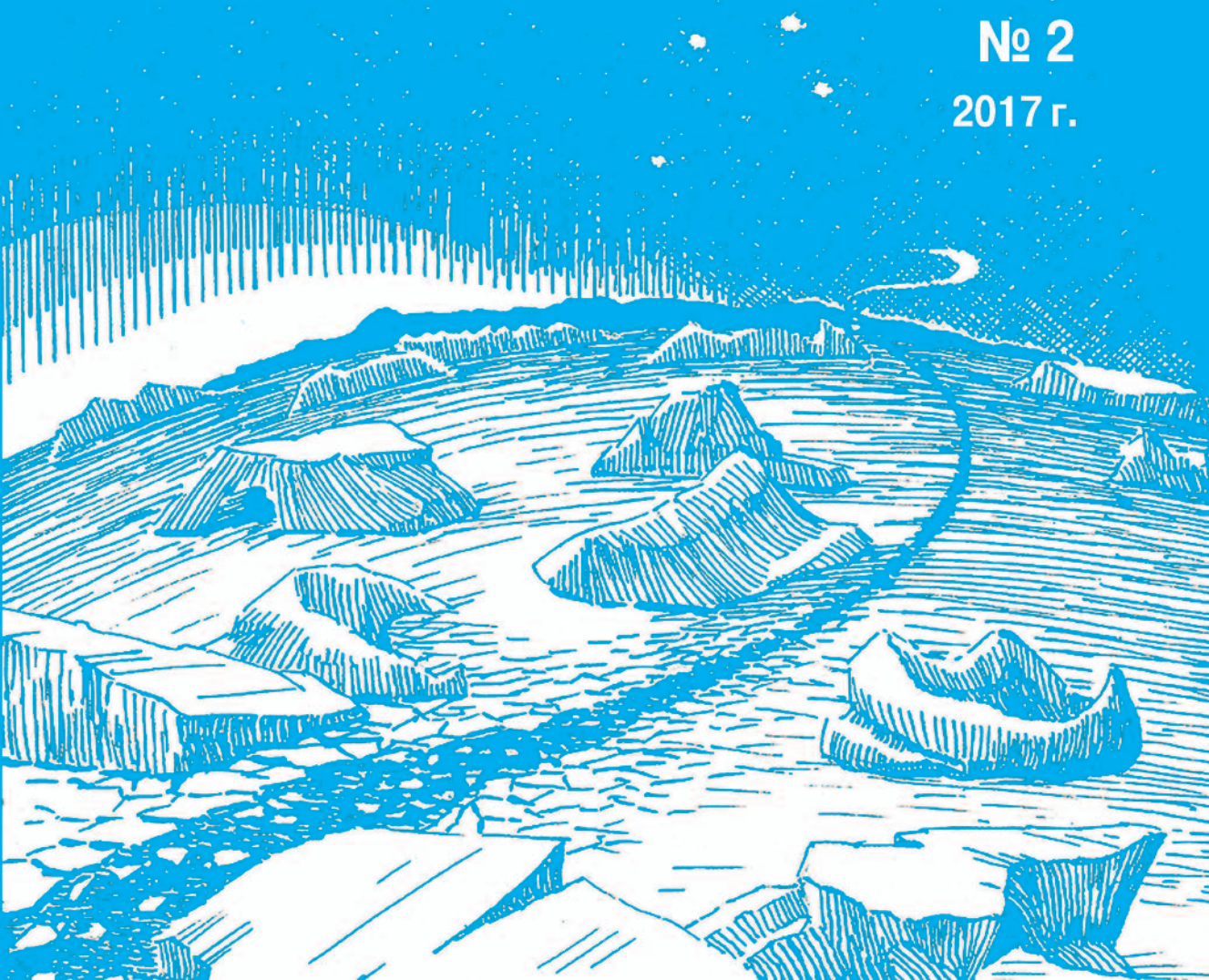


ISSN 0555-2648



ПРОБЛЕМЫ АРКТИКИ И АНТАРКТИКИ

№ 2
2017 г.



МИНИСТЕРСТВО ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ
И ЭКОЛОГИИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ
И МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

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

ПРОБЛЕМЫ АРКТИКИ И АНТАРКТИКИ

№ 2 (112)

Издается с июня 1937 г.

Санкт-Петербург
ААНИИ
2017

Главный редактор

чл.-кор. РАН, д-р геогр. наук *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. Махитас* (ААНИИ)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ПРОБЛЕМЫ АРКТИКИ И АНТАРКТИКИ

№ 2 (112)

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), 2017

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Е.А. Гусев, А.Б. Кузнецов, Н.В. Куприянова, З.В. Пушина, Г.В. Степанова, Л.Г. Деревянко, Н.Ю. Аникина, В.А. Четверова, Я.Д. Яржембовский, А.В. Крылов.</i> Эоплейстоценовые отложения гыданского побережья Енисейского залива (север Западной Сибири).....	5
<i>Е.У. Миронов, В.Г. Смирнов, И.А. Бычкова, С.В. Клячкин, Л.Н. Дымент, Н.Ю. Захваткина, Р.И. Май, Р.Б. Гузенко, Е.Б. Саперштейн, С.В. Михальцева, Е.В. Платонова, Л.А. Старцев.</i> Экспериментальный аппаратно-программный комплекс спутникового мониторинга и прогноза ледовой обстановки	15
<i>Е.С. Караевская, Н.Э. Демидов, Д.Г. Шмелев, Е.М. Ривкина, С.А. Булат.</i> Изучение бактериальных сообществ многолетнемерзлых пород оазисов Антарктиды методами культивирования.....	27
<i>С.В. Попов, М.П. Кашкевич, В.И. Кашкевич, В.В. Харитонов, Е.В. Йовенко.</i> Удельное поглощение электромагнитных волн дециметрового диапазона в воде Ладожского озера (Ленинградская область)	43
<i>Н.Е. Иванов, А.П. Макинас.</i> Многолетняя изменчивость характеристик климата Северной Якутии — экстремумы температуры воздуха.....	50
<i>В.М. Анохин, М.А. Холмянский.</i> Особенности конфигурации протяженных форм рельефа и берегов озер северо-западной части плато Путорана.	70
<i>Л.В. Цибизов.</i> Повторно-жильные льды в аномальном магнитном поле: численное моделирование.....	75
<i>М.А. Холмянский, В.М. Анохин.</i> Связь типов криолитозоны Западно-Арктического шельфа с его геологическими особенностями	85

СТРАНИЦЫ ИСТОРИИ

<i>В.В. Лукин.</i> Предпосылки создания и современная роль Мадридского Протокола в Системе Договора об Антарктике	96
Памяти Н.А. Корнилова	113
Памяти Н.И. Баркова	115

CONTENTS

<i>E.A. Gusev, A.B. Kuznetsov, N.V. Kupriyanova, Z.V. Pushina, G.V. Stepanova, L.G. Derevyanko, N.Yu. Anikina, V.A. Chetverova, Ya.V. Yarzhembovsky, A.V. Krylov.</i> Eopleistocene deposits of the Gydan coast of Yenisey bay (North of West Siberia)	5
<i>E.U. Mironov, V.G. Smirnov, I.A. Bychkova, S.V. Kljachkin, L.N. Dymant, N.Ju. Zahvatkina, R.I. Maj, R.B. Guzenko, E.B. Sapershtejn, S.V. Mihal'ceva, E.V. Platonova, L.A. Starcev.</i> Experimental hardware-software complex of satellite monitoring and forecast of ice conditions	15
<i>E.S. Karaevskaya, N.E. Demidov, D.G. Shmelev, E.M. Rivkina, S.A. Bulat.</i> The study of the bacterial communities in the Antarctic oases' permafrost by means of culturing....	27
<i>S.V. Popov, M.P. Kashkevich, V.I. Kashkevich, V.V. Kharitonov, E.V. Yovenko.</i> Absorption of UHF electromagnetic waves in the water of Lake Ladoga (Leningrad region)	43
<i>N.E. Ivanov, A.P. Makshtas.</i> Characteristics of climate variability in the Northern Yakutia — extremes of air temperature.	50
<i>V.M. Anokhin, M.A. Kholmianskii.</i> Features of configuration of linear relief and lakes coasts for northwestern Putoran plateau	70
<i>L.V. Tsibizov.</i> Ice wedges in anomalous magnetic field: numerical modeling	75
<i>M.A. Kholmianskii, V.M. Anokhin.</i> The connection between the cryolithozone types of the West Arctic shelf and its geological features	85

PAGES OF HISTORY

<i>V.V. Lukin.</i> Preconditions of creation and current role of Madrid Protocol in the Antarctic Treaty System.....	96
In Memory of N.A. Kornilov	113
In Memory of N.I. Barkov	115

ЭОПЛЕЙСТОЦЕНОВЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ ГЫДАНСКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ ЕНИСЕЙСКОГО ЗАЛИВА (СЕВЕР ЗАПАДНОЙ СИБИРИ)

Е.А. ГУСЕВ¹, А.Б. КУЗНЕЦОВ²,
Н.В. КУПРИЯНОВА¹, З.В. ПУШИНА¹, Г.В. СТЕПАНОВА¹, Л.Г. ДЕРЕВЯНКО³,
Н.Ю. АНИКИНА³, В.А. ЧЕТВЕРОВА⁴, Я.Д. ЯРЖЕМБОВСКИЙ⁵, А.В. КРЫЛОВ⁶

¹ — ФГБУ «ВНИИОкеангеология», Санкт-Петербург, e-mail: gus-evgeny@yandex.ru

² — Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, Санкт-Петербург, e-mail: antonbor9@mail.ru

³ — Центральная горногеологическая лаборатория, Сыктывкар, e-mail: luda_derevyanko@mail.ru

⁴ — ФГБУ «ВСЕГЕИ», Санкт-Петербург, e-mail: valentinka4@inbox.ru

⁵ — АО «ПМГРЭ», Ломоносов, e-mail: greenz@yandex.ru

⁶ — ОАО «Поляргео», Санкт-Петербург, e-mail: krylov-polargeo@yandex.ru

Описаны естественные обнажения морских эоплейстоценовых отложений на севере Западной Сибири. Эоплейстоценовый возраст подтвержден путем SIS-хемостратиграфических исследований образцов. Для этого времени реконструировано постепенное обмеление и опреснение моря, с заболачиванием осушенного дна. Об этом свидетельствует ленточная слоистость отложений, исчезновение фораминифер и морских моллюсков и появление солонатоводных и пресноводных водорослей и остракод. По спорово-пыльцевым данным эоплейстоценовое время было теплым, на берегах произрастали хвойные и хвойно-лиственные леса.

Ключевые слова: эоплейстоцен, Западная Сибирь, стронциевая хемостратиграфия.

ВВЕДЕНИЕ

Эоплейстоцен нами понимается в границах, обозначенных в Общей стратиграфической шкале квартера России, принятой МСК в 2007 г. (Постановления, 2008), — от 1800 до 787 тыс. лет назад. В Западной Сибири согласно Унифицированной региональной стратиграфической схеме четвертичных отложений Западно-Сибирской равнины (2000) к эоплейстоцену отнесен кочковский горизонт (Волкова и др., 2016). В отличие от неоплейстоценовых горизонтов, выделенных на климатостратиграфической основе, нижняя и верхняя части эоплейстоценового кочковского горизонта имеют биостратиграфическое обоснование. Горизонт охарактеризован по южной части Западно-Сибирской равнины комплексами четвертичных млекопитающих, остракод, макроостатками ископаемой флоры, палинокомплексами, кроме того, он сопоставлен по обратной намагниченности отложений с ортозоной Матуяма (Волкова и др., 2002). Нижний эоплейстоцен включает барнаульские аллювиальные пески, верхний представлен озерными глинами и суглинками кубанкинских, ерестнинских и раздольинских слоев (Волкова и др., 2002).

На севере Западной Сибири эоплейстоценовые отложения предположительно выделены по скважинам на полуостровах Ямал и Тазовском, где они представлены суглинками и ленточно-слоистыми алевритами (Волкова, 1999), а также на гыданском берегу Енисейского залива вблизи полярной станции Лескино, где они представлены дислоцированными ритмично-слоистыми алевритами (Каплянская и др., 1986). В обоих случаях возраст отложений определен условно, на основании изучения спорово-пыльцевых комплексов и макроостатков растений.

Нами изучены эоплейстоценовые ленточно-слоистые алевриты, обнажающиеся в высоких обрывах гыданского берега Енисейского залива — к юго-востоку от полярной станции Лескино и к юго-западу от мыса Дорофеевского.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Полевые работы проводились в 2008 году силами институтов ВНИИОкеангеология (г. Санкт-Петербург), криосферы Земли СО РАН (г. Тюмень, г. Москва) и географического факультета МГУ, в 2014 г. — Полярной морской геологоразведочной экспедицией (г. Ломоносов). Для изучения выбирались обнажения эоплейстоценовых отложений, находящиеся в коренном залегании. Наиболее подходящими объектами явились крутые береговые обрывы Енисейского залива, подмываемые морем, стенки которых постоянно подновляются. Исследованные нами обнажения вскрывались неширокими (до 2–4 м) расчистками на всю высоту обрыва. Образцы для лабораторных исследований отбирались с глубины 30–50 см от поверхности обнажения, чтобы по возможности исключить влияние процессов внутригрунтового растворения и выщелачивания, с одной стороны, и засорения современной органикой — с другой. Опробование производилось через каждые 30–100 см. Спорово-пыльцевые спектры и состав комплексов бентосных фораминифер изучались в Центральной горногеологической лаборатории (г. Сыктывкар). Определение остракод выполнялось специалистами ВНИИОкеангеология. Диатомовые водоросли исследовались во ВНИИОкеангеология и МГУ. Малакофауна изучалась палеонтологом А.В. Крыловым (ЗАО «Поляргео»). Содержание суммарного органического вещества в осадках измерялось в лаборатории ВНИИОкеангеология на C_{org} -анализаторе TOC-VCSN с приставкой SSM-5000.

