотнение льда в этой области. В процессе внедрения зона разрушений распространяется в осевом направлении от лицевой поверхности к тыльной. Очаги разрушения зарождались в виде косых трещин под углом 45° к оси симметрии. Практически во всех вариантах на оси симметрии очаги разрушения сливались в магистральную трещину, длина которой составила 20 мм. Выявлено, что сферический ударник большую часть процесса внедрялся в ослабленный растягивающими напряжениями лед. В последних вариантах картина разрушения льда несколько меняется, в нем образовывается «пробка» и уже две магистральные трещины.

Семейство кривых на рис. 8 иллюстрирует зависимость глубины внедрения сферического ударника от времени. Выявлено, что с ростом начальной скорости удара увеличивается время внедрения ударника, причем в двух последних вариантах

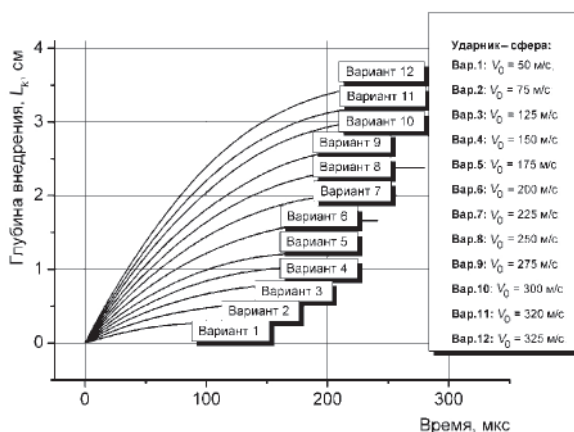


Рис. 8. Временные зависимости глубины внедрения сферы.

оно было примерно одинаковым. Увеличивается угол наклона между осью абсцисс и касательной в точке начала координат. Зависимость глубины внедрения ударника от времени вполне можно аппроксимировать степенной функцией.

На рис. 9 показаны графические зависимости поврежденности льда от времени. Параметр поврежденности для количественной оценки поврежденности материала впервые предложен в (Глазырин, 2008). Выявлено, что в первых трех вариантах развитие разрушений во льду протекало вплоть до 60 мкс. Почти на всех кривых поврежденности обнаружена «ступенька», наибольшая высота которой была зафиксирована в последних двух вариантах.

Проведенные расчеты, представленные в табл. 2, позволили сформулировать следующие выводы. Процесс внедрения проходил без разрушения материала ударника. Характер временной зависимости скорости ударника был близок к линейному. Время процесса внедрения сферического ударника составило около 300 мкс. Глубина внедрения ударника постоянно увеличивалась и в трех последних вариантах превысила радиус ледяной преграды. Процесс развития разрушений во льду отмечен в

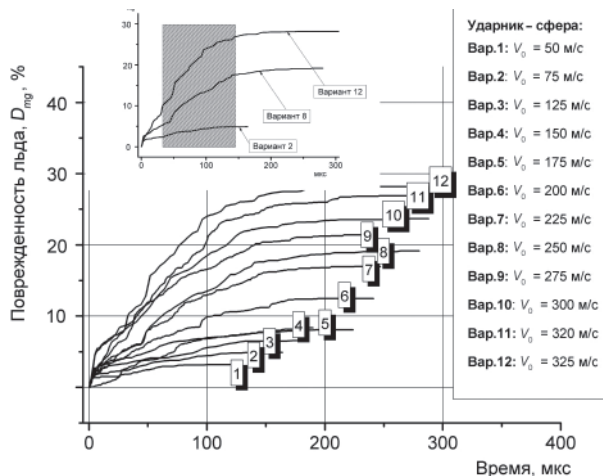


Рис. 9. Временная зависимость поврежденности льда.

Результаты процесса внедрения компактных ударников в лед

Номер варианта	V_0 , м/с	t_k , мкс	L_k , мм	D_{mg} , %	Откол	
					лицевой	тыльный
1	50	118	2,8	3,20	–	–
2	75	139	5,4	4,91	–	–
3	100	185	8,0	6,55	–	–
4	125	200	10,4	8,0	–	–
5	150	216	12,9	8,35	–	–
6	175	241	16,6	12,47	–	–
7	200	255	20,3	16,98	–	–
8	225	272	23,8	19,15	–	–
9	250	281	26,7	21,37	–	–
10	275	295	30,5	23,67	–	–
11	300	301	32,7	26,86	+	+
12	325	313	35,9	28,10	+	+

основном на начальных стадиях процесса внедрения. В двух последних вариантах зафиксированы лицевой и тыльный отколы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведенные комплексные теоретико-экспериментальные исследования по динамическому нагружению льда позволили сделать следующие выводы. В настоящее время адекватные физико-математические модели поведения льда все еще разрабатываются. Основная сложность, скорее всего, связана с отсутствием надежных экспериментальных данных о процессах разрушения и сложной внутренней структуре этого древнейшего природного материала. На базе НИИ прикладной математики и механики организована мобильная лаборатория «Взрывное разрушение природных материалов», основной целью которой является экспресс-анализ разрушения льда при динамическом нагружении. При подрыве эмульсионного ВВ во льду образуется майна, по форме близкая к окружности. Проведены натурные испытания по подрыву эмульсионного ВВ в воде под заснеженным и бесснежным ледяными покровами. Численно смоделирован первый натурный эксперимент, и детально воспроизведен процесс разрушения льда. Лед описывается однофазной упруго-пластической, пористой средой с учетом свойств прочности, ударно-волновых явлений и совместного образования отрывных и сдвиговых разрушений. Действие продуктов детонации задается политропой Ландау–Станюковича. Проведены лабораторные эксперименты по соударению сферического ударника с ледяными цилиндрами. Изучен процесс соударения сферического ударника с ледяной преградой в звуковом диапазоне начальных скоростей, и выявлены основные закономерности процесса разрушения.

Авторы выражают благодарность главному инженеру ОАО «КузбассСпецВзрыв» А.Н. Садохину за помощь в проведении экспериментов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 13-08-00509а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Богородский В.В., Гаврило В.П. Лед. Физические свойства. Современные методы гляциологии. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 383 с.

Глазова Е.Г., Кочетков А.В., Крылов С.В., Повереннов Е.Ю. Численное моделирование удара и проникания в мерзлый грунт, покрытый снегом // Проблемы прочности и пластичности. 2014. Т. 76. № 3. С. 235–242.

Глазырин В.П., Орлов Ю.Н., Орлов М.Ю. Разрушение льда при ударном и взрывном нагружении // Вычислительные технологии. 2008. Т. 13. Спец. Вып. Ч. 1. С. 425–432.

Горельский В.А., Коняев А.А., Толкачев В.Ф. Моделирование глубины проникания ударников в пресный лед при температуре -25°C // Тезисы докладов Всероссийской конференции «Полярная механика-2013». Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. С. 21–22.

Орлов М.Ю., Глазырин В.П., Орлов Ю.Н., Садохин А.Н., Богомолов Г.Н. Комплексное теоретико-экспериментальное исследование поведения поликристаллического льда при динамических нагрузках. Ч. 1. Эксперименты по ударно-взрывному нагружению пресноводного льда. Расчет процесса взрывного нагружения системы «Лед – ВВ – Вода» // Вестник Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема. 2013. Вып. 2 (13). С. 98–112.

Орлова Ю.Н. Комплексное теоретико-экспериментальное исследование поведения льда при ударных и взрывных нагрузках: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск, 2014. 155 с.

Орлов Ю.Н., Глазырин В.П., Орлов М.Ю. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2010610911 от 28.01.2010 «Удар-ОС1. Ударно-волновое нагружение конструкций. Осесимметричная задача».

Теоретические и экспериментальные исследования высокоскоростного взаимодействия тел / Под редакцией А.В. Герасимова, Томск.: Изд-во ТГУ, 2007. 572 с.

Физика взрыва / Науч. ред. Л.П. Орленко. Изд. 3-е, перераб. М.: Физматлит, 2002. Т. 1. 832 с.

Физика и механика льда / Под ред. П. Трюде. М.: Мир, 1983. 352 с.

Carney K.S., Benson D. J., DuBois P., Lee R. A phenomenological high strain rate model with failure for ice // International Journal of Solids and Structures. 2006. Vol. 43. P. 7820–7839.

ORLOV M. YU., ORLOV YU. N.

COMPLEX THEORETICAL AND EXPERIMENTAL RESEARCH OF DYNAMIC LOADING OF POLYCRYSTALLINE ICE

The research of dynamic loading of ice are presented. Physical and mathematical model of the behavior of ice under shock loads explosive and a numerical method for calculating the stress-strain state ice have been developed. Full-scale experiments on the destruction of the annual river ice explosive charge in water was conducted. Laboratory experiment on impact of the spherical impactor with ice barriers is made. The task of the penetration of the spherical steel impactor into ice was solved.

Keywords: ice, experiment, explosion, calculation, lane, deformation, destruction.

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ГЕОРАДАРНЫХ ПОДПОВЕРХНОСТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ РОССИЙСКОГО СЕКТОРА АРКТИКИ

*академик Н.Н. МЕЛЬНИКОВ, канд. техн. наук А.И. КАЛАШНИК,
вед. инж. Д.В. ЗАПОРОЖЕЦ, науч. сотр. А.Ю. ДЬЯКОВ,
мл. науч. сотр. Д.А. МАКСИМОВ*

*ФГБУН Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук,
г. Апатиты, e-mail: kalashnik@goi.kolasc.net.ru,*

В западной части российского сектора Арктики сосредоточено более 300 промышленных объектов, которые отнесены к категории особо ответственных и требуют регулярных обследований и мониторинга. Рассмотрен опыт и приведены примеры георадарных исследований Горного института КНЦ РАН на горных предприятиях, гидротехнических сооружениях, линейно протяженных объектах, котлованах и площадках для строительства, а также для идентификации и трассирования подземных инженерных коммуникаций.

Ключевые слова: Арктика, георадар, подповерхностные исследования, строение, состояние, мониторинг.

ВВЕДЕНИЕ

В западной части российского сектора Арктики сосредоточено более 300 промышленных объектов, которые отнесены к категории особо ответственных (Доклад о состоянии..., 2014). Это рудники, карьеры и технические сооружения крупных горнодобывающих предприятий: АО «Апатит», АО «Ковдорский ГОК», АО «Кольская ГМК», АО «ОЛКОН», АО «Ловозерский ГОК», ГОК «Олений ручей» СЗФК, а также гидротехнические сооружения (ГТС) различного назначения: ГЭС, ТЭЦ, хвосто- и шламохранилища горно-перерабатывающих и металлургических предприятий. Сюда же следует отнести нефтегазообъекты (платформы, добычные приповерхностные и подводные модули, технологические и транспортные трубопроводы, временные хранилища, приемные и перевалочные прибрежные терминалы, заводы по переработке, магистральные транспортные нефтегазопроводы и т.п.), которые, в перспективе развития добычи нефти и газа на шельфе Баренцева моря и последующего трубопроводного транспортирования нефтеуглеводородов потребителям, будут в значительной степени сконцентрированы в данном регионе (Мельников, Калашник, 2009; Супруненко, Суслова, 2012).

Наряду с суровыми арктическими условиями, геологическая среда западной части Арктики, особенно Кольского полуострова, является геодинамически активной — здесь инструментально регистрируются природно-техногенные опасные геомеханические процессы и геодинамические проявления различного масштаба (Годзиковская и др., 2010). В центральной части Кольского полуострова, вследствие

крупномасштабных горных работ на Хибинских и Ловозерском месторождениях, произошли индуцированные землетрясения магнитудой свыше 4, приведшие к разрушениям как подземных горных выработок, так и наземных сооружений и коммуникаций. При этом область воздействия землетрясений в десятки раз превышала район ведения горных работ.

ОСОБЕННОСТИ РЕГИОНА

Необходимо также выделить специфические для западной части российского сектора Арктики горно-геологические и индустриально-промышленные особенности:

- высокое напряженно-деформированное состояние массивов пород верхней части земной коры, с преобладанием субгоризонтальной тектонической составляющей, которая может превышать собственный вес пород в 2–3 раза (Геодинамическая безопасность..., 2003);

- гляциоизостатическое поднятие (всплывание) земной коры — при этом крупные геологические блоки по-разному и неравномерно смещаются по разломам (Никонов, 2006);

- сейсмичность как природного, так и техногенного характера, имеющая ярко выраженную зональность, приуроченную к прибрежным зонам и центральной части Кольского полуострова (Годзиковская и др., 2010);

- изменчивость рельефа земной поверхности с перепадом высот до 200–500 м (Калашник, Максимов, 2013);

- крупномасштабная и интенсивная разработка горнорудных месторождений подземным и открытым способом, с перемещением огромных объемов породных масс (Мельников, Лукичев, 2013);

- большое число озер и рек, имеющих социально-экономическое значение (источники водоснабжения городов, населенных пунктов и промышленных предприятий, ГЭС и т.п.) (Кашулин, Кашулина, 2014; Мельников, Калашник, 2009);

- наличие в регионе атомных объектов (Кольская атомная электростанция — работающие блоки и строительство второй очереди; хранилище отработавшего ядерного топлива в Сейда-губе; захоронение ядерных отходов в губе Андреевой и др.);

- наличие крупных морских портов: Мурманского, Канда拉克шского и Витино;

- наличие ряда военных объектов стратегического и регионального значения.

Все это предопределяет, в целях обеспечения промышленной безопасности горнотехнических и нефтегазовых объектов региона, необходимость оценки их состояния и надежности выполнения функционального назначения на основе регулярных геотехнических исследований.

ВОЗМОЖНОСТИ ГЕОРАДАРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Геотехнические исследования состояния промышленных объектов включают в себя, как правило, комплексы натурных инженерно-геологических, геодезических и геофизических наблюдений (Калашник и др., 2015; Мельников и др. 2015), к числу которых следует отнести и георадарное подповерхностное зондирование. Георадарные исследования в комплексах натурных наблюдений и инженерных изысканий начинают активно применяться в различных областях, среди которых в первую очередь необходимо выделить горное дело, геологию, транспортное, промышленное, гидротехническое и гражданское строительство, экологию и др. (Мельников, Калашник, 2010; Старовойтов, 2008). Отличительной особенностью георадарных зондирований

является возможность исследования внутренней структуры геологической среды или промышленной конструкции на глубину от 0,5 до 300 м с разрешающей способностью от 2 см до 5 м соответственно.

Для задач горного дела зондирование с помощью георадарных комплексов дает возможность: обследовать борта, уступы и бермы в карьерах; кровлю, потолчины и целики в подземных горных выработках; выявлять природные и техногенные разрывные нарушения в законтурном массиве пород; обследовать состояние ограждающих дамб накопителей жидких горнопромышленных отходов, котлованов и площадок под строительство, фундаментов под крупнотоннажные механизмы и сооружения и т.п.

Применение георадарных зондирований в геологии позволяет строить детальные геологические разрезы как при инженерно-геологических изысканиях, так и при оконтуривании залежей полезных ископаемых; определять границы распространения полезных ископаемых, положение карстовых воронок и пустот; выявлять локальные проявления месторождений полезных ископаемых; определять положение уровня грунтовых вод, глубину и профиль дна рек и озер; толщину льда, глубину промерзания водоемов.

С применением современных георадарных технологий возможно производить оценку состояния оснований и фундаментов транспортных, промышленных и гражданских сооружений; определять глубину промерзания в грунтовых массивах и дорожных конструкциях; определять содержание влаги в грунте земляного полотна и подстилающих грунтовых основаниях; определять качество и состояние бетонных конструкций (мостов, зданий и т.д.), состояние дамб и плотин; выявлять оползневые зоны.

Георадар является очень хорошим средством для уточнения и идентификации подземных инженерных сетей и коммуникаций: металлических и пластиковых труб, кабелей, объектов коммунального хозяйства, включая водо- и теплоснабжение (особенно для случаев отсутствия или утраты документации на них).

Специально следует выделить решаемые с помощью георадарных технологий задачи экологии: поиск и оконтуривание подземных источников воды, оценка загрязнения почв; обнаружение утечки из нефте-, продукто- и водопроводов; идентификация мест захоронения экологически опасных отходов и др.

ИССЛЕДОВАНИЯ ГОРНОГО ИНСТИТУТА КНЦ РАН

Горным институтом КНЦ РАН выполнены георадарные поверхностные исследования на основных горнодобывающих предприятиях Кольского полуострова и о. Шпицберген, на площадках строительства новых промышленных объектов, на участках трассы планируемых магистральных трубопроводов по Кольскому полуострову и Северной Карелии, а также фундаментов телебашни г. Мурманска высотой 186 м, опор для трубопровода теплоцентрали, фундаментов под крупнотоннажные дробильные мельницы обогатительных фабрик горно-перерабатывающих предприятий (рис. 1, табл. 1). Ниже приведены примеры проведенных георадарных подповерхностных исследований.

На карьере «Железный» АО «Ковдорский ГОК» георадарные зондирования выполнены в целях оценки состояния и исследования внутренней структуры массива пород рабочих уступов, а также для выявления и геометризации пространственного положения плоскостей тектонических нарушений, геологических дислокаций и зон неоднородностей и структурной нарушенности (Калашник и др., 2014) (рис. 2).

Выполнено также георадарное обследование предгорья Ковдорского горнорудного массива, представляющего собой природно-техническую систему, подвергающуюся



Рис. 1. Схема основных промышленных предприятий Кольского полуострова и Северной Карелии.

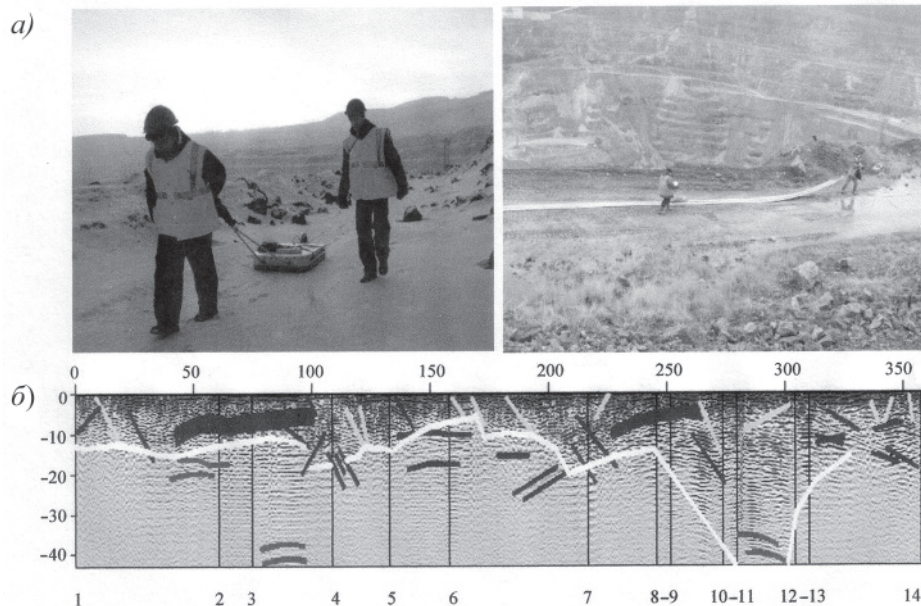


Рис. 2. Георадарные обследования участка борта карьера Железный АО «Ковдорский ГОК»: а — проведение измерений; б — пример геологического разреза по данным георадарного зондирования.

**Примеры георадарных подповерхностных исследований в западной части
российского сектора Арктики**

Наименование объекта исследования	Цель и задачи исследований
Горнодобывающие предприятия	
Ковдорский ГОК, карьер «Железный», рабочие уступы	Оценка геолого-структурного строения законтурного массива пород; выявление дислокаций и зон неоднородностей — для обоснования параметров новых уступов
Ковдорский ГОК, карьер «Железный», участки ЦПТ и РДКК	Оценка состояния и структуры законтурного массива пород; выявление и трассирование тектонических нарушений; выявление дислокаций и зон с различными волновыми характеристиками — для целей оценки устойчивости участка
АО «Апатит», рудник Центральный, отвалы	Оценка структуры отвалов с выявлением уплотненных породно-снежно-ледяных зон — для решения задач их перемещения за пределы действующего карьера
АО «Апатит», рудник Восточный, карьеры Коашвинский, Ньорпахкский	Выявление границ изменения литологической разности пород и руд
АО «Апатит», рудник Кировский, АО «Апатит», рудник Расвумчорский	Обследование законтурного состояния стенок горной выработки без крепи и с крепью
Гидротехнические сооружения	
СЗФК, ограждающие дамбы хвостохранилища	Мониторинг состояния и выявление скрытых фильтрационно-деформационных процессов — для минимизации рисков потери противофильтрационной функциональности и механической устойчивости ограждающих дамб
Кольская ГМК, ограждающие дамбы хвостохранилища	Определение положения депрессионной плоскости, выявление скрытых зон неоднородностей (разуплотнения) в теле плотины
Нивские ГЭС, Пиренгская плотина	
Кривопорожская ГЭС, Кемская плотина	
Фундаменты	
СЗФК, фундаменты мельниц обогатительной фабрики	Определение качества заливки, состояния и структуры фундаментов, а также оценка влагонасыщенности пород под ними
г. Мурманск, фундаменты телебашни	Оценка прочности, состояния и структуры четырех фундаментов телебашни
ОАО «Арктикуголь», ТЭЦ п. Баренцбург, Шпицберген	Изучение состояния приповерхностных грунтов в районе расположения ТЭЦ п. Баренцбург, определение верхней границы зоны вечной мерзлоты
Площадки под строительство	
ЗАО «МурманскТИСИЗ», разгрузочная площадка на ст. Титан	Определение структуры насыпных и естественных грунтов разгрузочной площадки. Уточнение и дополнение геологических разрезов
СЗФК, площадка строительства хвостохранилища	Оценка качества выторфовки; выявление влагонасыщенных и водоносных слоев в подстилающих породах; оконтуривание сформировавшейся при выемке естественного грунта рельефа поверхности под телом дамбы
г. Мурманск, Долина уюта, котлован для строительства спортивного комплекса	

Наименование объекта исследования	Цель и задачи исследований
Линейно-протяженные объекты	
ЗАО «МурманскТИСИЗ» ж.д. пути на ст. Титан.	Определение структуры насыпных и естественных грунтов полотна ж.д. путей
Дорога на новый аэропорт «Хибины»	Определение структуры насыпных и естественных грунтов полотна дороги
Участки трассы магистрального трубопровода в Кандалакшской сейсмогенной зоне	Исследование состояния и структуры приповерхностной зоны земной коры на активных разломах; оценка изменчивости волновых характеристик по мере удаления от разлома
Озеро Имандра, переходная зона «суша–вода» для магистрального трубопровода	Оценка толщины льда и состояния флюидонасыщенного слоистого массива грунтов
Склон горы Айкуайвенчор, горнолыжный подъемник	Оценка мощности моренных отложений для целей строительства
Коммуникации	
г. Апатиты, Академгородок КНЦ РАН	Поиск и картирование подземных инженерных сетей и коммуникаций.
г. Апатиты, центральный городской стадион	Обследование грунта Апатитского стадиона для сооружения дренажа искусственного покрытия

периодическим взрывным (волновым) воздействиям. Анализ волновых картин на радарограммах, полученных при проведении исследований, подтвердил возможность применения методов неразрушающего подповерхностного зондирования в подобных условиях с достаточной достоверностью получения данных и их количественной и качественной интерпретации. Выявлен скрытый в глубине массива и представляющий потенциальную опасность для промышленных сооружений разлом. Также было установлено, что перекрывающий разлом слой мощностью до 5 м представляет собой сильнотрещиноватые раздробленные породы.

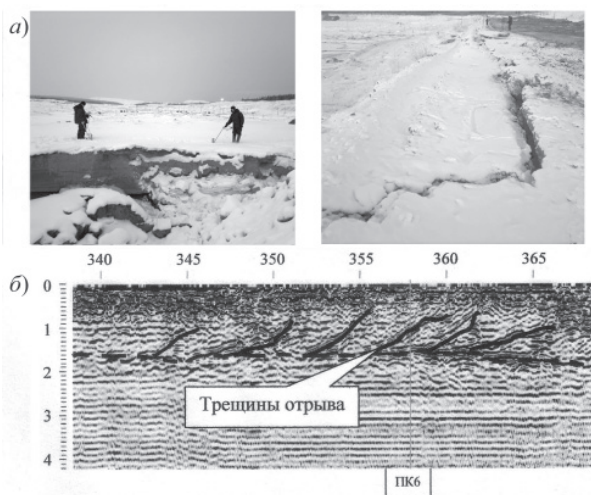


Рис. 3. Обследование участка ограждающей дамбы хвостохранилища георадарными комплексами: *a* — трещины в теле дамбы; *б* — продольное сечение по данным георадарного зондирования.

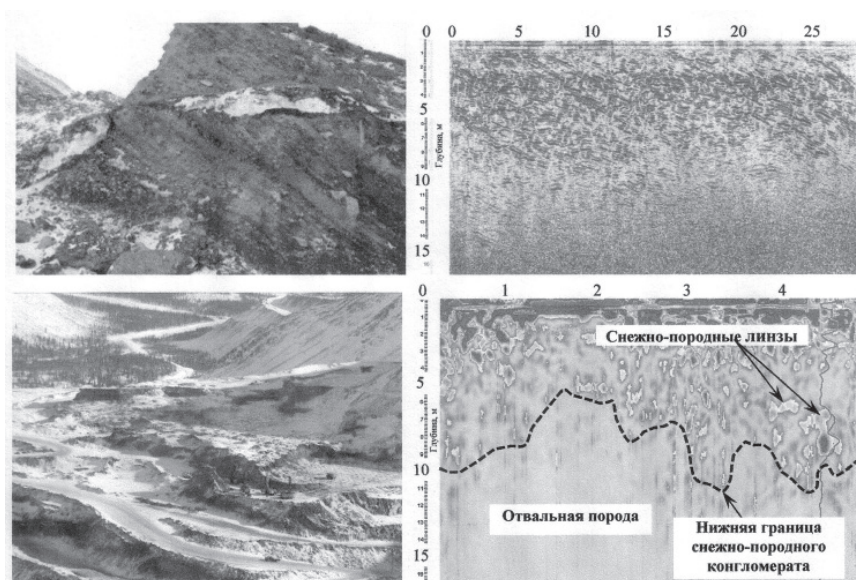


Рис. 4. Фрагмент отвалов пород с включением снежно-ледяной зоны (слева) и фрагменты разрезов по данным георадарных исследований (справа).

В течение ряда лет выполнялся мониторинг состояния ограждающих дамб хвостохранилища АО «Ковдорский ГОК» (Данилкин и др., 2014), хвостохранищ АО «Кольская ГМК», ГОК «Олений ручей» СЗФК (Калашник и др., 2013) в целях минимизации рисков фильтрационно-деформационных процессов.

На АО «Апатит» выполнена оценка внутренней структуры породных отвалов карьера «Центральный» в целях выявления уплотненных породно-снежно-ледяных зон (линз) (рис. 4), а перспективный участок рудника «Восточный» дифференцирован по литологической разности пород и руд.

На западном склоне горы Айкуайвенчорр Хибинского горнорудного массива (центральная часть Кольского полуострова) протяженностью 515 м и с перепадом высот от вершины до нижней точки склона приблизительно 300 м георадарное зондирование было выполнено в комплексе изысканий для строительства лыжного подъемника. Исследованный участок имел снежный покров с повышенной влажностью и локальными обнажениями склона. Глубина снега составляла в среднем 80–90 см, а на отдельных участках достигала 1,5 м. По результатам камеральной обработки полевых исследований построена радарограмма (рис. 5), на которой можно выделить несколько слоев. Снежный покров четко прослеживается по длине всего профиля ввиду большой разницы диэлектрической проницаемости на границе сред «снег–морена». На участках 0–55 м, 85–160 м, 220–230 м, 305–315 м снежный покров отсутствует. Вторым слоем была выделена морена, мощность которой составляет от 2 м на вершине горы до 5 м к подножью. При анализе профиля на участке 0–270 м можно увидеть увеличение мощности морены с 2 до 5 м, а на участке 270–515 м — уменьшение с 5 до 3,5 м. Граница морены с коренной породой менее уверенно идентифицируется ввиду суглинистых отложений в составе верхнего слоя и повышенной влажности исследуемой области, обусловленной активным таянием снега.

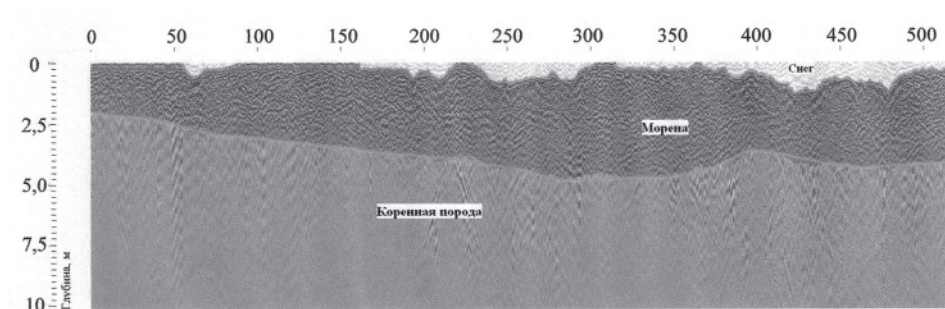


Рис. 5. Геологический разрез, построенный по результатам георадарного зондирования склона горы Айкуайвенчорр Хибинского горнорудного массива.

При строительстве ограждающих дамб хвостохранилища ГОКа «Олений ручей» СЗФК была выполнена оценка качества «выторфовки» грунтов площадки под строительство и исследовано подстилающее основание на наличие скрытых влагонасыщенных и водоносных слоев. В дальнейшем был выполнен мониторинг вывода гидротехнической системы «хвостохранилище–дамбы» на рабочий режим. Также было выполнено георадарное обследование состояния бетонных фундаментов, построенных для дробильных мельниц (рис. 6).

В зимний период было выполнено георадарное зондирование донных грунтов в переходной зоне «береговой склон–крупномасштабный водоем» (измерения производились с поверхности ледяного покрова озера Имандра, центральная часть Кольского полуострова). При этом во внимание принимались три группы основных задач: 1) геологические (уточнение литологии и структуры геологического разреза переходной зоны); 2) гидрологические (глубина воды, мощность придонных осадков, грунтов, илов; толщина льда), 3) поисковые (связанные с обнаружением и идентификацией искусственных (техногенных) объектов на дне водоемов, в осадочных слоях, илах и ледовом покрове).

Анализ полученных результатов позволяет выявить следующие особенности исследуемого водного объекта: толщина ледового покрова составляет около 1,5 м; на границе илистых отложений с водой отмечается резкая смена волновой картины, что дает возможность четко определить глубину водоема на исследованном участке,

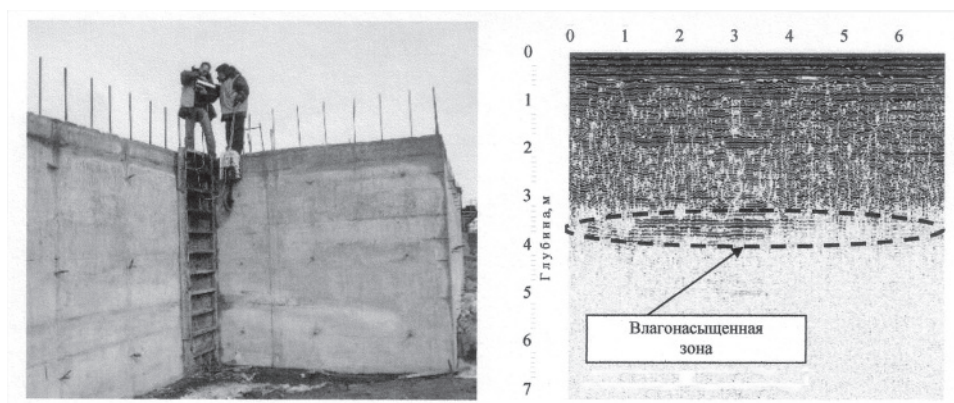


Рис. 6. Георадарное зондирование по стенкам и кровле бетонных фундаментов под мельницы.

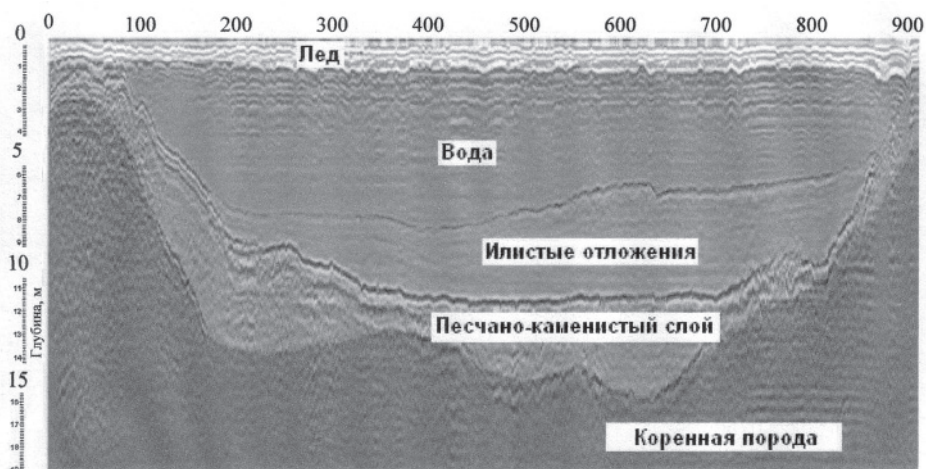


Рис. 7. Радарограмма исследований в переходной зоне «береговой склон – крупномасштабный водоем» (оз. Имандра).