Датирование органических остатков выполнялось методом Sr-изотопной хемотрастиграфии (SIS), который опирается на изменения отношения $^{87}Sr/^{86}Sr$ в океане в геологическом прошлом. Изучение образцов из глубоководных океанических скважин показало, что отношение $^{87}Sr/^{86}Sr$ в осадках позднего кайнозоя повышалось в среднем на 0,00004/млн лет (McArthur et al., 2001). Высокий градиент этого отношения и возможности современных масс-спектрометров позволяют датировать позднекайнозойские осадки с точностью ± 200 тыс. лет (Кузнецов и др., 2012). «Вычисление» возраста по методу SIS осуществляется путем сопоставления измеренного в образце отношения $^{87}Sr/^{86}Sr$ и кривой вариации $^{87}Sr/^{86}Sr$ по алгоритму LOWESS, разработанному (McArthur et al., 2001). Этот метод позволил использовать Sr-изотопную характеристику неперекристаллизованных раковин моллюсков севера Западной Сибири.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследованы два района — разрез (0825) на Дорофеевском полуострове, а также разрез (0813) и две расчистки (328 и 329) в районе мыса Лескино (рис. 1).

Дорофеевский полуостров. Разрез 0825 ($71^{\circ} 22' 28,4''$ с.ш., $82^{\circ} 50' 44,6''$ в.д.) находится в 7 км к юго-западу от мыса Дорофеевского. Высокий береговой обрыв



Рис. 1. Положение изученных разрезов.

(около 45 м) в верхней своей части сложен мерзлыми оскольчатыми суглинками с решетчатой криотекстурой, содержащими трещинный лед (рис. 2 цвет. вклейки). В 1 км юго-западнее обнажения 0825 в этих суглинках в 2008 г. был встречен пластовый лед мощностью около 3 м, который при своем таянии образовал небольшой термоцирк. Ниже плотных оскольчатых суглинков залегают ритмичнослоистые алевриты с редкими тонкими прослоями светло-серых мелкозернистых песков (рис. 3 цвет. вклейки), черных тугопластичных глин и множеством уплощенных фигурных карбонатных конкреций. Нами изучена толща ритмичнослоистых алевритов на высоту 34 м. Выполнены гранулометрические и минералогические (тяжелая фракция) анализы 37 образцов. Как видно из распределения гранулометрических фракций по разрезу, в нижней части разреза, в интервале 17–29 м в осадке практически отсутствует песчаная фракция, а в интервале 26–29 м содержание глинистой составляющей > 90 %.

Пять образцов из этого разреза были исследованы для определения содержания органического вещества, в целом получены довольно низкие значения (0,29–0,68 %), при этом вниз по разрезу содержание $C_{\text{орг}}$ увеличивается (табл. 1).

Таблица 1

Содержание органического углерода в образцах из разреза 0825

№ п/п	Лабораторный №	Глубина, м	Содержание $C_{\text{орг}}$ (%) на абсолютно сухое вещество
1	683	8	0,41
2	684	10	0,29
3	685	17	0,63
4	686	20	0,63
5	687	34	0,68

Конкреции, встречающиеся в нижней части разреза, имеют сложные очертания (рис. 2 цвет. вклейки), иногда образуют целые конкреционные прослои. Поверхность некоторых конкреций осложнена замысловатыми отпечатками, связанными, по-видимому, с биотурбацией либо с процессом роста конкреций. В основании разреза, в интервале 32–34 м в песчанистых алевроитах встречаются раковины *Portlandia arctica* (Gray, 1824) с сомкнутыми створками (16 створок), кроме того, собраны *Macoma calcarea* (Gmelin, 1791) (3 створки), *Ennucula tenuis* (Montagu, 1808) (2 створки) и раковина *Lunatia tenuistriata* (Dautzenberg et Fischer, 1911).

Микрофаунистический анализ показал присутствие нескольких ракушинок фораминифер *Cassidulina subacuta* Gud. и *Retroelphidium* sp. плохой сохранности на высоте 14 и 17 м. В образцах из интервала 35–37 м также определены фораминиферы в небольшом количестве плохой сохранности. Это *Retroelphidium atlanticum* Gud., *Criboelphidium granatum*, *Cribronion obsoletus* Gud., *Cr. aff. incertus*, *Buccella frigida*, *Tappanella* sp. cf.

Из осадков нижней части разреза (22–28 м) были отобраны образцы для изучения диатомовых водорослей. На глубине 24 м установлены бентосные солоноватоводно-морские и морские диатомеи — *Navicula digitoradiata*, *Grammatophora arctica*, *Diploneis interrupta*, *Achnanthes groenlandica* и др., захороненные *in situ*. Условия их накопления происходили в обстановке мелководного солоноватоводно-морского водоема (лагуны?). В пробе с глубины 26 м обнаружены единичные пресноводные-солоноватоводные бентосные виды, представленные главным образом аэрофилом *Hantzschia amphyoaxis*, которые способны развиваться в пересыхающих текучих водотоках. Таким образом, по данным диатомового анализа формирование осадков в интервале 23–24 м происходило в условиях мелководного солоноватоводно-морского водоема (лагуны?). Выше по разрезу (22 м и выше) по присутствию пресноводных видов аэрофилов можно заключить, что осадки накапливались во время существования пресноводного водоема.

Кроме того, в осадках разреза определены остракоды. В образце с глубины 31 м определена одна створка остракоды *Sarsicytheridea bradleyi* (Norman). Это типично морской, аркто-бореальный вид, имеющий широкое стратиграфическое распространение в отложениях севера Западной Сибири и Русской платформы. В верхней части разреза, в образце с глубины 6 м встречена одна створка остракоды *Limnocythere sancti-patricii* Brady et Robertson хорошей сохранности. По данным Elofson 1941, это вид пресноводный, характерный для континентальных (озерных, озерно-аллювиальных, речных) водоемов, ныне живущий в замкнутых пресноводных бассейнах с соленостью 0–2 ‰.

Для спорово-пыльцевого анализа из разреза 0825 отобрано 29 проб. Все пробы хорошо наполнены спорами и пылью. Определяются 4 спорово-пыльцевых комплекса (СПК) (рис. 4 цвет. вклейки).

1-й СПК (инт. глубин 26,0–33,0 м — 8 проб) определен в нижней части разреза. Пробы из данного интервала имеют похожие спектры, отражающие северо-таежный тип растительности. Основу палинокомплекса составляют древесные растения, среди которых доминируют хвойные породы деревьев — *Picea obovata*, *Picea* sp. — 25–43 %, *Pinus sibirica* — 4–9 %, *P. silvestris* — 2–5 %, *Larix* sp. — 0–2 %. Вверх по разрезу характеристики спектров меняются, характеризуя значительное похолодание (2-й СПК, инт. глубин 19,0–25,0 м — 7 проб). Преобладали тундровые ландшафты, и лишь в понижениях рельефа наблюдались островки лесотундры. Доминирует травя-

Пробы из интервала глубин 3,25–17,0 м содержат похожие спорово-пыльцевые спектры, характеризующие таежный тип растительности. Можно выделить 5 спорово-пыльцевых комплексов, отличающихся незначительно (рис. 8 цвет. вклейки). В целом во время накопления изученных осадков на территории преобладали преимущественно елово-березовые леса с примесью сосны — *Picea obovata*, *Picea* sp. — 23–36 %, *Pinus sibirica* — 3–6 %, *P. silvestris* — 1–4 %, *Betula* ex. sect. *Albae* — 6–10 %, *Alnaster* — 1–4 %, *Salix* sp. — 2–4 %, *Betula* sect. *Nanae* — 1–4 %. Безлесные пространства занимала луговая растительность: разнотравье — 2–10 %, сем. *Ranunculaceae* — 2–10 %, *Cyperaceae* — 5–15 %, *Chenopodiaceae* — 0–7 %, *Polygonaceae* — 0–2 %, *Caryophyllaceae* — 1–9 %, *Compositae* — 0–1 %, *Pirolaceae* — 0–2 %, *Liliaceae* — 0–1 %, *Umbelliferae* — 0–1 %. Споровые растения сем. *Polypodiaceae* — 6–12 %, *Sphagnum* sp. — 2–10 %, *Lycopodium* sp. — 1–6 %, *Ophyoglossum* sp. — 0–1 %. В мацерате отмечается большое количество растительных остатков, много угольной крошки, присутствуют спиккулы губок и в небольшом количестве центрические диатомовые водоросли, водоросли *Peredeneia* и единичные переотложенные формы мезозойского возраста.

Несколько образцов изучены на предмет содержания в осадках остатков диатомей. В образце из основания разреза (17 м) обнаружен самый разнообразный в видовом отношении из установленных в осадках этого разреза пресноводный комплекс диатомей, включающий бентосные болотные виды *Eunotia praerupta* и *Pinnularia* sp., бентосные *Diploneis* aff. *decipiens*, *Fragilaria* sp., планктонные *Cyclotella* aff. *striata*.

В образцах с глубин 4,2 и 4,5 м установлены створки пресноводных бентосных диатомей, представленных типичными болотными видами-убиквистами *Eunotia praerupta*, *E. praerupta* var. *bidens* и *Pinnularia* sp. и др.

Формирование осадков из основания разреза (~17 м) происходило в условиях сильно опресненного морского бассейна. Выше по разрезу (4,5–17 м) диатомовые водоросли или отсутствуют, или переотложены. Наконец, верхние части разреза (глубины около 4 м) накапливались в пресноводных условиях заболачиваемого водоема.

Палеокарпологическая проба из отложений лескинской толщи (пачка б., образец взят в 1986 году сотрудниками ВСЕГЕИ в 3,8 км к юго-востоку от устья р. Нярмхой-Яха) по определению П.И. Дорофеева (БИН АН СССР) содержит остатки следующих форм: *Bryales* gen. — масса остатков, *Sphagnum* sp. — единично, *Selaginella selaginoides* (L.) Link, *Larix* sp. — много хвой, *Picea* sp. — много хвой, *Juniperus* sp., *Potamogeton* sp. — обломки типа *P. filiformis* Pers., *Sagittaria natana* Pall., *Carex* sp., *Eleocharia palustris* (L.) R.Br., *Scirpus* sp., *Salix herbaceae* L. — листочки, *Betula* ex sect. *Costatae* (Rgl.) Kochne, *Betula nana* L., *Alnaster fruticosae* Rupr., *Corispermum* sp., *Ranunculus sceleratus* L., *Potentilla* cf. *nivea* L., *Potentilla* ex gr. *auserina* L., *Comarum palustre* L., *Crataegus* sp., *Linum* sp., *Rippuris vulgarie* L., *Renyanthes trifoliata* L. Возможно, переотложенной формой является *Sparganium stenophyllum*, остальные П.И. Дорофеев считает синхронными породам. П.И. Дорофеев указывает, что подобные флоры распространены в европейской части СССР начиная со среднего акчагыла; они и являлись предшественниками настоящих плейстоценовых флор. Им подчеркивается сходство этой флоры с некоторыми флорами европейской части (например, из села Моисеево), которые, по его мнению, являются плиоценовыми, относящимися к апшерону и параллелизуемыми с кромерскими флорами. По мнению П.И. Дорофеева, данная флора может представлять арктический плиоцен — эоплейстоцен (Каплянская и др., 1986).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Выделение в разрезе осадочного чехла Северной Евразии плиоцен-эоплейстоценовых отложений (Белкин, 1963; Загорская и др., 1963; Зархидзе, 1972; Яхимович и др., 1992 и др.) оспаривалось некоторыми авторами (Гладенков, Петров, 1990). Вместе с тем в последние годы найдены новые доказательства присутствия в разрезе миоценовых, плиоценовых, эоплейстоценовых отложений на основе палеомагнитных, палеонтологических и Sr-хемостратиграфических данных (Зархидзе и др., 2010; Крылов, 2014; Крылов, Марке, 2014; 2014а; Крылов и др., 2014; Кузнецов и др., 2014; 2014а; Gusev et al., 2009). Выделенные позднекайнозойские комплексы по ряду признаков можно скоррелировать с разрезами плиоцена-эоплейстоцена зарубежной Арктики (Funder et al., 2001; Duk-Rodkin, Barendregt, 2011; Matthiessen et al., 2009).