которая составляет порядка 6–8 м; подошва илов идентифицирована по интенсивным осям синфазности более сложной формы по сравнению с донным отражением и поэтому уверенно выделяется; коренные отложения отличаются от современных илов на радарограмме характером осей синфазности; глубина залегания коренных пород составляет от 2–3 м у берега до 14–16 м при удалении от береговой черты (рис. 7).

Отдельно следует упомянуть георадарное зондирование площадки здания ТЭЦ ОАО «Арктикуголь» в пос. Баренцбург (о. Шпицберген). Целью работ являлось выявление глубины залегания верхней границы мерзлоты, которая, по данным инженерно-геологических изысканий 25-летней давности, располагалась на уровне 6,2–6,7 м ниже дневной поверхности. Георадарным определением было установлено, что граница мерзлоты в настоящее время расположена на глубине 6,5–7,5 м на различных участках периметра здания.

В целом за период 2009–2014 гг., в целях решения различных горно-геологических и геотехнических задач, георадарные исследования были выполнены на более чем 20 объектах, среди которых, с учетом вышеперечисленных горнотехнических, фундаменты телебашни г. Мурманска, котлованы и площадки для строительства, лыжный и городской стадионы, дороги и др. (см. табл. 1).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Опыт проведения работ и полученные результаты позволяют уверенно констатировать, что георадарное подповерхностное зондирование, обладающее такими качествами, как оперативность и информативность, может являться эффективным дополнением (а в отдельных случаях — самостоятельным средством) инженерных исследований и мониторинга горнотехнических и нефтегазовых объектов для условий западной части российского сектора Арктики.

Георадарные подповерхностные исследования, выполненные Горным институтом КНЦ РАН для разнопрофильных промышленных объектов Кольского полуострова, Северной Карелии и о. Шпицберген, наглядно демонстрируют, что георадарные технологии могут быть отнесены к универсальным средствам неразрушающего изучения

внутреннего строения и мониторинга состояния ответственных объектов в арктических условиях. Институтом создается система многоуровневого геодинамического мониторинга горнотехнических и нефтегазовых объектов региона, в основу которой положен принцип проведения системных мультидисциплинарных комплексных исследований, включающих в себя: наземные и GPS (спутниковые) геодезические, инженерно-геологические, гидрогеологические и геотехнические измерения, а также подповерхностную, поверхностную и площадную (спутниковую) георадарную съемку. Интегрирование георадарных съемок в геодезическую систему наблюдений позволит достаточно уверенно и с высокой точностью определять смещения и деформации дневной поверхности и контролируемых объектов. Совместное использование геодезических и георадарных методов в комплексе с инженерно-геологическими, гидрогеологическими и геомеханическими исследованиями позволит получать более полную картину состояния геологической среды, сопряженной с контролируемыми объектами, с учетом тектонических и гидрогеологических процессов.

Статья подготовлена в рамках выполнения проекта РФФИ 15-29-06037.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Геодинамическая безопасность при освоении недр земной поверхности / Отв. ред. А.А. Козырев. Апатиты: КНЦ РАН, 2003. 207 с.

Годзиковская А.А., Асминг В.Э., Виноградов Ю.А. Ретроспективный анализ первичных материалов о сейсмических событиях, зарегистрированных на Кольском полуострове и прилегающей территории в XX веке / Отв. ред. А.Н. Виноградов. М.: Ваш полиграфический партнер, 2010. 130 с.

Данилкин А.А., Калашиник А.И., Запорожец Д.В., Максимов Д.А. Мониторинг состояния ограждающей дамбы в зоне отработки техногенного месторождения Ковдорского ГОКа // ГИАБ. 2014. № 7. С. 344–352.

Доклад о состоянии и об охране окружающей среды Мурманской области в 2013 году. 2014. 152 с. URL: <http://new.gov-murman.ru/region/environmentstate/2013.pdf> [дата обращения 23.06.2015]

Калашиник А.И., Гилярова А.А., Калашиник Н.А., Максимов Д.А., Смирнова О.В. Экономические аспекты исследований состояния гидротехнического сооружения (ГТС) накопителя жидких промышленных отходов // Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом. 2015. № 6. С. 23–26.

Калашиник А.И., Запорожец Д.В., Дьяков А.Ю., Казачков С.В., Сохарев В.А. Исследования георадарами структуры и текущего состояния горных пород, слагающих уступы основного карьера Ковдорского ГОКа // Горный журнал. 2014. № 4. С. 60–64.

Калашиник А.И., Запорожец Д.В., Лебедик А.В. Мониторинг строительства и эксплуатации ограждающих дамб хвостохранилища ГОК «Олений ручей» // Мониторинг природных и техногенных процессов при ведении горных работ: Сб. докл. Всеросс. науч.-техн. конф. с междунар. участием, 24–27 сентября 2013 г. Апатиты, 2013. С. 188–193.

Калашиник А.И., Максимов Д.А. Автоматизация геостатистической обработки данных при проведении факторного анализа трасс линейно-протяженных объектов // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2013. № 8. С. 19–21.

Кацулин Н.А., Кацулина Т.Г. Современное состояние пресноводных ресурсов Мурманской области. Проблемы и перспективы // Экологические проблемы северных регионов и пути их решения: Материалы V Всерос. науч. конф. с междунар. участием. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2014. Ч. 1. С. 21–26.

Мельников Н.Н., Калашиник А.И. Инновационные георадарные технологии изучения подповерхностной структуры и состояния природно-технических систем // Вестник КНЦ. 2010. № 3. С. 4–8.

Мельников Н.Н., Калашиник А.И., Каспарьян Э.В., Калашиник Н.А. Концепция геодинамического мониторинга объектов нефтегазопромысла в регионе Баренцева моря // Геоэкология. 2015. № 2. С. 166–175.

Мельников Н.Н., Калашиник А.И. Шельфовые нефтегазовые разработки: геомеханические аспекты. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2009. 140 с.

Мельников Н.Н., Лукичёв С.В. Современные тенденции развития горной технологии, региональные особенности // Горнодобывающая промышленность Баренцева Евро-Арктического региона: взгляд в будущее: Сб. докл. II Междунар. конф. горнопромышленного комплекса, Кировск, 22–23 ноября 2012 г. Мурманск: Северная ТПП, 2013. С. 6–10.

Никонов А.А. Современные движения земной коры. Изд. 2-е, доп. М.: КомКнига, 2006. 192 с.

Старовойтов А.В. Интерпретация георадиолокационных данных. М.: МГУ, 2008. 192 с.

Супруненко О.И., Суслова В.В. Западно-Арктическая нефтегазоносная провинция: ресурсная база углеводородного сырья, состояние и перспективы недропользования // Горный журнал. 2012. № 3. С. 66–71.

N.N. MELNIKOV, A.I. KALASHNIK, D.V. ZAPOROZHETS, A.YU. DYAKOV, D.A. MAKSIMOV

EXPERIENCE IN APPLYING GEORADAR SUBSURFACE STUDIES AT THE RUSSIAN ARCTIC WESTERN SECTOR

The western part of the Russian Arctic sector accumulates more than 300 industrial objects which are considered as critical and require regular observations and monitoring. The paper observes experience and presents cases of georadar studies performed by the Mining Institute KSC RAS on mining enterprises, hydrotechnical facilities, linear extended objects, ditches and construction sites, as well as for identifying and tracing underground engineering communications.

Keywords: Arctic, georadar, subsurface studies, structure, state, monitoring.

О ЛЕДОВОЙ ХОДКОСТИ И УПРАВЛЯЕМОСТИ КРУПНОТОННАЖНЫХ СУДОВ ДВОЙНОГО ДЕЙСТВИЯ В АРКТИКЕ

д-р техн. наук К.Е. САЗОНОВ

*ФГУП «Крыловский государственный научный центр» (КГНЦ), Санкт-Петербург,
e-mail: kirsaz@rambler.ru*

В работе приведен краткий обзор работ, посвященных исследованиям движения судов во льдах кормой вперед, которые предшествовали созданию технологии судов двойного действия. Проанализирована эволюция концепции двойного действия с момента ее появления до настоящего времени. Выполнен критический анализ широко рекламируемых характеристик ледовой ходкости и управляемости крупнотоннажных судов двойного действия. Описан возможный источник возникновения ошибок при проведении испытаний самоходных моделей в ледовых бассейнах на режиме движения задним ходом.

Ключевые слова: крупнотоннажное судно, концепция двойного действия, ледовая ходкость, ледовая управляемость, ледовый бассейн.

ВВЕДЕНИЕ

Многочисленные исследования показывают, что экономически эффективную транспортную морскую транспортную систему в арктических морях возможно создать при использовании в ней крупнотоннажных судов ледового плавания (Дехтярук и др., 2013). Современные крупнотоннажные суда ледового плавания от ранее используемых отличаются резким увеличением главных размерений, и в первую очередь длины и ширины корпуса. При этом ширина корпуса крупнотоннажных судов в 1,5–2 раза превышает ширину существующих ныне, в том числе и строящихся ледоколов. Это обстоятельство делает практически невозможным использование традиционной тактики плавания судов во льдах, которая базируется на лидирующем положении ледокола, прокладывающего во льдах канал для движения судов. При использовании традиционной схемы проводки крупнотоннажное судно вынуждено доламывать неразрушенный ледоколом ледяной покров, что требует существенного увеличения мощности энергетической установки судна, а также обеспечения достаточной прочности корпуса. Эти показатели оказываются сравнимыми с соответствующими показателями судна, осуществляющего одиночное плавание.

В настоящее время во всем мире ведутся активные поиски технологий, которые могли бы обеспечить безопасное плавание крупнотоннажных судов в ледовых условиях. Многие специалисты полагают, что решение этой проблемы может быть найдено с помощью использования судов двойного действия. Рассмотрению эффективности применения судов двойного действия при их эксплуатации в Арктике посвящена данная работа.

ИСТОРИЧЕСКИЙ ЭКСКУРС

Идея применения на ледоколах и судах ледового плавания носовых гребных винтов, или, что практически то же самое, движения кормой вперед, не нова. Впервые носовые гребные винты появились во второй половине XIX в. в Северной Америке, положив начало развитию ледоколов так называемого «американского типа» (Андриенко, 2009). Ряд преимуществ подобной конструкции был вполне очевиден, это в первую очередь возможность размыва несмерзшихся торосистых образований. Именно для этой цели носовой винт был использован С.О. Макаровым в первом варианте конструкции корпуса ледокола «Ермак». Недостатки носового расположения гребных винтов были выявлены достаточно быстро: это невозможность в то время обеспечить достаточную прочность лопастей гребных винтов и гребного валопровода. Этот важнейший фактор вынудил судостроителей с осторожностью относиться к применению носовых гребных винтов на ледоколах. Тем не менее во второй половине XX в. был построен и успешно эксплуатировался целый ряд ледоколов, оснащенных носовыми движителями. Это ледоколы типа «Капитан Белоусов» и «Василий Прончищев» в СССР, типа «Войма», «Карху» и «Тармо» в Финляндии, «Эльбьерн» и «Данбьерн» в Дании (Каштелян и др., 1972). Необходимо отметить, что все указанные ледоколы предназначались для работы в неарктических замерзающих морях. Ледоколы типа «Капитан Белоусов» и «Василий Прончищев» использовались также для работы в арктических портах, причем в этом случае на ледоколах типа «Василий Прончищев» носовой винт не использовался (Каштелян и др., 1972). Опыт эксплуатации таких ледоколов показал, что они наиболее эффективны в условиях стесненных фарватеров, набитых тертым льдом и шугой.

Во второй половине XX в. изучалась ледовая ходкость ледоколов и судов при движении кормой вперед. Результаты этих исследований показали, что при этом режиме движения наблюдается снижение ледового сопротивления (Игнатьев, 1966). Причем это снижение ледового сопротивления было довольно значительным, потому что показатели ледовой ходкости при движении кормой вперед часто оказывались лучше, чем на передний ход, хотя тяговые характеристики заднего хода у судов с традиционным движительным комплексом всегда хуже.

Возрождение интереса к движению ледоколов задним ходом во льдах и, соответственно, к применению носовых винтов произошло в конце XX в. благодаря деятельности капитана а/л «Арктика» Ю.С. Кучиева. К этому времени многие проблемы, связанные с обеспечением прочности движительного комплекса ледоколов, были успешно решены, поэтому он стал активно применять при эксплуатации «Арктики» движение задним ходом, продемонстрировав при этом повышение ледопроеходимости. Он также выступал за применение носовых винтов на арктических ледоколах (Кучиев, 1993). В качестве причины эффективности носовых гребных винтов Ю.С. Кучиев называет:

- размыв подводной части торосов, менее подверженной смерзанию;
- обмыв корпуса ледокола, уменьшающий силы трения и предотвращающий облипание бортов и заклинивание ледокола.

В работе (Сазонов, 2010) содержится теоретическое объяснение эффекта снижения сопротивления при движении задним ходом, основанное на учете влияния на различные составляющие ледового сопротивления мощных струй воды, отбрасываемых движителем и омывающих корпус. На рис. 1 приведены результаты расчетов

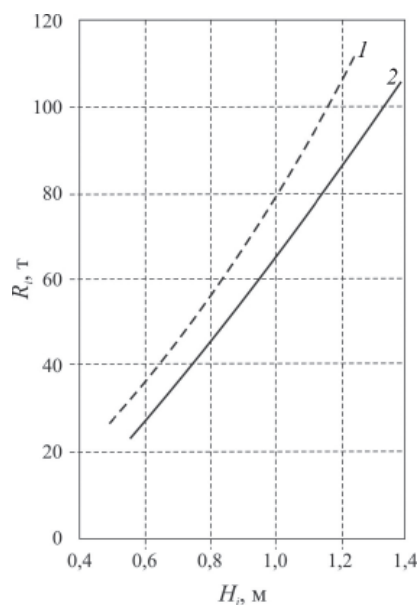


Рис. 1. Сопротивление ледокола при движении передним (1) и задним (2) ходом.

ледового сопротивления традиционного ледокола при движении передним и задним ходом. Из анализа результатов следует, что ледовое сопротивление при работе носовых движителей (движение задним ходом) снижается в 1,6–1,8 раза.

Также стали появляться работы, в которых предлагалось использовать эффект снижения ледового сопротивления при движении задним ходом для решения различных задач морской ледотехники. Одним из первых было предложение российских специалистов использовать этот режим для проведения сейсмической разведки в ледовых условиях (Буравцев, Сазонов, 1992; Буравцев и др., 1995). Это предложение было поддержано финскими специалистами (Салми, 1995). К сожалению, оно до настоящего времени еще не реализовано.

В 1995 г. финскими специалистами была предложена концепция судна двойного действия (DAS) (Backstrom et al., 1995), которая заключалась в том, что носовая и кормовая оконечности судна проектировались на совершенно различные режимы движения: нос судна оптимизировался для получения хороших показателей ходкости на чистой воде (предполагалось, что он может иметь бульб), а форма кормовой оконечности обеспечивала движение во льдах.

ЭВОЛЮЦИЯ КОНЦЕПЦИИ СУДНА ДВОЙНОГО ДЕЙСТВИЯ

Концепция судна двойного действия могла появиться только после разработки новых движительно-рулевых комплексов типа «Азипод», предложенных также финскими специалистами. Дело в том, что движение задним ходом традиционных ледоколов и судов ледового плавания лимитируется конструктивными особенностями их движительно-рулевого комплекса. Обычные гребные винты фиксированного шага при реверсе развивают не более 70 % тяги переднего хода. И только использование винто-рулевых колонок, реверс которых осуществляется поворотом колонки на 180° , позволяет развивать на заднем ходу тяговые усилия, сравнимые по величине с тягой переднего хода. Кроме этого использование винто-рулевых колонок позволило по-

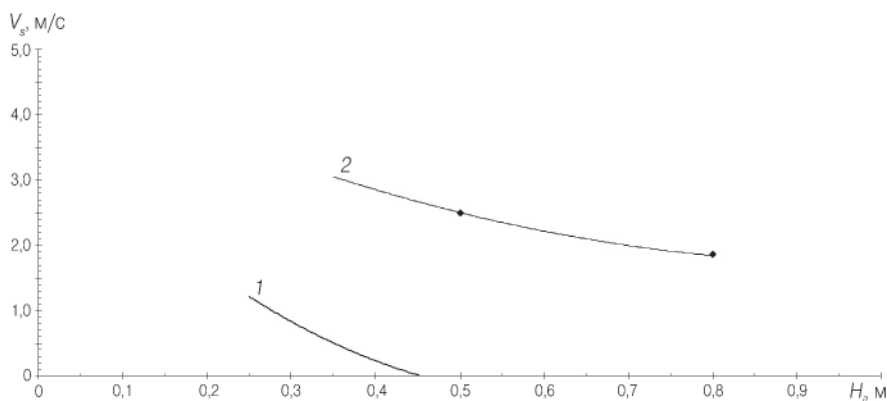


Рис. 2. Ледопроходимость танкера двойного действия:
1 — движение носом вперед, 2 — движение кормой вперед.

высить тяговые характеристики движительного комплекса и на передний ход за счет использования профилей лопастей гребного винта с повышенной кривизной. В традиционном движительном комплексе использование таких профилей невозможно из-за резкого снижения тяговых характеристик заднего хода.

Финскими специалистами был выполнен большой объем модельных испытаний в ледовом бассейне в подтверждение эффективности и работоспособности предложенной концепции. В качестве примера можно привести результаты исследований, опубликованных в (Juutmaa et al., 2001). В этой работе приведены результаты испытаний танкера двойного действия, предназначенного для эксплуатации в Балтийском море. Эти исследования проводились в обеспечение проектирования танкеров типа «Мастера». На рис. 2 представлены полученные в результате проведения эксперимента кривые ледопроходимости при движении носом и кормой вперед.

Первоначальная идея судна двойного действия была реализована в небольшом количестве проектов, например, танкера дедвейтом 106 100 т «Мастера» и «Темпера», эксплуатирующиеся во льдах Финского залива. Эти суда достаточно хорошо себя зарекомендовали при движении в набитых и слегка смерзшихся ледяных каналах. В арктических условиях эти суда не применялись.

Суда двойного действия стали предметом активного изучения во многих ледовых бассейнах мира. В результате выполненных исследований было установлено, что крупнотоннажные суда с бульбовой носовой оконечностью практически не могут передвигаться передним ходом в сплошных льдах. Их предельная ледопроходимость обычно не превышает 20–25 см. Полная невозможность движения передним ходом в сплошных льдах еще допустима при эксплуатации судна на акваториях с относительно тонким ледяным покровом и при движении по каналам, проложенным во льдах. Для самостоятельного плавания в арктических условиях такие ограничения не приемлемы. По-видимому, это обстоятельство послужило причиной отказа от использования бульбовой носовой оконечности на судах двойного действия, предназначенных для эксплуатации в Арктике.

У судов двойного действия современной постройки (например, типа «Норильский никель» и типа «Василий Динков») носовая оконечность имеет ледокольную или умеренно ледокольную форму. Такая форма носовой оконечности позволяет этим судам работать во льдах как носом, так и кормой вперед. Указанные суда уже

несколько лет эксплуатируются в полярных морях, и этот факт является для многих обоснованием возможности применения технологии двойного действия в Арктике. В настоящее время существует целый ряд проектов крупнотоннажных судов двойного действия для арктического региона, которые должны обеспечить вывоз углеводородного сырья из мест его добычи, а также осуществлять транзитные перевозки в Арктике. Эти суда должны иметь ледокольную или умеренно ледокольную форму носовой оконечности. При этом предполагается, что в относительно тонких льдах толщиной до 1 м для достижения наилучших показателей ледовой ходкости судно должно двигаться носом вперед, а в более толстых — задним ходом (Цой и др., 2013).

Таким образом, можно констатировать, что за прошедшие 20 лет концепция судна двойного действия эволюционировала в сторону отказа от обеспечения хороших показателей ходкости судна на чистой воде. В ней осталось лишь обеспечение возможности движения задним ходом во льдах.

Ледовая ходкость и управляемость судов двойного действия. Одной из главных причин привлекательности судов двойного действия в качестве основного типа транспортного судна для Арктики, несомненно, являются высокие показатели их ледопроеходимости, которые усиленно пропагандируются на различных конференциях и симпозиумах. Хорошие характеристики ледовой ходкости подтверждаются обычно данными модельных экспериментов в ледовых бассейнах. Кроме этого, эксплуатация в Арктике судов двойного действия типа «Норильский никель» и «Василий Динков» создала иллюзию «ледокольной независимости» судов двойного действия (Смирнов, Головинский, 2014), т.е. возможности их успешного плавания в суровых ледовых условиях без ледокольной поддержки.

Также привлекательной является пропагандируемая повышенная маневренность судов двойного действия во льдах. В подтверждение этого тезиса обычно также ссылаются на данные натурных испытаний и модельный эксперимент.

Ледовое сопротивление. Результаты многочисленных модельных испытаний, выполненных в зарубежных ледовых бассейнах, показывают, что крупнотоннажные суда имеют очень хорошие показатели ледовой ходкости при движении кормой вперед. Эти показатели зачастую превышают соответствующие показатели атомных ледоколов. Например, по данным испытаний одного из ледовых бассейнов, крупнотоннажное судно, имеющее ширину корпуса около 50 м и мощность 45 МВт, может двигаться задним ходом со скоростью 2,4 узла во льдах толщиной 2,1 м. Атомный ледокол типа «Арктика», имеющий ширину корпуса 28 м и мощность 55 МВт, имеет предельную ледопроежимость 2,1–2,2 м на скорости 2 узла. Для сравнения этих двух судов можно использовать показатель N/B , где N — мощность, B — ширина корпуса, который часто применяется для этой цели. Его значения, определенные примерно для одинаковых толщин льда и скорости движения, составляют для крупнотоннажного судна 0,9 МВт/м, а для ледокола 1,96 МВт/м. Таким образом, получается, что на разрушение одного погонного метра льда ледокол затрачивает в 2 раза большую мощность.

Можно указать две возможные причины, благодаря которым может наблюдаться снижение ледового сопротивления крупнотоннажного судна по сравнению с ледоколом:

- лыжеобразная, вплоть до понтонообразной, форма кормовой оконечности, включающая уменьшенный угол наклона ахтерштевня по сравнению с углом наклона форштевня ледокола;

– омывание корпуса судна струями от движителей, которое приводит к очистке подводной части корпуса от притопленного им льда. При этом уменьшаются трение льда об обшивку корпуса, эффекты «подпора», связанные с увеличением разрушающего лед усилия из-за противодействия ему силы плавучести притопленных обломков, взаимодействующих с неразрушенным ледяным покровом.

Использование винто-рулевых колонок в качестве основного движительного комплекса потребовало внесения изменений в форму кормовой оконечности судов. Традиционная клинообразная корма с ярко выраженным ахтерштевнем не допускает размещение на ней поворотных колонок. В то же время лыжеобразная корма позволяет легко разместить на ней колонки таким образом, чтобы они не препятствовали поворотам. Эта же форма кормы допускает минимальный наклон ахтерштевня вплоть до 15–16°.

В ледоколостроении достаточно хорошо известно, что уменьшение угла наклона форштевня приводит к заметному снижению ледового сопротивления ледокола. Можно ожидать, что снижение угла наклона форштевня с 25 до 20° приведет к снижению ледового сопротивления примерно на 15 % (Сазонов, 2010).

Необходимо отметить, что картина разрушения ледяного покрова лыжеобразной формой отличается от таковой для традиционной клинообразной. Основное отличие заключается в том, что в районе диаметральной плоскости (под ахтерштевнем) образуется довольно большой сектор льда, который затем поворачивается и притапливается кормой. На рис. 3 представлена фотография такого сектора, полученная в одном из экспериментов в ледовом бассейне КГНЦ. Аналогичные образования наблюдаются и в других ледовых бассейнах (см., например, (Su et al., 2014)). Образование подобных обломков льда несколько снижает эффект от уменьшения угла наклона ахтерштевня.

Влияние на ледовое сопротивление омывающего действия струй от движителей уже давно и хорошо известно. На рис. 1 уже были представлены результаты расчетов движения ледокола с традиционной клинообразной формой корпуса носом и кормой вперед. На основании данных, представленных на этом рисунке, можно определить выигрыш, возникающий при омывании корпуса струями от винтов. Это результат получен для традиционного ледокола, длина которого составляет примерно 100 м.

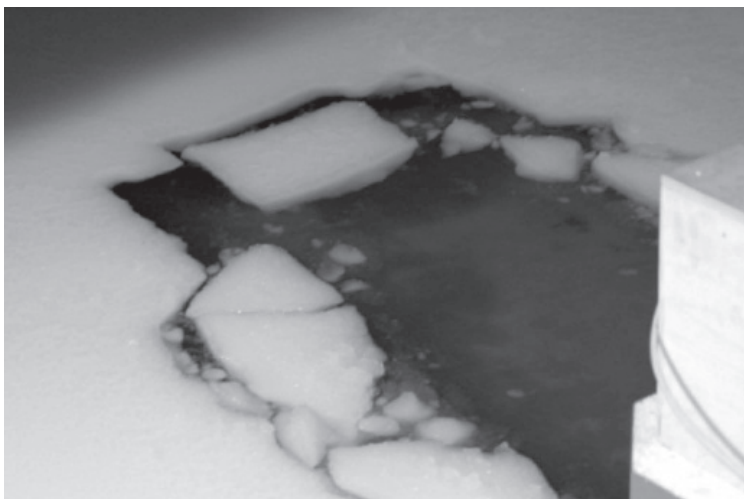


Рис. 3. Сектор льда, выламываемый кормовой оконечностью.

Возникает естественный вопрос: будет ли эффективен обмыв струями для судна, длина которого превышает 300 м? Соответствующие расчеты выполнялись в КГНЦ (Лобачев, Сазонов, 2005). Их результаты показали, что скорости в струе довольно быстро уменьшаются, поэтому эффект смыва обломков льда с подводной части корпуса может быть реализован только в непосредственной близости от места расположения движителей. Это означает, что эффективность обмыва корпуса струями для крупнотоннажного судна меньше, чем для относительно небольшого ледокола.

Подводя итог, можно констатировать, что указанные выше причины, несомненно, приводят к снижению ледового сопротивления при движении судна кормой вперед. Тем не менее если выполнить верхнюю оценку возможного снижения из-за них ледового сопротивления крупнотоннажного судна, движущегося задним ходом, то оно не может превысить 50–60 %. Указанного значения явно недостаточно для объяснения расхождения в показателях ледовой ходкости, которые были приведены выше.

Выше уже отмечалось, что высокие показатели ледовой ходкости были получены в основном на основании результатов экспериментов, выполненных в зарубежных ледовых бассейнах. Аналогичные эксперименты, проведенные в ледовых бассейнах КГНЦ, не подтверждают эти данные. По-видимому, расхождение в результатах объясняется различием применяемых в отечественных и зарубежных бассейнах экспериментальных методик определения ледового сопротивления с помощью моделей, оборудованных движителем. Модельные испытания на заднем ходу всегда проводят с работающими гребными винтами для имитации эффекта омывания корпуса струями от винтов. По мнению автора, одна из возможных причин, приводящих к неправильной оценке ледового сопротивления крупнотоннажного судна, двигающегося кормой вперед, заключается в следующем. При движении судна задним ходом практически постоянно происходит взаимодействие гребных винтов со льдом. В ходе этого взаимодействия изменяются тяговые характеристики движительного комплекса, при условии постоянства подводимой мощности в натурных условиях происходит неизбежное снижение частоты вращения гребного винта n . При этом характер изменения упора движителя не столь очевиден. При снижении частоты вращения гидродинамический упор уменьшается пропорционально n^2 , в то же время может возрастать ледовый упор, возникающий при взаимодействии гребного винта с притопленными льдинами. При проведении же модельного эксперимента обычно выполняется требование $n = const$, поэтому тяга движительного комплекса модели может увеличиваться.

Результаты расчетов для случая $n = const$, выполненных по методике, изложенной в работе (Сазонов, 2015), представлены на рис. 4. На этом рисунке показан характер изменения скорости движения самоходной модели судна в случае поддержания частоты вращения движителя постоянной. Из рисунка следует, что при любом уровне ледовой нагрузки на движитель происходит возрастание его тяговых характеристик, что, соответственно, приводит к увеличению скорости движения. Это обстоятельство необходимо учитывать при анализе данных модельных самоходных испытаний, особенно тех, в которых основной измеряемой величиной для определения ледового сопротивления является скорость движения модели.

Для исключения влияния этого эффекта при проведении испытаний в ледовом бассейне самоходных или буксируемых моделей с работающими гребными винтами необходимо проводить измерения упора движителей и вносить эти данные в схему обработки экспериментальной информации. Такая практика постоянно применяется в ледовом бассейне КГНЦ (Клементьева и др., 2010).

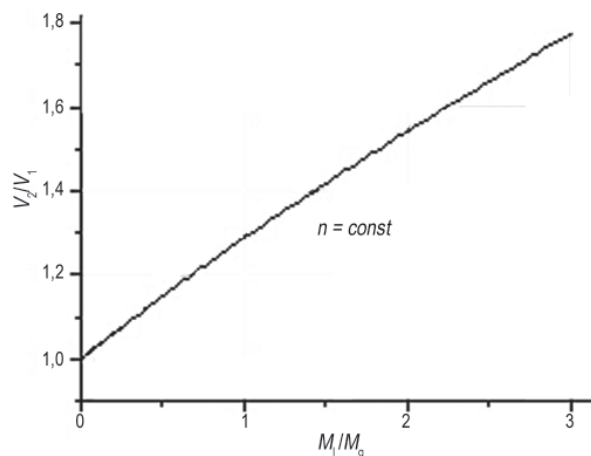


Рис. 4. Возрастание относительной скорости движения судна при наличии взаимодействия движителя со льдом и поддержании постоянной частоты его вращения: M_1 , M_g — ледовый и гидродинамический моменты на движителе соответственно; V_1 , V_2 — скорость движения модели при отсутствии взаимодействия движителей со льдом и при взаимодействии соответственно.

Ледовая управляемость. Повышенные характеристики ледовой управляемости крупнотоннажных судов двойного действия также часто приводятся в качестве аргумента в пользу их применения. Эти аргументы основываются на данных натурных и модельных испытаний. Обычно приводят график из работы финских специалистов (Wilkman et al, 2004), на котором ледовая поворотливость крупно-

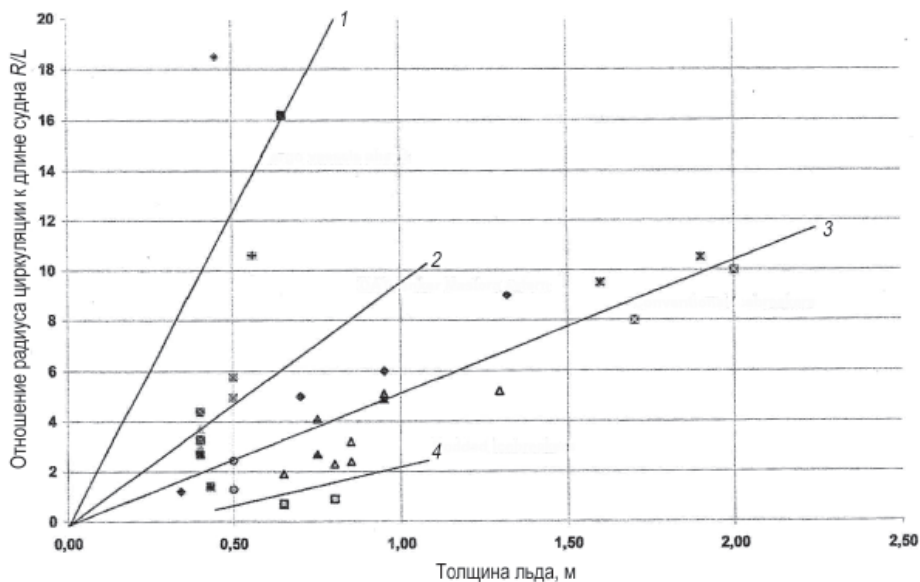


Рис. 5. Сравнение поворотливости ледоколов и судов, оснащенных винто-рулевыми колонками, с традиционными ледоколами и судами: 1 — грузовое судно при движении носом вперед; 2 — танкер двойного действия «Mastera» при движении кормой вперед; 3 — традиционные ледоколы; 4 — ледоколы с винто-рулевыми колонками.