Изученные нами на севере Западной Сибири разрезы характеризуют донеоплейстоценовые отложения, имеющие облик осадков, частично диагенетически преобразованных. Большая мощность ленточнослоистых глинистых алевроитов, их тонкий гранулометрический состав свидетельствуют о длительном накоплении толщи. Это отмечали и первые исследователи разреза у мыса Лескина (Сергиенко, Биджиев, 1983; Каплянская и др., 1986). Учитывая определенные изменения, затронувшие осадки, а именно выщелачивание, о чем свидетельствуют полурастворенные раковины фораминифер из нижней части толщи, а также образование конкреций, местами многочисленных, к результатам палеомагнитных измерений, сделанных по расчисткам в районе Лескина, интенсивно дислоцированных, следует относиться если не критически, то осторожно.

Поэтому полученные ранее данные о прямой намагниченности осадков лескинской толщи (Сергиенко, Биджиев, 1983; Каплянская и др., 1986) могут не соответствовать действительности из-за перемагничивания отложений, подвергшихся внутригрунтовой циркуляции растворов, или из-за неотектонических деформаций. Вряд ли изученные предшественниками части разреза лескинской толщи точно соответствуют экскурсам прямой намагниченности Кобб Маунтин (1,775–1,790 млн лет). Скорее всего, из-за сильных изменений осадки утратили свой первоначальный палеомагнитный сигнал, приобретая намагниченность времени этих изменений (очевидно, в неоплейстоцене).

Эти наши предположения подтверждаются SIS-хемостратиграфическими данными (табл. 2). Судя по полученным измерениям, ленточнослоистые отложения изученных разрезов и расчисток, вмещающие раковины моллюсков *Portlandia arctica*, имеют эоплейстоценовый возраст.

Таблица 2

С-О-изотопные данные и Sr-изотопная стратиграфия карбонатных раковин из рыхлых отложений Енисейского залива

№ п/п	№ разреза	Материал датирования	Возраст, млн лет SIS	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ от 0,709175	$\delta^{13}\text{C}$ PDB	$\delta^{18}\text{O}$ PDB
1	0825	<i>Portlandia arctica</i> (Gray)	1,47 1,40	0,709104 0,709109	–1,6	3,0
2	328	<i>Portlandia arctica</i> (Gray)	1,70	0,709092	–2,4	1,9
3	329	<i>Portlandia arctica</i> (Gray)	1,2	0,709123	–3,2	3,6

Судя по распределению по разрезам обоих изученных районов органических остатков, характерных для морских и пресноводных условий, в течение эоплейстоцена происходила постепенная регрессия моря, с частичной или полной изоляцией палеобассейна от морских вод. Об этом говорит существенно глинистый состав осадков, наличие морских моллюсков и бентосных фораминифер в нижних частях разрезов и ленточная слоистость осадков, наличие фигурных конкреций, а также пресноводных диатомей и остракод в верхних частях разрезов. В этом состоит отличие северного регрессивного разреза эоплейстоцена Западной Сибири от южного, где однообразные осадки представлены почти исключительно континентальными фациями.

Спорово-пыльцевые спектры, выделенные из осадков изученных разрезов, характеризуют теплые климатические условия с небольшим эпизодом похолодания (разрез 0825). На берегах эоплейстоценового палеобассейна произрастали хвойные и хвойно-лиственные леса, с эпизодами распространения тундровой и лесотундровой растительности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наши исследования подтвердили существование на севере Западной Сибири естественных обнажений морских эоплейстоценовых отложений. Большинство исследователей ранее предполагалось их наличие на глубине десятков метров ниже уровня моря, и так же предположительно выделялись плиоцен-эоплейстоценовые интервалы в кернах скважин. Позже сотрудниками ВСЕГЕИ были условно выделены эоплейстоценовые отложения в береговых обрывах в районе мыса Лескина. Нами эти предположения были подтверждены путем SIS-хемостратиграфических исследований образцов из этих обнажений. Кроме того, выходы эоплейстоценовых отложений были обнаружены нами в 140 км юго-востоку от Лескинских яров, на Дорофеевском полуострове. Для эоплейстоценового времени реконструировано постепенное обмеление и опреснение моря, с заболачиванием осушенного дна. Об этом свидетельствует ленточная слоистость отложений, исчезновение фораминифер и морских моллюсков и появление солоноватоводных и пресноводных водорослей и остракод. По спорово-пыльцевым данным эоплейстоценовое время было теплым, на берегах произрастали хвойные и хвойно-лиственные леса.

ЛИТЕРАТУРА

- Белкин В.И. О неогеновых отложениях Большеземельской тундры // Доклады Академии наук СССР. 1963. Т. 149. № 3. С. 660–662.
- Волкова В.С. Палинотрастиграфия четвертичных отложений полуостровов Ямал и Тазовский (проблемы плиоцена) // Геология и геофизика. 1999. Т. 40. № 8. С. 1119–1134.
- Волкова В.С., Архипов С.А., Бабушкин А.Е., Кулькова И.А., Гуськов С.А., Кузьмина О.Б., Левчук Л.К., Михайлова И.В., Сухорукова С.С. Стратиграфия нефтегазоносных бассейнов Сибири. Кайнозой Западной Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «ГЕО», 2002. 246 с.
- Волкова В.С., Кузьмина О.Б., Хазина И.В. К вопросу о возрасте и объеме Кочковского горизонта (эоплейстоцен Западной Сибири) // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2016. № 4 (28). С. 3–8.
- Гладенков Ю.Б., Петров О.М. Дискуссионные проблемы стратиграфии верхнего кайнозоя севера СССР // Бюллетень комиссии по изучению четвертичного периода. 1990. № 59. С. 5–12.
- Гнибиденко З.Н. Палеомагнетизм кайнозоя Западно-Сибирской плиты. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2006. 161 с.

- Загорская Н.Г., Яшина З.И., Слободин В.Я., Левина Ф.М., Белевич А.М. Морские неоген(?)–четвертичные отложения низовьев реки Енисей // Труды НИИГА. 1965. Т. 144. 92 с.
- Зархидзе В.С. Падимейская толща западных и центральных районов Тимано-Уральской области. Вопросы стратиграфии и корреляции плиоценовых и плейстоценовых отложений северной и южной частей Предуралья. 1972. Вып. 1. С. 56–66.
- Зархидзе Д.В., Гусев Е.А., Аникина Н.Ю., Бартова А.В., Гладенков А.Ю., Деревянко Л.Г., Крылов А.В., Тверская Л.А. Новые данные по стратиграфии плиоцен-четвертичных отложений бассейна реки Море-Ю (Большеземельская тундра) // Геолого-геофизические характеристики литосферы Арктического региона. 2010. Вып. 7. С. 96–110.
- Каплянская Ф.А., Никольская М.В., Тарноградский В.Д. Доледниковые морские отложения на севере Западной Сибири (лескинская толща) // Кайнозой шельфа и островов Советской Арктики. Л.: ПГО «Севморгеология», 1986. С. 100–109.
- Крылов А.В. Новые данные по бореальным моллюскам из отложений плиоцена-эоплейстоцена западной части Российской Арктики // Известия Русского географического общества. 2014. Т. 146. Вып. 1. С. 56–72.
- Крылов А.В., Марке Р. Морские моллюски атлантического происхождения из отложений плиоцена-эоплейстоцена Российской Арктики и их биостратиграфическое значение. Моллюски рода *Isocrassina* // Региональная геология и металлогения. 2014. № 57. С. 27–36.
- Крылов А.В., Марке Р. Морские моллюски атлантического происхождения из отложений плиоцена-плейстоцена запада Российской Арктики и их биостратиграфическое значение. Моллюски родов *Astarte*, *Cyrtodaria*, *Mya*, *Panomya* // Региональная геология и металлогения. 2014. № 60. С. 35–51.
- Крылов А.В., Гусев Е.А., Кузнецов А.Б., Зархидзе Д.В. Значение моллюсков рода *Cyrtodaria* для стратиграфии кайнозойских отложений Арктики // Проблемы Арктики и Антарктики. 2014. № 4 (102). С. 5–23.
- Кузнецов А.Б., Семихатов М.А., Горохов И.М. Изотопный состав Sr в водах Мирового океана, окраинных и внутренних морей: возможности и ограничения Sr-изотопной хемотратиграфии // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2012. Т. 20. № 6. С. 3–19.
- Кузнецов А.Б., Зархидзе Д.В., Крылов А.В., Маслов А.В. Стронциевая изотопная хемотратиграфия позднекайнозойских отложений Тимано-Уральского региона по раковинам моллюсков: обоснование эоплейстоцена // Доклады РАН. 2014. Т. 458. № 6. С. 687–691.
- Кузнецов А.Б., Макарихин В.В., Покровский Б.Г., Константинова Г.В. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ и $\delta^{18}\text{O}$ хемотратиграфия и фациальные условия обитания плейстоценовых моллюсков Карелии (пос. Гридино) // Доклады РАН. 2014. Т. 459. № 2. С. 198–202.
- Постановления Межведомственного стратиграфического комитета и его постоянных комиссий. Вып. 38, СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2008. С. 115–122.
- Сергиенко В.М., Биджиев Р.А. Позднечетвертичная тектоника севера Западно-Сибирской низменности // Бюллетень московского общества испытателей природы. Отдел геологический. 1983. Т. 58. № 6. С. 73–82.
- Унифицированная региональная стратиграфическая схема четвертичных отложений Западно-Сибирской равнины / Под ред. В.С. Волкова, А.Е. Бабушкина. Новосибирск: СНИИГГиМС, 2000. 64 с.
- Яхимович В.Л., Зархидзе В.С., Афанасьева Т.А. Геологические события позднего плиоцена в области северных и южных морей (на примере Каспийского и Баренцевоморского бассейнов) // Геологическая история Арктики в мезозое и кайнозое: Материалы чтений памяти В.Н. Сакса. Кн. 2. СПб.: ВНИИОкеангеология, 1992. С. 56–59.
- Duk-Rodkin A., Barendregt R.W. Stratigraphical Record of Glacials/Interglacials in Northwest Canada // Developments in Quaternary Sciences. 2011. Vol. 15. P. 661–698.

Funder S., Bennike O., Böcher J., Israelson C., Petersen K.S., Simonarson L.A. Late Pliocene Greenland – the Kap København formation in North Greenland // *Bulletin of the Geological Society of Denmark*. 2001. Vol. 48. P. 117–134.

Gusev E.A., Andreeva I.A., Anikina N.Y., Bondarenko S.A., Derevyanko L.G., Iosifidi A.G., Klyuvitkina T.S., Litvinenko I.V., Petrova V.I., Polyakova E.I., Popov V.V., Stepanova A.Y. Stratigraphy of Late Cenozoic sediments of the western Chukchi Sea: New results from shallow drilling and seismic-reflection profiling // *Global and Planetary Change*. 2009. Vol. 68. № 1–2. P. 115–131.

Matthiessen J., Knies J., Vögt Ch., Stein R. Pliocene palaeoceanography of the Arctic Ocean and subarctic seas // *Philosophical Transactions of Royal Society A*. 2009. Vol. 367. P. 21–48.

McArthur J.M., Howarth R.J., Bailey T.R. Strontium isotope stratigraphy: LOWESS version 3: Best fit to the marine Sr-isotope curve for 0–509 Ma and accompanying look-up table for deriving numerical age // *Journal of Geology*. 2001. Vol. 109. № 2. P. 155–170.

*E.A. GUSEV, A.B. KUZNETSOV, N.V. KUPRIYANOVA, Z.V. PUSHINA, G.V. STEPANOVA,
L.G. DEREVYANKO, N.YU. ANIKINA, V.A. CHETVEROVA, YA.V. YARZHEMBOVSKY,
A.V. KRYLOV*

EOPLEISTOCENE DEPOSITS OF THE GYDAN COAST OF YENISSEY BAY (NORTH OF WEST SIBERIA)

In the north of Western Siberia, natural outcrops of marine Eopleistocene sediments are described. Eopleistocene age is confirmed by SIS-chemostratigraphic studies of samples. For this time, the gradual regression and desalination with the buffing was reconstructed. This is evidenced by the thin-stratification of deposits, the disappearance of foraminifera and marine mollusks and the appearance of brackish and freshwater algae and ostracods. According to the spore-pollen data, Eopleistocene time was warm, coniferous and coniferous-deciduous forests grew on the banks.

Keywords: eopleistocene, West Siberia, Sr chemostratigraphy.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС СПУТНИКОВОГО МОНИТОРИНГА И ПРОГНОЗА ЛЕДОВОЙ ОБСТАНОВКИ

*Е.У. МИРОНОВ, В.Г. СМИРНОВ, И.А. БЫЧКОВА, С.В. КЛЯЧКИН,
Л.Н. ДЫМЕНТ, Н.Ю. ЗАХВАТКИНА, Р.И. МАЙ, Р.Б. ГУЗЕНКО,
Е.Б. САПЕРШТЕЙН, С.В. МИХАЛЬЦЕВА, Е.В. ПЛАТОНОВА, Л.А. СТАРЦЕВ*

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

Рассматриваются новые методы автоматизированного определения параметров ледяного покрова по спутниковым данным и модернизированный метод краткосрочного прогноза ледовой обстановки на основе численной модели «океан–лед». Дана характеристика разработанных новых программных средств. Приводится описание созданного экспериментального аппаратно-программного комплекса спутникового мониторинга и прогноза ледовой обстановки, состоящего из пяти подсистем.

Ключевые слова: ледовая обстановка, спутниковые изображения, методы классификации, динамико-термодинамическая модель, моря Западной Арктики, аппаратно-программный комплекс.

ВВЕДЕНИЕ

Ледяной покров является одним из наиболее значимых факторов окружающей среды, затрудняющих активную хозяйственную деятельность в арктических морях. Так, ледяной покров препятствует плаванию судов без ледовых усилений, рыболовству, геологоразведке, строительству гидротехнических сооружений и т.д. Особая актуальность проблем совершенствования методов мониторинга и прогнозирования ледовой обстановки в арктических морях вызвана активизацией судоходства на Северном морском пути и интенсивным освоением нефтегазовых месторождений на континентальном шельфе (Grigoryev, 2017).

Появившиеся в последние годы технические средства в сочетании с современными информационными технологиями позволяют создавать новые и совершенствовать существующие методы и программные средства мониторинга и прогнозирования ледовой обстановки (Миронов и др., 2010; Смирнов, Бычкова, 2015; Спутниковые методы, 2011; Клячкин и др., 2015).

В ААНИИ при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в 2014–2016 гг. были разработаны новые и усовершенствованы существующие методы мониторинга и прогнозирования состояния ледяного покрова, программная реализация которых позволила создать аппаратно-программный комплекс спутникового мониторинга и прогнозирования ледовой обстановки (ЭАПК «Лед»).

ЭАПК «Лед» предназначен для автоматизации процесса определения сплоченности и возраста морского льда по спутниковым снимкам и выполнения краткосрочного прогноза ледовой обстановки.

МЕТОД АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТНОЙ СПЛОЧЕННОСТИ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА ПО СПУТНИКОВЫМ РАДИОЛОКАЦИОННЫМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Разделение морского льда по возрасту на радиолокационных (РЛ) изображениях основано на разнице в механизмах рассеяния электромагнитных волн СВЧ-диапазона различной поляризации, свойственных конкретным видам морского льда и открытой воде. Открытая водная поверхность при сильном ветровом волнении может иметь в микроволновом диапазоне такие же рассеивающие свойства, как серый, серо-белый или многолетний лед. Спокойная водная поверхность на радиолокационных изображениях отображается как зона низкого отраженного сигнала, то есть имеет темный тон, практически такой же, как в случае наблюдения однолетнего тонкого льда. Для взволнованной водной поверхности при использовании горизонтальной поляризации излучения характерны высокие значения сигнала на РЛ-изображении, сопоставимые по яркости со значениями, свойственными многолетним льдам. Такая неоднозначная зависимость однополяризационного сигнала от типа подстилающей поверхности затрудняет классификацию морского льда по возрасту. Избежать неоднозначности удастся путем использования РЛ-изображений с двумя поляризациями (НН и НV), благодаря возникающей значительной разнице в сигнале от воды и льда.

Нейронные сети (НС), применяемые в ЭАПК «Лед» для классификации морских льдов по возрасту, представляют собой алгоритмы распознавания образов, имитирующие процессы обработки информации человеческим мозгом. Для определения видов морских льдов по РЛ-изображениям создается многослойная НС, имеющая несколько скрытых слоев, задаются правила ее обучения. Настройка НС проводится по материалам специально подобранной (для данного региона, спутника, периода года) обучающей выборки и является наиболее сложным этапом классификации по методу НС. Обучение производится с использованием алгоритма обратного распространения ошибки и имеет целью минимизацию суммарной ошибки сети. Для анализа текстуры изображения в ЭАПК производится расчет следующих статистических характеристик поля удельной эффективной поверхности рассеяния (УЭПР): энергия, энтропия, корреляция, инерция, однородность, выпуклость кластера и др. По тестовым изображениям опытные ледовые эксперты выбирают наиболее типичные участки льдов определенного вида; для каждого вида льда рассчитывается набор текстурных характеристик, определяются средние значения УЭПР. В итоге каждому вектору данных (набору характеристик, полученных для эталонного участка изображения) соответствует достоверно известный вид морского льда; обучающий массив состоит из вектора данных и номера класса льда, для которого такой расчет был произведен (Bogdanov et al., 2005; Zakhvatkina et al., 2013).

На входной слой НС подаются текстурные признаки анализируемого РЛ-изображения, число нейронов в первом слое соответствует числу используемых текстурных признаков и значений УЭПР. Пройдя через НС, входной вектор отображается в результирующий вектор на выходе НС. Число элементов выходного слоя равно числу классифицируемых видов морского льда.

НС обладают важным свойством классифицировать векторы данных, которые не использовались при тренировке сети. Эта способность НС к обобщению позволяет использовать их как универсальный классификатор спутниковых изображений морского ледяного покрова. На рис. 1 дан пример классификации спутникового РЛ-изображения морских льдов, выполненной по методу НС.

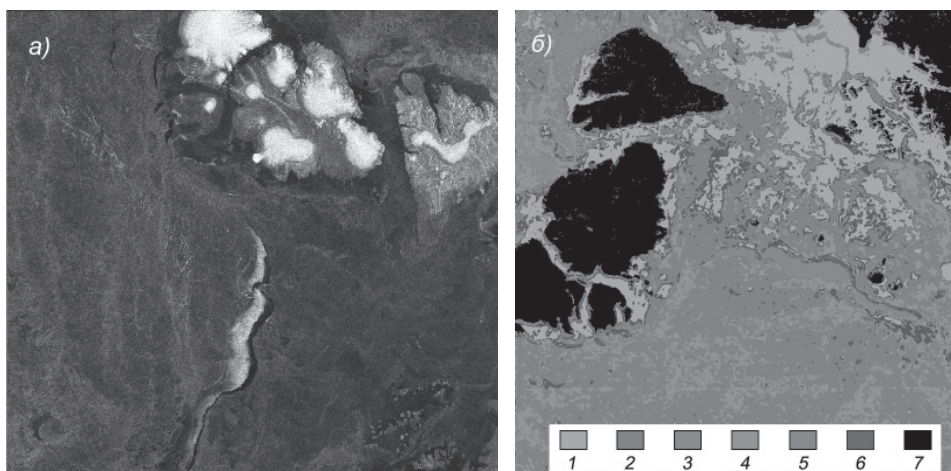


Рис. 1. Пример автоматизированной классификации РЛ-изображения ИСЗ RADARSAT-2 от 27.04.2015 г. с применением алгоритма НС: *а* — РЛ-изображение ИСЗ RADARSAT-2, НН-поляризация; *б* — классифицированное РЛ-изображение.

1 — припай; 2 — однолетний толстый лед; 3 — однолетний лед средний; 4 — однолетний лед тонкий; 5 — молодой лед; 6 — спокойная чистая вода/нилас; 7 — объекты суши.

МЕТОД АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЩЕЙ СПЛОЧЕННОСТИ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА ПО СПУТНИКОВЫМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ ВИДИМОГО ДИАПАЗОНА

Для оценки общей сплоченности ледяного покрова в ЭАПК «Лед» применяется автоматизированная сегментация оптического изображения морских льдов на зоны различной сплоченности ледяного покрова. Сегментация производится в два этапа. На первом этапе реализуется пороговая классификация, при которой каждый пиксел морской поверхности ассоциируется либо с ярким объектом (морской лед), либо с темным фоном (вода).

Территория суши исключается из рассмотрения с помощью наложения маски в виде шейп-файла береговой линии, хранящегося в базе данных. Аналогично исключаются из анализа участки, занятые облачностью и туманом. Для подготовки шейп-файла облачности оператором ЭАПК используется информация нескольких оптических спектральных каналов.

Пороговая классификация изображения морских льдов выполняется по методу японского ученого Н. Отсу (Otsu, 1979), основанному на расчете гистограммы двумерного поля яркости для расчета порога t . Метод применим для 8-битного изображения, гистограмма которого имеет бимодальный характер. Нахождение порога, разделяющего классы, по методу Отсу сводится к минимизации внутриклассовой дисперсии, представляющей собой взвешенную сумму дисперсий двух классов:

$$\sigma_w^2(t) = \omega_1(t)\sigma_1^2(t) + \omega_2(t)\sigma_2^2(t),$$

где ω_1 и ω_2 — вероятности первого и второго классов соответственно, а σ_1^2 и σ_2^2 — дисперсии этих классов.

Отсу показал, что минимизация внутриклассовой дисперсии эквивалентна максимизации межклассовой дисперсии, которая равна:

$$\sigma_b^2(t) = \omega_1(t)\omega_2(t) [\mu_1(t) - \mu_2(t)]^2,$$

где μ_1 и μ_2 — средние арифметические значения этих двух классов. Значения μ_i могут обновляться итеративно при изменении порога.

На втором этапе обработки изображения морских льдов выполняется расчет сплоченности льдов по квадратам регулярной сетки. Шаг сетки может меняться в зависимости от района и расчетной сетки прогностической ледовой модели. По спутниковым данным проводится оценка сплоченности (N) морских льдов в баллах для каждого элемента сетки, площадью a^2 : $N = (\sum A_i)/n \times 10$, где A_i — значение яркости в пикселе на бинарном снимке ($A_i = 0$ для воды и $A_i = 1$ для льда), n — количество информативных пикселей в квадрате сетки (т.е. без пикселей суши и облачности).

На рис. 2 представлен пример использования метода Отсу для автоматизированного выделения морского льда на спутниковом снимке оптического диапазона.

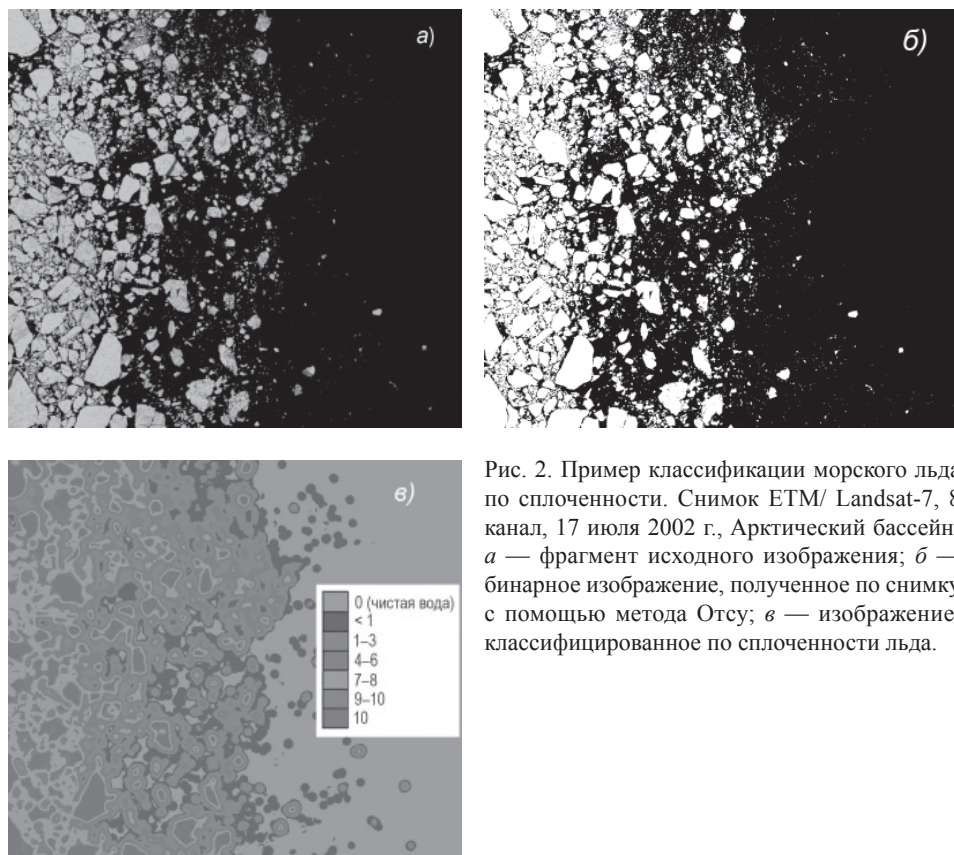


Рис. 2. Пример классификации морского льда по сплоченности. Снимок ETM/ Landsat-7, 8 канал, 17 июля 2002 г., Арктический бассейн: а — фрагмент исходного изображения; б — бинарное изображение, полученное по снимку с помощью метода Отсу; в — изображение, классифицированное по сплоченности льда.

МОДЕРНИЗАЦИЯ МЕТОДА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА И ЕГО ДРЕЙФА

Метод прогнозирования распределения и дрейфа ледяного покрова в арктических и замерзающих неарктических морях России был разработан в ААНИИ в начале 2000-х гг. За последние 10–15 лет этот метод достаточно широко использовался для

составления оперативных краткосрочных ледовых прогнозов, достоверность которых в целом оказалась вполне удовлетворительной (Клячкин и др., 2015).

Метод представляет собой численную реализацию системы уравнений динамики и термодинамики ледяного покрова и океана с соответствующими граничными условиями.