тоннажных танкеров двойного действия сравнивается с ледовой поворотливостью ледоколов и других судов (рис. 5). На этом рисунке по оси абсцисс отложена толщина ровного льда, а по оси ординат относительный радиус циркуляции судна. На графике приведено четыре кривых, характеризующих поворотливость ледоколов, оснащенных винто-рулевыми колонками, обычных ледоколов, танкеров двойного действия и обычных судов ледового плавания. При беглом взгляде на этот график создается впечатление, что суда, оснащенные винто-рулевыми колонками, имеют существенно лучшие показатели поворотливости, чем традиционные ледоколы и суда. Однако более детальный анализ этого графика показывает, что все результаты, относящиеся к судам с винто-рулевыми колонками, получены в относительно тонких льдах. Насколько хорошо этот новый перспективный тип движителя функционирует в тяжелых ледовых условиях, остается загадкой. Очевидно, что информация, содержащаяся на рис. 5, явно недостаточна для выполнения серьезного анализа характеристик ледовой управляемости судов.

Результаты модельных испытаний, выполненных в ледовом бассейне Гамбурга и приведенные в работе (Цой и др., 2013), вызывают сомнения. В соответствии с ними газовоз шириной около 50 м и длиной более 300 м, оборудованный тремя винто-рулевыми колонками, имеет относительный радиус циркуляции $R/L = 4$ во льдах толщиной, несколько превышающей 1,5 м. По утверждению авторов статьи, это значение «находится на уровне маневренности во льдах ледоколов, оборудованных двумя ВРК» (нижняя прямая на рис. 5). Результаты теоретических и экспериментальных исследований (Сазонов, 2006) показывают, что увеличение длины корпуса и, особенно, цилиндрической вставки приводит к существенному увеличению радиуса циркуляции, поэтому столь низкое его значение, полученное для относительно толстого льда, следует считать некорректным. Более разумные, на наш взгляд, результаты получены в том же эксперименте для модели газовоза, имеющего другой винто-рулевой комплекс (два бортовых ВРК и средний традиционный винт), его относительный радиус циркуляции составляет $R/L = 12$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрение ледовой ходкости и управляемости судов двойного действия, выполненное в данной статье, позволяет сделать следующие выводы.

1. Со времени своего появления в 90-х гг. прошлого века технология использования судов двойного действия претерпела существенные изменения. К настоящему времени практически оставлены попытки создания классических судов двойного действия, имеющих предназначенную для движения на чистой воде носовую оконечность, оснащенную бульбом. Все эксплуатируемые в Арктике и проектирующиеся суда имеют умеренную или усиленную ледокольную форму носовой оконечности. Таким образом, можно констатировать, что идея создания универсального транспортного судна, обладающего одинаково хорошими характеристиками ходкости как на чистой воде, так и в ледовых условиях потерпела крах.

2. Тем не менее до сих пор многие специалисты считают, что движение крупнотоннажного судна кормой вперед позволит ему не только совершать самостоятельные плавания во льдах без ледокольного обеспечения, но и позволит преодолевать льды, которые зачастую неподвластны ледоколам. По нашему мнению, это довольно опасное заблуждение, аналогичное мнению высказывают и специалисты «Атомфлота» (Смирнов, Головинский, 2014).

3. В работе показано, что при движении кормой вперед может достигаться эффект снижения ледового сопротивления. Указаны также причины, приводящие к этому снижению. Выполненный анализ показывает, что все эти причины не могут привести к анонсируемым показателям ледовой ходкости крупнотоннажных судов.

4. В работе указана возможная причина завышения показателей ледовой ходкости судов на основании анализа данных модельного эксперимента в ледовом бассейне.

5. В работе показано, что пропагандируемые повышенные характеристики ледовой управляемости крупнотоннажных судов при движении задним ходом также вызывают большие сомнения. Эти данные основываются исключительно на результатах модельных экспериментов в ледовых бассейнах. Ни одного подтверждающего эти выводы натурального эксперимента пока не существует.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Андрюченко В.Г. Ледокольный флот России, 1860-е – 1918 гг. М.: Европейские издания, 2009. 536 с.

Буравцев В.Ю., Сазонов К.Е. Способ сейсмической разведки на акваториях с ледяным покровом. А.С. № 1835938, СССР/ Гос. Реестр изобр. 13.10.1992.

Буравцев В.Ю., Гасельганц А.А., Майзель А.Б., Сазонов К.Е. Геофизический ледокол для поиска нефти и газа // Разведка и охрана недр. 1995. № 12. С. 26–29.

Дехтярук Ю.Д., Добродеев А.А., Сазонов К.Е. Некоторые вопросы создания морских транспортных систем для вывоза углеводородов из Арктики // Арктика: экология и экономика. 2013. № 2 (10). С. 84–91.

Игнатьев М.А. Гребные винты судов ледового плавания. Л.: Судостроение, 1966. 114 с.

Каשתелян В.И., Рывлин А.Я., Фаддеев О.В., Ягодкин В.Я. Ледоколы. Л.: Судостроение, 1972. 286 с.

Клементьева Н.Ю., Сазонов К.Е., Тарица Г.В., Штрамбранд В.И., Щербаков И.В. Сопоставление результатов модельных исследований различных вариантов перспективного ледокола мощностью 25 МВт // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2010. Вып. 51 (335). С. 207–218.

Кучиев Ю.С. Носовая оконечность ледокола со встроенным в корпус гребным винтом // Сб. тезисов III Международной выставки и симпозиума по судостроению, судоходству и разработке шельфа «Нева-93». СПб., 1993. С. 34.

Лобачев М.П., Сазонов К.Е. Исследование некоторых аспектов гидромеханики судов двойного действия // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2005. Вып. 24 (308). С. 89–98.

Сазонов К.Е. Ледовая управляемость судов. СПб.: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2006. 252 с.

Сазонов К.Е. Теоретические основы плавания судов во льдах. СПб.: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2010. 274 с.

Сазонов К.Е. Оценка изменений тяговых характеристик движительного комплекса судна,двигающегося задним ходом во льдах // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. 2015. № 38–39. С. 97–100.

Салми П. Геофизическое судно для ледовых условий чистой воды // Разведка и охрана недр. 1995. № 12. С. 29.

Смирнов А.А., Головинский С.А. Перспективы развития Северного морского пути (к 55-летию атомного ледокольного флота) // Арктика: экология и экономика. 2014. № 4 (16). С. 108–113.

Цой Л.Г., Андрюшин А.В., Штрек А.А. Обоснование основных параметров перспективных крупнотоннажных газовозов для Арктики // Проблемы Арктики и Антарктики. 2013. № 3 (97). С. 46–56.

Backstrom M., Juurma K., Wilkman G. New Icebreaking Tanker Concept for the Arctic (DAT). Proceeding of POAC 95, Murmansk, Russia. St. Petersburg, 1995. Vol. 4. P. 52–71.

Juurmaa K., Mattsson T., Wilkman G. The development of the new double acting ships for ice operation. Proceeding of POAC 01, Ottawa, Canada, 2001. Vol. 2. URL: <http://www.poac.com/PapersOnline.html> [дата обращения 20.09.2015].

Su B., Skjetne R., Berg T.E. Numerical assessment of a double-acting offshore vessel's performance in level ice with experimental comparison // Cold Regions Science and Technology. 2014. № 106–107. P. 96–109.

Wilkman G. et al. Full scale experience of double acting tankers (DAT) Mastera and Tempera // Proc. 17th Int. Symp. on Ice. St.-Petersburg, Russia, 2004. Vol. 1. P. 488–497.

K.E. SAZONOV

ON PROPULSION AND MANEUVERING PERFORMANCE OF LARGE-SIZE DOUBLE-ACTING VESSELS IN ARCTIC WATERS

The paper gives a brief overview of studies on ship operation in ice under the stern-first mode that preceded the development of double-acting ship technologies. The evolution of the double-acting concept from its inception till present time is analyzed. The paper provides a critical analysis of the claimed propulsion and maneuvering performance of large-size double-acting vessels. A possible source of errors in self-propulsion astern model tests in ice basins is described.

Keywords: large-size vessel, double-acting concept, propulsion in ice, maneuverability in ice, ice basin.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КИСЛОРОДА И ДЕФИЦИТА КИСЛОРОДА В АТЛАНТИЧЕСКИХ ВОДАХ В ЕВРАЗИЙСКОМ СУББАСЕЙНЕ СЕВЕРНОГО ЛЕДОВИТОГО ОКЕАНА

канд. хим. наук А.П. НЕДАШКОВСКИЙ¹, канд. геогр. наук Н.И. САВЕЛЬЕВА¹,
науч. сотр. О.А. МОРОЗОВА², д-р физ.-мат. наук Л.А. ТИМОХОВ²

¹— Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН,
г. Владивосток, e-mail: nealpa@mail.ru

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

Представлены результаты гидрохимических исследований, полученные во время дрейфа станций СП-34 и СП-35, а также океанографических наблюдений в высокоширотных арктических экспедициях 2005 и 2007 гг. Исследована изменчивость растворенного кислорода и дефицита кислорода в ядре атлантической водной массы (АВМ) в Евразийском суббассейне. Распределение кислорода в ядре АВМ характеризуется практически постоянным его содержанием в котловинах Амундсена и Нансена и над хребтом Гаккеля. Вертикальное распределение кислорода в котловинах характеризуется минимумом в ядре атлантических вод.

Показано, что в исследуемом районе между температурой воды в ядре АВМ и дефицитом кислорода существует зависимость, а именно: с уменьшением температуры воды дефицит кислорода увеличивается. Наименьший дефицит кислорода наблюдается в АВМ, поступающей из пролива Фрама в котловину Нансена. Вдоль Евразийского материкового склона дефицит кислорода в ядре АВМ увеличивается, и наибольшее его значение имеют возвратные атлантические воды в котловине Амундсена. Обсуждаются возможные сценарии, объясняющие трансформацию характеристик ядра АВМ, распространяющейся вдоль хребта Ломоносова.

Дефицит кислорода в ядре АВМ имеет значимые вариации величин в котловинах Нансена и Амундсена и в отличие от величины растворенного кислорода, изменчивость которого невелика, может служить хорошим индикатором трансформации и циркуляции атлантических вод в Евразийском суббассейне.

Ключевые слова: Северный Ледовитый океан, Евразийский суббассейн, атлантическая водная масса, кислород, дефицит кислорода.

ВВЕДЕНИЕ

Особенностью гидрологической структуры глубоководной части Северного Ледовитого океана (СЛО) является наличие теплого слоя на глубинах 150–900 м, который идентифицируется как атлантическая водная масса (АВМ). Атлантические воды проникают в СЛО в виде двух ветвей, входящих в Евразийский суббассейн: непосредственно через пролив Фрама (фрамовская ветвь) и транзитом через Баренцево и Карское моря (баренцевоморская ветвь), взаимодействие которых определяет характеристики АВМ в Арктическом бассейне (Панов, Шпайхер, 1963; Тимофеев,

1957; Aagaard et al., 1985; Rudels, 2001; Schauer et al., 2002). Интерес к изучению АВМ обусловлен тем, что последняя оказывает значительное влияние на климат полярных областей (Купецкий, 1959; Трешников, Баранов, 1972; Шпайхер, 1967).

В исследованиях, ведущихся в этом направлении, анализируются в основном термохалинные характеристики и в значительно меньшей степени рассматриваются гидрохимические параметры. В настоящей работе для анализа процессов трансформации и циркуляции вод атлантического происхождения в Северном Ледовитом океане использованы два важнейших из гидрохимических параметров — концентрация растворенного кислорода (O_2) и дефицит кислорода (dO_2), являющийся разностью между концентрацией насыщения O_2 и наблюдаемой концентрацией O_2 . Концентрация растворенного кислорода хотя и не является консервативной величиной, но чрезвычайно полезна для понимания динамических процессов в океане (Иванов, 1978). Дефицит кислорода в определенных случаях, как показано в статье, имеет преимущества для анализа: параметр dO_2 в значительной степени устраняет вариации, обусловленные зависимостью растворимости O_2 от температуры.

ДАННЫЕ НАБЛЮДЕНИЙ

Материал, используемый в работе, получен в 23-м рейсе НЭС «Академик Федоров» в августе–сентябре 2005 г. (далее Федоров-23), во время дрейфа станции СП-34 в 2005–2006 гг., в 26-м рейсе НЭС «Академик Федоров» в августе–сентябре 2007 г. (далее Федоров-26) и на дрейфующей станции СП-35 в 2007–2008 гг. Схема расположения станций показана на рис. 1. Наряду со станциями, выполненными

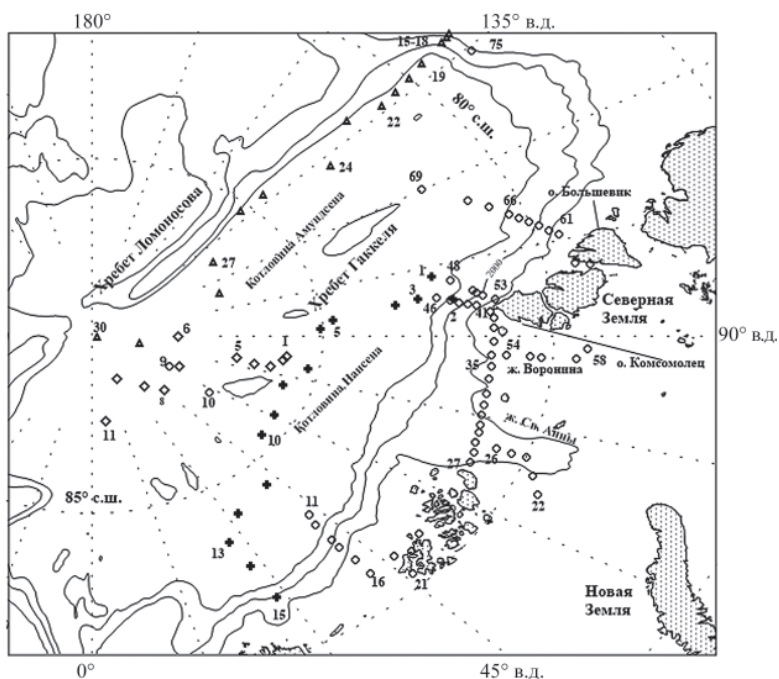


Рис. 1. Схема расположения станций. На рисунке цифрами отмечены номера станций; станции экспедиции Федоров-23 обозначены треугольниками, экспедиции СП-34 — ромбиками, экспедиции СП-35 — крестиками и экспедиции Федоров-26 — кружками.

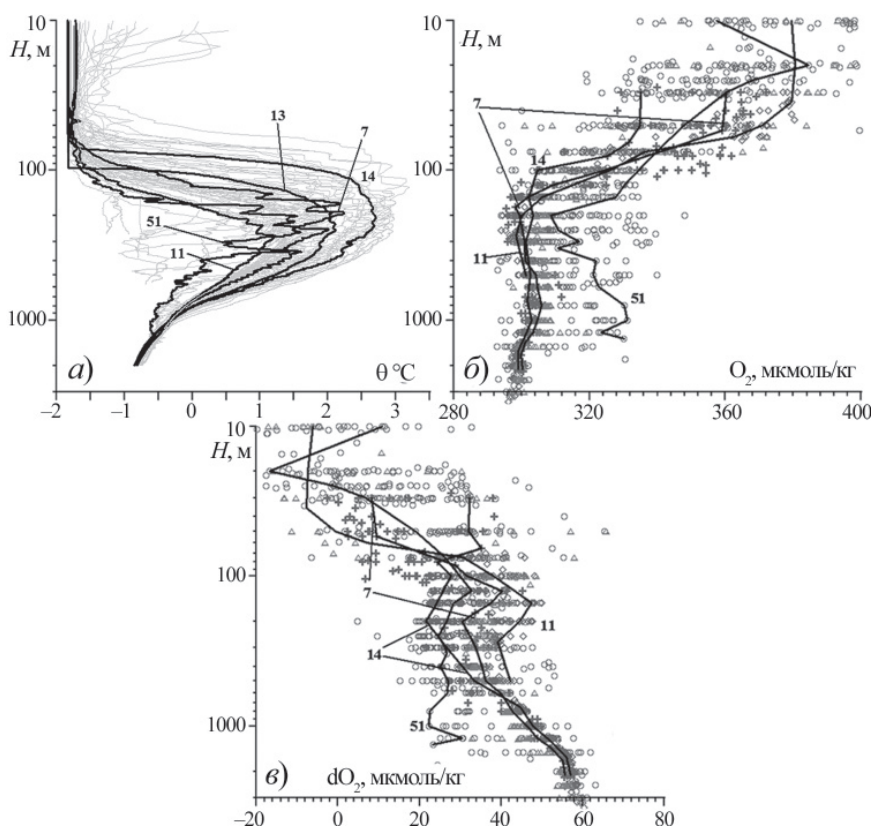


Рис. 2. Вертикальная изменчивость потенциальной температуры θ (а), концентрации кислорода O_2 (б) и дефицита кислорода dO_2 (в) на исследуемой акватории.

Данные экспедиции Федоров-23 обозначены треугольниками, экспедиции СП-34 – ромбиками, экспедиции СП-35 – крестиками и экспедиции Федоров-26 – кружками. Цифры соответствуют номерам станций в экспедициях: 51 — Федоров-26; 11 — СП-34; 7, 13, 14 — СП-35.

непосредственно в Евразийском суббассейне, в работе рассматриваются станции, выполненные в прилегающих акваториях морей Баренцева, Карского и Лаптевых, процессы в которых оказывают заметное влияние на характеристики вод котловин (Иванов, Аксенов, 2013; Rudels et al., 2000a).

Пробы воды отбирались батометрами Нискина. Концентрация растворенного кислорода определялась методом Винклера (Современные методы, 1992) с помощью цифровой бюретки Vitlab E-continius (Германия). Ошибка определения растворенного кислорода составляет 1 мкмоль/кг.

Общий характер вертикальной изменчивости потенциальной температуры, O_2 и dO_2 показан на рис. 2. Ядро АВМ хорошо выделяется на станциях, расположенных в котловинах Нансена и Амундсена, по максимуму температуры (рис. 2а). На большинстве станций в слое атлантических вод наблюдаются зигзагообразные структуры в распределении температуры (Carmack et al., 1997), особенно выраженные над материковым склоном (ст. 51, рис. 2а). Средняя потенциальная плотность в ядре составляет $27,88 \pm 0,02$.

Для станций, расположенных на шельфе и над материковым склоном, на которых теплый промежуточный слой выражен неотчетливо или имеет плотность, отличную

от приведенной выше, использовались характеристики, находящиеся в пределах той же плотности, что и в ядре АВМ в глубоководной области ($27,88 \pm 0,02$). На этих станциях инверсия температуры наблюдается в слое с отрицательной температурой воды. Точки с наиболее низкой температурой соответствуют холодным плотным водам, наблюдаемым главным образом в желобе Воронина.

Вертикальное распределение кислорода (рис. 2б) в котловинах Нансена и Амундсена однотипно и характеризуется минимумом в ядре атлантических вод, связанным, по-видимому, с уменьшением растворимости O_2 с ростом температуры. Величина концентрации кислорода в ядре АВМ в котловинах лежит в интервале 296–308 мкмоль/кг. Наибольшие вариации O_2 в пределах 320–400 мкмоль/кг наблюдаются в поверхностной структурной зоне на глубинах 10–150 м. На станциях, расположенных на шельфе и в желобах Св. Анны и Воронина, высокая изменчивость кислорода наблюдается на всех горизонтах. В глубинных водах изменения кислорода незначительны, в частности, на горизонте 2000 м концентрация кислорода составляет 299 ± 1 мкмоль/кг и с ростом глубины изменяется мало.

Вертикальное распределение дефицита кислорода (рис. 2в) в котловинах на большинстве станций характеризуется максимумом в верхнем пикноклине (глубины 20–80 м). В ядре АВМ дефицит кислорода имеет минимум. Значения dO_2 в ядре АВМ лежат в интервале 19–40 мкмоль/кг, с глубиной они монотонно увеличиваются, достигая наибольших значений в глубинных водах. На горизонте 2000 м дефицит кислорода составляет 57 ± 2 мкмоль/кг и с ростом глубины, как и кислород, меняется слабо. Максимум в верхнем пикноклине обусловлен, на наш взгляд, особенностями его формирования, в котором участвуют воды шельфового происхождения с высоким dO_2 вследствие расходования кислорода на окисление органического вещества, концентрация которого выше, чем в нижележащих водах. На шельфе и в желобах Св. Анны и Воронина высокая изменчивость dO_2 наблюдается на всех горизонтах.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Географическое распределение кислорода (на рисунке не показано) характеризуется практически постоянным его содержанием в котловинах и над хребтом Гаккеля. Концентрация кислорода возрастает в районе желобов Св. Анны, Воронина и шельфа, где наблюдаются отрицательные температуры.

На рис. 3а, б представлены пространственные распределения потенциальной температуры и дефицита кислорода в ядре АВМ на рассматриваемой акватории. На рисунке видно, что наиболее высокие температуры и минимальный дефицит кислорода наблюдаются в водах над материковым склоном от Шпицбергена до о-вов Северной Земли. В этой области распространяются переносимые пограничным течением теплые атлантические воды фрамовской ветви (Rudels, 2001).

В котловине Амундсена распределение температуры и dO_2 достаточно однородно, здесь же наблюдаются наименьшие температуры и наибольший дефицит кислорода в ядре АВМ в Евразийском суббассейне. Наибольшая пространственная изменчивость температуры и dO_2 наблюдается в котловине Нансена, в районе желобов Св. Анны и Воронина. На шельфе и главным образом в желобе Воронина температура воды в слое инверсии имеет отрицательное значение. При этом с уменьшением температуры дефицит кислорода увеличивается. Отметим, что в желобе Воронина отрицательные температуры формируются вследствие поступления в этот район сильно трансформированных баренцевоморских вод (Иванов, Аксенов, 2013; Schauer et al., 2002). В дальнейшем эти воды обозначим как холодные воды Баренцева моря (ХВБ).

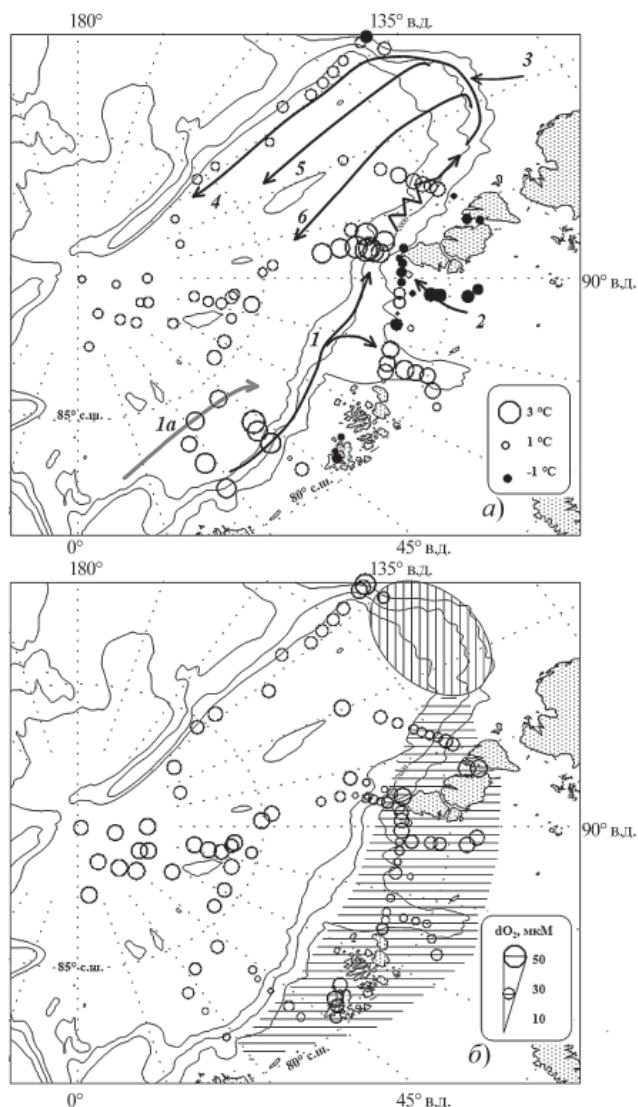


Рис. 3. Распределения потенциальной температуры (а) и дефицита кислорода (б) в ядре АВМ на рассматриваемой акватории СЛО.

На рис. 3а черными кружками обозначена отрицательная температура, белыми — положительная. Стрелки показывают схему распространения и трансформирования атлантических вод (Rudels, 2001; Rudels et al., 2013): 1 — фрамовская ветвь атлантических вод; 1а — предполагаемое распространение Ермаковской ветви Западно-Шпицбергенского течения (Manly, 1995; Saloranta, Naugan, 2001); 2 — холодные плотные воды Баренцева моря (трансформированные воды баренцевоморской ветви); 3 — холодные плотные воды шельфа моря Лаптевых; 4, 5, 6 — возвращение трансформированных атлантических вод из Евразийского суббассейна в пролив Фрама.

На рис. 3б горизонтальными линиями выделена область взаимодействия теплых вод из пролива Фрама и трансформированных вод баренцевоморской ветви. Вертикальными линиями выделена область трансформирования АВМ холодными плотными водами моря Лаптевых.

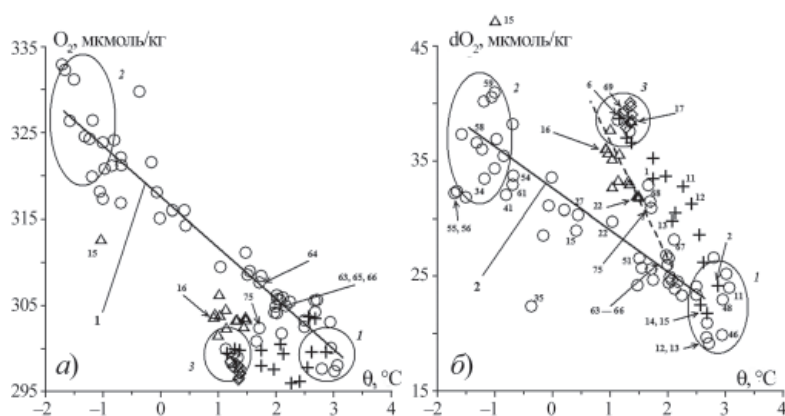


Рис. 4. Зависимость кислорода (а) и дефицита кислорода (б) в ядре АВМ от потенциальной температуры.

Треугольники — Федоров-23, ромбики — СП-34, кружки — Федоров-26, крестики — СП-35. Эллипсы соответствуют: 1 — атлантическим водам, входящим с фрамовской ветвью и распространяющимся в пограничном течении до о. Комсомолец; 2 — плотным холодным водам Баренцева моря; 3 — водам внутри котловины Амундсена. Цифры — номера станций.

Для детального анализа изменчивости O_2 и dO_2 исследуем тесноту связи между θ и O_2 и между θ и dO_2 для ядра АВМ. На рис. 4 приведены поля точек в координатах $\theta - O_2$ и в координатах $\theta - dO_2$. На обоих рисунках выделяются группы точек, между характеристиками которых наблюдается линейная корреляция: прямая линия 1 на рис. 4а и прямая линия 2 на рис. 4б. Точки, расположенные вдоль этих прямых, соответствуют станциям на шельфе, в желобах и над склоном от Шпицбергена до шельфа моря Лаптевых. Область точек с наиболее высокой температурой, ограниченная эллипсом 1, соответствует станциям, расположенным от Шпицбергена до островов Северной Земли вдоль пограничного течения, переносящего теплые атлантические воды. Точки с наиболее низкой температурой (выделены эллипсом 2) соответствуют ХВБ, наблюдаемым в желобе Воронина (рис. 3а). ХВБ имеют высокое содержание O_2 , обусловленное повышением его растворимости при понижении температуры. В то же время dO_2 в ХВБ выше, чем в атлантических водах, поступающих в котловину Нансена, что может объясняться увеличенным расходом O_2 на окисление органического вещества, созданного в Баренцевом море.

Коэффициенты корреляции, r , в рассматриваемых массивах ($n = 49$) составляют между θ и O_2 $r = -0,96$ и между θ и dO_2 $r = -0,91$, что свидетельствует о тесной связи между параметрами. Можно предположить, что на шельфе Баренцева моря, в желобах Св. Анны и Воронина, над материковым склоном от Шпицбергена до моря Лаптевых (участок, заштрихованный горизонтальными линиями на рис. 3б) изменение O_2 и dO_2 в ядре АВМ происходит благодаря смещению фрамовской ветви атлантических вод и ХВБ в результате бокового перемешивания (Кириллов, 2008), о чем свидетельствуют ярко выраженные зигзагообразные структуры в вертикальном распределении температуры (рис. 2а). В ходе рассматриваемого смешения вод кислород ведет себя преимущественно как консервативный параметр.

Рассмотрим характеристики вод на разрезе от о. Большевик (Северная Земля) в северо-северо-восточном направлении (рис. 1, ст. 61–69), который пересекает поток пограничного течения, распространяющегося с запада на восток. Теплое ядро этого

потока ограничено станциями 63–66. Индексы dO_2/θ , лежащие на линии смешения и соединяющей области 1 и 2 (рис. 4б), отличаются незначительно. Это позволяет сделать вывод о том, что трансформация теплой фрамовской ветви, вызванная смешением с ХВБ, на выходе из района, прилегающего к Северной Земле, практически завершена, поскольку полностью охватывает всю струю пограничного течения.

Дальнейшее изменение химических характеристик ядра атлантических вод, переносимых пограничным течением, продолжается вдоль склона моря Лаптевых. Трансформация ядра АВМ в этом районе, по-видимому, также обусловлена боковым перемешиванием с холодными плотными шельфовыми водами. Наши наблюдения показывают, что воды на границе шельфа моря Лаптевых (ст. 15–17, Федоров-23, рис. 1, 4б) при равной температуре имеют заметно больший дефицит кислорода, чем ХВБ. Это вызвано, на наш взгляд, влиянием стока Лены, Хатанги, а также вод Оби и Енисея, поступающих через пролив Вилькицкого, несущих значительное количество органического вещества (Романкевич, Ветров, 2001), на окисление которого расходуется больше кислорода. По причине перемешивания с этими шельфовыми водами атлантические воды, покидающие склон моря Лаптевых (см. ст. 75, Федоров-26; ст. 19–21, Федоров-23, рис. 1, 4б), при равной температуре имеют dO_2 заметно выше, чем атлантические воды, трансформированные смешением с ХВБ.

Пограничное течение атлантических вод на востоке склона моря Лаптевых разделяется на две ветви, одна из которых распространяется далее в Американо-Азиатский суббассейн, другая начинает возвратное движение в пролив Фрама вдоль хребта Ломоносова (рис. 3а, стрелка 4; см. Rudels, 2001). Этим водам соответствуют точки, обозначенные треугольниками, расположенные вдоль штриховой линии на рис. 4б. Изменение dO_2/θ индексов в ядре АВМ продолжается вдоль траектории их дальнейшего движения по мере удаления от склона моря Лаптевых вдоль хребта Ломоносова. Это хорошо видно на рис. 5, где представлена изменчивость dO_2 и θ в ядре АВМ на всем протяжении пограничного течения от Шпицбергена до хребта Ломоносова и далее в возвратной ветви этого течения вдоль хребта Ломоносова (рис. 3а, стрелки 1 и 4). Если в районе Северной Земли и склона моря Лаптевых падение температуры и рост dO_2 может объясняться, как показано выше, перемешиванием с холодными плотными водами, поступающими с шельфа, то для атлантических вод, распространяющихся вдоль хребта Ломоносова, объяснение изменчивости θ и dO_2 в ядре АВМ не столь однозначно. Обсудим возможные сценарии, объясняющие трансформацию характеристик ядра АВМ, распространяющейся вдоль хребта Ломоносова.

Первая гипотеза основана на предположении, что после того, как атлантические воды, распространяющиеся в северном направлении вдоль хребта Ломоносова (от ст. 22 и далее, рис. 1), покинули район прямого взаимодействия с шельфовыми водами, их дальнейшая изменчивость обусловлена только вертикальным обменом с вышележащими и глубинными водами. Примем в качестве начальных характеристик атлантических вод характеристики в ядре на ст. 22 (Федоров-23): соленость $S = 34,87$ psu, температуру атлантической воды $\theta = 1,465$ °C и содержание кислорода $O_2 = 324$ мкмоль/кг. Для вышележащих вод используются средние характеристики на горизонте 100 м: $S = 34,1$ psu, $\theta = -1,5$ °C, $O_2 = 326$ мкмоль/кг. Для глубинных вод взяты средние характеристики на горизонте 1000 м: $S = 34,88$ psu, $\theta = -0,36$ °C, $O_2 = 307$ мкмоль/кг. По данным температуры и солености из треугольника смешения (Тимофеев, Панов, 1962) нами определены доли компонентов смешиваемых водных масс в ядре АВМ, которые использованы для рас-

чета концентрации кислорода в предположении его консервативного поведения. Расчет показал, что при сделанных допущениях дефицит кислорода в ядре АВМ в ходе ее трансформации растет, что обусловлено более высоким дефицитом кислорода вышележащих и особенно глубинных вод. Но, поскольку измеренная концентрация кислорода меньше рассчитанной, дополнительный вклад в рост dO_2 , по нашему мнению, дает биохимическое потребление кислорода (БПК).