Прогноз изменения термохалинной структуры водной толщи основан на уравнениях баланса тепла и солей, проинтегрированных в пределах верхнего квазиоднородного слоя. В качестве граничных условий задаются потоки тепла и солей на поверхности моря и на нижней границе верхнего квазиоднородного слоя. Прогноз динамики моря строится на основе нестационарной модели океана, в которой используются уравнения неразрывности и движения в гидростатическом приближении с граничными условиями, традиционными для задач подобного рода. Прогноз термической эволюции ледяного покрова основывается на уравнении теплового баланса двухслойной среды «лед–снег» при условии равенства потоков тепла через слой льда и слой снега.

Динамика ледяного покрова прогнозируется на основе уравнения баланса количества движения в нестационарной постановке. Тангенциальные напряжения на верхней и нижней поверхности льда определяются с помощью квадратичного закона, силы внутреннего взаимодействия в ледяном покрове описываются с помощью вязко-пластической реологической модели. Ледяной покров имитируется с помощью метода маркеров — условных льдин, каждая из которых обладает своими «индивидуальными» признаками: координатами, скоростью, толщиной, разрушенностью, торосистостью и специальным признаком, позволяющим отличать дрейфующий лед от припая.

Опыт краткосрочного численного прогнозирования показал, что в целом модель позволяет получить вполне адекватное представление о ледовых условиях, ожидаемых в течение ближайших 1–5 суток. Оправдываемость прогнозов достаточно высока, эффективность — устойчиво положительна.

Вместе с тем модель, положенная в основу прогностического метода, несвободна от недостатков. В первую очередь это относится к океанскому блоку модели. Уравнения и соответствующие граничные условия, описывающие динамику океана, сформулированы в упрощенном виде, в результате чего проявляются определенные погрешности при расчетах течений, денивеляции уровня моря, термохалинной структуры и т.д. В некоторых случаях это приводит к ошибкам прогнозов, в особенности молодых льдов, которые наиболее «чутко» реагируют на изменения динамики и термохалинной структуры океана.

Таким образом, главным направлением модификации метода прогноза дрейфа и перераспределения ледяного покрова являлась радикальная перестройка океанского блока модели. Для выполнения этой задачи было решено использовать одну из последних версий океанской модели Принстонского университета (Princeton Ocean Model, POM) (Blumberg, Mellor, 1987; Mellor, 2003). В ААНИИ имеется достаточный опыт использования этой модели для исследования различных океанографических явлений в арктических морях (Май, 2007; Май, 2008; Некрасов, Май, 2009; Ионов и др., 2015).

Система уравнений движения и неразрывности в модели POM реализована в так называемых σ -координатах, где вертикальная дискретизация выполнена не для горизонтов с фиксированной толщиной, а для заданного количества слоев (рис. 3). Модель позволяет рассчитывать как баротропную, так и бароклинную моду динамики

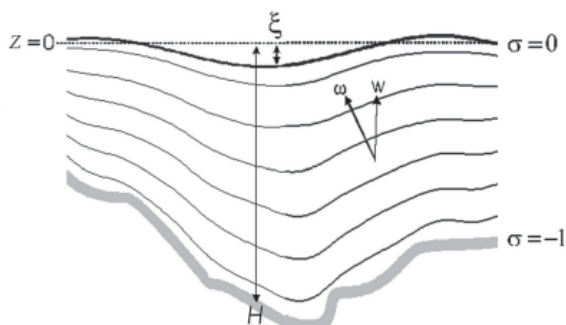


Рис. 3. Система σ -координат.

H — глубина моря, ξ — отклонение уровневой поверхности, w — вертикальная составляющая скорости течений в Z -координатах, ω — вертикальная составляющая скорости течения в σ -координатах.

океана, при этом коэффициенты турбулентного обмена рассчитываются с помощью уравнений баланса турбулентной энергии.

Вторая относительно устойчивая погрешность прогностической модели, ухудшающая результаты прогнозов, проявлялась в случайных флуктуациях сплоченности льда, не обусловленных ни динамикой (дивергенция/конвергенция), ни термикой (замерзание/таяние). Природа этих «неоправданных» флуктуаций связана с тем, что первоначальное положение маркеров в ячейке, имитирующих ледяной покров, определяется с помощью генератора случайных чисел. В результате даже при нулевой дивергенции движущиеся маркеры иногда могут случайным образом перейти или не перейти в соседнюю ячейку, в результате чего сплоченность льда может измениться.

Понятно, что этот эффект более вероятен, когда количество маркеров в ячейке незначительно. Поэтому была предпринята попытка купировать такие случайные колебания сплоченности за счет увеличения максимально возможного количества маркеров в ячейке с 20 до 40, т.е. 40 маркеров в ячейке соответствуют 10 баллам сплоченности, 36 маркеров — 9 баллам и т.д.

Наконец, третьим ключевым направлением модификации прогностического метода являлась его адаптация к региону Западной Арктики и району архипелага Шпицберген. Эта, по существу, чисто технологическая задача сводилась к разработке регулярной сетки, аппроксимирующей данный регион, построению матриц глубин и берегов, матрицы значений толщины льда в момент сезонного максимума, а также некоторых вспомогательных матриц, необходимых для визуализации расчетных полей.

БАЗА ДАННЫХ ПО РАЗРЫВАМ В ЛЕДЯНОМ ПОКРОВЕ

Важной характеристикой ледяного покрова в зимний период являются нарушения сплошности ледяного покрова (НСЛ), которые включают в себя трещины, каналы, разводья, а также узкие протяженные зоны с повышенной раздробленностью льда. НСЛ принято называть разрывами в ледяном покрове, т.к. они образуются в холодный период года под воздействием динамических факторов, связанных с пространственной неравномерностью скорости дрейфа льда (Горбунов и др., 1986).

База данных (БД) крупных разрывов в ледяном покрове Западной Арктики, входящая в состав ЭАПК «Лед», была создана на основе информации о НСЛ, полученной со снимков ИСЗ NOAA малого разрешения. Минимальная ширина каналов, дешифрируемых на таких снимках, составляет 500 м (Бушуев, 1991). Для заполнения БД исходной информацией о

разрывах было обработано 3240 снимков. Период наблюдений охватывает с некоторыми промежутками временной интервал с 1979 по 2015 г. включительно.

При разработке БД требовалось выбрать структуру записи в ней таким образом, чтобы сделать последующие расчеты характеристик разрывов независимыми от ориентации в пространстве выбранной системы координат и размера исследуемой акватории, а также от шага осреднения. Поэтому в качестве объекта, описываемого одной строкой в БД, была принята точка, ограничивающая один из концов относительно прямолинейного отрезка разрыва, т.е. ее географические координаты (широта и долгота). Сочетание даты наблюдения, номера разрыва на снимке и порядкового номера точки, принадлежащей этому разрыву, делало каждый объект в БД уникальным. Такая организация структуры записи позволяет рассчитывать направление разрывов относительно любого заданного меридиана и определять протяженность разрывов в любой заданной области, не привязываясь к какой-либо конкретной сетке.

Для расчета по «Базе данных крупных разрывов в Западной Арктике» обобщенных характеристик разрывов было разработано специальное программное обеспечение. Созданный интерфейс позволяет пользователю выбирать из предложенного списка характеристику разрывов и форму представления результатов ее расчета. Характеристики разрывов, вычисление которых включено в состав программного обеспечения, можно разделить на три группы: характеристики ориентации разрывов (первая и вторая по значимости модальная ориентация, обеспеченность обоих модальных интервалов и результирующее направление разрывов), характеристики плотности разрывов (удельная длина и расстояние между разрывами) и их протяженность. Все эти характеристики учитываются при планировании морских операций и используются для анализа пространственной и временной изменчивости разрывов. Алгоритмы определения большинства из них приводятся в работах (Дымент, 2000; Горбунов и др., 2014).

Пространственное осреднение всех характеристик ориентации и удельной длины разрывов может производиться как по квадратам сетки 100×100 км или 200×200 км, так и по всей акватории Западной Арктики в целом. Распределение протяженности разрывов рассчитывается по всей акватории, а распределение среднего расстояния между разрывами — как по всей акватории, так и по выделенным районам. Временной период обобщения данных задается пользователем, однако он не может быть менее одного месяца.

В зависимости от выбранной характеристики разрывов форма представления результатов ее расчета может быть разной (рис. 4 цвет. вклейки). Характеристики ориентации отображаются как численными значениями их средней величины и диапазонов изменений, так и в виде ориентированных отрезков по квадратам сетки. При этом размер отрезков, ориентированных в направлении первой и второй моды, пропорционален обеспеченности соответствующего модального интервала. Программное обеспечение предусматривает возможность построения круговой диаграммы распределения ориентации разрывов и гистограммы распределения обеспеченности модального интервала по всей акватории. Для последней характеристики и для удельной длины формируются все необходимые файлы для построения полей их распределения при помощи пакета Surfer, входящего в ЭАПК «Лед».

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ МОНИТОРИНГА И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЛЕДОВОЙ ОБСТАНОВКИ

Разработка программных средств, предназначенных для автоматизированного определения характеристик ледяного покрова в Западной Арктике по спутниковым

данным оптического спектрального диапазона и спутниковым радиолокационным изображениям высокого разрешения, заключалась в программной реализации алгоритмов определения возраста ледяного покрова и сплоченности морского льда. Особенностью работ было то, что разрабатываемые программные средства должны позволять проводить по спутниковым изображениям высокого разрешения автоматизированное определение характеристик ледяного покрова в оперативном режиме. Для спутниковых изображений высокого разрешения характерен большой объем; размеры спутниковых кадров составляют от сотен мегабайт до нескольких гигабайт. При этом время от загрузки спутникового снимка в ЭАПК и до получения выходной продукции в виде, готовом для отправки потребителям по спутниковым (или иным) каналам связи, не должно превышать 2 ч. Такие условия предъявляют высокие требования к быстродействию программы, к оптимальной организации работы программных блоков с большими информационными массивами.

Для численной реализации метода определения возраста льда разработана и опробована программа «Возраст льда». Программа усваивает данные спутниковых радиолокаторов с синтезированной апертурой. В настоящее время могут использоваться РЛ-изображения с функционирующих ИСЗ RADARSAT-2, TerraSAR-X, Sentinel-1. Для определения общей сплоченности разработана и опробована программа «Сплоченность льда». Программа усваивает спутниковые данные оптического спектрального диапазона.

Модули расчета частной и общей сплоченности производят вычисления сплоченности льда по спутниковым изображениям и сохраняют результаты в текстовом файле. Автоматизированная оценка частной сплоченности ледяного покрова подразумевает отнесение каждого пиксела к определенному классу, представляющему различные категории морских льдов или относящемуся к открытой водной поверхности. Оценка общей сплоченности при этом выполняется посредством объединением всех классов льда в квадрате сетки с расчетом процентного соотношения «вода–лед».

Результирующий файл представляет собой последовательность текстовых строк, каждая из которых содержит номер ячейки по широте, номер ячейки по долготе, широту центра ячейки, долготу центра ячейки и сплоченность льда в баллах. Номера и координаты ячеек соответствуют номерам и координатам ячеек файла координатной (регулярной) сетки.

Модификация прогностической модели потребовала внесения существенных коррективов в программное обеспечение, причем эти изменения в основном затронули организацию взаимодействия между океанским и ледовым блоками модели. В новой версии программного обеспечения модели океанский блок выступает в роли головной программы, а все процедуры, связанные с расчетом состояния ледяного покрова, организованы в виде подпрограмм. Из океанского блока в ледовый передаются данные о состоянии поверхностного слоя моря (скорости течений, денивелизация уровня, температура, соленость, вертикальный поток тепла). Из ледового блока в океанский передаются данные по основным характеристикам ледяного покрова (скорость дрейфа, общая сплоченность), а также данные о вертикальных потоках солей, обусловленных стеканием рассола при увеличении толщины льда.

Кроме того, модификация океанского блока модели включала, помимо нюансов, связанных с ледяным покровом, разработку некоторых процедур, обеспечивающих подготовку начальных полей температуры и солености:

– извлечение $T-S$ данных из глобального массива (Locarnini et al., 2013; Zweng et al., 2013) для выбранного региона и выбранного месяца;

- приведение $T-S$ данных к сетке модели с помощью сплайн-интерполяции;
- приведение месячных данных (Locarnini et al., 2013; Zweng et al., 2013) к заданной дате с помощью линейной интерполяции;
- преобразование данных по вертикальной структуре океана из традиционных Z -координат в σ -координаты.

СОЗДАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА МОНИТОРИНГА И ПРОГНОЗА ЛЕДОВОЙ ОБСТАНОВКИ

Система мониторинга ледовой обстановки должна соответствовать определенным требованиям, касающимся оперативности, полноты, форм представления, устойчивости к разным помехам, независимости от субъективных факторов и т.д. Для обеспечения этих требований создан экспериментальный аппаратно-программный комплекс спутникового мониторинга и прогноза ледовой обстановки. Функциональная схема ЭАПК «Лед» приведена на рис. 5.

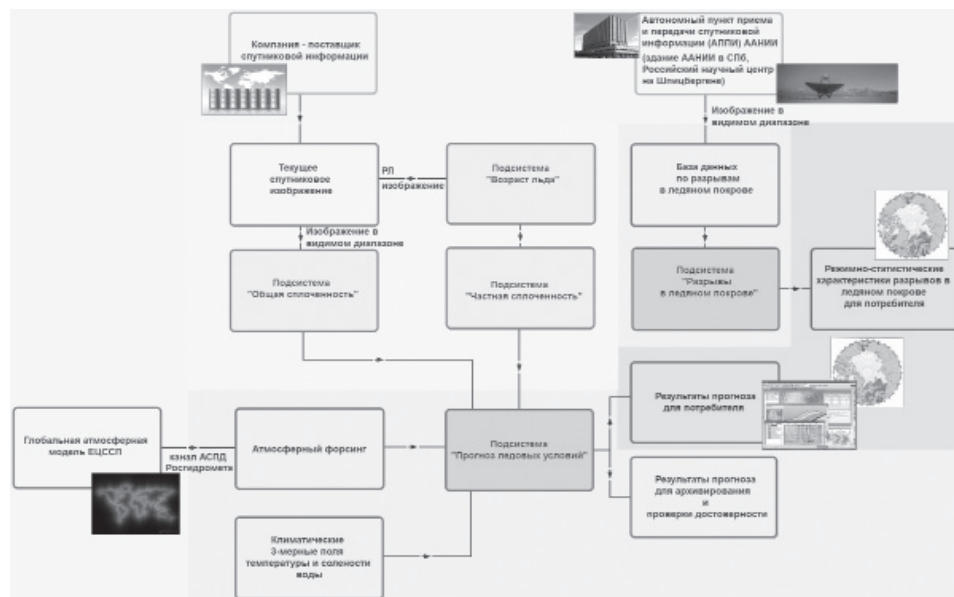


Рис. 5. Функциональная структура ЭАПК спутникового мониторинга и прогноза ледовой обстановки.

В состав ЭАПК «Лед» входят четыре рабочие станции и каналы связи трех типов для обмена информацией внутри комплекса и между ЭАПК и внешней средой:

- рабочая станция для создания и обучения нейронных сетей;
- рабочая станция для определения общей и частной сплоченности ледяного покрова;
- рабочая станция для прогноза дрейфа и распределения ледяного покрова;
- рабочая станция для расчета режимных характеристик разрывов в ледяном покрове;
- канал связи, использующий глобальную сеть интернет, осуществляющий обмен информацией между ЭАПК и внешней средой;
- канал связи, использующий ведомственную сеть Росгидромета, осуществляющий подачу информации определенного типа извне на вход ЭАПК;

– канал связи, использующий локальную сеть ААНИИ, осуществляющий обмен информацией как внутри ЭАПК, так и между ЭАПК и внешней средой.

Каждая рабочая станция представляет собой компьютер с соответствующими периферийными устройствами, оснащенный как стандартным программным обеспечением, так и специальным программным обеспечением, необходимым для решения специфических задач ЭАПК. База данных по разрывам в ледяном покрове, используемая для расчета их режимных характеристик, также установлена на жестком диске соответствующей рабочей станции.

Все пять подсистем ЭАПК «Лед» (рис. 5) работают в единой управляющей оболочке, состоящей из модуля управления, модуля обработки и хранения усвоенной информации, модуля визуализации и управления режимами отображения, модуля представления данных в ГИС. Программный модуль управления реализован на высокоуровневом языке C++ в среде разработки Embarcadero RAD Studio XE6 и предназначен для функционирования под операционной системой Windows. Информация обрабатывается компонентами программного обеспечения ЭАПК. Конечный продукт, подготовленный в ЭАПК «Лед», сохраняется в специальной директории, определенном в модуле управления обработкой и хранением усвоенной информации.

В программных средствах ЭАПК «Лед» предусмотрены:

- модульный принцип обработки информации;
- возможность подключения специальных библиотек, ускоряющих работу с массивом;
- оптимальное использование оперативной памяти;
- использование статистических алгоритмов обработки двумерных полей яркости, основанных на использовании анализа градиентных изменений, не требующих абсолютной калибровки сигнала;
- применение динамических массивов при построении программного кода, численное решение системы дифференциальных уравнений.

Программное обеспечение комплекса обладает следующими свойствами: функциональная достаточность (полнота); надежность (в т.ч. восстанавливаемость, наличие средств выявления ошибок); модифицируемость; модульность построения; удобство эксплуатации.

Программное обеспечение комплекса построено таким образом, чтобы отсутствие отдельных данных не сказывалось на выполнении функций комплекса, при реализации которых эти данные не используются. Также реализованы меры по защите от ошибок при вводе и обработке информации, обеспечивающие заданное качество выполнения функций комплекса. Обеспечена защита уже сгенерированной и загруженной части программного обеспечения от случайных изменений.

Для разработанного ЭАПК «Лед» подготовлен полный комплект эксплуатационной документации, включающий пакет Технической документации и пакет Программной документации. Кроме того, были проведены приемочные испытания комплекса на реальных массивах спутниковых и наземных наблюдений, полученных по морям Западной Арктики.

ВЫВОДЫ

В ходе работы по созданию ЭАПК «Лед» разработана принципиально новая методика автоматизированного дешифрирования морского льда по спутниковым снимкам видимого спектрального диапазона с ИСЗ Landsat-8 и радиолокационным

изображениям различной поляризации со спутников RADARSAT-2, TerraSAR-X, Sentinel-1, основанная на статистических методах анализа двумерных полей, включая нейро-сетевые алгоритмы. Использование объективных методов анализа позволяет в автоматизированном режиме составлять электронные ледовые карты в согласованном формате с минимизацией фактора субъективного взгляда ледового эксперта.

Для подготовки с помощью ЭАПК «Лед» краткосрочного прогноза ледовой обстановки разработана оригинальная численная прогностическая модель «лед–океан», с научной и технологической точек зрения отвечающая современному мировому уровню. В модели реализованы подходы, положенные в основу океанской модели Принстонского университета и ледовой модели ААНИИ, что позволило совместить представление океана в терминах σ -координат и представление ледяного покрова как набора маркеров. Особенностью разработанной прогностической модели является способ задания начальных условий прогностического расчета ледяного покрова, основанный на оперативной информации, полученной в ЭАПК по спутниковым данным по оригинальной методике дешифрирования спутникового снимка.

Созданный экспериментальный аппаратно-программный комплекс позволяет в автоматизированном режиме осуществлять:

- определение общей и частной сплоченности морского льда по спутниковым снимкам видимого диапазона и радиолокационным снимкам высокого пространственного разрешения;
- определение возрастных характеристик льда по спутниковым радиолокационным снимкам высокого пространственного разрешения;
- краткосрочный прогноз ледовой обстановки (распределения и дрейфа льдов);
- расчет режимно-статистических оценок нарушений сплошности ледяного покрова (разрывов).

Использование ЭАПК «Лед» позволит минимизировать риски техногенных катастроф, связанных с разрушающим воздействием льдов на стационарные и мобильные технические объекты в районах разведки и добычи энергетических сырьевых ресурсов на шельфе в Западной Арктике, а также повысить безопасность навигации по Северному морскому пути и транзитным маршрутам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бушуев А.В. Развитие и совершенствование системы и методов ледовых наблюдений // Проблемы Арктики и Антарктики. 1991. Вып. 66. С. 170–183.
- Горбунов Ю.А., Дымент Л.Н., Лосев С.М. Средние многолетние характеристики крупных нарушений сплошности льда в Карском море и в северо-восточной части Баренцева моря: Справочное пособие. СПб.: ААНИИ, 2014. 36 с.
- Горбунов Ю.А., Карелин И.Д., Лосев С.М. Природа нарушения сплошности морского ледяного покрова в зимнее время // Материалы гляциологических исследований. 1986. Вып. 55. С. 131–134.
- Дымент Л.Н. Применение кластерного анализа для выделения районов с однородными системами разрывов в ледяном покрове Арктического бассейна // Метеорология и гидрология. 2000. № 12. С. 52–59.
- Ионов В.В., Май Р.И., Смагин Р.Е. Численная гидродинамическая модель приливных явлений в губе Кереть (Кандалакшский залив, Белое море) // Известия РГО. 2015. Т. 147 (2). С. 22–37.
- Клячкин С.В., Гузенко Р.Б., Май Р.И. Численная модель эволюции ледяного покрова арктических морей для оперативного прогнозирования // Лед и снег. 2015. Т. 55. № 3. С. 83–96.

Май Р.И. Нелинейные приливные явления Белого моря // Комплексные исследования процессов, характеристик и ресурсов российских морей Северо-Европейского бассейна / Под ред. Г.Г. Матишова. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2007. С. 185–200.

Май Р.И. Линейные и нелинейные приливные явления в морях Европейской Арктики // Проблемы Арктики и Антарктики. 2008. № 3 (80). С. 115–125.

Мионов Е.В., Аших И.М., Дымов В.И., Кулаков М.Ю., Клячкин С.В. Модели и методы расчета и прогноза ледовых и океанографических условий в арктических морях // Проблемы Арктики и Антарктики. 2010. № 2 (85). С. 16–28.

Некрасов А.В., Май Р.И. О двумерном анализе структуры полусуточного прилива в некоторых районах Белого моря // Океанология. 2009. Т. 49 (6). С. 820–834.

Смирнов В.Г., Бычкова И.А. Спутниковый мониторинг ледяных образований при обеспечении безопасности работ на шельфе арктических морей // Исслед. Земли из космоса. 2015. № 4. С. 79–87.

Спутниковые методы определения характеристик ледяного покрова / Под ред. В.Г. Смирнова. СПб.: ААНИИ, 2011. 240 с.

Blumberg, A.F., Mellor G.L. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model // Three-Dimensional Coastal Ocean Models / Edited by N. Heaps. American Geophysical Union, Washington, D.C., 1987. Vol. 4. P. 208.

Bogdanov A.V., Sandven S., Johannessen O.M., Alexandrov V.Y., Bobylev, L.P. Multisensor approach to automated classification of sea ice image data // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2005. Vol. 43. № 7. P. 1648–1664.

Grigoryev M. Russia's Arctic Projects: Shipping support, challenges and decisions // 13th Annual Arctic Shipping Forum, 25–27 April 2017, Helsinki. URL: www.arcticshippingforum.com [дата обращения 10.05.2017].

Locarnini R.A., Mishonov A.V., Antonov J.I., Boyer T.P., Garcia H.E., Baranova O.K., Zweng M.M., Paver C.R., Reagan J.R., Johnson D.R., Hamilton M., Seidov D.. World Ocean Atlas 2013. Vol. 1: Temperature. NOAA Atlas NESDIS 73. 2013. 40 p.

Mellor G.L. A three-dimensional, primitive equation, numerical ocean model. Users guide. Program in Atmospheric and Oceanic Sciences Princeton University. Princeton, NJ 08544-0710. 2003. 53 p.

Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. 1979. Vol. 9. № 1. P. 62–66.

Zakhvatkina N.Y., Alexandrov V.Y., Johannessen O.M., Sandven S., Frolov I.Y. Classification of Sea Ice Types in ENVISAT Synthetic Aperture Radar Images // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2013. Vol. 51. № 5. P. 2587–2600.

Zweng M.M., Reagan J.R., Antonov J.I., Locarnini R.A., Mishonov A.V., Boyer T.P., Garcia H.E., Baranova O.K., Johnson D.R., Seidov D., Biddle M.M. World Ocean Atlas 2013. Vol. 2: Salinity. NOAA Atlas NESDIS 74. 2013. 39 p.

E.U. MIRONOV, V.G. SMIRNOV, I.A. BYCHKOVA, S.V. KLJACHKIN, L.N. DYMENT,
N.JU. ZAHVATKINA, R.I. MAJ, R.B. GUZENKO, E.B. SAPERSHTEJN, S.V. MIHAL'CEVA,
E.V. PLATOVA, L.A. STARCEV

EXPERIMENTAL HARDWARE-SOFTWARE COMPLEX OF SATELLITE MONITORING AND FORECAST OF ICE CONDITIONS

New methods for automated determination of sea ice cover features based on satellite data and upgraded method of short-term forecast of ice conditions based on numerical model “ocean-ice” are considered. The characteristic of the developed new software tools is given. The description of the experimental hardware-software complex of satellite monitoring and forecasting of ice conditions, consisting of five subsystems is presented.

Keywords: ice conditions, satellite images, methods, dynamic-thermodynamic model, the Western Arctic Seas.

ИЗУЧЕНИЕ БАКТЕРИАЛЬНЫХ СООБЩЕСТВ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД ОАЗИСОВ АНТАРКТИДЫ МЕТОДАМИ КУЛЬТИВИРОВАНИЯ

Е.С. КАРАЕВСКАЯ¹, Н.Э. ДЕМИДОВ^{2,6}, Д.Г. ШМЕЛЕВ³, Е.М. РИВКИНА⁴,
С.А. БУЛАТ⁵

¹ — ООО КориумСкан, e-mail: katty_k_s@mail.ru

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

³ — АО «Гипротрубопровод», e-mail: shmelevdenis_msu@mail.ru

⁴ — ФАНО ФГБУНИ Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пушкино, e-mail: muss@mail.ru

⁵ — Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова, НИЦ «Курчатовский институт», Гатчина, e-mail: bulat@omrb.pnpi.spb.ru

⁶ — ФАНО ФГБУНИ Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, г. Москва

Проведено культивирование аэробных и анаэробных бактерий из многолетнемерзлых пород острова Кинг Джордж, оазисов Ширмахера, Холмы Ларсеманн, Бангера и Берега Хоббса. На основе качественного и количественного состава культивируемого сообщества образцов проведена сравнительная характеристика разнообразия морских, озерных и флювиогляциальных отложений различных геоэкологических условий и возраста.