Приняв скорость распространения ядра атлантических вод вдоль хребта Ломоносова 1,3 см/с (Woodgate et al., 2001), получим время распространения атлантических вод от ст. 22 до ст. 30 (рис. 5), расположенной в конце возвратной ветви атлантических вод, $\sim 2,6$ года. При таких допущениях наша оценка годового БПК в ядре АВМ составляет $0,7 \pm 0,4$ мкмоль/(кг·год). Полученная величина слабо зависит от выбора принятых в расчете характеристик компонентов водных масс, смешивающихся с ядром атлантического слоя. В то же время для Канадской котловины ($85,8^\circ$ с.ш. и $108,8^\circ$ з.д.) оценка БПК в холодном галоклине составляет 3 мкмоль/(кг·год) (Wallace, Moore, Jones, 1987), что в 4 раза выше нашей оценки. Поскольку в Канадской котловине БПК определен, во-первых, на меньшей глубине (~ 150 м), во-вторых, в районе, где распространяются воды из высокопродуктивных Берингова и Чукотского морей, наша оценка БПК выглядит реальной. Поэтому вдоль хребта Ломоносова дефицит кислорода в ядре АВМ в ходе ее трансформации может быть связан с биохимическим потреблением кислорода.

Вторая гипотеза основывается на следующем положении. Поток, идущий вдоль хребта Ломоносова на север, несет как относительно теплые атлантические воды, наблюдаемые на ст. 75 ($\theta = 1,7^\circ\text{C}$; $dO_2 = 31$ мкмоль/кг) и распространяющиеся в за-

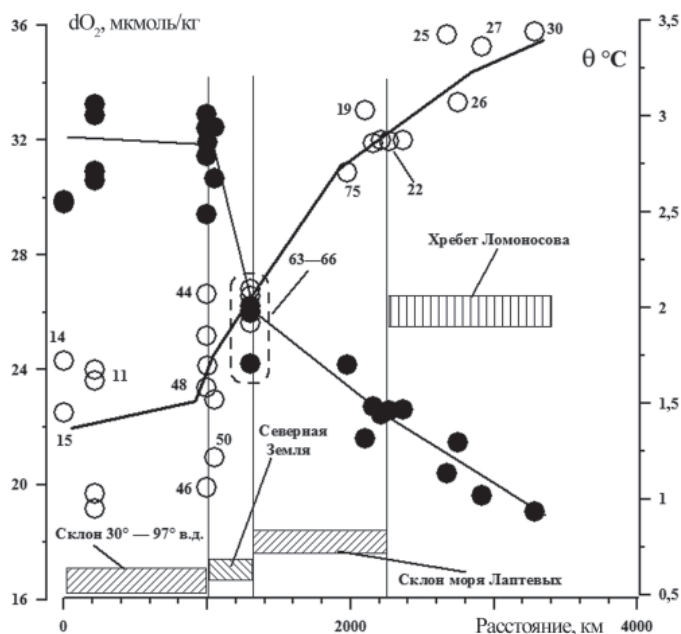


Рис. 5. Изменение dO_2 и θ в ядре АВМ в Евразийском суббассейне вдоль материкового склона и хребта Ломоносова.

Цифры — номера станций. Заштрихованные прямоугольники — районы, вдоль которых проходят атлантические воды. Белые кружки — dO_2 , черные кружки — потенциальная температура.

падной части течения, так и холодные воды шельфа моря Лаптевых с более высоким дефицитом кислорода, движущиеся на восточной периферии течения. В этом случае трансформация АВМ за счет бокового перемешивания может продолжаться и после того, как возвратная ветвь атлантических вод покинула склон моря Лаптевых.

Результатом должен быть рост дефицита кислорода и падение температуры в северном направлении. Данное предположение подтверждает тот факт, что точки, соответствующие АВМ, распространяющейся вдоль хребта Ломоносова (рис. 4б), лежат вдоль прямой (штриховая линия), соединяющей области значений $\theta - dO_2$ вод, поступающих в море Лаптевых (ст. 63–66, Федоров-26), и упоминаемых выше холодных шельфовых вод моря Лаптевых (ст. 15–17, Федоров-23).

Третья гипотеза объясняет трансформацию характеристик ядра на основе временной изменчивости температуры атлантических вод, поступающих через пролив Фрама. В работе (Polyakov et al., 2005) приводятся данные о резком потеплении ядра атлантических вод в 2004 г. на склоне моря Лаптевых, объясняемом распространением теплого импульса атлантических вод из пролива Фрама. Воды, наблюдаемые нами на последних станциях разреза вдоль хребта Ломоносова в 2005 г., должны были находиться на шельфе моря Лаптевых в 2003 г., т.е. до потепления, что может объяснять их пониженную температуру и, видимо, иные гидрохимические характеристики.

Таким образом, однозначного ответа на вопрос о причинах уменьшения температуры и роста дефицита кислорода возвратной ветви атлантических вод в настоящее время получить не удастся. Учитывая изложенное, полученную нами оценку БПК можно, вероятно, считать верхним пределом этой величины. В таком случае консервативность кислорода в ядре АВМ, наблюдаемая при распространении атлантических вод от Шпицбергена до хребта Ломоносова, получает простое объяснение. Мы оценили время, в течение которого атлантические воды, переносимые пограничным течением, распространяются от Шпицбергена до хребта Ломоносова, используя скорость пограничного течения, взятую из работы (Pnyushkov et al., 2013). Полученная нами оценка времени адвекции составляет $\sim 1,5$ года. За такой промежуток времени расход кислорода на окисление органического вещества может лишь незначительно превысить ошибку его измерения.

Наиболее высокий дефицит кислорода в ядре АВМ (39 ± 1 мкмоль/кг, область, ограниченная эллипсом 3, рис. 4б) наблюдается главным образом в северной части котловины Амундсена. В котловине Амундсена атлантические воды возвращаются в пролив Фрама (Rudels, 2001). По гидрологическим наблюдениям скорость их адвекции меньше, чем вдоль хребта Ломоносова (Rudels et al., 2013). Оценка возраста вод, выходящих из котловины Амундсена вблизи хребта Гаккеля, выполненная ранее (Wallace et al., 1992) по соотношению T^3/He , дает возраст атлантических вод 13–15 лет. Для вод, входящих в Арктический бассейн, этот возраст (по тем же оценкам) $\sim 2,5$ года. Принимая время распространения атлантических вод от Шпицбергена до склона моря Лаптевых в 1,5 года (по нашей оценке, приведенной выше), получим, что адвекция атлантических вод в котловине Амундсена от склона моря Лаптевых до станций, выполненных на СП-34 в приполосном районе котловины Амундсена (ст. 8–11, рис. 1), займет ~ 10 лет, что значительно больше времени адвекции вдоль хребта Ломоносова. Следовательно, высокие величины dO_2 в ядре АВМ, наблюдаемые нами в котловине Амундсена, могут быть следствием большого времени адвекции, в течение которого dO_2 увеличивается за счет продолжительного вертикального перемешивания и окисления органического вещества.

В правой части поля точек на рис. 4б правее штриховой линии наблюдается значительное увеличение dO_2 с уменьшением температуры, примерно в 2 раза более резкое, чем вдоль прямой 2. В этой области лежат точки, соответствующие станциям в интерьере котловины Нансена и над хребтом Гаккеля, вдоль которого со стороны котловины Нансена атлантические воды также возвращаются в пролив Фрама, как показано на рис. 3а. Поскольку эти воды распространяются от склона моря Лаптевых, они изначально имеют более высокий dO_2 , чем атлантические воды, переносимые пограничным течением из пролива Фрама (прямая ветвь). В ходе дальнейшего распространения дефицит кислорода в ядре этих возвратных вод, как и в котловине Амундсена, может только возрастать. Наличие прямой и возвратной ветвей атлантических вод в котловине Нансена приводит к возникновению переходной зоны между атлантическими водами с низким dO_2 , переносимыми в восточном направлении пограничным течением, и возвратными атлантическими водами с высоким dO_2 . Это объясняет наблюдаемую зависимость $\theta - dO_2$.

Сравнение зависимостей $\theta - O_2$ и $\theta - dO_2$, представленных на рис. 4, показывает, что первая менее информативна, поскольку в ней тесная связь между изменчивостью кислорода и потенциальной температурой имеет место только в шельфовой области и желобах, в то время как в собственно Евразийском суббассейне изменчивости O_2 от θ не наблюдается.

Заметные температурные вариации в ядре АВМ, наблюдаемые на станциях в центральной части котловины Нансена, на наш взгляд, связаны с генезисом этих вод, которые поступают в этот район после пребывания над материковым склоном, где они подвергаются трансформации в результате процессов, упомянутых ранее. Исключением являются станции 11–13, СП-35 (рис. 1), где температурные неоднородности в ядре АВМ составляют менее 0,1 °С, практически как у атлантических вод фрамовской ветви, входящей в котловину Нансена (температурный профиль ст. 13, СП-35, для примера показан на рис. 2а). На основании этого можно считать, что на ст. 11–13 экспедиции СП-35 также наблюдаются атлантические воды, поступающие в котловину Нансена из пролива Фрама. Согласно (Manly, 1995; Saloranta, Naugan, 2001) теплые атлантические воды из пролива Фрама проникают в котловину Нансена двумя ветвями: Свалбардской, распространяющейся близко к материковому склону, и Ермакской, распространяющейся над плато Ермака и северо-западнее его, которые затем объединяются. Отличие Ермакской ветви от Свалбардской заключается в том, что атлантические воды Ермакской ветви подвергаются значительному вертикальному перемешиванию, уменьшающему температуру в ядре. По-видимому, воды Ермакской ветви наблюдаются на ст. 11–13. Однако в нашем случае ядро АВМ на ст. 11–13 характеризуется не только меньшей температурой, по сравнению с температурой атлантических вод, входящих в котловину Нансена вдоль склона, но и имеет $dO_2 \sim$ на 9 мкмоль/кг больше, причем повышенный дефицит кислорода невозможно объяснить изменением характеристик ядра атлантических вод за счет вертикального перемешивания. На наш взгляд, повышенный дефицит кислорода в ядре АВМ на ст. 11–13 может быть обусловлен тем, что атлантические воды, переносимые Ермакской ветвью, модифицированы за счет перемешивания на западной периферии Западно-Шпицбергенского течения с водами, поступающими в пролив Фрама из котловины Амундсена, которые, как показано выше, характеризуются высоким dO_2 . Подобная возможность для глубинных водных масс рассматривается в работе (Rudels et al., 2000).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Географическое распределение кислорода в ядре АВМ характеризуется практически постоянным его содержанием в котловинах Амундсена и Нансена и над хребтом Гаккеля. Концентрация кислорода возрастает в районе желобов Св. Анны, Воронина и шельфа, где наблюдаются отрицательные температуры воды.

Вертикальное распределение кислорода в котловинах характеризуется минимумом в ядре атлантических вод. Величина концентрации кислорода в ядре АВМ в котловинах лежит в интервале 296–308 мкмоль/кг.

Вертикальное распределение dO_2 в котловинах характеризуется ярко выраженным максимумом в верхнем слое пикноклина и минимумом в ядре АВМ. Наибольших величин дефицит кислорода достигает в глубинных водах. В ядре АВМ наименьший dO_2 (23 ± 1 мкмоль/кг) наблюдается в атлантических водах, входящих из пролива Фрама в котловину Нансена. В ходе последующего распространения вдоль Евразийского материкового склона дефицит кислорода в ядре атлантических вод увеличивается в результате изопикнического перемешивания с холодными плотными водами шельфа с высоким dO_2 . Зависимость $\theta - dO_2$ для трансформированного ядра АВМ определяется генезисом шельфовых вод. Перемешивание с шельфовыми водами моря Лаптевых увеличивает дефицит кислорода в ядре АВМ больше, чем перемешивание с шельфовыми водами баренцевоморского происхождения. Это происходит потому, что в формировании первых участвуют воды Лены, Хатанги, а также Оби и Енисея, поступающие через пролив Вилькицкого, несущие значительное количество органического вещества, на окисление которого расходуется больше кислорода.

Вертикальное перемешивание, вклад которого наиболее значим внутри котловин, также увеличивает dO_2 в ядре АВМ за счет вклада вод верхнего пикноклина и особенно глубинных вод, имеющих более высокий dO_2 .

Наибольший дефицит кислорода в Евразийском суббассейне имеют возвратные атлантические воды в котловине Амундсена (39 ± 1 мкмоль/кг), что обусловлено их трансформированием в результате перемешивания на склоне моря Лаптевых с шельфовыми водами, характеризующимися высокими dO_2/θ индексами, до $[50 \text{ мкмоль/кг}]/[-1^\circ\text{C}]$, а также большим временем адвекции, в течение которого dO_2 увеличивается за счет вертикального перемешивания и окисления органического углерода.

Рост dO_2 в котловине Нансена в направлении от материкового склона к хребту Гаккеля отражает существование переходной зоны между атлантическими водами прямой ветви с низким dO_2 , переносимыми пограничным течением в восточном направлении, и атлантическими водами, возвращающимися в пролив Фрама, с высоким dO_2 .

Индексы dO_2/θ показывают, что северо-восточнее плато Ермака наблюдаются входящие в котловину Нансена атлантические воды Ермакской ветви Западно-Шпицбергенского течения, которые содержат примесь возвратных атлантических вод, поступающих в пролив Фрама из котловины Амундсена.

Выполненное исследование показало, что dO_2/θ -индекс может служить хорошим индикатором трансформации атлантических вод в Евразийском суббассейне, в отличие от растворенного кислорода, поскольку значения величин растворенного кислорода существенным образом не изменяются в котловинах Нансена и Амундсена.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Иванов А. Введение в океанографию. М.: Мир, 1978. 574 с.
- Иванов В.В., Аксенов Е.О. Трансформация атлантической воды в восточной части котловины Нансена по данным наблюдений и моделирования // Проблемы Арктики и Антарктики. 2013. № 1 (95). С. 72–87.
- Кириллов С.А. Термохалинные интрузии в северной части моря Лаптевых и их вклад в процессы вертикального тепло- и солеобмена: Дис. ... канд. геогр. наук. СПб., 2007. 208 с.
- Купецкий В.Н. Глубинные атлантические воды как причина некоторых особенностей полярного климата // Проблемы Арктики. 1959. № 6. С. 13–21.
- Панов В.В., Шнайхер А.О. Влияние атлантических вод на некоторые черты гидрологического режима Арктического бассейна и сопредельных морей // Океанология. 1963. Т. 3. № 4. С. 579–590.
- Романкевич Е.А., Ветров А.А. Цикл углерода в Арктических морях России. М.: Наука, 2001. 302 с.
- Современные методы гидрохимических исследований океана. М.: ИО АН СССР, 1992. 200 с.
- Тимофеев В.Т. Атлантические воды в Арктическом бассейне // Проблемы Арктики. 1957. № 2. С. 41–51.
- Тимофеев В.Н. Поступление атлантической воды и тепла в Арктический бассейн // Океанология. 1961. Т. 1. № 3. С. 407–411.
- Тимофеев В.Т., Панов В.В. Косвенные методы выделения и анализа водных масс. Л.: Гидрометеиздат, 1962. 285 с.
- Трешников А.Ф., Баранов Г.И. Структура циркуляции вод Арктического бассейна. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 157 с.
- Шнайхер А.О. О влиянии атлантических вод на формирование особенностей гидрометеорологических процессов в зимний период (на примере морей Карского и Лаптевых) // Известия Всесоюзного географического общества. 1967. Т. 99. Вып. 2. С. 114–121.
- Aagaard K., Swift J.H., Carmack E.C. Thermohaline circulation in the Arctic Mediterranean Seas // Journal of Geophys. Res. 1985. Vol. 90. № C3. P. 4833–4846.
- Carmack E.C., Aagaard K., Swift J.H., Macdonald R.W., McLaughlin F.A., Jones E.P., Perkin R.G., Smith J.N., Ellis K.M., Killius L.R. Changes in temperature and tracer distributions within the Arctic Ocean: results from the 1994 Arctic Ocean section // Deep-Sea Res. II. 1997. Vol. 44. № 8. P. 1487–1502.
- Dmitrenko I.A., Kirillov S.A., Ivanov V.V., Woodgate R.A., Polyakov I.V., Koldunov N., Fortier L., Lalonde C., Kaleschke L., Bauch D., Holemann J.A., Timokhov L.A. Seasonal modification of the Arctic Ocean intermediate water layer off the eastern Laptev Sea continental shelf break // Journal of Geophys. Res. 2009. Vol. 114. C06010, doi:10.1029/2008JC005229.
- Ivanov V.V., Polyakov I.V., Dmitrenko I.A., Hansen E., Repina I.A., Kirillov S.A., Mauritzen C., Simons H., Timokhov L.A. Seasonal variability in Atlantic Water off Spitsbergen // Deep-Sea Res. I. 2009. Vol. 56. P. 1–14.
- Manly T.O. Branching of Atlantic Water within the Greenland-Spitsbergen Passage: An estimate of recirculation // Journal of Geophys. Res. 1995. Vol. 100. № C10. P. 20627–20634.
- Pnyushkov A.V., Polyakov I.V., Ivanov V.V., Kikuchi T. Structure of the Fram Strait branch of the boundary current in the Eurasian Basin of the Arctic Ocean // Polar Science. 2013. Vol. 7. P. 53–71.
- Polyakov I.V., Beszczynska A., Carmack E.C., Dmitrenko I.A., Fahrbach E., Frolov I.E., Gerdes R., Hansen E., Holfort J., Ivanov V.V., Johnson M.A., Karcher M., Kauker F., Morison J., Orvik K.A., Schauer U., Simmons H.L., Skagseth O., Sokolov V.T., Steele M., Timokhov L.A., Walsh D., Walsh J.E. One more step toward a warmer Arctic // Geophys. Res. Lett. 2005. Vol. 32 (17). L17605. doi:10.1029/2005GL023740.

Rudels B. Arctic basin circulation // Encyclopedia of ocean science / Steele J.M., Thorpe S.A., Turekian K.K. (eds.) London: Academic Press, 2001. P. 177–187.

Rudels B., Meyer R., Fahrbach E., Ivanov V.V., Osterhus S., Quadfasel D., Schauer U., Tverberg V., Woodgate R.A. Water mass distribution in Fram Strait and over the Yermak Plateau in summer 1997 // *Ann. Geophysicae*. 2000. Vol. 18. P. 687–705.

Rudels B., Muench R.D., Gunn J., Schauer U., Friedrich H.J. Evolution of the Arctic Ocean boundary current north of the Siberian shelves // *Journal of Marine Systems*. 2000. Vol. 25. P. 77–97.

Rudels B., Schauer U., Björk G., Korhonen M., Pisarev S., Rabe B., Wisotzki A. Observations of water masses and circulation with focus on the Eurasian Basin of the Arctic Ocean from the 1990s to the late 2000s // *Ocean Sci*. 2013. Vol. 9. P. 147–169. doi:10.5194/os-9-147-2013.

Saloranta, T. M., Haugan P.M. Interannual variability in the hydrography of Atlantic water northwest of Svalbard // *J. Geophys. Res.* 2001. Vol. 106. P. 13931–13943.

Schauer U., Loeng H., Rudels B., Ozhigin V. K., Dieck W. Atlantic water flow through the Barents and Kara seas // *Deep-Sea Research*. 2002. Vol. 49. P. 2281–2298.

Wallace D.W.R., Moore R.M., Jones E.P. Ventilation of the Arctic Ocean cold halocline: rates and isopycnal transport, oxygen and primary production inferred using chlorofluoromethane distributions // *Deep-Sea Research*. 1987. Vol. 34. № 12. P. 1957–1979.

Wallace D.W.R., Schlosser P., Krysell M., Bonisch G. Halocarbon ratio and tritium/³He dating of water masses in the Nansen Basin, Arctic Ocean // *Deep-Sea Research*. 1992. Vol. 39. Suppl. 2. P. 435–458.

Woodgate R.A., Aagaard K., Muench R.D., Gunn J., Björk G., Rudels B., Roach A.T., Schauer U. The Arctic Ocean Boundary Current along the Eurasian slope and the adjacent Lomonosov Ridge: Water mass properties, transports and transformations from moored instruments // *Deep-Sea Research I*. 2001. Vol. 48. P. 1757–1792.

A.P. NEDASHKOVSKY, N.I. SVELIEVA, O.A. MOROZOVA, L.A. TIMOKHOV

DISTRIBUTION OF THE DISSOLVED OXYGEN AND AOU IN THE ATLANTIC WATER OF THE ARCTIC OCEAN

The results of hydrochemical study received during drift of SP-34 and SP-35 stations, and also oceanographic supervision in high-latitude Arctic expeditions 2005 and 2007 are presented. Variability of distribution of the dissolved oxygen and apparent oxygen utilization (AOU) in a core of the Atlantic water mass (AWM) in the Eurasian Basin is investigated. Distribution of oxygen in a core of AWM is characterized by its almost constant contents in Amundsen and Nansen Basins and over Gakkel Ridge. Vertical distribution of oxygen in hollows is characterized by a minimum in a core of the Atlantic waters.

It is shown that there is a relation between the water temperature in the core of AWM and AOU in the studied area — with reduction of water temperature apparent oxygen utilization increases.

The smallest AOU is observed in AWM coming from Fram Strait to Nansen Basin. Along the Eurasian continental slope AOU in a core of AWM increases, also the greatest its value has return Atlantic waters in Amundsen Basin. The possible scenarios explaining transformation of characteristics of a core of AWM extending along the Lomonosov Ridge are discussed.

Apparent oxygen utilization in a core of AWM has significant variations of sizes in Nansen and Amundsen Basins and unlike the size of the dissolved oxygen which variability is small, can serve as the good indicator of transformation and circulation of the Atlantic waters in the Eurasian Basin.

Keywords: Arctic Ocean, Eurasian Basin, Atlantic Water, oxygen, apparent oxygen utilization.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК АТМОСФЕРНОГО АЭРОЗОЛЯ В ПОЛЯРНЫХ РАЙОНАХ СЕВЕРНОГО И ЮЖНОГО ПОЛУШАРИЙ

*д-р физ.-мат. наук С.М. САКЕРИН¹, канд. физ.-мат. наук Д.М. КАБАНОВ¹,
канд. физ.-мат. наук В.С. КОЗЛОВ¹, канд. физ.-мат. наук В.В. ПОЛЬКИН¹,
канд. геогр. наук В.Ф. РАДИОНОВ², канд. физ.-мат. наук Д.Г. ЧЕРНОВ¹*

¹ — Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск, e-mail: sms@iao.ru

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

В последнее десятилетие авторами ведутся исследования с борта научных судов микрофизических и оптических характеристик аэрозоля в высокоширотных районах океана: массовой концентрации аэрозоля и «сажи» в приводном слое, дисперсного состава частиц, аэрозольной оптической толщи в диапазоне спектра 0,34–2,14 мкм и влагосодержания атмосферы. В статье проводится обобщение и сравнительный анализ характеристик аэрозоля, полученных в Южном океане (51–59-я РАЭ), 100-мильной зоне вблизи Антарктиды и трех районах Северного Ледовитого океана. Обсуждаются особенности пространственного распределения и временной изменчивости параметров аэрозоля в полярных районах.

Ключевые слова: аэрозоль, полярные районы, аэрозольная оптическая толщина, сажа.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение окружающей среды и происходящих климатических изменений в полярных районах стало одной из приоритетных задач в конце XX – начале XXI века. Это обусловлено тем, что полярные области являются наиболее чувствительными частями климатической системы планеты (Алексеев и др., 2011; Eisenman et al., 2007; IPCC, 2013). Атмосферный аэрозоль, являясь одной из наиболее динамичных составляющих природной среды, играет важную роль в процессах перераспределения рассеянной и поглощенной солнечной радиации, образования облачности, изменения альбедо снежной поверхности (Ивлев, 2001; Кондратьев, 2006; Haywood, Boucher, 2000; Johnson et al., 2004) и др.), а также переноса вещества атмосферными массами (см. например, (Шевченко, 2006; Виноградова, Пономарева, 2012; Rahn, 1981)).

Атмосфера в полярных областях, обедненная собственными источниками аэрозоля, менее загрязнена в сравнении с другими регионами Земли. Вместе с тем имеются отличия в характеристиках аэрозольной составляющей атмосферы в южной и северной полярных областях. На состав арктической атмосферы влияют выносы континентального аэрозоля со стороны Евразии и Америки, в то время как антарктическая атмосфера, в силу географического расположения, менее подвержена влиянию дальних переносов примесей.

Наблюдения за атмосферным аэрозолем в последние годы ведутся на многих арктических, антарктических станциях и в высокоширотных и морских экспедициях. Основные результаты этих исследований обобщались, например, в работах (Tomasi et al., 2007; 2012; 2015). Кроме оптических характеристик и дисперсного состава арктического аэрозоля, особое внимание стало уделяться исследованиям содержащегося в аэрозоле поглощающего вещества («сажи») и влияния выносов из Евразии и Северной Америки на уровень его концентраций (Виноградова, 2012; Виноградова и др., 2015; Huang et al., 2010; Wang et al., 2011).

В рамках сотрудничества ААНИИ и ИОА СО РАН уже более десяти лет ведутся ежегодные измерения оптических, микрофизических характеристик и химического состава атмосферного аэрозоля в различных районах Южного и Северного Ледовитого океанов. Результаты исследований аэрозоля по отдельным экспедициям обсуждались в ряде публикаций (Полькин и др., 2011; Сакерин и др., 2012а; 2013; 2014; Чернов и др., 2014; Sakerin et al., 2015). В данной работе проводится обобщение и сравнительный анализ характеристик аэрозоля, полученных в полярных областях обоих полушарий.

ХАРАКТЕРИСТИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

В измерениях характеристик аэрозоля использовались комплекты приборов в составе портативного солнечного фотометра, фотоэлектрических счетчиков частиц (АЗ-5, АЗ-10, GRIMM), аэталометра (измеритель массовой концентрации поглощающего вещества — «сажи») и в некоторых случаях — нефелометра ФАН. Основные характеристики этих приборов и методик определения искомых характеристик приводились в публикациях (Сакерин и др., 2012б; Кабанов и др., 2009; Козлов и др., 2008; Счетчик..., 2010; Шмаргунов и др., 2007; 2008; Grimm et al., 2009).

По данным экспедиционных измерений определялись: спектральная аэрозольная оптическая толщина (АОТ) атмосферы в диапазоне спектра 0,34–2,14 мкм, массовая концентрация аэрозоля (M_A , $\text{мкг}\cdot\text{м}^{-3}$) и «сажи» (M_{BC} , $\text{мкг}\cdot\text{м}^{-3}$), счетная концентрация частиц (N_A , см^{-3}) в диапазоне диаметров от 0,4 до 10 мкм, влагосодержание атмосферы (W , см).

Наблюдения солнечным фотометром проводились 1–2 раза в час, в ситуациях, когда солнце не было закрыто облачностью. По полученным данным рассчитывались среднечасовые значения спектральных АОТ атмосферы. Приземные характеристики аэрозоля измерялись ежечасно (продолжительность одного цикла около 15 мин).

Сравнительный анализ результатов измерений проведен для следующих районов:

- 1) акватория Южного океана южнее 50° ю.ш., 2007–2014 гг.;
- 2) подрайон «Антарктида» (обсерватория «Мирный» и 100-мильная зона вблизи берегов Антарктиды), 2007–2014 гг.;
- 3) удаленные от побережья районы Северного Ледовитого океана (СЛО), 2013 г.;
- 4) гидрометеорологическая обсерватория в Тикси, 2010 г.;
- 5) Российский научный центр на Шпицбергене — РНЦШ (п. Баренцбург), 2011–2014 гг.

Кроме того, для большей детализации при описании приземных характеристик аэрозоля дополнительно выделены районы «Баренцево море, юг» (вблизи побережья) и «Баренцево море, север», а при анализе данных об АОТ в п. Баренцбург (РНЦШ) отдельно рассматривались данные для весеннего (I — апрель–июнь) и летне-осеннего (II — июль–сентябрь) циклов наблюдений.

СПЕКТРАЛЬНАЯ АЭРОЗОЛЬНАЯ ОПТИЧЕСКАЯ ТОЛЩИНА АТМОСФЕРЫ

По результатам измерений интенсивности солнечной радиации в узких спектральных участках солнечным фотометром определялись спектральный ход АОТ, параметры α и β формулы Ангстрема:

$$\tau^a(\lambda) = \beta \cdot \lambda^{-\alpha}, \quad (1)$$

а также мелко- (τ^f) и грубодисперсная (τ^c) компоненты АОТ (Сакерин и др., 2012а; 2014):

$$\tau^a(\lambda) = \tau^c + \tau^f(\lambda) \approx \tau^c + m \cdot \lambda^{-n}, \quad (2)$$

где m и n — параметры мелкодисперсной компоненты τ^f , аналогичные параметрам Ангстрема. (Мелкодисперсная компонента АОТ обычно оценивается для длины волны 0,5 мкм — $\tau^f_{0,5}$).

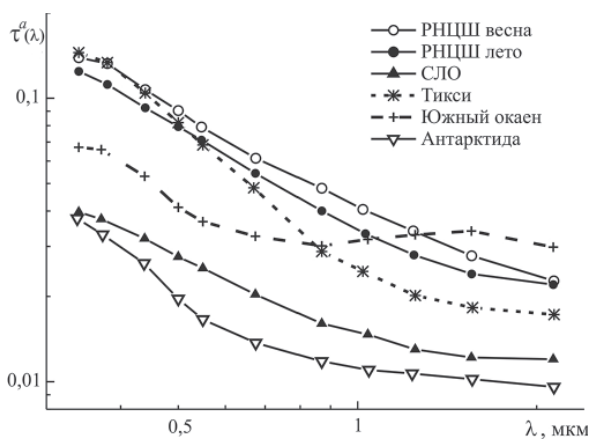


Рис. 1. Средние спектральные зависимости АОТ атмосферы в высокоширотных районах и Южном океане.

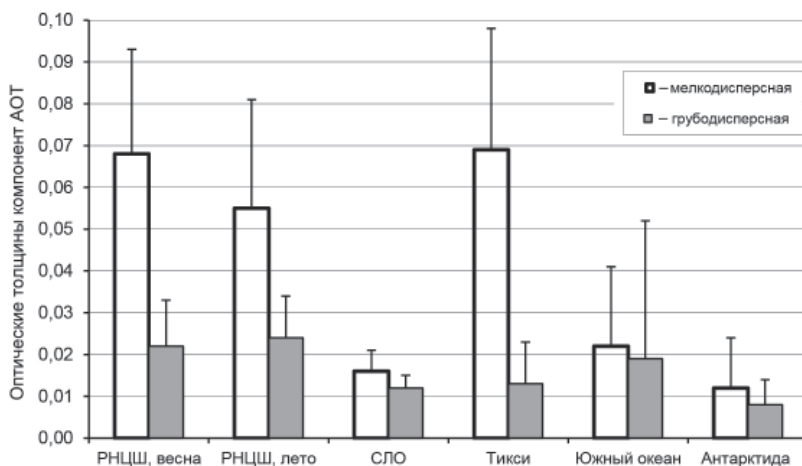


Рис. 2. Средние значения грубодисперсной (τ^c) и мелкодисперсной ($\tau^f_{0,5}$) компонент АОТ в высокоширотных районах.

На рис. 1 приведены средние спектральные зависимости АОТ, измеренные в пяти районах Арктики и Антарктики. Более подробная информация о параметрах АОТ в полярных районах представлена в табл. 1 и на рис. 2.

Таблица 1

Средние ($\pm$ СКО) значения характеристик АОТ атмосферы, общее влагосодержание атмосферы (W) и количество дней наблюдений (n) в полярных районах

Характеристика	РНЦШ, I	РНЦШ, II	СЛО	Тикси	Южный океан	Антарктида
$\tau_{0,38}^a$	0,139 $\pm$ 0,060	0,112 $\pm$ 0,042	0,037 $\pm$ 0,003	0,134 $\pm$ 0,053	0,066 $\pm$ 0,066	0,033 $\pm$ 0,015
$\tau_{0,5}^a$	0,090 $\pm$ 0,028	0,079 $\pm$ 0,030	0,028 $\pm$ 0,003	0,082 $\pm$ 0,035	0,041 $\pm$ 0,05	0,020 $\pm$ 0,01
$\tau_{0,87}^a$	0,048 $\pm$ 0,013	0,040 $\pm$ 0,016	0,016 $\pm$ 0,002	0,029 $\pm$ 0,01	0,03 $\pm$ 0,044	0,012 $\pm$ 0,007
$\tau_{2,14}^a$	0,023 $\pm$ 0,011	0,022 $\pm$ 0,014	0,012 $\pm$ 0,003	0,017 $\pm$ 0,008	0,03 $\pm$ 0,036	0,01 $\pm$ 0,007
α	1,15 $\pm$ 0,38	1,24 $\pm$ 0,26	0,97 $\pm$ 0,42	1,87 $\pm$ 0,20	1,05 $\pm$ 0,73	1,17 $\pm$ 0,54
β	0,04 $\pm$ 0,012	0,034 $\pm$ 0,015	0,014 $\pm$ 0,003	0,022 $\pm$ 0,008	0,026 $\pm$ 0,04	0,009 $\pm$ 0,006
$\tau_{0,5}^f$	0,068 $\pm$ 0,025	0,055 $\pm$ 0,026	0,016 $\pm$ 0,005	0,069 $\pm$ 0,029	0,022 $\pm$ 0,019	0,012 $\pm$ 0,007
τ^c	0,022 $\pm$ 0,011	0,024 $\pm$ 0,01	0,012 $\pm$ 0,003	0,013 $\pm$ 0,01	0,019 $\pm$ 0,033	0,008 $\pm$ 0,006
W , см	0,53 $\pm$ 0,18	1,14 $\pm$ 0,25	0,74 $\pm$ 0,13	1,21 $\pm$ 0,42	0,62 $\pm$ 0,16	0,38 $\pm$ 0,25
n , дней	67	39	3	10	10	318

Из рис. 1 видно, что минимальные значения спектральных АОТ получены в Антарктиде (обсерватория «Мирный» и 100-мильная зона вблизи берегов). Несколько больше они над акваториями арктических морей (СЛО). В этих районах, частично покрытых льдом и наиболее удаленных от континентов, наблюдаются самые малые значения мелко- и грубодисперсной компонент АОТ: $\tau^c = 0,012$, $\tau_{0,5}^f = 0,016$ (см. рис. 2). Они характеризуют глобальный фоновый уровень аэрозоля. Самые большие значения АОТ наблюдались на арх. Шпицберген в начале теплого периода: средние $\tau_{0,5}^f$ больше фонового уровня в 4–6 раз, а τ^c — примерно в 2 раза. Промежуточные по величинам значения АОТ, особенно ее крупнодисперсной фракции, наблюдаются над акваторией Южного океана.

По средней величине мелкодисперсной компоненты АОТ можно выделить два типа районов или мест наблюдений: «сухопутные» (Шпицберген, Тикси); удаленные от континентов части акватории СЛО и Антарктика. Несколько иначе группируются районы по величине грубодисперсной компоненты АОТ. Выше среднего уровня значения τ^c на Шпицбергене (почвенный аэрозоль с поверхности) и в Южном океане (генерация крупного морского аэрозоля). Ниже среднего уровня значения τ^c в районах, частично покрытых льдом/снегом, — Антарктида, СЛО, Тикси.

Для оценки наиболее вероятных значений τ^c и $\tau_{0,5}^f$ в полярных регионах были рассчитаны гистограммы повторяемостей отдельно для северной и южной полярных областей. Они приведены на рис. 3. Из-за разного числа данных в рассматриваемых районах было проведено статистическое выравнивание с учетом весовых коэффициентов.

Из рис. 3 видно, что гистограммы грубодисперсной компоненты АОТ соответствуют логнормальному распределению. В Антарктике основная часть значений τ^c сосредоточена в диапазоне 0–0,015 (наиболее вероятное — 0,005), а в Арктике — в диапазоне 0,01–0,03 (наиболее вероятное — 0,015).

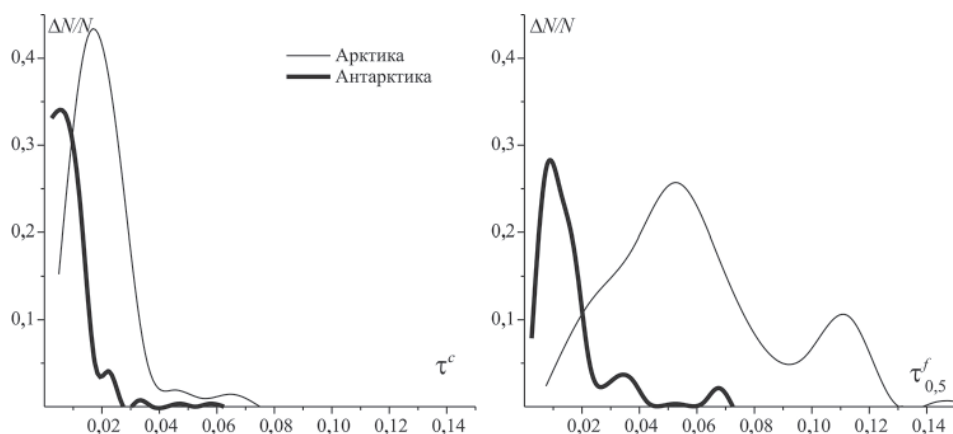


Рис. 3. Сглаженные гистограммы повторяемостей грубодисперсной и мелкодисперсной, $\Delta N/N$, фракций аэрозоля в высокоширотных районах.

Гистограмма распределений мелкодисперсной компоненты АОТ в Антарктике тоже логнормальная с наиболее вероятными значениями $\tau_{0,5}^f \sim 0,01$. Широкая двухмодальная гистограмма $\tau_{0,5}^f$ в Арктике с максимумами $\sim 0,05$ и $0,11$ отражает влияние континентального аэрозоля на характеристики аэрозольной составляющей атмосферы на станциях, расположенных на суше: Тикси и, особенно за счет весенних данных, на Шпицбергене.

Сравнительный анализ средних и наиболее вероятных значений τ^c , $\tau_{0,5}^f$ в двух полярных областях показывает, что более существенные различия между ними наблюдаются по мелкодисперсной компоненте АОТ — в Арктике $\tau_{0,5}^f$ в 5 раз больше, чем в Антарктике.

КОНЦЕНТРАЦИИ АЭРОЗОЛЯ И «САЖИ» В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ

В табл. 2 представлены средние величины, характеризующие содержание в приземном слое воздуха аэрозоля и «сажи» в рассматриваемых районах: счетная концентрация частиц N_A с размерами $d > 0,4$ мкм; счетные концентрации мелкодисперсной фракции частиц N_f в диапазоне размеров $0,4\text{--}1$ мкм, грубодисперсной фракции N_c ($d > 1$ мкм) и их отношение (N_c/N_f); массовые концентрации аэрозоля и «сажи» M_A и M_{BC} ; число дней наблюдений n .

Максимальные значения средних концентраций частиц (особенно крупных) наблюдались в приземном слое воздуха в Южном океане за счет генерации морского аэрозоля. В этом районе и самая большая относительная доля грубодисперсного аэрозоля — 19 %. Как следствие, над Южным океаном оказались и самые большие значения массовой концентрации аэрозоля: превышение M_A над другими полярными районами составляет 2–4 раза.

В других полярных районах различие концентраций N_A и N_f невелико: средние N_A находятся в диапазоне $1,7\text{--}2$ см⁻³, примерно такой же диапазон значений N_f , а относительная доля крупных частиц составляет 3–9 %. Отметим также, что среди арктических районов массовая концентрация аэрозоля немного выше на арх. Шпицберген и на юге Баренцева моря вблизи Кольского полуострова. Очевидно, что M_A в этих районах увеличивается за счет континентального аэрозоля — местного и выносов со стороны Европы.

Несколько иначе распределена по районам массовая концентрация «сажи». Повышенными значениями M_{BC} ($0,15\text{--}0,16$ мкг·м⁻³) выделяются, как и для массовой концентрации аэрозоля, арх. Шпицберген и южная часть Баренцева моря, где сказывается влияние континента. На севере Баренцева моря содержание «сажи» уменьшается

Таблица 2

Средние ($\pm$ СКО) значения счетной концентраций аэрозоля, N (см^{-3}), массовой концентраций аэрозоля и «сажи», M ($\text{мкг}\cdot\text{м}^{-3}$) в высокоширотных районах. n — количество дней наблюдений

Параметр	РНЦШ	Баренцево море, юг	Баренцево море, север	СЛО	Южный океан	Антарктида
N_A	$1,79 \pm 1,62$	$1,96 \pm 1,17$	$1,94 \pm 1,32$	$1,71 \pm 1,52$	$5,24 \pm 5,85$	$1,80 \pm 3,18$
N_f	$1,66 \pm 1,53$	$1,88 \pm 1,14$	$1,9 \pm 1,3$	$1,64 \pm 1,47$	$4,95 \pm 5,52$	$1,70 \pm 2,83$
N_c	$0,13 \pm 0,15$	$0,07 \pm 0,03$	$0,04 \pm 0,03$	$0,07 \pm 0,09$	$1,14 \pm 1,78$	$0,25 \pm 0,73$
(N_c/N_f) , %	7,5	4	3	5	19	9
M_A	$1,80 \pm 0,26$	$1,40 \pm 0,81$	$0,85 \pm 0,50$	$0,87 \pm 0,82$	$3,75 \pm 4,73$	$1,13 \pm 1,88$
M_{BC}	$0,16 \pm 0,27$	$0,153 \pm 0,013$	$0,057 \pm 0,036$	$0,030 \pm 0,029$	$0,033 \pm 0,073$	$0,026 \pm 0,040$
n , дней	293	3	6	40	122	~300

примерно в 3 раза и самые низкие значения M_{BC} ($0,03 \text{ мкг}\cdot\text{м}^{-3}$) наблюдаются в южной полярной области и СЛО.

Для сравнения на рис. 4, кроме приведенных в табл. 2 районов, представлены также средние концентрации M_A и M_{BC} , полученные в Карском и Белом морях и в Тикси (Полькин и др., 2011; Голобокова и др., 2013). Сравнение подтверждает, что содержание «сажи» в полярных районах распределено в соответствии с удаленностью и степенью влияния континента: максимальные значения M_{BC} наблюдались над субполярным и практически внутренним Белым морем, минимальные — в удаленных от континентов океанских районах и в Тикси в июне 2010 г.

Массовая концентрация аэрозоля в полярных районах в значительной степени зависит от наличия на подстилающей поверхности льда и снега, которые препятствуют поступлению в атмосферу крупных частиц морского и/или почвенного аэрозоля. По этой причине более высокие значения M_A характерны для открытых акваторий Белого, Карского моря и Южного океана, а минимальные значения — в Антарктиде,

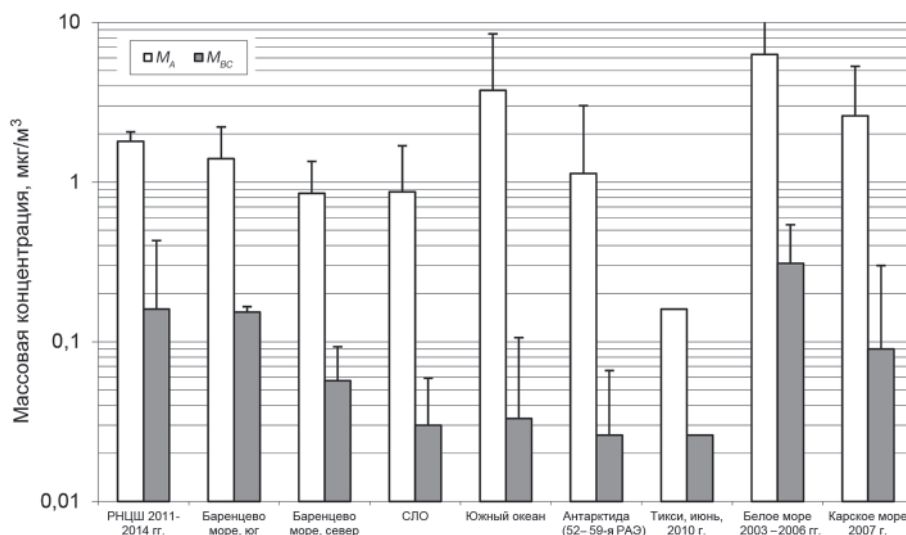


Рис. 4. Средние массовые концентрации аэрозоля и «сажи», $\text{мкг}/\text{м}^3$, в полярных районах.

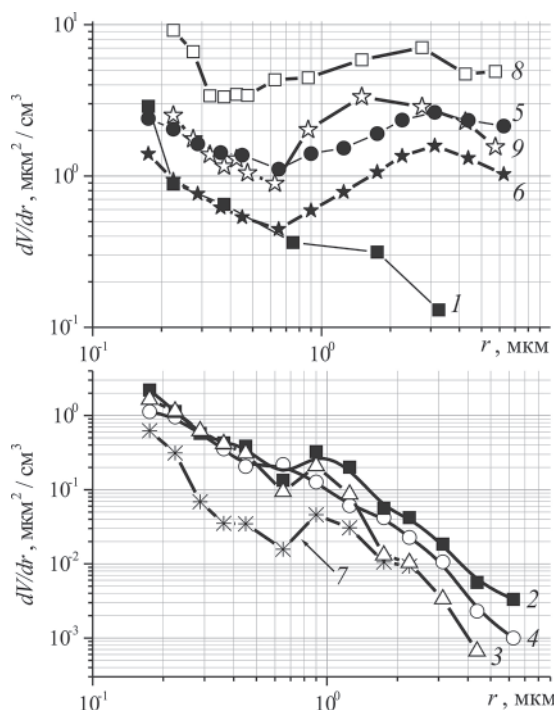


Рис. 5. Средние объемные распределения аэрозольных частиц dV/dr в полярных районах: 1 — РНЦШ; 2 — Баренцево море, юг; 3 — Баренцево море, север; 4 — СЛО; 5 — Южный океан; 6 — Антарктида (100-мильная зона); 7 — Тикси; 8 — Белое море; 9 — Карское море.

в северных частях арктических морей, а также на берегу моря Лаптевых (Тикси), в период, когда поверхность была покрыта льдом или снегом (Голобокова и др., 2013).

На рис. 5 приведено сопоставление распределений частиц по объемам dV/dr в тех же, что и на рис. 4, высокоширотных районах. Основное различие функций dV/dr , превышающее три порядка величины, наблюдается в диапазоне самых крупных частиц: максимальные значения над Белым, Карским морем и Южным океаном; минимальные — в районах 3, 4, 7. Такое распределение dV/dr по районам свидетельствует о важной роли степени открытости морской поверхности как источника генерации морского аэрозоля. В диапазоне самых мелких частиц величины dV/dr в разных районах отличаются друг от друга в меньшей степени — примерно в 10 раз: максимальные значения тоже в Белом море, минимальные — в районах 3, 4, 7.

Неожиданным результатом является то, что средняя функция распределений dV/dr , полученная для прибрежной зоны Антарктиды (особенно в диапазоне крупных частиц) расположена выше, чем для арктических морей. В этой связи отметим, что измерения счетной концентрации аэрозоля в 52–59-й РАЭ проводились тремя типами счетчиков (A3-5, A3-10, GRIMM). Поэтому завышенные значения dV/dr , по-видимому, обусловлены погрешностью взаимной привязки и перерасчета данных измерений различных приборов.

Авторы выражают благодарность организаторам/руководителям морских и полярных экспедиций за содействие в проведении исследований атмосферного аэрозоля над океаном, а также коллегам, которые участвовали в измерениях, — Н.И. Власову, А.В. Губину, Вас.В. Полькину, А.Н. Прахову, Д.Е. Савкину, С.А. Терпуговой, Ю.С. Турчиновичу.

Работа выполнена в рамках работ по Подпрограмме «Организация и обеспечение работ и научных исследований в Антарктике» ГП РФ «Охрана окружающей среды» на 2012–2020 гг., Стратегии российского присутствия на архипелаге Шпицберген до 2020 года и при финансовой поддержке программ фундаментальных исследований Президиума РАН № 23 (до 2015 г.) и № 3 (2016 г.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев Г.В., Иванов Н.Е., Пнюшков А.В., Харланенкова Н.Е. Климатические изменения в морской Арктике в начале XXI века // Метеорологические и геофизические исследования. Серия: «Вклад России в Международный полярный год 2007/08» / Под ред. Г.В. Алексеева. М.: ООО «Паулсен», 2011. С. 6–28.
- Виноградова А.А., Пономарева Т.Я. Атмосферный перенос антропогенных примесей в арктические районы России (1986–2010) // Оптика атмосферы и океана. 2012. Т. 25. № 6. С. 475–483.
- Виноградова А.А. Эмиссии антропогенного черного углерода в атмосферу: распределение по территории России // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 12. С. 1059–1065.
- Виноградова А.А., Смирнов Н.С., Коротков В.Н., Романовская А.А. Лесные пожары в Сибири и на Дальнем Востоке: эмиссии и атмосферный перенос черного углерода в Арктику // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28. № 6. С. 512–520.
- Голобокова Л.П., В.В. Польшин, Кабанов Д.М., Т.В. Ходжер, С.А. Терпугова, Д.Г. Чернов, Чипанина Е.В., Панченко М.В., Сакерин С.М. Исследования атмосферного аэрозоля в Арктических районах России // Лед и снег. 2013. № 2 (122). С. 129–136.
- Ивлев Л.С. Аэрозольное воздействие на климатические процессы // Оптика атмосферы и океана. 2011. Т. 24. № 5. С. 392–410.
- Кабанов Д.М., Веретенников В.В., Воронина Ю.В., Сакерин С.М., Турчинович Ю.С. Информационная система для сетевых солнечных фотометров // Оптика атмосферы и океана. 2009. Т. 22. № 1. С. 61–67.
- Козлов В.С., Шмаргунов В.П., Польшин В.В. Спектрофотометры для исследования характеристик поглощения света аэрозольными частицами // Приборы и техника эксперимента. 2008. № 5. С. 155–157.
- Кондратьев К.Я. Аэрозоль и климат: современное состояние и перспективы разработок. Ч. 3. Аэрозольное радиационное возмущающее воздействие // Оптика атмосферы и океана. 2006. Т. 19. № 7. С. 565–575.
- Польшин В.В., Панченко М.В., Голобокова Л.П., Филиппова У.Г., Ходжер Т.В., Лисицын А.П., Шевченко В.П. Приводный аэрозоль Белого и Карского морей в августе 2007 г. // Вклад России в Международный полярный год 2007/08. Метеорологические и геофизические исследования. М.; СПб.: ООО «Паулсен», 2011. С. 199–214.
- Польшин В.В., Польшин В.В., Голобокова Л.П., Панченко М.В., Терпугова С.А., Тихомиров А.Б. О межгодовой изменчивости широтного распределения микрофизических и химических характеристик приводного аэрозоля в восточной Атлантике в 2006–2010 годах // Оптика атмосферы и океана. 2013. Т. 26. № 6. С. 519–524.
- Сакерин С.М., Чернов Д.Г., Кабанов Д.М., Козлов В.С., Панченко М.В., Польшин В.В., Радионов В.Ф. Предварительные результаты исследований аэрозольных характеристик атмосферы в районе Баренцбурга (Шпицберген) // Проблемы Арктики и Антарктики. 2012а. № 1 (91). С. 20–31.
- Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Ростов А.П., Турчинович С.А., Князев В.В. Солнечные фотометры для измерений спектральной прозрачности атмосферы в стационарных и мобильных условиях // Оптика атмосферы и океана. 2012б. Т. 25. № 12. С. 1112–1117.

Сакерин С.М., Власов Н.И., Кабанов Д.М., Лубо-Лесниченко К.Е., Прахов А.Н., Радионов В.Ф., Турчинович Ю.С., Holben B.N., Smirnov A. Результаты спектральных измерений аэрозольной оптической толщины атмосферы солнечными фотометрами в 58-й Российской антарктической экспедиции // Оптика атмосферы и океана. 2013. Т. 27. № 12. С. 1059–1067.

Сакерин С.М., Андреев С.Ю., Кабанов Д.М., Николашкин С.В., Прахов А.Н., Радионов В.Ф., Турчинович Ю.С., Чернов Д.Г., Holben B.N., Smirnov A., Sorokin M.G. О результатах исследований аэрозольной оптической толщи атмосферы в арктических районах // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 5. С. 413–423.

Счетчик аэрозольных частиц АЗ-10. Руководство по эксплуатации. ЭКИТ7.830.000 РЭ. М., 2010. 13 с.

Чернов Д.Г., Козлов В.С., Панченко М.В., Турчинович Ю.С., Радионов В.Ф., Губин А.В., Прахов А.Н. Особенности изменчивости концентраций аэрозоля и сажи в приземном слое воздуха в Баренцбурге (Шпицберген) в 2011–2013 гг. // Проблемы Арктики и Антарктики. 2014. № 4 (102). С. 34–44.

Шевченко В.П. Влияние аэрозолей на среду и морское осадконакопление в Арктике. М.: Наука, 2006. 226 с.

Шмаргунов В.П., Польшкин В.В. Аэрозольный счетчик на базе АЗ-5 // Приборы и техника эксперимента. 2007. № 2. С. 165.

Шмаргунов В.П., Козлов В.С., Тумаков А.Г., Польшкин В.В., Панченко М.В. Автоматизированный аэрозольный нефелометр на базе ФАН // Приборы и техника эксперимента. 2008. № 5. С. 165.

Eisenman I., Untersteiner N., Wettlaufer J.S. On the reliability of simulated Arctic sea ice in Global Climate Models // Geophysical Research Letters. 2007. Vol. 34. L10501, doi:10.1029/2007GL029914.

Grimm H., Eatough D.J. Aerosol measurement: the use of optical light scattering for the 15 determination of particulate size distribution, and particulate mass, including the semi-volatile fraction // J. Air Waste Manage. 2009. Vol. 59. P. 101–107.

Haywood J., Boucher O. Estimates of the direct and indirect radiative forcing due to tropospheric aerosols: a review // Rev. Geophys. 2000. Vol. 38. P. 513–543.

Huang L., Gong S.L., Sharma S., Lavoué D., Jia C.Q. A trajectory analysis of atmospheric transport of black carbon aerosols to Canadian high Arctic in winter and spring (1990–2005) // Atmos. Chem. Phys. 2010. Vol. 10. P. 5065–5073. doi:10.5194/acp-10-5065-2010.

IPCC: Climate Change 2013: The Physical Science Basis, Intergovernmental Panel on Climate Change, 2013. 1552 p. URL: http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_ALL_FINAL.pdf [дата обращения август 2014].

Johnson B., Shine K., Forster P. The semi-direct aerosol effect: impact of absorbing aerosols on marine stratocumulus // Q. J. Roy. Meteor. Soc. 2004. Vol. 130. P. 1407–1422.

Rahn K.A. Relative importances of North America and Eurasia as sources of Arctic aerosol // Atmos. Environ. 1981. Vol. 15. P. 1447–1455.

Sakerin S.M., Bobrikov A.A., Bukin O.A., Golobokova L.P., Polkin V.S., Polkin V.V., Shmirko K.A., Kabanov D.M., Khodzher T.V., Onischuk N.A., Pavlov A.N., Potemkin V.L., Radionov V.F. On measurements of aerosol-gas composition of the atmosphere during two expeditions in 2013 along Northern Sea Route // Atmos. Chem. Phys. 2015. Vol. 15. Issue 21. P. 12413–12443. doi:10.5194/acp-15-1-2015.

Tomasi C., Vitale V., Lupi A., Di Carmine C., Campanelli M., Herber A., Treffeisen R., Stone R.S., Andrews E., Sharma S., Radionov V.F., von Hoyningen-Huene W., Stebel R., Yansen G.H., Myhre C.L., Wehrli C., Aaltonen V., Lihavainen Y., Virkkula A., Hillamo R., Strom J., Toledano C., Cachorro V.E., Ortiz P., de Frutos A.M., Blindheim S., Frioud M., Gausa M., Zeielinski T., Petelski T., Yamanouchi T. Aerosol in polar regions: A historical overview based on optical depth and in situ observations // J. Geophys. Res. 2007. Vol. 112. D16205. doi: 10.1029/2007JD008432.

Tomasi C., Lupi A., Mazzola M., Stone R.S., Dutton E.G., Herber A., Radionov V.F., Holben B., Sorokin M., Sakerin S.M., Terpugova S.A., Lanconelli C., Petkov B., Vitale V. An update of the long-term trend of aerosol optical depth in the polar regions using POLAR-AOD measurements performed during International Polar Year // *Atmospheric Environment*. 2012. Vol. 52. P. 29–47.

Tomasi C., Kokhanovsky A.A., Lupi A., Ritter C., Smirnov A., Mazzola M., Stone R.S., Lanconelli C., Vitale V., Holben B.N., Nyeki S., Wehrli C., Altonen V., de Leeuw G., Rodriguez E., Herber A.B., Stebel K., Stohl A., O'Neill N.T., Radionov V.F., Zielinski T., Petelski T., Sakerin S.M., Kabanov D.M., Xue Y., Mei L., Istomina L., Wagener R., McArthur B., Sobolewski P.S., Butler J., Kivi R., Courcoux Y., Larouche P., Broccardo S., Piketh S.J. Aerosol remote sensing in polar regions // *Earth-Science Reviews*. 2015. Vol. 140. P. 108–157.

Wang Q., Jacob D.J., Fisher J.A., Mao J., Leibensperger E.M., Carouge C.C., Le Sager P., Kondo Y., Jimenez J.L., Cubison M.J., Doherty S.J. Sources of carbonaceous aerosols and deposited black carbon in the Arctic in winter-spring: implications for radiative forcing // *Atmos. Chem. Phys.* 2011. Vol. 11. P. 12453–12473. doi:10.5194/acp-11-12453-2011.

S.M. SAKERIN, D.M. KABANOV, V.S. KOZLOV, V.V. POL'KIN, V.F. RADIONOV, D.G. CHERNOV

COMPARATIVE ANALYSIS OF ATMOSPHERIC AEROSOL IN POLAR REGIONS OF THE NORTHERN AND SOUTHERN HEMISPHERES

In recent decades, onboard scientific vessels, the authors carry out studies of microphysical and optical characteristics of atmospheric aerosol in high-latitude regions of ocean: mass concentrations of aerosol and “black carbon” in near-water atmospheric layer, disperse composition of particles, aerosol optical depth in wavelength range of 0.34–2.14 μm , and water vapor content of the atmosphere. There are summarized and comparatively analyzed the mean aerosol characteristics, obtained in the Southern Ocean (51st–59th RAE), 100-mile zone near Antarctica, and three regions of the Arctic Ocean. The specific features of the spatial distribution and time variations in aerosol parameters in polar regions are discussed.

Keywords: Aerosol, polar regions, aerosol optical depth, black carbon.

ИЗМЕНЧИВОСТЬ ТЕЧЕНИЙ В ПЕЧОРСКОМ МОРЕ

д-р физ.-мат наук В.А. РОЖКОВ², аспирант Н.А. СУХИХ^{1,2}

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

² — Санкт-Петербургский государственный университет, e-mail: varozhk@gmail.com

Обсуждаются результаты вероятностного анализа измерений скоростей течений продолжительностью с сентября 2001 по октябрь 2003 г., выполненные синхронно на двух станциях на серии горизонтов в Печорском море.

Массив данных скоростей течений проанализирован в нестационарных приближениях: периодически коррелированных случайных процессов (ПКСП) в диапазоне сезонной изменчивости (с периодом коррелированности 1 год) и полипериодически коррелированных случайных процессов (ППКСП) в диапазоне приливных явлений (с периодами коррелированности, равными лунным и солнечным суткам и полусуткам с учетом месячных, полумесячных и долгопериодных неравенств). Также приводятся результаты анализа течений в диапазоне синоптической изменчивости в квазистационарном приближении после фильтрации (исключения годовой и суточной цикличности).

Ключевые слова: скорость течений, нестационарное приближение, периодически коррелированный случайный процесс, полипериодически коррелированный случайный процесс, приливная ритмика, сезонная изменчивость.

ВВЕДЕНИЕ

С сентября 2001 по октябрь 2003 г. в Печорском море были выполнены измерения течений от поверхности до дна на двух станциях, расстояние между которыми 118 км.

Полученный массив исходных данных был проанализирован А.В. Нестеровым векторно-алгебраическим методом (Белышев и др., 1983) в квазистационарном приближении (Нестеров, 2005). На основе графика спектральной плотности (рис. 4, Нестеров, 2005) им было показано, что скорость течения обладает низкочастотной (сезонной), синоптической (межсуточной) и приливной (внутрисуточной) изменчивостью. Основные статистические характеристики течений на двух станциях, полученные в квазистационарном приближении, приведены в таблице 1.

Таблица 1

Оценки модуля и направления средней скорости течений и инвариантов тензора СКО (станция 1, 16.09.2001 – 25.10.2003; станции 2, 17.09.2001 – 31.10.2003) (Нестеров, 2005)

Горизонт	$\bar{m}_r$, см/с	φ°	$\sqrt{I_1}$, см/с	α°	$\sqrt{\chi}$	r	$\bar{m}_r$, см/с	φ°	$\sqrt{I_1}$, см/с	α°	$\sqrt{\chi}$	r
Станция 1							Станция 2					
2	4,8	60	24,0	108	0,49	4,9	3,5	31	19,6	152	0,60	5,9
10	4,8	69	22,5	106	0,51	4,7	2,7	52	19,5	161	0,59	7,3
21/16	4,2	69	19,1	91	0,64	4,5	2,6	41	17,5	169	0,62	6,6

Согласно табл. 1 модуль средней скорости течений $|\vec{m}_p|$ имеет значения от 2,6 до 4,8 см/с и направления φ на северо-восток (от 30° до 70°), т.е. характеризует вынос вод в направлении «Поморский пролив — пролив Карские ворота». СКО скорости течений в 5–7 раз превышает средний перенос; эллипс СКО вытянут, т.к. малая ось примерно в два раза меньше большой оси; направление большой оси α отличается от φ , но держится около оси северо-запад–юго-восток.

С целью детализации поддиапазонного описания этой изменчивости в данной работе этот уникальный массив данных анализируется в приближении периодически коррелированных случайных процессов (ПКСП) в диапазоне сезонной изменчивости и полипериодически коррелированных случайных процессов (ППКСП) в диапазоне приливных явлений (периоды коррелированности – лунные и солнечные сутки и полусутки с учетом месячных, полумесячных и долгопериодных неравенств) (Башмачников и др., 2001а; Башмачников и др., 2001б; Иванов, Рожков, 2005).

ГODOVAYA ИЗМЕНЧИВОСТЬ СКОРОСТИ ТЕЧЕНИЙ

На рис. 1 представлена векторная диаграмма среднемесячных математических ожиданий значений скоростей течений $\vec{m}_p(t)$ на горизонте 2 м. Огибающая векторов скорости течения от месяца к месяцу описывает на графике несколько петель, что свидетельствует о сложности годового хода скорости течений в исследуемом районе. Аналогичные по сложности графики характерны для других горизонтов и на второй станции.

В работе (Горелик, 1959) показано, что при суперпозиции двух взаимно перпендикулярных линейно поляризованных синхронных гармонических колебаний возникает эллиптически поляризованное колебание. Таким образом, суперпозиция проекций вектора скорости течения

$$v_u = A_u \cos(\omega t - \psi_u) \text{ и } v_v = A_v \cos(\omega t - \psi_v)$$

является эллипсом, формулы расчета параметров которого представлены в монографии (Рожков, 1996).

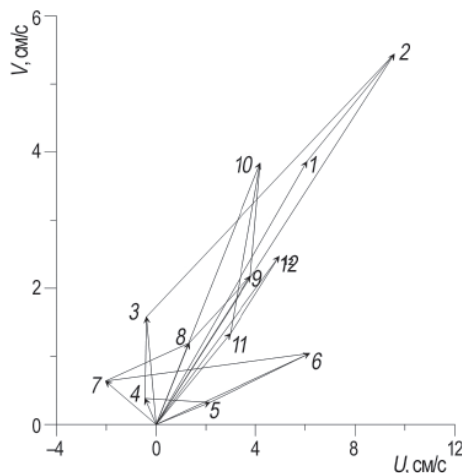


Рис. 1. Векторная диаграмма среднемесячных значений скорости течений на горизонте 2 м на станции 1, где горизонтальной осью является проекция течения на параллель в направлении восток u , а вертикальной проекция на меридиан в направлении север — v ; числами обозначены номера месяцев, начиная с октября 2001 г.

Обозначим символами значения большой L_1 и малой L_2 осей эллипса, угла наклона α большой оси относительно географической системы координат, а также знака обхода эллипса годовой гармоникой и ее оборотов $\vartheta_k(t_1, t_2) = A_u A_v \sin[(t_2 - t_1)/T] \sin(\Psi_u - \Psi_v)$ по часовой (+) или против часовой (–) стрелки.

В табл. 2 приведены указанные выше характеристики, а также среднегодовые значения проекций (m_u, m_v) (Рожков, 1996), а модуль вектора $|\vec{m}_r|$ вычисляется через проекции (m_u, m_v) . Значения параметров математического ожидания, амплитуд гармоник и полуосей эллипса даны в см/с.