Ключевые слова: аэробные бактерии, анаэробные накопительные культуры, вечная мерзлота, оазисы, Антарктида.

ВВЕДЕНИЕ

Исследования микроорганизмов, способных сохранять жизнеспособность в вечной мерзлоте, проводились с начала XX в. при обнаружении в мерзлоте остатков представителей плейстоценовой фауны (Омелянский, 1911; Исаченко, 1912; Каптерев, 1938; Крисс, 1940; Каляев, 1947). Из многолетнемерзлых пород Арктики были выделены жизнеспособные аэробные (Звягинцев и др., 1985; Хлебникова и др., 1990; Соина и др., 1991; Vorobyova et al., 1997; Карасев и др., 1998; Хмеленина и др., 2002; Rodrigues et al., 2006; Backermans et al., 2006; Steven et al., 2006, 2007; 2008) и анаэробные бактерии и археи (Rivkina et al., 1998; 2007; Suetin et al., 2009; Krivushin et al., 2010; Scherbakova et al., 2011), водоросли (Вишневская и др., 1997; Vishnivetskaya et al., 2002), дрожжи (Бабьева и др., 1969; Дмитриев и др., 1997; Faizutdinova et al., 2005), микромицеты (Кочкина и др., 2001; 2012; Озерская и др., 2008) и простейшие животные (Шатилов и др., 2005; 2010).

Вечная мерзлота Антарктиды изучена в значительно меньшей степени (Gilichinsky et al., 2007; Goordial et al., 2016). Вечномерзлые отложения по сравнению

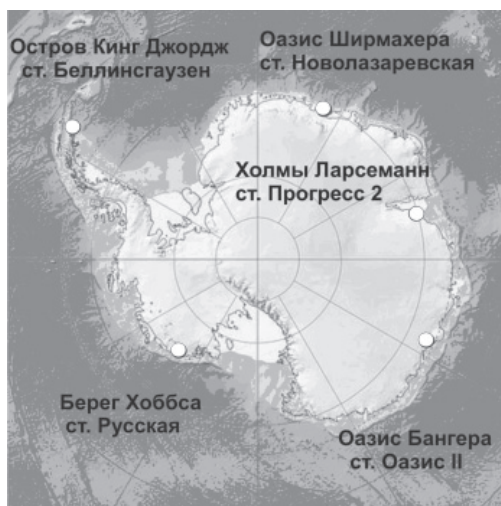


Рис. 1. Районы бурения (получения проб) исследуемых многолетнемерзлых пород.

с чистым льдом являются лучшей природной средой, способствующей длительному сохранению жизнеспособных микроорганизмов. Клетки в ней способны сохраняться в течение длительного геологического времени от нескольких тысяч до нескольких миллионов лет (Gilichinsky, Rivkina, 2011). С экзобиологической точки зрения микробное разнообразие многолетнемерзлых пород (ММП) Земли является моделью для дальнейшей разработки подходов и методов обнаружения жизни на планетах криогенного типа. Наиболее близким аналогом ММП Земли является мерзлота Марса (Gilichinsky et al., 2007; Демидов и др., 2012). В нашей работе представлены результаты культивирования аэробных бактерий, а также сульфатредуцирующей активности некоторых образцов в анаэробных условиях и предположения о свойствах сообществ исследуемых многолетнемерзлых пород, характеризующихся различными геокриологическими условиями, происхождением, возрастом и географическим положением. Районы работ представлены на рис. 1.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Образцы мерзлых осадочных пород были отобраны с помощью буровой установки УКБ 12/25 колонковым способом путем простого механического вращения пробоотборника без промывки и без добавления каких-либо химических реагентов. Для микробиологических исследований отбирали центральную часть ненарушенного мерзлого керна диаметром 50–100 мм с соблюдением мер стерильности. Образцы доставляли в лабораторию при отрицательных температурах. Отбор навески мерзлого керна проводили стерильно в микробиологическом боксе.

Для культивирования использовали метод прямого посева из образца на плотные питательные среды: 1/2 TSA, R₂A, ГА (голодный агар) и морской агар (Sigma). Расчет численности клеток проводили по формуле: $N = (mPb)/a$, где m — количество колоний на чашке; P — разведение; b — количество капель в одном мл; a — масса навески. Для обнаружения анаэробной активности образцов использовали стандартную среду для сульфатредукторов с использованием ацетата, пирувата и лактата натрия в качестве источников углерода. Культивирование проводили при температурах 4, 6

и 20 °C. Фиксирование процесса сульфатредукции проводили качественно методом изменения оптической плотности на спектрофотометре SPECOL 221 (Институт биофизики и физиологии микроорганизмов) при длине волны 660 нм. Приготовление раствора: 1 мл 2-процентного ацетата Zn; 0,2 мл пробы накопительной культуры; 0,5 мл 0,2-процентного раствора N,N-диметил-1,4-фенилендиамина в 20-процентной серной кислоте; 0,05 мл 10-процентного раствора железо-аммонийных квасцов в 2-процентной серной кислоте; дистиллированной воды до общего объема 10 мл (Абашина и др., 2015).

Учет численности анаэробных клеток проводили методом предельных разведений, для чего посев суспензии образец/среда как 1:10 последовательно 7 раз разбавляли в 10 раз до получения разведения 10^8 , после чего учитывали наличие и численность клеток спустя 3 месяца инкубации в каждом разведении.

Для определения таксономической принадлежности культур из их биомассы с помощью набора реактивов «MOBIO Power Soil DNA isolation KIT» выделяли геномную ДНК и затем проводили полимеразную цепную реакцию (ПЦР) с использованием праймеров 27f-5'-AGAGTTTGTATCMTGGCTCAG-3', 1492r-5'-TACCTTGTACGACTT-3' и 63f-5'-CAGGCCTAACACATGCAAGTC; 1387r-5'-CGGCGGWTGTACAAGGC-3' (Marchesi et al., 1998) для получения ампликонов генов 16S рибРНК. Полученный продукт очищали с помощью набора QIAGEN DNA purification KIT. С использованием автоматического 4-капиллярного секвенатора определяли нуклеотидные последовательности ампликонов (без клонирования), которые затем обрабатывали с помощью программ Chromas и Blast (<http://blast.ncbi.nlm.nih.gov/Blast.cgi>).

Выделение геномной ДНК из образцов проводили в помещениях, сертифицированных по классу чистоты (класс 10000 и ламинар класса 100) лаборатории гляциологии и геофизики окружающей среды (ЛГГОС) (Гренобль, Франция) (Bulat et al., 2004). Механическое разрушение клеток проводили с помощью инструмента FastPrep ("MP Biomedicals", США). Для выделения геномной ДНК использовали коммерческий набор PowerSoil DNA isolation kit ("MoBio Labs", США). Для амплификации генов 16S рибРНК бактерий использовали пару вырожденных универсальных праймеров на область v3-v5 (590 нуклеотидных пар) (Karlova et al., 2011; Chuvochina et al., 2011). Ампликоны клонировали в вектор набора TOPO TA Cloning® Kit for Sequencing ("Invitrogen", США). Предварительно степень покрытия клоновых библиотек и ее коррекцию (в сторону большего покрытия) определяли по результатам риботипирования с использованием трех ферментов рестрикции Alu I, Hpa II и Hae III ("Fermentas", Литва), тогда как окончательную степень покрытия определяли по результатам анализа нуклеотидных последовательностей, сгруппированных в флотипы. Секвенирование проводили в компании «Евроген» (Москва, Россия). Выравнивание, сравнение и идентификацию выявленных флотипов осуществляли с помощью программы CLUSTALW2 (<http://www.ebi.ac.uk/Tools/msa/clustalw2>) и алгоритма BLAST базы данных GenBank (<http://blast.ncbi.nlm.nih.gov>) (Altschul et al., 1990). По результатам этого анализа судили о таксономическом положении ДНК клонов/флотипов.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Остров Кинг Джордж (станция Беллинсгаузен)

Скважины A11-08 и B1-09 глубиной 12 и 9 м соответственно вскрыли отложения морской террасы на острове Кинг Джордж в районе станции Беллинсгаузен (62,192° ю.ш., 58,939° з.д., 15 м). Среднегодовая температура отложений –0,6 °C

(Абрамов и др., 2011). Отложения представлены (сверху вниз): до 5 см крупным галечником, до 7,5 м мерзлым песком, далее до 9 м — суглинком и до 11 м — голубой глиной, далее — подстилающие талые глинистые отложения, в которых расположен подмерзлотный водоносный горизонт.

Характерной особенностью многолетнемерзлых пород был черный цвет и сильный запах сероводорода. Льдистость отложений варьировала от 10 до 36 %. В скважине отмечено присутствие метана от 0,5 до 7,4 мл/кг, изотопный состав которого $\delta^{13}\text{C}(\text{CH}_4)$ от -81 до -94 ‰, что однозначно указывает на его биогенный генезис (Абрамов и др., 2011). Общая минерализация водной вытяжки составляет 1–4 г/л. В ее составе доминируют ионы Na^+ и SO_4^{2-} , что говорит о промывании осадков пресными водами. Значения окислительно-восстановительного потенциала (Eh) варьировали от 413 на 8,5 м до +18 на 3,0 м и были +242 на 4 м. Значения pH варьировали от 7,23 до 9,82 с максимумом на глубине 6,5 м. Всего было исследовано 18 микробиологических образцов.

Численность культивируемых аэробных бактерий на питательных средах изменялась от 0 до 10^4 КОЕ/г, причем закономерности распределения культивируемых аэробов по разным слоям выявлено не было. Наибольшая численность (10^4 КОЕ/г) была зафиксирована в образцах, наиболее близких к поверхности на глубине от 3 до 4 м в обеих скважинах. В более глубоких слоях она падала до $0\text{--}10^2$ КОЕ/г. При этом максимальная численность приходилась на слои песка и глины, минимальная — на слой супеси, максимальные значения льдистости приходились на 5,5, 6,5 и 9 м, а содержание органического углерода равномерно возрастало с глубиной (рис. 2).

Из использованных питательных сред наиболее благоприятными для культивирования из этих отложений оказались разбавленные среды со средним содержанием органических субстратов (R_2A и 1/2TSA) и морской агар, содержащий раствор микроэлементов и небольшое количество минеральных солей. При температуре 4°C рост был преимущественно на среде R_2A , при 20°C — на среде 1/2TSA.

В результате посевов образцов на питательные среды практически не было выявлено доминирования колоний одного морфотипа, за исключением образцов с глубин 3,2–3,3 и 4,1–4,2 м, доминирующими в которых оказались молочно-белые круглые плоские колонии, содержащие кокки и определенные как *Acinetobacter sp.* (Bel-320-1*, 2, Bel-410-1, 2). Данный флотип показал 99,7 % сходства (по последовательности) с культурой *Acinetobacter lwoffii* DSM 2403 (Audureau et al., 1940). Представители этого вида являются патогенами человека, но могут встречаться и в почвах.

Среди других культур из единичных колоний идентифицированы были следующие.

Bel-440-1 — *Kocuria sp.* — кокки, образующие маленькие круглые ярко-красные колонии — 97 % сходства с *Kocuria rosea* (GenBank № X87756) (Stackebrandt et al., 1995). Представители этого рода были выделены из почв, пыли и циано-бактериальных матов Антарктиды.

Bel-440-2 — *Micrococcus sp.* — кокки, на 96 % сходные со штаммом *Micrococcus endophyticus* YIM 56238 (Chen et al., 2009), изолированным из корней *Aquilaria sinensis*.

Bel-660-1, 2, 3 — *Microbacterium sp.* — кокки, образующие ярко-желтые колонии, сходные на 98 % со штаммом *Microbacterium paraoxydans* CF36 (Laffineur et al., 2003), изолированным из крови больного лейкемией, и на 99 % со штаммом

* Название культур состоит из названия станции (Bel), глубины в см (380) и порядкового номера культуры с данной глубины.

Microbacterium phyllosphaerae DSM 13468, выделенным из отходов мульчирования дерна (Behrendt et al., 2001).

Bel-940-1, 2 — *Frigobacterium* sp. — грамположительная палочкообразная бактерия, образующая желто-бежевые круглые колонии — 97 % сходства со штаммом *Frigoribacterium faeni* 801 (Kampfner et al., 2000), выделенным из сенной пыли и имеющим оптимальный рост при 4–8 °С, а также 96 % сходства со штаммом *Frigoribacterium mesophilum* MSL-08 (Dastager et al., 2008) с острова Бигеум, Южная Корея.

Культура Bel-380 — грамположительная палочковидная бактерия, образующая круглые пигментированные (красный цвет) колонии, лишь 84 % сходства со штаммом *Pedobacter composti* TR6-06, выделенным из компоста (Lee et al., 2009), осталась неидентифицированной (менее 90 % сходства — уровень выше семейства).