Таблица 2

Параметры разложения кривой годового хода вектора скорости течений в виде ПКПС

Гармоника	Среднегодовое			Математическое ожидание							
	m_u	m_v	$ \vec{m}_r $	A_u	A_v	Ψ_u	Ψ_v	$L_1/2$	$L_2/2$	α°	Знак
Станция 1 (2001–2002)											
Годовая (2 м)	2,99	2,04	3,62	0,71	0,61	307	318	0,92	0,21	41	–
Полугодовая (2 м)				0,55	0,55	214	171	0,53	0,49	215	+
Третьегодовая (2 м)				1,84	0,69	126	115	1,62	1,12	20	+
Годовая (10 м)	3,75	1,78	4,16	0,96	0,30	321	312	0,95	0,35	17	+
Полугодовая (10 м)				0,65	0,42	167	165	0,65	0,22	33	+
Третьегодовая (10 м)				2,22	0,70	139	132	1,74	1,55	17	+
Годовая (21 м)	3,09	1,98	3,67	0,90	0,39	306	211	0,90	0,40	357	+
Полугодовая (21 м)				0,48	0,24	183	104	0,38	0,32	7	+
Третьегодовая (21 м)				1,84	0,77	145	152	1,66	1,12	23	–
Станция 1 (2002–2003)											
Годовая (2 м)	5,21	2,81	5,92	1,87	0,64	187	296	1,72	0,97	353	–
Полугодовая (2 м)				2,00	0,57	31	70	1,84	0,85	13	–
Третьегодовая (2 м)				0,15	0,97	340	115	0,88	0,44	6	–
Годовая (10 м)	5,07	1,74	5,36	1,85	0,41	205	219	1,89	0,18	12	–
Полугодовая (10 м)				1,89	0,36	39	45	1,80	0,59	11	–
Третьегодовая (10 м)				0,52	0,35	91	128	0,59	0,22	32	–
Годовая (21 м)	4,37	1,04	4,49	1,68	0,64	207	169	1,75	0,43	18	+
Полугодовая (21 м)				1,47	0,89	41	26	1,58	0,60	31	+
Третьегодовая (21 м)				0,51	0,31	86	87	0,60	0,04	31	–

Из таблицы видно, что такой способ параметризации дает возможность сопоставить между собой структурные особенности течений как между станциями, так и по вертикали. Наибольший вклад в изменчивость вносит гармоника с периодом четыре месяца в 2001–2002 гг. и гармоники с периодами год и полгода в 2002–2003 гг., что можно объяснить географическим положением станций и различием метеорологических, гидрологических и ледовых условий.

Район исследования находится под воздействием реки Печоры, которая определяет гидрологический режим данной акватории, а также характеризуется сложными ледовыми условиями (наличием льда, аномальных ледяных образований) 7–9 месяцев в году.

Период 2002–2003 гг. характеризовался аномальными ледовыми условиями, наблюдалось сокращение площади ледяного покрова акватории в феврале–июле по

сравнению со средними многолетними значениями (Zubakin et al., 2015), влияние ледяного покрова на течения в этот год не было доминирующим. Аналогичная ситуация наблюдается и на станции 2, где гармоника с периодом 4 месяца преобладает в 2001–2002 гг., но в 2002–2003 гг. ее вклад значимо меньше, чем гармоник с периодами год и полгода.

ПРИЛИВНАЯ РИТМИКА СКОРОСТИ ТЕЧЕНИЙ

Основной особенностью Печорского моря является наличие интенсивных приливных течений. Обычно в практических задачах ограничиваются расчетами параметров 4 суточных (K_1 , P_1 , O_1 , Q_1), 4 полусуточных (M_2 , S_2 , N_2 , K_2) и 4 мелководных волн (MS_4 , M_4 , S_4 , M_6).

В табл. 3 приведены оценки амплитуд (A_u , A_v) и фаз (Ψ_u , Ψ_v) гармонических постоянных основных приливных гармоник проекций скорости течений, вычисленные по реализации месячной продолжительности по методу МНК (Войнов, 1999). Мелководные гармоники вносят незначительный вклад и в таблице не представлены.

Согласно табл. 3, характеризующей приливную ритмику течений одного месяца (август 2002 г.), полусуточные гармоники превышают суточные, гармоника M_2 преобладает над остальными, гармонические постоянные приливных течений меняются по вертикали (между горизонтами) и по горизонтали (между станциями).

Этот пример иллюстрирует тот факт, что внутренние волны приливных периодов не обязательно обусловлены только потенциалом приливообразующих сил (Марчук, Каган, 1977; Поверхностные..., 2002; Рожков, 2013; Рожков, 2015;), но существенно зависят от стратификации вод и рельефа дна.

Согласно (Рожков, 2013; Рожков, 2015; Рожков, 1996) гармонические постоянные являются случайными величинами (не константами) и для них допустимо описание через вероятностные характеристики ППКСП, такие, как математическое ожидание $\bar{m}_F(t)$ и дисперсия $D_F(t)$.

Яркой иллюстрацией сложности приливных течений являются диаграммы суточного хода скорости течений в августе 2002 г. на трех горизонтах (2, 10, 21 м) станции 1, представленные на рисунке 2а. Из рис. 2а следует, что, проведя кривую, соединяющую концы векторов $\bar{m}(t)$ по последовательности номеров часов, получим

Таблица 3

Оценки амплитуд (A_u , A_v) и фаз (Ψ_u , Ψ_v) проекций скорости течений, вычисленные для августа 2002 г.

Гармоника	A_u см/с	A_v см/с	Ψ_u	Ψ_v	A_u см/с	A_v см/с	Ψ_u	Ψ_v
	Станция 1				Станция 2			
	2 м				2 м			
M_2	22,04	15,99	252	95	13,17	22,05	262	114
S_2	7,32	5,17	338	178	5,71	5,15	18	233
N_2	5,43	2,83	242	92	2,89	5,30	144	65
K_2	1,99	1,41	1	201	1,55	1,40	40	256
K_1	0,71	4,02	15	101	2,27	3,58	332	146
P_1	0,24	1,33	22	108	0,75	1,19	339	153
O_1	0,91	1,20	170	17	1,21	1,78	133	9
Q_1	0,86	0,88	172	65	0,48	1,45	2	340

Гармоника	$A_{u'}$ см/с	$A_{v'}$ см/с	Ψ_u	Ψ_v	$A_{u'}$ см/с	$A_{v'}$ см/с	Ψ_u	Ψ_v
	Станция 1				Станция 2			
	10 м				10 м			
M_2	20,80	15,64	251	92	9,67	13,31	310	106
S_2	6,02	4,42	343	171	1,03	5,10	272	181
N_2	4,54	4,06	225	66	5,06	2,76	290	153
K_2	1,64	1,20	6	193	0,28	1,39	294	204
K_1	0,93	3,78	4	101	2,42	3,42	296	143
P_1	0,31	1,25	11	108	0,80	1,13	303	150
O_1	0,71	0,69	158	3	1,56	0,22	220	116
Q_1	0,24	0,49	106	208	0,53	1,02	68	309
	21 м				16 м			
M_2	9,67	12,45	274	30	9,82	10,93	330	88
S_2	3,00	3,83	352	119	1,90	2,98	79	167
N_2	3,33	1,68	282	8	2,86	1,52	291	110
K_2	0,82	1,04	15	141	0,52	0,81	102	189
K_1	2,41	3,32	329	106	2,32	2,48	321	144
P_1	0,80	1,10	336	113	0,77	0,82	328	151
O_1	1,03	1,36	146	317	1,61	0,45	235	189
Q_1	0,19	1,03	249	180	0,44	0,56	90	309

кривую из семейства фигур Лиссажу (Горелик, 1959), которая отличается от эллипса, но может быть представлена суммой последовательности векторных гармоник. На рисунке 2б представлены эллипсы приливных гармоник, которые вносят основной вклад во внутрисуточную изменчивость течений.

В табл. 4 на примере одного месяца (август 2002 г.), одного горизонта (2 м) и одной станции приведены оценки вероятностных характеристик $\vec{m}_v(t)$, $D_v(t)$ векторного ПКСП с периодом коррелированности 24 ч, интервалом дискретности $\Delta = 1$ ч, длиной реализации $\theta = 31$ сут., а также с периодами коррелированности 12 ч и 8 ч. В таблице приведены значения модуля вектора математического ожидания в см/с и его направления φ , а также основные характеристики дисперсии по векторно-алгебраическому методу (линейный инвариант тензора дисперсии I_1 в см²/с², коэффициент вариации r и параметры эллипса СКО: наклон главной полуоси эллипса к географической системе координат α и параметр вытянутости эллипса $\sqrt{\chi}$).

Строки обертонов (с периодами 12 ч и 8 ч) суточной гармоник даны как повторы их значений, хотя для построения вероятностной модели требуется учесть фазовый сдвиг.

На рис. 3 по данным табл. 4 приведены графики внутрисуточных изменений регулярного компонента суточного хода $\vec{m}_v(t)$ и стохастического компонента через инварианты тензора СКО скорости течений.

Напомним, что в этой статье термин эллипс как геометрическая кривая второго порядка используется в двух функциональных пространствах: временном (график последовательности значений $\vec{m}_v(t)$ с суточной или годовой ритмикой) и вероятностном (изображение тензора СКО векторного процесса $\vec{V}(t)$).

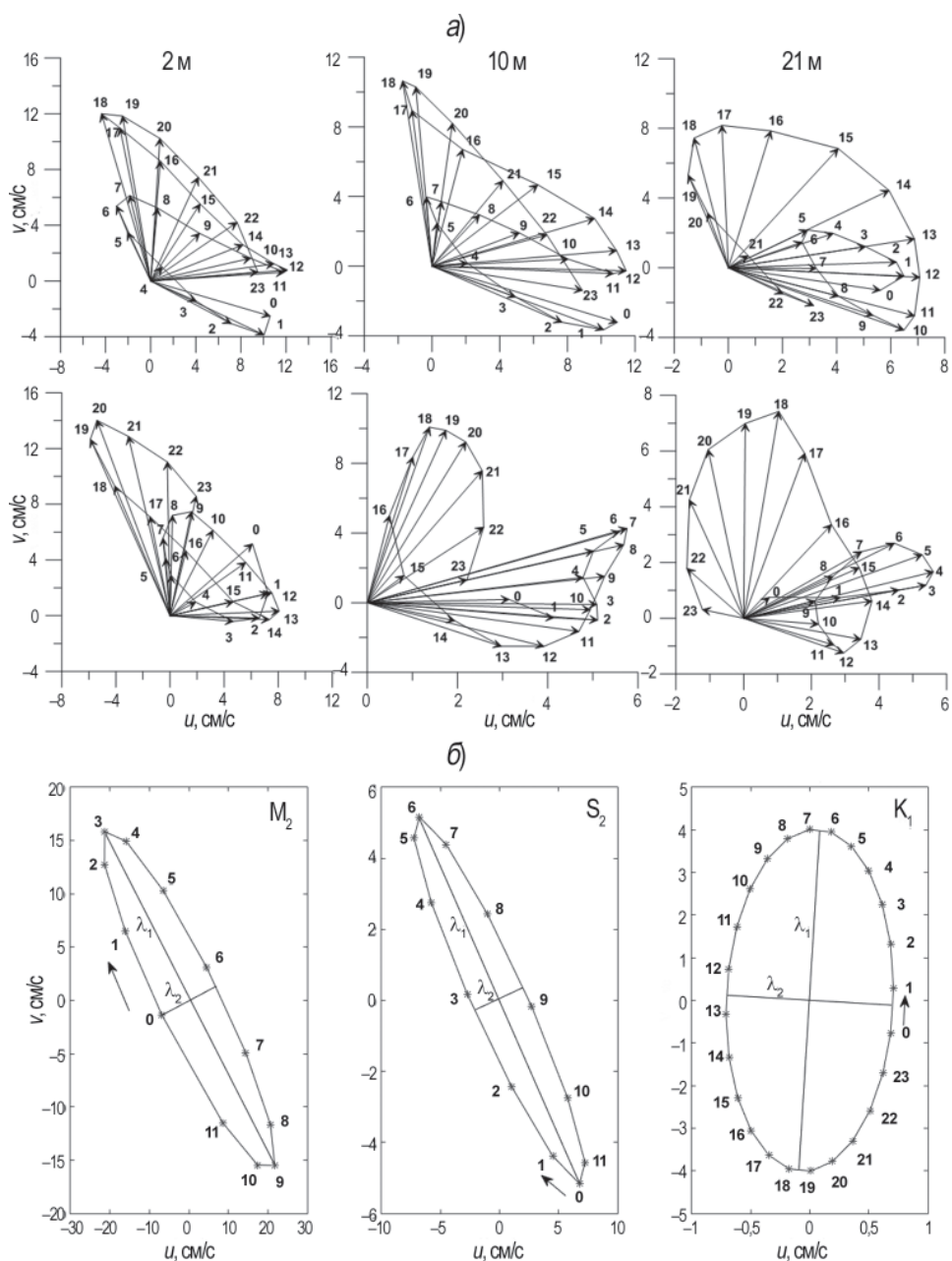


Рис. 2. Диаграммы суточного хода в августе 2002 г. на 1-й станции и трех горизонтах (2, 10, 21 м) (а) и эллипсы приливных течений для M_2 , S_2 и K_1 для горизонта 2 м 1-й станции (б). Цифрами обозначены часы.

Результаты анализа изменчивости гармонических постоянных и рассмотрение приливных течений как векторных ПКСП и ППКСП привели к необходимости создать классификацию приливных течений как векторных случайных процессов.

Оценки вероятностных характеристик $\bar{m}_F(t)$, $D_F(t)$ векторного ПКСП
с периодом коррелированности 24, 12 и 8 ч

Час	$T = 24$ ч						$T = 12$ ч						$T = 8$ ч					
	$\bar{m}_F(t)$	φ°	$\sqrt{I_1}$	r	$\sqrt{\chi}$	α°	$\bar{m}_F(t)$	φ°	$\sqrt{I_1}$	r	$\sqrt{\chi}$	α°	$\bar{m}_F(t)$	φ°	$\sqrt{I_1}$	r	$\sqrt{\chi}$	α°
0	10,89	103	24,4	2,2	0,37	-62	11,39	94	25,4	2,2	0,36	-63	5,51	47	23,7	4,3	0,41	-60
1	10,77	111	24,3	2,3	0,37	-60	10,57	97	24,8	2,3	0,37	-61	5,23	48	24,0	4,6	0,38	-58
2	7,76	113	22,7	2,9	0,39	-61	7,66	92	23,7	3,1	0,38	-61	5,24	48	24,6	4,7	0,37	-57
3	4,30	110	22,3	5,2	0,39	-60	4,68	64	23,2	5,0	0,40	-60	5,77	51	24,7	4,3	0,40	-58
4	1,42	45	22,3	15,7	0,43	-56	4,89	11	23,4	4,8	0,42	-57	6,13	49	24,2	3,9	0,43	-59
5	4,06	330	21,8	5,4	0,46	-59	7,63	342	23,4	3,1	0,42	-57	5,96	47	23,6	4,0	0,44	-61
6	6,17	331	22,6	3,7	0,46	-65	9,44	337	24,2	2,6	0,42	-59	5,89	46	23,5	4,0	0,43	-64
7	6,41	343	22,5	3,5	0,47	-65	9,24	346	23,6	2,6	0,46	-57	5,73	44	23,4	4,1	0,41	-64
8	5,28	6	22,2	4,2	0,45	-59	7,77	5	23,0	3,0	0,47	-57						
9	5,52	52	22,9	4,1	0,38	-59	6,91	38	23,2	3,4	0,44	-61						
10	9,01	80	25,4	2,8	0,34	-58	8,76	71	24,4	2,8	0,40	-62						
11	11,84	87	26,8	2,3	0,37	-61	10,68	87	25,3	2,4	0,37	-64						
12	12,14	86	26,3	2,2	0,35	-63												
13	11,00	84	25,3	2,3	0,36	-61												
14	8,58	72	24,6	2,9	0,37	-60												
15	7,05	38	24,1	3,4	0,41	-60												
16	8,65	6	24,4	2,8	0,42	-58												
17	11,31	346	24,9	2,2	0,39	-55												
18	12,77	340	25,7	2,0	0,37	-55												
19	12,10	348	24,7	2,0	0,43	-52												
20	10,26	5	23,7	2,3	0,49	-56												
21	8,55	30	23,5	2,7	0,50	-63												
22	8,74	61	23,3	2,7	0,45	-68												
23	9,52	86	23,7	2,5	0,36	-66												

А.И. Дуванин (1960) классифицирует приливные явления по показателю характера приливов $\kappa = (H_{\kappa_1} + H_{\kappa_2}) / H_{\kappa_2}$ через отношение амплитуд основных гармонических составляющих. Для полусуточных приливов $0 < \kappa < 0,5$; для смешанных приливов: неправильные полусуточные $0,5 < \kappa < 2,0$, неправильные суточные $2,0 < \kappa < 4,0$; для суточных приливов $4,0 < \kappa$. За классифицирующую переменную берет-

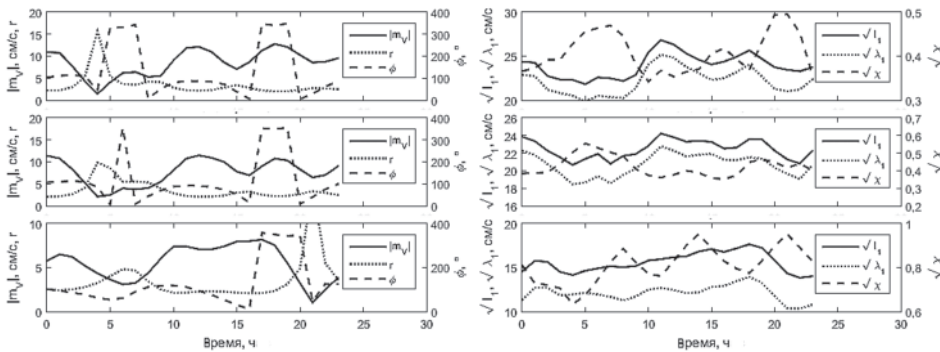


Рис. 3. Вектор математического ожидания и инварианты тензора СКО суточного хода за август 2002 г. в отдельные часы суток на станции 1 на 3 горизонтах (2, 10 и 21 м).

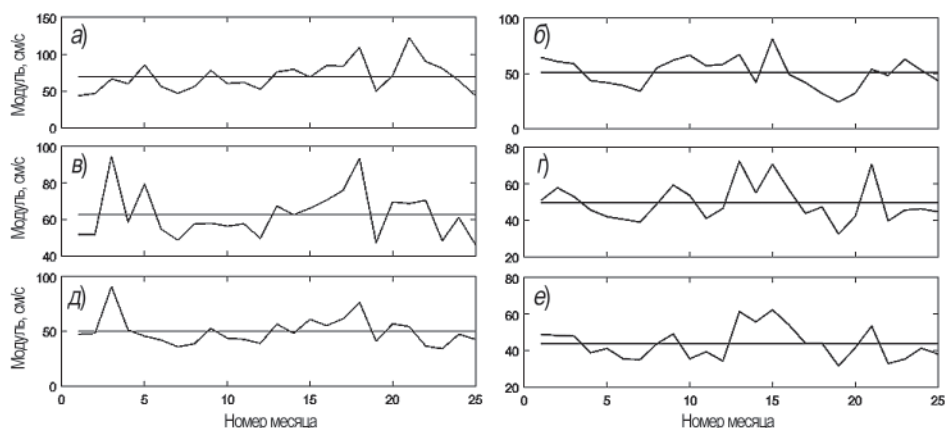


Рис. 4. Временные ряды модуля $\vec{V}_{\max}(t)$ на станциях 1 (а, в, д) и 2 (б, в, е) на горизонтах (2 (а, б), 10 (в, в) и 21 (д, е) м) с октября 2001 по октябрь 2003 г.

ся суточная ритмика приливных течений в виде векторной диаграммы средних за фиксированный месяц значений вектора скорости течений в фиксированный час, но согласно табл. 4 требуется учесть и СКО ежечасных значений (рис. 3).

А.А. Дмитриева (1963) для классификации использует максимальную скорость течения $\vec{V}_{\max}(t)$, характеризуемую модулем этого вектора, направлением γ и фазой τ . На рис. 4 приведены графики временных рядов модуля $\vec{V}_{\max}(t)$.

Из рис. 4 следует, что

- приливные движения на станции 1 и 2 во все сезоны года на всех горизонтах неоднородны;

- далеко не всегда экстремумы $|\vec{V}(t)|$ выше 1 м/с можно объяснить сизигией прилива.

Исходя из модели ППКСП и сохраняя основные принципы классификаций А.И. Дуванина и А.А. Дмитриевой, новая классификации приливов должна базироваться на методе дисперсионного анализа (ДА) векторных периодически нестационарных случайных процессов. В работе (Иванов и др., 2006) изложены принципы классификации скалярных гидрометеорологических полей методом ДА. Разработка методов классификации векторных полей требует дальнейшего развития ДА.

СИНОПТИЧЕСКАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ

Для изучения синоптической изменчивости течений отфильтруем годовой ход путем центрирования реализации $\vec{V}(t)$ на среднемесячные значения $\vec{m}_v(t)$ конкретного года и будем анализировать в квазистационарном приближении только последовательность среднесуточных значений (для исключения приливной ритмики). После исключения годовой и суточной ритмики и сохранения на реализациях течений синоптических флуктуаций, их корреляционный и спектральный анализ в квазистационарном приближении позволяет увидеть на рис. 5, где представлены графики оценок инвариантов I_1 , θ ковариационного тензора $K_p(\tau)$ и тензора спектральной плотности $S_p(\omega)$, привычные закономерности синоптической изменчивости течений. Ковариационная функция имеет экспоненциально-косинусный вид, типичный для стационарного случайного процесса авторегрессии — скользящего среднего АРСС (2, 1), а график

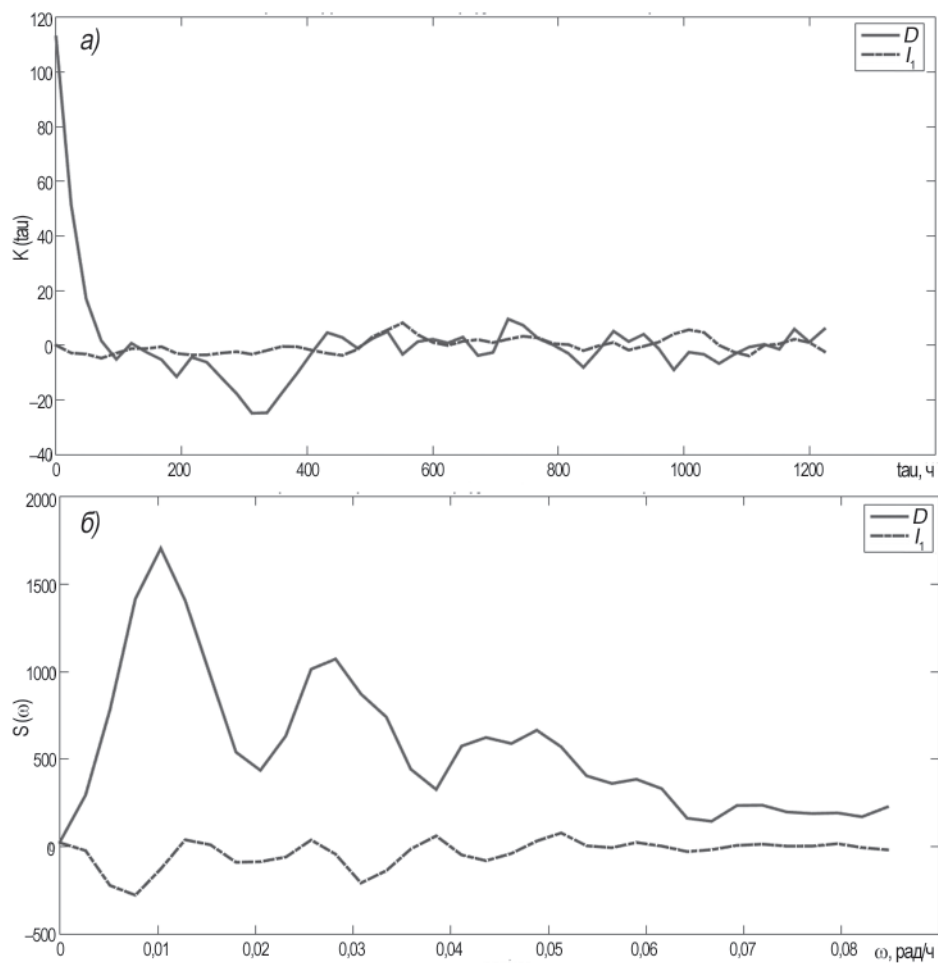


Рис. 5. Оценки инвариантов I_1 и θ ковариационного тензора $K_{\vec{r}}(\tau)$ (а) и тензора спектральной плотности $S_{\vec{r}}(\omega)$ (б) на станции 1 на горизонте 2 м.

Таблица 5

Оценки модуля и направления средней скорости течений и инвариантов тензора СКО для фильтрованного ряда данных с октября 2001 по сентябрь 2003 г.

Гори- зонт	$\bar{m}_r$, см/с	φ°	$\sqrt{I_1}$, см/с	$\sqrt{\lambda_1}$, см/с	$\sqrt{\lambda_2}$, см/с	α°	$\sqrt{\chi}$	r	$\bar{m}_r$, см/с	φ°	$\sqrt{I_1}$, см/с	$\sqrt{\lambda_1}$, см/с	$\sqrt{\lambda_2}$, см/с	α°	$\sqrt{\chi}$	r
Станция 1									Станция 2							
2 м	0,10	30	13,4	12,0	6,0	85	2,0	139	0,21	241	8,8	8,5	2,4	42	3,6	42
10 м	0,05	135	12,9	10,7	7,2	79	1,5	252	0,22	279	9,9	9,0	4,1	28	2,2	45
21 м	0,08	216	11,7	9,9	6,2	68	1,6	151	0,19	295	9,7	8,7	4,2	17	2,1	50

линейного инварианта функции спектральной плотности имеет три выраженных максимума на периодах 26, 9 и 5 суток. В табл. 5 даны оценки модуля, направления средней скорости течений и инвариантов тензора СКО.

Модуль вектора математического уменьшается с глубиной на станции 1 и незначительно изменяется на станции 2. С глубиной средний вектор отклоняется на положительный угол вправо относительно его положения в поверхностном горизонте. Значения параметров дисперсии значительно превышают средние значения, коэффициент вариации много больше 1.

ВЫВОДЫ

1. Совместный анализ синхронных измерений течений на двух станциях в Печорском море позволил установить, что квазистационарное приближение [Нестеров, 2005] является первичным анализом, который позволил сфокусировать внимание на необходимости поддиапазонного анализа ансамбля временных рядов.

За основу этого анализа, следуя (Рожков, 2013; Рожков, 2015), принято

- изучение годовой и приливной ритмики течений в приближении ПКСП и ППКСП;

- фильтрация ритмических диапазонов изменчивости, в частности, через осреднение исходных данных за час, сутки, месяц, год;

- изучение в квазистационарном приближении в диапазонах синоптической и мелкомасштабной изменчивости течений;

- выявление пространственной (горизонтальной и вертикальной) неоднородности течений.

2. В диапазоне сезонной изменчивости течений наибольший вклад в дисперсию процесса вносит третьегодовая гармоника, а в 2002–2003 гг. — годовая и полугодовая гармоники, что можно объяснить аномалиями ледяного покрова акватории.

3. Показано, что гармонические постоянные приливных течений не являются постоянными и меняются по вертикали (между горизонтами), по горизонтали (между станциями) и по времени. В этом случае для описания параметров внутренних приливных волн необходимо применение вероятностных характеристик и методов ППКСП.

Компонентный метод описания позволяет выделить постоянную и стохастическую части приливных гармоник (математическое ожидание и дисперсию), когерентный — рассмотреть внутрисуточную изменчивость течений.

4. Диапазон синоптической изменчивости рассмотрен в стационарном приближении после применения фильтрации приливной и сезонной ритмики. Полученные параметры корреляционных функций и функций спектральных плотностей характеризуют эту изменчивость как случайный процесс авторегрессии — скользящего среднего АРСС (2, 1).

Данная статья и по ее названию, и по содержанию направлена на обсуждение результатов вероятностного анализа натурных данных, но ее авторы ставили перед собой задачу построить имитационную вероятностную модель течений в Печорском море с учетом главных влияющих факторов (приливообразующие силы, синоптические процессы, ледовый покров). Эта модель строится, исходя из рассмотрения приливного компонента как ППКСП, сезонной изменчивости — как ПКСП, а синоптической изменчивости — как АРСС (2, 1).

Вероятностная модель в квазистационарном приближении (Нестеров, 2005) не учитывает сезонной и приливной ритмики течений и имеет сложную спектральную структуру.

В то же время планируемая поддиапазонная модель изменчивости течений допускает детерминизм факторов (в среднем) и их стохастичность (через СКО), позволяет варьировать комбинациями параметров аппроксимации спектральной плотности случайного процесса и функции распределения вероятностей его значений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Баимачников И.Л., Бухановский А.В., Иванов Н.Е., Рожков В.А., Фукс В.Р. Приливы как полипериодически коррелированный случайный процесс // Сборник докладов 4-й Всероссийской научно-технической конференции «Современное состояние, проблемы навигации и океанографии» (НО-2001). Санкт-Петербург, 6–9 июня 2001. Т. 2. СПб., 2001а. С. 175–179.
- Баимачников И.Л., Иванов Н.Е., Рожков В.А. Методы анализа приливных явлений в морях // Навигация и гидрография. 2001б. № 13. С. 151–169.
- Бельшев А.П., Клеванцов Ю.П., Рожков В.А. Вероятностный анализ морских течений. Л.: ГИМИЗ, 1983. 264 с.
- Войнов Г.Н. Приливные явления в Карском море. СПб.: РГО, 1999. 110 с.
- Горелик Г.С. Колебания и волны. М.: Физматлит, 1959. 572 с.
- Дмитриева А.А. Методы расчета и предвычисления приливных течений. Л.: ЛГУ, 1963. 182 с.
- Драган Я.П., Рожков В.А., Яворский И.Н. Методы вероятностного анализа ритмики океанологических процессов. Л.: Гидрометеоздат, 1987. 319 с.
- Дуванин А.И. Приливы в море. Л.: ГИМИЗ, 1960. 390 с.
- Иванов Н.Е., Клеванцов Ю.П., Рожков В.А. Специфика дисперсионного анализа гидрометеорологических процессов и полей // Известия РГО. 2006. Т. 138. Вып. 5. С. 20–39.
- Иванов Н.Е., Рожков В.А. Изменчивость приливо-отливных явлений // Навигация и гидрография. 2005. Т. 19. С. 100–110.
- Марчук Г.И., Каган Б.А. Океанские приливы. Математические модели и численные эксперименты. Л.: Гидрометеоздат, 1977. 296 с.
- Нестеров А.В. Динамика вод и льдов в юго-восточной части Баренцева моря по данным автономных донных станций // Труды РАО. Международная конференция. Санкт-Петербург, 13–15 сентября 2005. СПб., 2005. С. 128–131.
- Поверхностные и внутренние волны в арктических морях. СПб.: Гидрометеоздат, 2002. 364 с.
- Рожков В.А. Статистическая гидрометеорология. СПб.: СПбГУ, 2013. Ч. 1. 186 с.; 2013. Ч. 2. 215 с.; 2015. Ч. 3. 255 с.
- Рожков В.А. Теория вероятностей случайных событий, величин и функций с гидрометеорологическими примерами. СПб.: «Прогресс-погода», 1996. 560 с.
- Zubakin G.K., Gudoshnikov Yu.P., Nesterov A.V., Sukhikh N.A. Hydrometeorological and ice conditions in the Pechora Sea during the conduct of the experiment in 2001–2003 (part 1) // Proceedings International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC'15), June 14–18, 2015, Tondheim, Norway. Curran Associations, 2015. P. 240–249.

V.A. ROZHKOVA, N.A. SUKHIKH

VARIABILITY OF CURRENTS IN THE PECHORA SEA

The results of the probabilistic analysis of sea currents velocity ADCP measurements was collected from September 2001 to October 2003 simultaneously at two stations on series of horizons.

In present study the dataset is analyzed in non-stationary approximation in case of periodically correlated random processes (PCRP) in the range of seasonal variability (period of correlation 1 year) and polyperiodically correlated random processes (PPCRP) in the range of tidal variability (periods of correlation are lunar and solar days and half of these days with considering of monthly, semimonthly and the long-term inequalities). The results of the analysis are in the range of annual, tidal and synoptic sea currents variability in the quasi-stationary approximation after filtration (filtration of annual and diurnal cycles).

Keywords: sea current velocity, non-stationary approximation, periodically correlated random process, polyperiodically correlated random process, tidal rhythms, seasonal variability.

ПАЛИНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕКОНСТРУКЦИИ РАЗРЕЗОВ СРЕДНЕГО И ПОЗДНЕГО ГОЛОЦЕНА ПОБЕРЕЖЬЯ БАРЕНЦЕВА МОРЯ

канд. геогр. наук Т.В. САПЕЛКО¹, канд. геогр. наук М.А. АНИСИМОВ^{2,3},
аспирант Е.С. НОСЕВИЧ²

¹ — Институт озераведения РАН, Санкт-Петербург, e-mail: tsapelko@mail.ru

² — Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург

³ — ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, e-mail: anisimov@aaari.ru

В статье представлены новые палинологические данные о последних этапах голоцена. В работе характеризуются изменения растительности на границе суббореального и субатлантического периодов, вызванные похолоданием климата на побережье Баренцева моря. Мы получили результаты палинологического анализа из разрезов различного генезиса. Реконструкция растительности проведена не только на локальном, но и на региональном уровне. Около 3000–2500 лет назад, на территории рассматриваемого региона получила распространение лесотундровая растительность, связанная с относительно теплым периодом. Около 2500–2000 лет назад лесотундровая растительность сменилась тундровой, что было связано с похолоданием климата. Палинологический анализ является очень важным ключом к реконструкции растительности и изменения климата.

Ключевые слова: Кольский полуостров, Баренцево море, палинология, палеоклимат, реконструкции растительности.

ВВЕДЕНИЕ

Реконструкции растительности и климата за голоценовый период, выполненные для территории арктических островов, весьма актуальны при решении современных проблем освоения и изучения Арктики. В связи с этим значительное количество палинологических исследований проводится для арктических островов. Однако при изучении разрезов островных территорий арктической зоны палинологи сталкиваются с серьезными проблемами. Это в первую очередь небольшое количество разрезов в Арктике, пригодных для палинологических исследований. В основном содержание пыльцы в таких разрезах невелико (Говоруха, 1967; Дымов, Шарин, 2005; Большианов и др., 2009), что затрудняет проведение анализа. Еще одной проблемой палинологических исследований на арктических островах является значительное содержание заносной пыльцы (Андреев и др., 1997; Анисимов, Москаленко, 2006 и др.). Поэтому весьма актуальными являются методические работы по изучению субрецентных и рецентных проб арктических островов и прилегающих континентальных районов — территорий вероятного заноса пыльцы. Подобных исследований для арктических островов выполнено немного: субрецентные и рецентные палиноспектры для архипелага Северная Земля (Калугина и др., 1979; Andreev et al., 2008),

рецентные палиноспектры для Новосибирских островов (Анисимов, Москаленко, 2006), субрецентные палиноспектры для архипелага Земля Франца-Иосифа (Кренке, Федорова, 1961; Nosevich et al., 2015; Сапелко и др., 2015). Во всех палиноспектрах отмечается большое количество дальнезаносной пыли.

Для решения перечисленных проблем палинологических реконструкций арктической зоны мы провели исследования серии разрезов прибрежной зоны Баренцева моря. Вероятным источником, откуда идет занос пыли на острова, является Кольский полуостров, о чем свидетельствуют наши предварительные исследования поверхностных проб на севере полуострова и на архипелаге Земля Франца-Иосифа (Сапелко и др., 2015). Результаты исследований излагаются и обсуждаются в статье.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследуемая территория относится к области субарктического климатического пояса. Близость теплого Северо-Атлантического течения обуславливает аномально высокие для данной широты зимние температуры воздуха — в среднем они составляют -12°C . Летние температуры составляют $8-9^{\circ}\text{C}$. Территория относится к району избыточного увлажнения, т.к. годовое количество осадков на побережье составляет 600–700 мм, что значительно превышает испаряемость (Атлас Мурманской области, 1971; Кременецкий и др., 1997). При движении с запада на восток влияние теплого течения ослабевает, что отражается и в характере растительности. Почвы в регионе

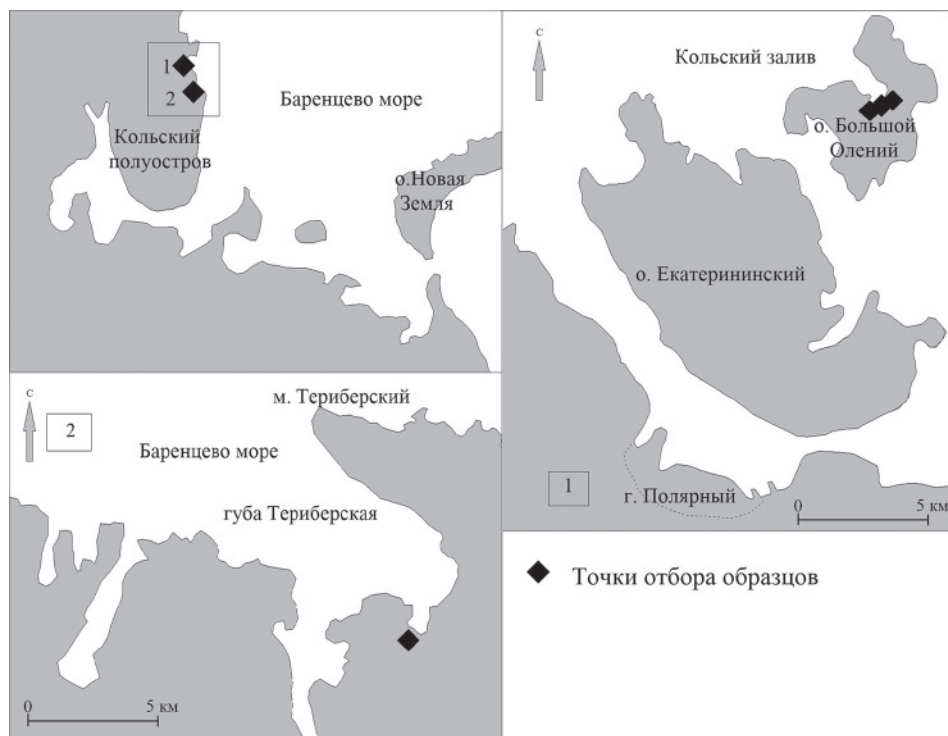


Рис. 1. Места отбора разрезов: 1 — разрезы донных отложений озера и археологического памятника на о. Большой Олений; 2 — разрез болота у п. Териберка.



Рис. 2 . Расположение разрезов, отобранных на о. Большой Олений

в основном маломощные, встречаются литоземы. Однако нередко торфяные и подзолистые почвы, где мощность органогенного горизонта в отдельных случаях достигает 30–40 см. Заболоченные низины заняты торфяными почвами. Все изученные нами разрезы в настоящее время расположены в тундровой зоне примерно в 10 км за пределами современной границы леса. Северная граница *Pinus* проходит в десятках километров к югу (Gervais, MacDonald, 2001). Бореальные виды представлены на западе Кольского полуострова, где южный тип тундры переходит в лесотундру.

На севере Кольского полуострова с помощью палинологического анализа изучено три разреза: торфяник в районе п. Териберка, озерный и археологический

Таблица 1

Результаты радиоуглеродного датирования

Название разреза	Лабораторный номер	Материал	Радиоуглеродный возраст, C14 BP (лет назад)	Калиброванный возраст, Cal BC/AD (лет до нашей эры/лет нашей эры)
Культурный слой археологического разреза острова Большой Олений	Oxford University	Кость	3237±32	1525–1440 BC
	Oxford University	Кость	3195±39	1500–1430 BC
	LE-6801*	Уголь	2750±40	920–830 BC
	LE-6802	Уголь	3080±110	1490–1130 BC
	LE-6803	Уголь	3130±100	1520–1260 BC
	LE-6804	Уголь	3090±50	1420–1260 BC
	LE-6805	Затвердевшая смола	4010±45	2580–2460 BC
17–19 см	LE-6806	Торф	890±30	1040–1220 AD
Озеро о. Большой Олений (17–20 см)	LE-7398	Торф	1335±100	535–900 AD
Териберка, болото (80–85 см)	SPb-463**	Торф	3400±65	1500–2000 BC

Примечание: LE* — радиоуглеродная лаборатория ИИМК РАН (Санкт-Петербург), SPb** — радиоуглеродная лаборатория Российского государственного педагогического университета им. А.И. Герцена (Санкт-Петербург).

разрезы на острове Большой Олений в Кольском заливе Баренцева моря (рис. 1, 2). Радиоуглеродное определение возраста вмещающих отложений было выполнено в лабораториях Оксфордского университета, Санкт-Петербургского педагогического университета им. А.И. Герцена и радиоуглеродной лаборатории ИИМК РАН. Результаты датирования представлены в табл. 1.

Техническая обработка образцов для спорово-пыльцевого анализа проводилась по усовершенствованной стандартной методике (Гричук, 1940) с применением тяжелой жидкости ($\text{CdI}_2 + \text{KI}$). Для определения зерен пыльцы и спор использовались определители (Куприянова, Алёшина, 1972; Moore et al., 1991 и др.). При интерпретации растительности использованы монографии и атласы современной растительности (Александров и др., 2004; Флора Мурманской области, 1966). Спорово-пыльцевые диаграммы построены с помощью программ Tilia, Tilia Graph и TGView (<http://www.museum.state.il.us/pub/grimm/>). Подсчет процентных соотношений проводился от общей суммы пыльцы и спор. Для различных микрорегионов побережья Баренцева моря были отобраны и изучены поверхностные пробы (Sapelko, Nosevich, 2013; Носевич, Сапелко, 2014).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

1. **Разрез в районе поселка Териберка** ($69^{\circ}10'$ с.ш., $35^{\circ}11'$ в.д.; 11 м над уровнем моря) был отобран в 2011 г. в центральной части болота мезотрофного типа (Nosevich et al., 2014). Разрез представляет собой монолитную толщу торфа, степень разложения которого снижается с глубиной. Общая мощность разреза 92 см. Выполнено описание окружающих ландшафтов, на основании которого составлена ландшафтная схема изученного болота (рис. 3). Болотные сообщества представлены *Rubus chamaemorus*, *Carex* и *Sphagnum*. *Betula nana* и *Empetrum nigrum* формируют кустарничковый ярус. Распространены мхи и лишайники, например *Cetraria islandica*, *Cladonia alpestris*, *C. Rangiferina*, *C. Sylvatica*, *Peltigera aphthosa*, *Dicranum undulatum*. Растительные сообщества имеют достаточно выраженную привязку к элементам рельефа. Березовые

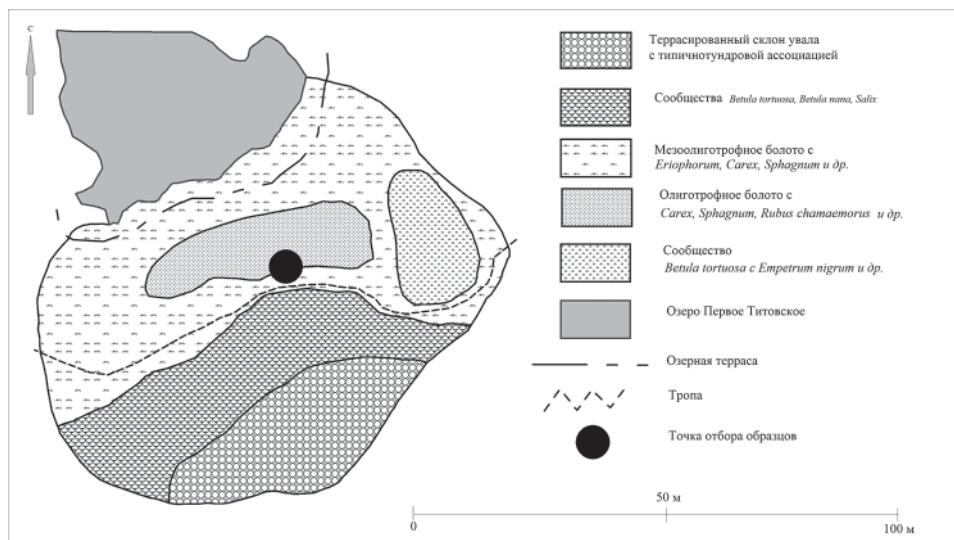
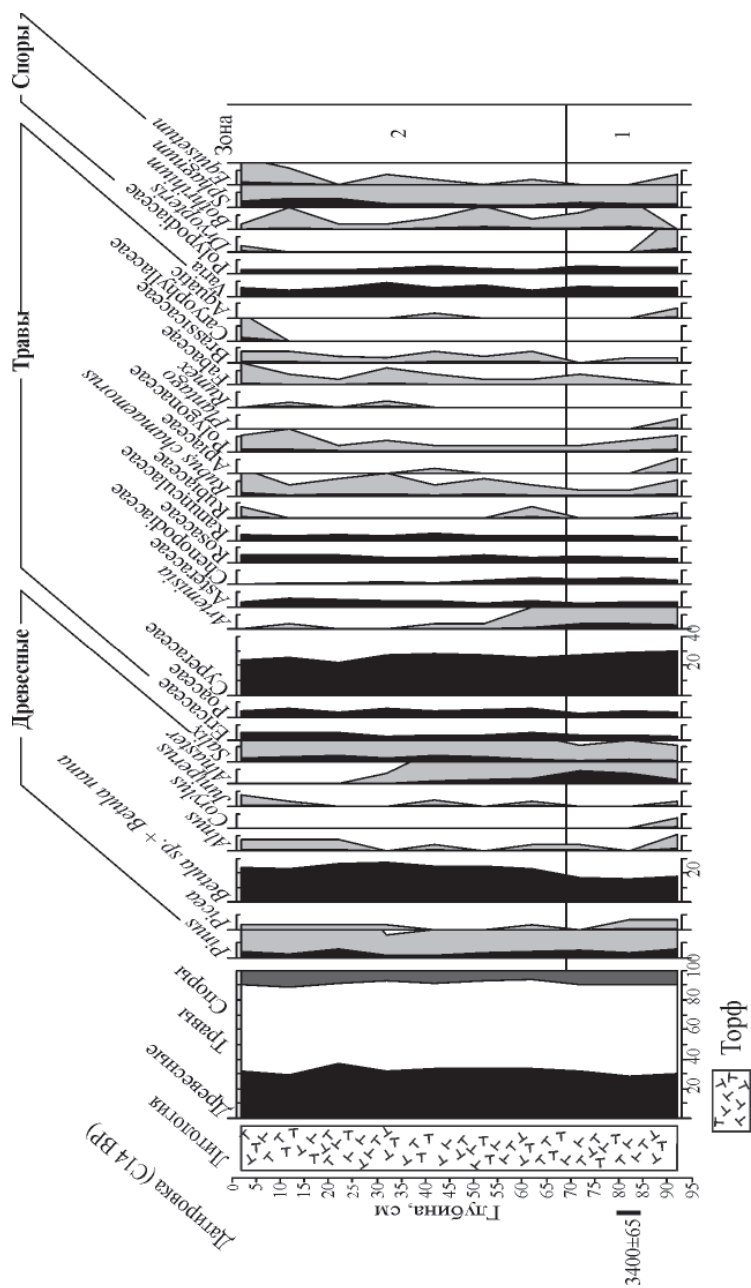


Рис. 3. Схема растительности болота у пос. Териберка.



криволесья, достигающие 5 м в высоту, приурочены к межскальным понижениям и тыловым швам террас, более защищенным от ветра и имеющим большую мощность мелкозема. Типично тундровые ассоциации с обилием лишайников и карликовой березой занимают открытые пространства седловин и вершин увалов. На этих же позициях в понижениях, аккумулирующих обильную влагу, формируются висячие болота. К небольшим озерам, распространенным на изучаемой территории, приурочены эвтрофные болота. К ним же были отнесены обширные заболачивающиеся участки понижений на морских террасах. Торфонакопление здесь обусловлено обильным питанием от поверхностного стока — временных водотоков и небольших ручьев, не имеющих еще глубокого выработанного русла. Нередко такие ручьи берут начало из мелких озер на более высоких террасах и текут по небольшим углублениям, питая более крупные ручьи, имеющие каньонообразные русла.

Радиоуглеродное датирование образца торфа из разреза в районе п. Териберка (табл.) выполнено в лаборатории Санкт-Петербургского педагогического университета им. А.И. Герцена. По результатам спорово-пыльцевого анализа построена диаграмма (рис. 4), где выделены две палинозоны.

Палинозона 1 (1500–500 BC, 69–92 см)

Данный комплекс характеризуется преобладанием травянистых растений. Среди древесных доминирует пыльца *Betula*, концентрация которой снижается к средней части зоны (с 17,4 до 15,9 %), но вновь увеличивается к верхней границе зоны (16,3 %). Аналогичный тренд имеет процент пыльцы *Pinus*. Пыльца *Picea* отсутствует в верхней части палинозоны. При этом увеличивается содержание пыльцы *Alnaster* (с 3,3 % в нижней части палинозоны до 9,1 % в верхней). Единичные зерна пыльцы *Corylus* были обнаружены в нижней части зоны. Среди трав преобладает пыльца *Cyperaceae*, а ее максимум (30,1 %) приходится на нижнюю часть палинозоны. Процент пыльцы *Rubus chamaemorus* минимален (0,4 %) в средней и верхней части палинозоны, содержание пыльцы *Ericaceae*, *Rosaceae* и *Ranunculaceae* возрастает к верхней границе зоны. В верхнем образце данной зоны отмечена пыльца *Plantago*, а также пыльца водной растительности. Преобладающими спорами являются *Polypodiaceae* и *Dryopteris*.

Палинозона 2 (500 BC — 2000 AD, 0–69 см)

Содержание пыльцы *Betula* увеличивается (до 22,4 %). Процент пыльцы *Pinus* уменьшается и достигает минимума (1,5 %) в средней части палинозоны, однако ближе к поверхности *Pinus* достигает своего максимума 5,5 %. Пыльца ели отсутствует в средней части зоны, встречаясь в небольших количествах в начале и в конце зоны. Пыльца *Alnaster* снижается до 4,1 %, затем до 0,8 % и исчезает в верхней части палинозоны. Пыльца *Salix* увеличивается к середине палинозоны. При этом доминирует пыльца трав. Одной из доминант является пыльца *Poaceae* с максимальным содержанием 6,3 % в нижней части зоны. Пыльца *Cyperaceae* также остается доминантной, но ее содержание уменьшается к поверхности с 28 до 23,3 %. Пыльца *Rubus chamaemorus* достигает максимума 1,9 % у поверхности. Пыльца *Ericaceae* увеличивается к верхней части зоны и достигает максимума 5,1 %, в то время как *Artemisia* резко снижается и исчезает. Максимум пыльцы *Ranunculaceae* приурочен к средней части зоны, на глубине 42 см, одновременно с появлением водной растительности. Пыльца *Rumex* была встречена дважды, в верхней части разреза. Среди споровых доминирует *Polypodiaceae*, содержание *Sphagnum* и *Equisetum* увеличивается к верхней части палинозоны.

В целом палинологические и радиоуглеродные данные показывают, что растительный покров *палинозоны 1* формировался в суббореальном периоде, а *палинозона 2* относится к субатлантическому периоду. Соотношение пыльцы древесных, трав и спор практически не меняется на протяжении всего разреза. Однако с наступлением субатлантического периода меняется состав растительного покрова, как среди древесных пород, так и среди трав. Полученные данные свидетельствуют о том, что климат становится холоднее с наступлением субатлантического периода.

2. Разрез донных отложений озера на о. Большой Олений (69° 13' с.ш., 33° 29' в.д.; 7 м над уровнем моря) отобран в 2005 г. в рамках работы на острове Кольской археологической экспедиции (Сапелко и др., 2009). Радиоуглеродное датирование образца торфа из разреза донных отложений озера на о. Большой Олений (рис. 2, табл. 1) выполнено в радиоуглеродной лаборатории ИИМК РАН.

В разрезе донных отложений озера выделено 2 палинозоны (рис. 5). Отложения серого суглинка в нижней части разреза, а также прослой гальки можно выделить в *палинозону 1* (16–35 см). Зона характеризуется низкой концентрацией пыльцы. Однако в середине зоны отмечено несколько образцов, более насыщенных пыльцой. В остальных подсчитаны единичные значения. В основном это пыльцевые зерна древесных и трав. Много переотложенных форм. Следующая *палинозона 2* (0–16 см) соответствует отложениям светло-коричневой алевритовой гиттии. Концентрация пыльцы здесь явно растет, немного снижаясь ко второй половине зоны. Количество пыльцы древесных и травянистых пород колеблется в течение всей зоны примерно в одинаковых значениях. Среди древесных по всему разрезу преобладает пыльца сосны. Значительно и постоянно содержание пыльцы березы (от 10 до 30 %). На протяжении всей зоны отмечена непрерывная кривая пыльцы ели. Процент содержания ее невелик (до 5 %). Встречена пыльца карликовой березки, ольхи, можжевельника, ивы. Среди пыльцы травянистых пород доминирует пыльца осок и злаков. В самом начале зоны, на стыке с нижележащим галечным слоем, обнаружено зерно эфедры. В первой половине зоны постоянно встречается пыльца водных и прибрежно-водных растений. Процент спор по разрезу колеблется в пределах 20 %. Постоянно встречаются *Bryales* и *Equisetum*. Среди плаунов встречены два вида: *Lycopodium clavatum* и *Lycopodium annotinum*. В начале зоны в небольших количествах присутствует *Sphagnum*. В середине зоны единично отмечен полушник. Часто встречаются водоросли *Pediastrum*, *Botryococcus*.

Подводя итоги, можно отметить, что нижняя часть разреза, сложенная серым суглинком (*палинозона 1*), видимо, имеет морское происхождение. Низкая концентрация пыльцы, значительное присутствие переотложенных форм, явное перемешивание и отсутствие устойчивых комплексов растительности свидетельствует в пользу этого вывода. Наличие здесь галечного прослоя говорит о снижении уровня моря и начале постепенного обособления озера. Происходил этот процесс достаточно длительное время. Мощность галечного слоя составляет 4 см. Пыльца в этом слое отмечена единично. В основном это пыльца, принесенная с более возвышенных участков острова, оттуда, где расположен могильник. В этот период там господствовала тундровая растительность. Господствовали лишайниково-кустарничковые и ерничково-кустарничковые сообщества. Заносной летучей пыльцы сосны становится меньше, совсем нет пыльцы ели. Это также говорит о том, что палиноспектры в данном случае отражают в большей

степени локальную растительность. 1335±100 лет назад начинается озерное осадконакопление. Обособленность озера сопровождается появлением водной и прибрежно-водной растительности. Водоем на протяжении всей своей истории был, по-видимому, мелководным с достаточно чистой и прозрачной водой, кроме завершающего современного этапа. В середине озерного периода появляется даже озерный полушник. При этом присутствие водорослей *Pediastrum*, *Botryococcus* практически постоянно. *Pediastrum* присутствует нескольких видов. В этот период, по-видимому, напротив, на материковом берегу имеются участки березового криволесья. В наиболее климатически благоприятные периоды там же на материке в небольших количествах встречается ольха. Далее снижается общее количество древесных пород, при этом отмечен пик присутствия березы. Практически исчезает кустарниковая и даже кустарничковая растительность. Меняется характер травянистого покрова. Снижается и количество споровых растений. Исчезает водная и прибрежно-водная растительность. Все это указывает на ухудшение климатической обстановки и о наступлении неблагоприятных условий развития озера.

Нижняя часть разреза относится к морской стадии осадконакопления, о чем свидетельствует литология осадков и заносный характер единично найденных зерен. Переход к озерной стадии осадконакопления датируется 1335±100 BP (JIE-7398).

В результате можно заметить, что верхняя часть разреза донных отложений озера сформировалась за 1500 лет. Вследствие обособленности озера сформировалась пресноводная и прибрежно-водная растительность, отразившаяся в спектрах. На противоположном, материковом берегу, по всей видимости, в это время существовали березовые криволесья с редкими экземплярами ольхи. На последнем этапе развития озера из спектров исчезает даже кустарничковая растительность.

3. Из археологического памятника Оленеостровский могильник в южной части о. Большой Олений (69° 13' с.ш.; 33° 29' в.д.; 14,6 м над уровнем моря) отобран разрез общей мощностью 80 см (Шумкин и др., 2005). Радиоуглеродное датирование двух образцов костей из археологического памятника (рис. 2, табл. 1) выполнено в лаборатории университета г. Оксфорда и шесть датировок из памятника — в лаборатории ИИМК РАН (Шумкин и др., 2006).

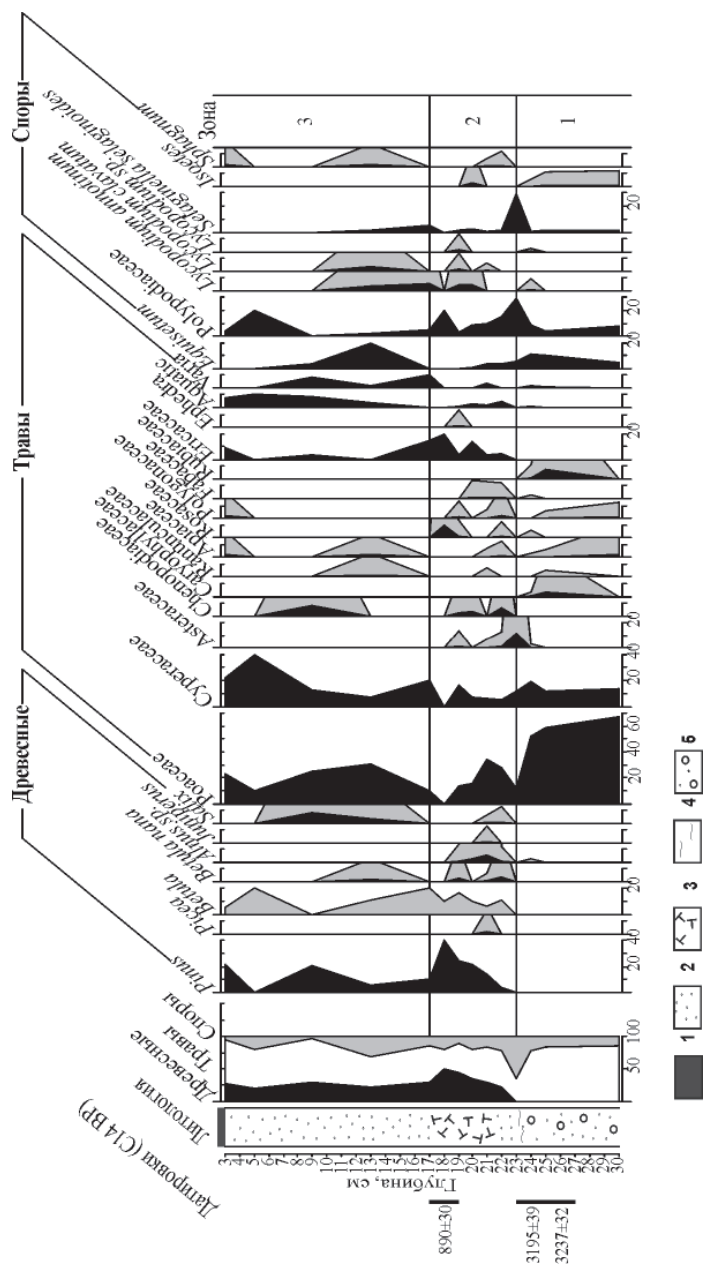
Образцы из нижнего слоя ракушечного песка с глубин 80–30 см содержали небольшое количество пыльцы плохой сохранности. Значительное увеличение содержания пыльцы и спор происходит с глубины 30 см (рис. 6).

Палинозона 1 (30–23 см)

Общая концентрация пыльцы увеличивается. Палиноспектры этого периода представлены в основном пыльцой травянистых пород и спорами. Пыльца древесных пород практически отсутствует. Среди пыльцы трав преобладает пыльца злаков и осоковых очень хорошей сохранности. Среди спор преобладают споры папоротников и хвощей. Образец с глубины 23 см следует выделить отдельно. Здесь отмечено значительное снижение концентрации пыльцы. Преобладает также пыльца злаков и осоковых. В небольшом количестве обнаружен уголь.

Палинозона 2 (22–19 см)

Концентрация пыльцы еще более увеличивается. Наблюдается значительное количество пыльцы древесных (более 50 %), ведущую роль среди которых играет пыльца сосны и берез. Изредка отмечается пыльца ели. Встречена пыльца кустарников и кустарничков. Процентное содержание пыльцы древесных в некоторых образцах



достигает процента пыльцы трав и спор. Однако вся пыльца плохой сохранности. Среди пыльцы травянистых преобладает пыльца злаков, осок, а также вересковых и разнотравья. Состав пыльцы трав очень разнообразный. Постоянно встречается пыльца водных и прибрежно-водных растений. Количество спор несколько снижается, однако увеличивается их разнообразие.

Палинозона 3 (19–3 см)

Концентрация пыльцы уменьшается. Постоянно встречается пыльца древесных пород, наиболее часто из них сосна и береза. Отмечена пыльца ивы. Среди травянистых преобладает пыльца вересковых и злаков. Спор найдено немного меньше, однако отмечено постоянное и значительное их присутствие.

Верхний образец (3–0 см) значительно отличается по составу и количеству пыльцы от предыдущих. Преобладает пыльца древесных пород, наибольший процент среди которой составляет пыльца сосны. Значительно количество берез и ивы. Среди пыльцы трав ведущую роль играет пыльца осок, злаков и вересковых. Из спор единично встречены *Polypodiaceae* и *Sphagnum*. Характерно большое количество макроостатков.

Толща ракушечного песка содержит небольшое количество пыльцы плохой сохранности, что не позволяет охарактеризовать природную обстановку периода ее формирования. Можно лишь говорить о неблагоприятных условиях захоронения пыльцы, существовавших в этот период.

Для органо-минерального слоя (погребенной почвы) характерно значительное увеличение содержания пыльцы и спор. Окружающие ландшафты представляли собой травянистые сообщества. Получают распространение водные и прибрежно-водные растения. Можно говорить об относительно прохладном и влажном климате, однако он стал более благоприятным для развития растительного покрова.

Вышележащий слой кварцево-полевошпатового песка имеет золотое происхождение. Здесь отмечено значительное снижение концентрации пыльцы. В образцах наряду с пылью и спорами обнаружены частицы угля. Полностью исчезает пыльца водных и прибрежно-водных растений, которая в небольших количествах была обнаружена в органо-минеральном слое. Климат стал более сухим, что способствовало развитию золотых процессов на открытых для господствующих ветров морских побережьях и террасах трансгрессии трюма во второй половине суббореала (Лаврова, 1960). Исушением климата, вероятно, обусловлено прекращение формирования органо-минерального слоя.

В вышележащем слое торфа отмечено резкое увеличение общего содержания пыльцы. Вновь появляются водные и прибрежно-водные растения. Значительное увеличение содержания в пылевых спектрах пыльцы древесных пород свидетельствует о влажных и теплых условиях. Очевидно, можно говорить о достаточно близком от могильника произрастании деревьев (на побережье Кольского залива). Кустарники же распространялись и на самом Большом Оленьем острове. Этот период фиксирует радиоуглеродная датировка 890 ± 30 C¹⁴ лет назад. При этом на полуострове Рыбачий в отложениях торфяника уже 628 ± 43 C¹⁴ лет назад зафиксирован период ухудшения климата (Кременецкий и др., 1997). В нашем разрезе ухудшение климата отмечается в следующем слое.

В образцах из оторфованного ракушечного песка, отмечаемого локально и перекрывающего слой торфа, концентрация пыльцы вновь снижается. При широ-

ком распространении березы, в основном преобладают травянистые открытые сообщества. Получают широкое распространение вересковые. Формирование слоя, по-видимому, происходило во влажных и более холодных условиях. Современный состав растительного покрова отражен в поверхностном почвенном горизонте. Процент содержания пыльцы сосны здесь значителен. Реконструируемый травянистый покров примерно соответствует растительности, произрастающей в настоящее время на Большом Оленьем острове.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования были получены новые данные по изменению растительного покрова и климата в течение суббореального и субатлантического периодов на побережье Баренцева моря (рис. 7). Около 3000–2500 лет назад на территории рассматриваемого региона получила распространение лесотундровая растительность, связанная с относительно теплым периодом. В суббореальный период все полученные результаты палинологического анализа указывают на распространение лесотундровой растительности с преобладанием березы и участием сосны.

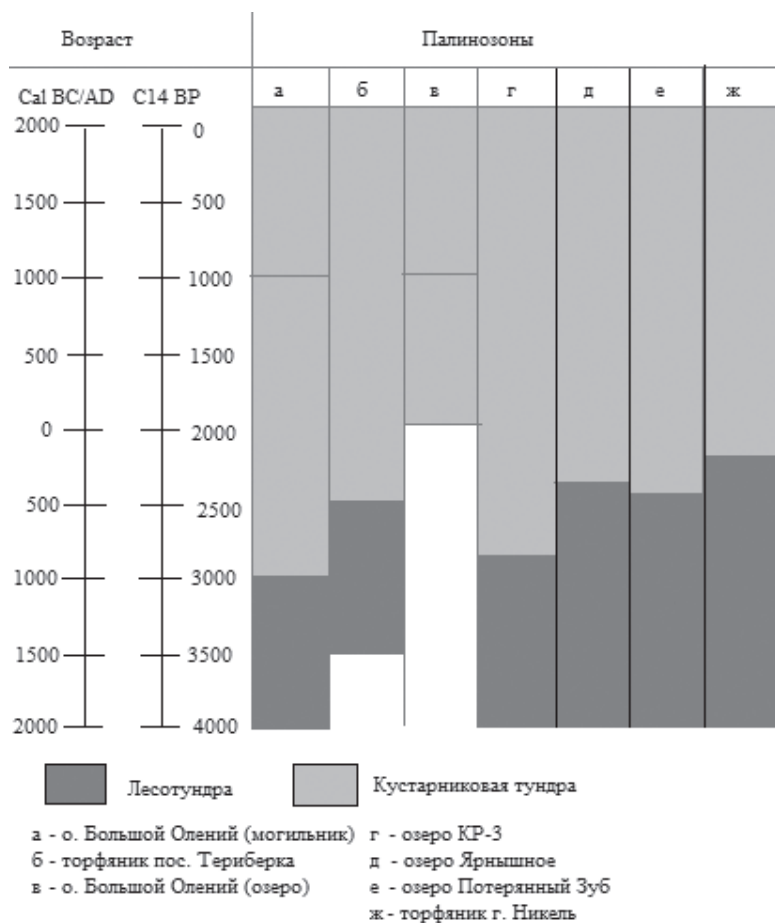


Рис.7. Реконструкция изменения растительного покрова северной части Кольского полуострова.

Климатические условия здесь были в это время относительно теплые и влажные. В субатлантический период произошло снижение термофильной растительности. Климат становится холоднее. Около 2500–2000 лет назад сократилось распространение древесной растительности. Лесотундровая зона сменилась тундрой.

Подобные условия развития природной обстановки наблюдается в это время и на других прилегающих территориях (Сапелко, 2014). На п-ове Рыбачий период ухудшения климата зафиксирован в отложениях торфяника (Кременецкий и др., 1997; Евзеров и др., 2007; Snyder et al, 1997). В донных отложениях озера КР-3 уменьшение содержания пыльцы *Pinus* зафиксировано около 2950 ± 45 С¹⁴ BP (Kremenetski et al., 2004). В районе Никеля (69 ° 27' с.ш., 30 ° 45' в.д., 185 м над уровнем моря, Кольский полуостров) в это время также зафиксировано снижение распространения березы и *Pinus sylvestris*. Около 2224 ± 48 С¹⁴ BP распространяются вересковые тундры (Янковска, 2011). Во всех разрезах тенденция примерно сходная. В субатлантическом периоде деревья практически отсутствуют, доминируют злаки и осоковые (рис. 6). Климат становится холоднее. Сходство тенденций во всех изученных разрезах, расположенных вблизи береговой линии Баренцева моря, свидетельствует, что климатические изменения имели региональный характер.

Авторы выражают благодарность за помощь в проведении полевых исследований В.Я. Шумкину, Е.М. Колтакову, А.И. Мурашкину, Д.А. Субетто, А.В. Лудиковой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Александров Г., Зайцева И., Кобяков К. Редкие растения Мурманской области. СПб.: Кольский центр охраны дикой природы, 2004. 162 с.

Андреев А.А., Николаев В.И., Большинов Д.Ю., Петров В.Н. Результаты палинологических исследований ледяного керна с ледникового купола Вавилова, Северная Земля // Материалы гляциологических исследований. Хроника обсуждений. 1997. № 83. С. 112–120.

Анисимов М.А., Москаленко И.Г. Условия формирования рецентных и субрецентных спорово-пыльцевых спектров на о-ве Беннетта (Новосибирские острова) // Вестник Санкт-Петербургского Государственного университета. Сер. 7. 2006. Вып. 1. С. 130–138.

Атлас Мурманской области. М.: ГУГК, 1971. 33 с.

Большинов Д.Ю., Погодина И.А., Гусев Е.А., Шарин В.В., Алексеев В.В., Дымов В.А., Анохин В.М., Аникина Н.Ю., Деревянко Л.Г. Новые данные по береговым линиям архипелагов Земля Франца-Иосифа, Новая Земля и Шпицберген // Проблемы Арктики и Антарктики. 2009. № 2 (82). С. 68–77.

Говоруха Л.С., Зауер Л.М. Донные отложения озер Земли Франца-Иосифа // История озер Северо-Запада России. Л.: ВГО, 1967. С. 257–365.

Гричук В.П. Методика обработки осадочных пород, бедных органическими остатками, для целей пыльцевого анализа // Проблемы физической географии. 1940. Вып. 8. С. 53–58.

Дымов В.А., Шарин В.В. Новые данные по палеогеографии голоцена архипелага Земля Франца-Иосифа (о-в Карла-Александра) // Арктика и Антарктика. 2005. Вып. 4 (38). С. 53–56.

Евзеров В.Я., Мёллер Я.Й., Колька В.В., Корнер Д.Д. История дегляциации полуостровов Рыбачьего и Среднего (Кольский полуостров) в позднем плейстоцене // Известия РАН. Серия географическая. 2007. № 5. С. 58–63

Калугина Л.В., Малаховский Д.Б., Макеев В.М., Сафронова И.Н. Некоторые результаты палинологических исследований на архипелаге Северная Земля в связи с вопросом о переносе пыльцы и спор в высокоширотной Арктике // Известия ВГО. 1979. № 4. С. 330–334.

Кременецкий К.В., Вацалова Т.В., Горячкин С.В., Черкинский А.В., Сулержицкий Л.Д. Динамика растительности и торфонакопления на западе Кольского полуострова в голоцене // Бюл. Моск. об-ва испытателей природы. отд. биол. 1997. Т. 102. Вып. 3. С. 39–45.

Кренке А.Н., Федорова Р.В. Пыльца и споры на поверхности ледников Земли Франца-Иосифа // Материалы гляциологических исследований. Хроника обсуждений. Выпуск 2. М.: Изд-во ИГ АН СССР, 1961. С. 57–60.

Куприянова Л.А., Алешина Л.А. Пыльца и споры растений флоры Европейской части СССР. Л.: Наука, 1972. 171 с.

Лаврова М.А. Четвертичная геология Кольского полуострова. М.; Л.: Наука, 1960. 234 с.

Носевич Е., Сапелко Т. Формирование субрецентных палиноспектров поверхностных проб на полуостровах Среднем и Рыбачьем, Мурманская область // Материалы к международной палинологической школе конференции. М.: ИГРАН, 2014. С. 55.

Сапелко Т.В. Северная Скандинавия. Палеогеография Кольского полуострова // Палеогеография Северной Евразии / А.А. Величко. М.: Наука, 2014. С. 30–37.

Сапелко Т.В., Анисимов М.А., Носевич Е.С., Курочкин Ю.Н. Корреляция островных и континентальных палинологических данных арктической зоны // Геология морей и океанов: материалы XXI Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. Т. I. Москва, 16–20 ноября, 2015. М.: ГЕОС. С. 222–226.

Сапелко Т.В., Лудикова А.В., Кузнецов Д.Д., Субетто Д.А. Палеогеографические исследования археологических памятников Кольского полуострова // Взаимодействие и хронология культур мезолита и неолита Восточной Европы: тезисы международной конференции к 100-летию Нины Николаевны Гуриной. СПб.: ИИМК РАН/ МАЭ РАН, 2009. С. 84–85.

Флора Мурманской области. М.; Л., 1966. Вып. 5. 549 с.

Шумкин В.Я., Колпаков Е.М., Мурашкин А.И. Некоторые итоги новых раскопок могильника на Большом Оленьем острове Баренцева моря // Записки ИИМК РАН. 2006. № 1. С. 42–52.

Шумкин В.Я., Сапелко Т.В., Лудикова А.В., Мурашкин А.И. Комплексное исследование могильника на Большом Оленьем острове в Кольском заливе Баренцева моря // Материалы конференции по изучению четвертичного периода. Сыктывкар, 2005. С. 470–471.

Янковская В. Результаты палинологического анализа изучения пальсы (Швеция, Россия) // Проблемы современной палинологии: Материалы XIII Российской палинологической конференции. Т. 1. Сыктывкар, 2011. С. 108–110.

Andreev A.A., Lubinski D.J., Bobrov A.A., Ingolfsson O., Forman S.L., Tarasov P.E., Moller P. Early Holocene environments on October Revolution Island, Severnaya Zemlya Arctic Russia // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. 2008. Vol. 267. P. 21–30.

Gervais B.R., MacDonald G.M. Tree-ring and summer-temperature response to volcanic aerosol forcing at the northern tree-line, Kola Peninsula, Russia // The Holocene 11-4. 2001. P. 499–505.

Kremenetski K.V., MacDonald G.M., Gervais B.R., Borisova O.K., Snyder J.A. Holocene vegetation history and climate change on the northern Kola Peninsula, Russia: a case study from a small tundra lake // Quaternary International. 2004. Vol. 122. P. 57–68.

Moore P.D., Webb J. A., Collinson M.E. Pollen analysis. 2nd edition. Blackwell Scientific Publications, Oxford, 1991. 216 p.

Nosevich E., Sapelko T., Anisimov M. Paleoclimate and paleoenvironmental reconstructions of the North Kola peninsula during the past 2000 years according pollen data // Geophysical Research Abstracts. 2014. Vol. 16. EGU2014-530, 2014 EGU General Assembly, Vienna. URL: <http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2014/EGU2014-530.pdf> [дата обращения 02.02.2016].

Sapelko T., Nosevich E. Holocene palaeoenvironmental changes on the North Kola Peninsula: formation of modern landscapes // Abstracts of Past Gateways. First International conference and workshop. St.-Petersburg, May 13–17, 2013. P. 65. URL: <http://www.geol.lu.se/pastgateways/docs/PastGateways2013-abstracts.pdf> [дата обращения 02.02.2016].

Snyder J.A., Forman S.L., Mode W.A., Tarasov G.A. Postglacial relative sea-level history: sediment and diatom records of emerged coastal lakes, north-central Kola Peninsula, Russia // *Boreas*. 1997. Vol. 26. № 1. P. 329–346.

T.V. SAPELKO, M.A. ANISIMOV, E.S. NOSEVICH

POLLEN RECONSTRUCTION DURING THE MIDDLE AND LATE HOLOCENE IN THE BARENTS SEA COAST

Our research presents new pollen data about the last stages of the Holocene. The data show vegetation changes in the transition of the Subboreal and Subatlantic periods in the Barents Sea coast, caused by the fall in temperatures. We retrieved pollen data from different genesis sites; therefore we can reconstruct not only local, but also regional vegetation. Around 3000–2500 years ago on the region was spread forest-tundra vegetation associated with the relatively warm period. Around 2500–2000 years ago was spread tundra vegetation associated with cold period. Pollen analysis is a very important key to the reconstruction of vegetation and climate change.

Keywords: Kola Peninsula, Barents Sea, palynology, paleoclimate, reconstruction of vegetation.

СТРАНИЦЫ ИСТОРИИ

УДК 061.62(09)(98)

Поступила 15 января 2016 г.

**О ПОДГОТОВКЕ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
АНТАРКТИДЫ В СЕРЕДИНЕ XX ВЕКА**
(К 60-ЛЕТИЮ ПЕРВОЙ КОМПЛЕКСНОЙ АНТАРКТИЧЕСКОЙ ЭКСПЕДИЦИИ)

канд. геогр. наук *И.Н. СОКРАТОВА*^{1,2}, д-р геогр. наук *Л.М. САВАТЮГИН*²

¹ — РАН, ИИЕТ РАН, г. Москва, e-mail: sokratova@geodep.ras.ru

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

60 лет назад (13 февраля 1956 г.) к исследованиям в Антарктиде приступила Первая Комплексная антарктическая экспедиция СССР, ознаменовавшая начало нового масштабного периода в истории освоения шестого континента, в целом сопряженной с развитием мировой политической и экономической системы.

Не случайно до сих пор возникают дискуссии о том, кому принадлежит первенство открытия ледяного материка, хотя официально признано, что Антарктида открыта в 1820 г. российскими моряками Первой русской антарктической экспедиции в Южное полушарие под командованием Ф.Ф. Беллинсгаузена и М.П. Лазарева (Овлащенко, 2010). Эта экспедиция была организована с целью утверждения Российской империи в качестве одного из руководителей мирового порядка после победы в войне 1812 г.; кроме того, кругосветные экспедиции того времени имели и практический смысл, поддерживая освоение Русской Америки. Во второй половине XIX в. Россия сменила геополитическую доктрину океанской державы на континентальную сухопутную концепцию, и российские антарктические плавания надолго прекратились. Попытка возродить их была предпринята в СССР в начале 1930-х гг., чтобы повысить между-

народный статус молодого советского государства. Тогда в Институте проблем Севера (ныне — Арктический и антарктический научно-исследовательский институт) под руководством Р.Л. Самойловича был подготовлен проект антарктической экспедиции по программе Второго Международного полярного года (1932–1933 гг.). Однако эта идея не нашла поддержки в политических кругах западных стран, и советский антарктический проект тогда реализовать не удалось. Основной причиной отмены экспедиции называют невозможность организации бункеровки советских судов в портах Южной Америки из-за отсутствия дипломатических представительств СССР в странах Южного полушария (Белов, 1966; Лукин, 2014).

Антарктика стала в то время наиболее перспективным регионом для китобойного промысла, а китовый жир являлся важнейшим стратегическим сырьем для оборонной промышленности. Стремление к монополизации морского промысла и защите своих национальных коммерческих интересов привело к тому, что в первой половине XX в. семь стран объявили односторонними правительственными актами об установлении своих «антарктических секторов» (Великобритания, Новая Зеландия, Австралия, Франция, Норвегия,

Аргентина, Чили). После того, как в 1938 г. Германия организовала экспедицию в Антарктиду с целью заявить о принадлежности ей участка Антарктиды, Советский Союз, не приступивший пока к освоению шестого континента, 27 января 1939 г. провозгласил идею о том, что Антарктида должна принадлежать всему человечеству (Лукин, 2014).

После победы во Второй мировой войне СССР и США вступили в борьбу за лидерство в международном сообществе. Советскому Союзу необходимо было закрепить за собой лидирующие позиции мировой державы, формирующей геополитику, что не позволяло оставаться в стороне от возобновившегося процесса раздела Антарктики. В международном праве того времени широко использовалось юридическое понятие «эффективной оккупации» или «эффективного контроля», которое воплощали в практику США (Лукин, 2014), поэтому в нашей стране встал вопрос об активном освоении Антарктического материка.

В 1946 г. под руководством В.Х. Буйницкого, в то время — директора Арктического института, был разработан проект Морской антарктической экспедиции СССР. Однако послевоенная экономическая ситуация в нашей стране не способствовала осуществлению данного проекта. При этом в 1947 г. в антарктических водах начала работу советская китобойная флотилия «Слава», в которой принимали участие специалисты Государственного океанографического института ГУГМС при Совете Министров СССР и Всесоюзного института рыбного хозяйства и океанографии Минрыбхоза СССР.

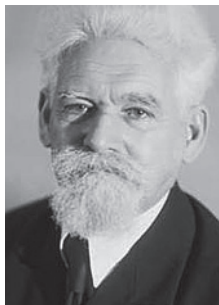
В конце 1947 г. Совет Министров СССР поручил МИД СССР заняться проблемами межгосударственных отношений в Антарктике, поскольку несогласованность границ антарктических секторов различных стран приводила к межгосударственным политическим конфликтам. В 1948 г. США на правах лидера решили взять на себя решение сложного вопроса международного права по урегулированию территориальных претензий на антарктические земли и для этой цели предложили организовать Международную антарктическую конференцию. Важно отметить, что Советский Союз не получил приглашения участвовать в этом мероприятии, поскольку он еще не проводил работ по активному освоению шестого континента. Это ослабляло позиции СССР на международной арене. В силу ряда причин конференция не состоялась, и вопрос международного режима Антарктики продолжал оставаться нерешенным (Лукин, 2014).

К концу 1940-х гг. были опубликованы первые результаты, в том числе американские, рекогносцировочных исследований различных участков прибрежной зоны Антарктиды, включая только что открытые свободные от оледенения участки — антарктические оазисы. В публикациях, с одной стороны, сообщалось об отсутствии на обследованных территориях нефти или радиоактивных минералов, которые представляли особый интерес; с другой стороны, говорилось о том, что новый, практически неизведанный континент может хранить большие запасы минеральных ресурсов (Сократова, 2010). В СССР публикации переводились на русский язык

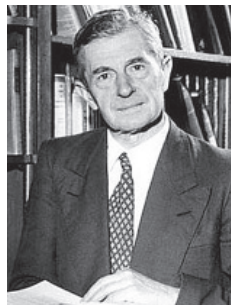
В.Х. Буйницкий



Л.С. Берг



С. Чэпмен



В.В. Белоусов



и анализировались. В докладе Географическому обществу Союза ССР его президент академик Л.С. Берг, ссылаясь на зарубежные публикации, сообщал о том, что «этот материк, возможно, окажется шкатулкой сокровищ... есть вероятность нахождения урановых руд...» (Берг, 1949). Неоднократное переиздание в эти годы романа В.А. Обручева «Земля Санникова» общим тиражом свыше 500 000 экземпляров, по всей видимости, также имело цель поддержания общественного интереса к полярным исследованиям в целом и, в том числе, к исследованиям загадочного Антарктического материка.

7 июля 1950 г. был опубликован Меморандум Совета Министров СССР о необходимости правового решения вопроса о режиме Антарктики с участием всех заинтересованных сторон. Было заявлено об экономических и научных интересах нашего государства в этом регионе. В связи с этим перед нашим государством встала задача создания национальной антарктической сети постоянно действующих станций на шестом континенте. Научные исследования являлись наиболее эффективным методом активного присутствия государства в Антарктике, и возглавить их было поручено Академии наук СССР (АН СССР). Это решение было принято еще до официального решения о проведении Международного геофизического года 1957/58 г. (МГГ), которое было принято Международным советом научных союзов при ООН в октябре 1951 г. по предложению известного английского геофизика профессора С. Чэпмена, поддержанному Все-

мирной метеорологической организацией (Саватюгин, 2004). Для координации работ МГГ и разработки общей программы исследований был создан Специальный комитет по проведению МГГ во главе с С. Чэпменом (Великобритания). Вице-президентом комитета сначала был профессор Л. Беркнер (США), а затем (с 1954 г.) один из наиболее авторитетных за рубежом советских геологов-тектонистов член-корреспондент АН СССР В.В. Белоусов.

В том же 1951 г. в аппарате Президиума Академии наук СССР был создан Отдел морских экспедиционных работ (ОМЭР), который возглавил знаменитый полярник И.Д. Папанин (оставшийся на этой должности до конца жизни); его заместителем стал Е.М. Сузюмов (до этого — ученый секретарь Института океанологии, активно работавший с И.Д. Папаниным). Инициативная группа, созданная при ОМЭР, но официально не оформленная, разрабатывала планы экспедиции в Антарктику. В Антарктиде планировалось решать прикладные научные задачи. В инициативную группу входили энтузиасты Антарктики — научные работники, моряки, летчики, инженеры, радисты, снабженцы с большим стажем и опытом работы в Арктике. Необходимо было найти отправные точки экспедиции, наметить ясные цели и реальные средства для их осуществления. Рабочую группу по океанографии возглавлял доктор географических наук В.Г. Корт — начальник Главной морской обсерватории; вопросы организации работ на материке разрабатывал доктор физико-математических наук А.М. Гусев — заместитель директора

И.Д. Папанин



Е.М. Сузюмов



В.Г. Корт



А.М. Гусев



Морского гидрофизического института; он же осуществлял связь с Межведомственным комитетом МГГ; проблемы гляциологии и географии намечала группа ученых под руководством доктора географических наук Г.А. Авсюка — заместителя директора Института географии АН СССР; группу по метеорологии вел крупный знаток климата Южного полушария кандидат наук Г.М. Таубер, сотрудник ГОИН. Опытные мореплаватели — капитаны дальнего плавания С.И. Ушаков и И.А. Ман изучали навигационные условия, планировали маршруты кораблей, занимались расчетами загрузки судна и выгрузки грузов на ледяной материк. С.И. Ушаков подготовил затем техническое задание, по которому на Рижском судоремонтном заводе дизель-электроход «Обь» был переоборудован в экспедиционное судно. В авиационную рабочую группу входили известные полярные летчики Герои Советского Союза И.П. Мазурук, И.И. Черевичный, М.Н. Каминский, опытный штурман Д.Н. Морозов и другие.

Материалы, подготовленные инициативной группой, легли в основу проекта решения, представленного затем Академией наук СССР совместно с заинтересованными министерствами и ведомствами в Совет Министров СССР. Многие из участников инициативной группы впоследствии приняли участие в Первой Комплексной антарктической экспедиции. На капитанском мостике стоял И.А. Ман, начальником морской части экспедиции стал В.Г. Корт, авиационный отряд возглавлял И.И. Черевичный, а главным штурманом авиаотряда отправился Д.Н. Морозов. В научном со-

ставе экспедиции находились А.М. Гусев, Г.А. Авсюк, А.В. Живаго, А.П. Лисицын и другие. Ученым секретарем экспедиции был назначен Е.М. Сузюмов.

Поддержку инициативной группе оказывали руководители Академии наук СССР — А.Н. Несмеянов, И.П. Бардин, А.В. Топчиев. Вопрос об экспедиции в Антарктику обсуждался в Госплане СССР и нескольких комиссиях. Реализация идей упиралась в главную трудность: в СССР не было ледокольных судов на жидком топливе, только к 1954 г. советский арктический флот пополнился мощными современными судами ледокольного типа, дизель-электроходами «Обь» и «Лена».

В 1954 г. решением Правительства СССР был создан Межведомственный комитет по подготовке и проведению МГГ при Президиуме Академии наук СССР (ныне Геофизический центр РАН). Комитет возглавил сначала академик Г.А. Гамбурцев, а после его кончины вице-президент АН СССР академик И.П. Бардин, заместителями были назначены члены-корреспонденты АН СССР В.В. Белоусов и Ю.Д. Буланже, профессор Н.В. Пушков и академик АН СССР Ф.Ф. Давитая. Ученым секретарем стала профессор В.А. Троицкая.

В ноябре 1954 г. впервые рассматривался вопрос о задачах, плане проведения и общей программе работ советской антарктической экспедиции; важнейшее место отводилось геолого-географическим исследованиям. Разработка этих программ велась главным образом в Арктическом научно-исследовательском институте (АНИИ) и в Институте географии; с середи-

Г.А. Авсюк



Ю.Д. Буланже



Г.М. Таубер



Г.А. Гамбурцев



ны 1955 г. в разработку программ включились Научно-исследовательский институт геологии Арктики и Всесоюзный институт техники разведки.

13 июля 1955 г. Совет Министров СССР издал постановление об организации Комплексной антарктической экспедиции (КАЭ). Научное руководство экспедиционными исследованиями было возложено на Академию наук СССР, а техническое и морское обеспечение — на Главное управление Северного морского пути (ГУ СМП) Минфлота СССР, в ведении которого находился АНИИ. Именно это обстоятельство определило назначение Президиумом АН СССР на должность начальника КАЭ Героя Советского Союза, заместителя директора АНИИ М.М. Сомова.

Распоряжением АН СССР от 1 августа 1955 г. № 00141 была создана Комиссия по антарктическим исследованиям при Межведомственном комитете по проведению МГГ. 16 сентября 1955 г. вышло Постановление № 474 «О создании Совета по антарктическим исследованиям при Президиуме Академии наук СССР». Во изменение распоряжения Президиума АН СССР от 01.08.1955 г. № 00141 был организован Совет по антарктическим исследованиям при Президиуме АН СССР и определены его основные задачи: согласование всех разрабатываемых программ. В окончательном виде общая программа была утверждена только во второй половине ноября 1955 г., за две недели до отправки экспедиции (Постановление Президиума АН СССР от 18 ноября 1955 г. № 600 «О подготовке и плане проведения Комплексной антарктической экспедиции АН СССР»). Были определены цели и главные задачи КАЭ, утверждены план научных исследований, руководящий состав экспедиции, предусмотрены конкретные задания Совету по антарктиче-



И.А. Ман



М.М. Сомов

ским исследованиям, ВИНТИ и Управлению делами АН СССР по обеспечению работ КАЭ.

Комплексная антарктическая экспедиция состояла из двух относительно самостоятельных частей — континентальной и морской.

М.М. Сомов, возглавлявший экспедицию, непосредственно руководил ее материковой частью. Морской частью экспедиции руководил заместитель начальника экспедиции по научной части В.Г. Корт.

Материковая часть 1-й КАЭ состояла из геолого-географического, аэрометеорологического, геофизического, аэрофотограмметрического отрядов, радиоотряда, авиационного и вспомогательного отрядов. В Морскую часть входили аэрометеорологический, гидрологический, гидрохимический, геологический, геофизический, гидрографический, биологический отряды. В экспедиции 1955–1957 гг. вместе с экипажами судов участвовало 425 человек, из которых на зимовку в Антарктиде осталось 92 человека.

Дизель-электроход «Обь» (капитан И.А. Ман) вышел из Калининграда 30 ноября 1955 г. В экспедиции также участвовали дизель-электроход «Лена» (капитан А.И. Ветров) и рефрижераторное судно № 7 (капитан М.А. Цыганков).

13 февраля 1956 г. была открыта первая советская антарктическая станция Мирный, М.М. Сомов возглавил зимовку на станции, под его руководством начались систематические стационарные научные наблюдения. В апреле 1956 г. М.М. Сомов организовал первый санно-тракторный поход в глубь материка, и в мае 1956 г. была создана первая стационарная внутриматериковая станция Пионерская. 15 октября 1956 г. в оазисе Бангера была открыта научная станция Оазис (Нудельман, 1959).



Разгрузка д/з «Обь» на рейде Мирного.

За время работы Первой КАЭ были произведены общие географические, геологические, геофизические, гляциологические и биологические обследования антарктического побережья протяженностью около 2000 км (от 76 до 111° в.д.), сопровождавшиеся аэромагнитной и аэрофотосъемкой. Были выполнены разведывательные полеты вдоль побережья к востоку и западу от станции Мирный и в глубь материка; обследованы районы Южного геомагнитного полюса и подступов к Полюсу относительной недоступности Антарктиды, давшие первые представления о характере этих районов. Морская экспедиция провела комплексные океанографические исследования в прибрежных районах Восточной Антарктиды в секторе от 91 до 162° в.д. на океанографических разрезах от островов Баллени до Новой Зеландии, через Тасманово море, от Австралии к морю Дейвиса и оттуда до Аденского залива. На картах появились названия новых географических объектов на русском языке.

Результаты работ Первой КАЭ опубликованы во многих научных статьях и

обобщены в монографиях (Нудельман, 1959; Саватюгин, Преображенская, 1999; Саватюгин, 2004, Сократова, 2010 и др.). Задачи Первой КАЭ были успешно выполнены. Наше государство, подтвердив лидерство на международной политической арене и следуя цели обеспечения своих государственных интересов в Антарктике, уверенно закрепилось на Антарктическом материке со строгим соблюдением норм международного права, приступив к его планомерному изучению, которое продолжается на протяжении последних 60 лет.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Белов М.И. Проект первой советской экспедиции в Антарктику // Информ. бюлл. САЭ. 1966. № 58. С. 64–67.
- Берг Л.С. Русские открытия в Антарктиде и современный интерес к ней. М.: Гос. издательство географ. литературы, 1949. 32 с.
- Лукин В.В. Российская антарктическая экспедиция на рубеже веков. Связь времен и поколений // Проблемы Арктики и Антарктики. 2014. № 1(99). С. 22–40.

Нудельман А.В. Советские экспедиции в Антарктику 1955–1959 гг. М.: АН СССР, 1959. 129 с.

Овлащенко А.В. Российские юристы-международники о приоритете открытия Антарктиды русской кругосветной экспедицией 1819–1821 гг. // Международное публичное и частное право. 2010. № 3. С. 5–22.

Саватюгин Л.М. Российская наука в Антарктике. М.: Городец, 2004. 304 с.

Саватюгин Л.М., Преображенская М.А. Российские исследования в Антарктике. Т. I (1–20 САЭ). СПб.: Гидрометеиздат, 1999. 360 с.

Сократова И.Н. Антарктические оазисы: история и результаты исследований. СПб.: ААНИИ, 2010. 274 с.

*Иллюстративный материал
предоставлен авторами статьи*

ТРЕБОВАНИЯ К СТАТЬЯМ, ПРЕДСТАВЛЯЕМЫМ ДЛЯ ПУБЛИКАЦИИ В ЖУРНАЛЕ «ПРОБЛЕМЫ АРКТИКИ И АНТАРКТИКИ»

1. Объем статьи не должен превышать 15 страниц текста в формате Microsoft Word с полуторным интервалом, включая список литературы, таблицы и рисунки.
2. Статьи должны быть представлены в распечатанном виде и переданы в электронном формате на CD или flash-накопителе (только при личной явке автора) в соответствии с нижеприведенными требованиями. Допускается пересылка файлов со статьей по электронной почте.
3. В комплект статьи, присылаемой автором, должны входить:
 - основной текст статьи на русском языке (включает в себя подрисовочные подписи и библиографический список);
 - иллюстративный материал в виде отдельных файлов любого из графических форматов в соответствии с нижеприведенными требованиями;
 - текст аннотации на русском и английском языках;
 - ключевые слова на русском и английском языках;
 - название статьи, инициалы и фамилии авторов на русском и английском языках;
 - сведения об авторах (ученая степень, должность, название организации и ее полный почтовый адрес, электронная почта и телефон (в статье не публикуется)) только на русском языке; УДК статьи;
 - акт экспертизы и сопроводительное письмо, подписанное руководителем организации или учреждения, где работает автор (авторы), или самим автором (авторами).
4. *Требования к представляемым текстовым файлам.*

Текст должен быть представлен в формате Word. При подготовке текста необходимо использовать стандартный шрифт Times New Roman 12 пт., для набора греческих и некоторых специальных символов использовать шрифт Symbol.

Дробные части чисел отделяются от целых ЗАПЯТОЙ, а не точкой.

Не допускается:

 - использование цифры 0 и буквы O в надстрочном написании в качестве символа градуса;
 - символа «-» (дефис) вместо «—» (тире);
 - использование символа «х» вместо символа «×»;
 - использование символов N, O, S, W в качестве указания широты и долготы как в текстах, так и на картах;

В качестве внешних кавычек используется пара «». При необходимости использования внутренних кавычек набираются кавычки “”.
5. *Требования к таблицам.*

Таблицы должны быть подготовлены в Microsoft Word шрифтом Times New Roman (при необходимости Symbol) 9 пт.

В каждой ячейке таблицы НЕ ДОЛЖНО БЫТЬ более одного абзаца.

При подготовке таблиц следует помнить, что максимальная ширина таблицы в книжной ориентации — 125 мм, в альбомной — 195 мм.

Таблицы оформляются разделительными линиями толщиной 0,5 пт.
6. *Требования к графическим файлам.*

Иллюстрации к статье готовятся в любом доступном для автора редакторе или приложении. При этом каждая иллюстрация ПРЕДСТАВЛЯЕТСЯ В ВИДЕ ОТДЕЛЬНОГО ФАЙЛА в одном из графических форматов: *.jpg, *.tif, *.eps, *.cdr, *.wmf, *.ai. Допускается иллюстративный материал в формате *.xls (строго БЕЗ рамок). Все иллюстрации должны быть ЕДИНООБРАЗНЫ (шрифт, линии) по стилю.

В публикации рекомендуется использовать черно-белые иллюстрации. Использование цветных иллюстраций допускается в исключительных случаях и только по согласованию с редакцией. Растровые изображения должны иметь размер не менее 900 пикселей по короткой стороне.

Размер и ориентация иллюстрации подбираются автором в соответствии с размером полосы верстки, которая составляет 195×125 мм (максимальный размер иллюстрации, включая подрисовочную подпись и легенду).

Для иллюстраций в векторном формате (рисунок в формате Corel Draw, Adobe Illustrator, Microsoft Excel или файлы, экспортированные в формат *.wmf) необходимо использовать только стандартные шрифты Windows (Times New Roman, Symbol) или их аналоги Type-1. При использовании иных шрифтов они должны быть проконвертированы в кривые.

Для оцифровки осей рисунков необходимо использовать только вышеуказанные шрифты НОРМАЛЬНОГО начертания, размером не более 10 пт. Десятичный знак при оцифровке осей и аппликаций — только ЗАПЯТАЯ.

Все карты, схемы, диаграммы, рисунки должны быть на русском языке.

7. *Требования к формулам.*

Для набора формул в версиях Microsoft Word 2010 (2013) следует использовать формульный редактор MathType; для версий Microsoft Word 2007 и более ранних, кроме MathType, можно использовать встроенный в Microsoft Word редактор Equation Editor. Размер шрифта основного текста – 10.

8. *Требования к списку литературы.*

Список работ, на которые есть ссылки в тексте, формируется в алфавитном порядке по фамилии первого автора (при отсутствии автора используется первая буква названия работы). Сначала идет перечень публикаций на русском языке, далее — зарубежных публикаций также в алфавитном порядке. Все работы из списка оформляются в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5–2008.

Ссылка на работу дается в тексте следующим образом. Если число авторов не превышает двух, то в круглых скобках приводится фамилия автора (авторов) без инициалов и через запятую год издания. Если число авторов три и более, то ссылка дается в форме (*Фамилия первого автора* и др., год издания).

С полным перечнем требований к статьям можно ознакомиться на web-странице журнала <http://www.aari.ru/main.php>.

Редакция оставляет за собой право делать необходимые редакционные исправления, дополнения, сокращения.

За размещение статей в журнале плата НЕ ВЗИМАЕТСЯ.

Всем авторам публикаций бесплатно высылается один экземпляр журнала.

Сборник научных статей
ПРОБЛЕМЫ АРКТИКИ И АНТАРКТИКИ
№ 1 (107)

Подписано в печать 17.03.2016
Формат 70×100 1/16
Тираж 200

Печать офсетная
Печ. л. 7,5
Заказ № 0395938

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