Оазис Ширмахера (станция Новолазаревская)

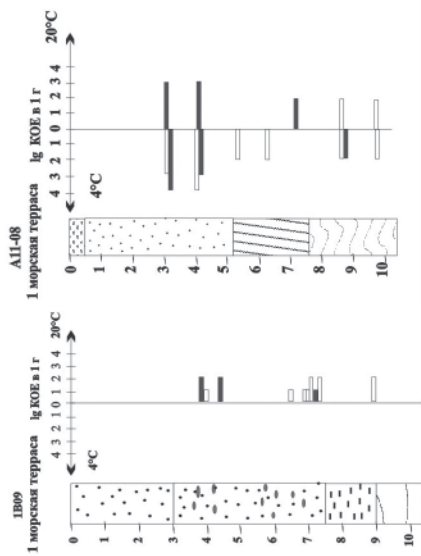
Скважины 2, 3, 4-09 пробурены в восточной части оазиса Ширмахера вблизи станции Новолазаревская и вскрыли отложения 1-й и 2-й озерных террас западного и восточного берега оз. Красное (70,763° ю.ш., 11,795° в.д., 80 м). Максимальная мощность рыхлых отложений оазиса, представленных песками с прослоями супеси и обломками коренных пород, составляла 3 м. Было показано, что верхняя часть разреза (10–80 см) была сложена сухими малольдистыми грунтами, подстилаемыми льдистыми мерзлыми породами (аналогичная двухслойная структура грунта характерна для мерзлотных районов Марса). Общая минерализация водной вытяжки составила от 0,23 до 1,65 г/л.

В ее составе доминировали ионы Cl^- , SO_4^{2-} и Na^+ . pH отложений варьировал от 6,8 до 7,28 в скважине 2-09, от 6,33 до 6,84 в скважине 3-09 и от 6,51 до 7,6 в скважине 4-09. Среднегодовая температура отложений составила –8,3 °С (Абрамов и др., 2011). Всего было исследовано 14 микробиологических образцов.

Численность культивируемых аэробных бактерий в разных образцах варьировала от 0 до 10^6 КОЕ/г. Рост наблюдался как при 4, так и при 20 °С, но максимальное число КОЕ/г было отмечено при 4 °С, при этом не все образцы, проявившие активность на среде R_2A , дали рост на среде 1/2TSA (рис. 2). На примере отложений скважин 3 и 4-09 была замечена некоторая зависимость численности КОЕ/г от льдистости образцов. Однако явной закономерности выявлено не было.

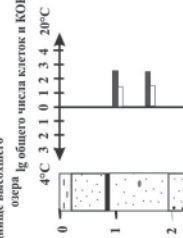
Из культивируемых аэробов в поверхностном мелкоземе шурфа скважины 4-09 доминировал актиномицет *Streptomyces* sp. (Nov-5-10), в образце 0,5 м скважины 3-09 — грамотрицательная бактерия *Polaromonas* sp. (Nov-50-2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10). Из минорных компонентов культивируемой части сообщества образца 0,5 м (3-09) были идентифицированы представители родов *Devosia* (Nov-50-1), *Deltia* (Nov-50-11), *Cryobacterium* (Nov-50-12, 13, 14) и *Bacillus* (Nov-50-16). Культура Nov-50-15 осталась неидентифицированной.

Так, Nov-5-10 — *Streptomyces* sp. — актиномицет, доминирующий в отложениях слоев 0–5, 5–10 см в верхней части скважины 4-09, образовывал врастающие в среду колонии, разделенные от центра перетяжками-сегментами, приобретающими через несколько суток при 20 °С белый воздушный мицелий на среде 1/2TSA и сиреневый на R_2A . Толщина мицелия — около 1 мкм. Наиболее близким из типовых штаммов (96 % сходства) оказался *Streptomyces subutilus* DSM 40445 (Arai et al., 1964) — продуцент гидроксистрептомицина. Как известно, род *Streptomyces* представляет типичных обитателей верхних горизонтов почв разных районов.

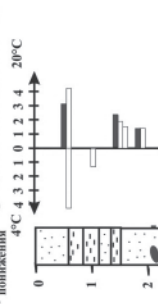


2-09

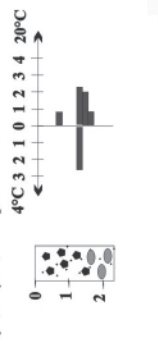
дно высохшего озера



3-09

тыловой нов
приозерного
полюска

1-07

дно озера
существующего

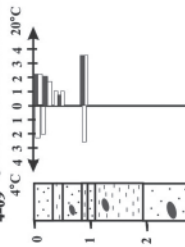
2-07

дно озера
существующего

1 озерная терраса

4-09

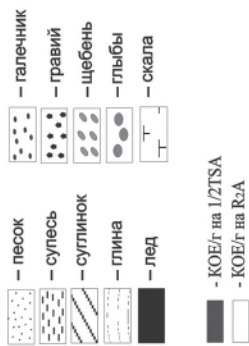
lg общего числа клеток и КОЕ в 1 г



3-07

дно озера
существующего

Условные обозначения



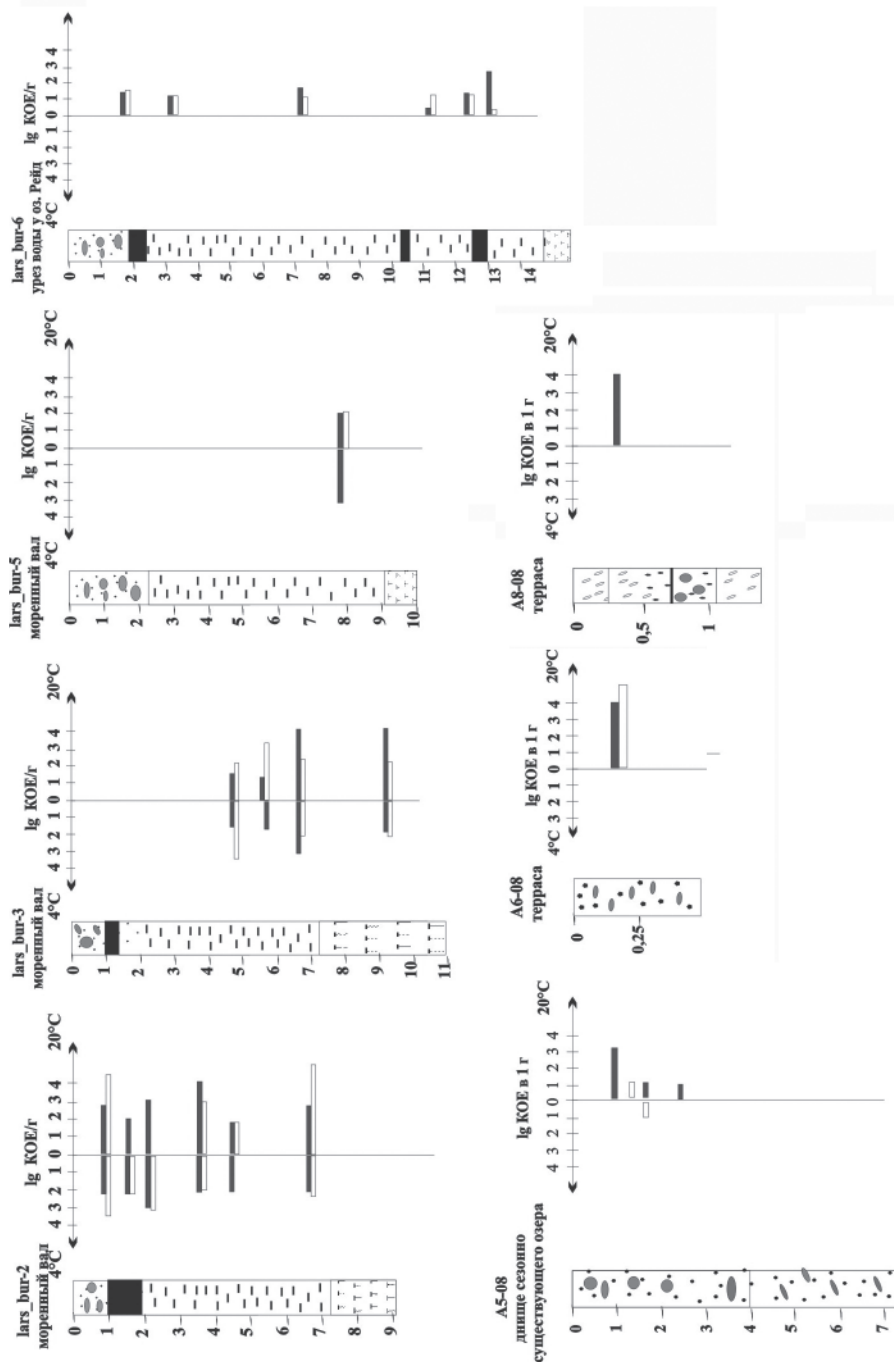


Рис. 2. Распределение числа колониеобразующих единиц в 1 г грунта (КОЕ/г) в скважинах, пробуренных во многолетнемерзлых породах оазисов Антарктиды.

Nov-50-2, 3 — *Polaromonas* sp. — граммотрицательные кокки, доминирующие на глубине 50 см скважины 3-09, образовывали бежевые плоские круглые колонии, показавшие 95% сходства со штаммом *Polaromonas naphthalenivorans* CJ2 (Jeon et al., 2004), выделенным из нефте-деготно загрязненных пресноводных отложений и способным использовать нафталин в качестве единственного источника углерода и энергии.

Отметим, что многие представители рода *Polaromonas* являются психрофилами (Miteva et al., 2004).

Nov-50-1 — *Devosia* sp. — граммотрицательная палочкообразная бактерия, образующая маленькие круглые плоские темно-бежевые колонии, выделенная с глубины 50 см скважины 3-09 и показавшая 95 % сходства со штаммом *Devosia limi* R-21940 = LMG 22951 (Vanparrys et al., 2005), выделенным из накопительной нитрифицирующей культуры из азотификсирующего клубенька водяной мимозы *Neptunia natans* в Индии.

Nov-50-4, 6, 9 — *Cryobacterium* sp. — грамположительные неравного размера палочки, образующие желто-бежевые плоские колонии, выделенные с глубины 50 см скважины 3-09 и показавшие 94 % сходства со штаммом *Cryobacterium psychrotolerans* 0549 (Zhang et al., 2007), выделенным из ледника, и 95 % сходства со штаммом *Cryobacterium mesophilum* MSL-15 (Dastager et al., 2008), выделенным из почвы острова Бигеум в Южной Корее.

Delftia sp. Nov-50-5 — граммотрицательная палочковидная бактерия, образующая светло-бежевые плоские круглые колонии, показавшая 98 % сходства со штаммом *Delftia lacustris* 332 (Jørgensen et al., 2009), выделенным из воды мезотрофного озера в Дании и способным разлагать пептидогликан.

Nov-50-7 — *Bacillus* sp. — грамположительная спорообразующая бактерия, образующая белые плотные колонии неправильной формы, выделенная с глубины 50 см скважины 3-09 и показавшая 99 % сходства со штаммом *Bacillus marisflavi* TF-11, выделенным из морской воды высыхающей отмели Желтого моря (Yoon et al., 2003).

Культура Nov-50-8 — грамположительная пигментированная красным цветом бактерия, делящаяся на палочки и показавшая лишь 85 % сходства со штаммом *Rhodococcus kroppenstedtii* K07-23, изолированным из холодной пустыни Индийских Гималай (Mayilraj et al., 2006), осталась неидентифицированной (менее 90 % сходства).

Холмы Ларсеманн (станция Прогресс)

Бурение скважин 1–3-07 производили в днище сезонно существующего озера (Кристальное) (69,395° ю.ш., 76,359° в.д., 39 м). Значения Eh отложений варьировали от –335 до +484 мВ. Значения pH в скважине 1-07 составляли от 4,01 до 6,86, в скважине 3-07 — 6,86 и в скважине 2-07 до 9,18. В скважине 1-07 обнаружен метан в количествах от 0,03 до 16,13 мл/кг. Всего было исследовано 7 микробиологических образцов.

Численность культивируемых аэробных бактерий составляла от 0 до 10⁴ КОЕ/г. Максимальный рост был отмечен на более богатой органическими субстратами среде 1/2TSA, чем R₂A и голодный агар. Большую численность наблюдали при 20 °С, а не при 4 °С (рис. 2).

Скважины lars_bur-2, 3, 5 и 6 были пробурены на моренных отложениях долины озер Рейд и Скандретт (Нелла) (69,387° ю.ш., 76,376° в.д., 15 м) (Демидов и др., 2013).

Максимальная мощность морены наблюдалась в скважине lars_bur-3 и составила 5,5 м. Первые 1–2 м отложений содержали валуны диаметром до 1 м, включенные в мерзлый песок серого и желтовато-бурого цвета с массивной криотекстурой. Возраст отложений по данным радиоуглеродного датирования нижележащих озерно-морских

отложений составляет менее 30 тыс. лет. Далее вниз по скважине были вскрыты озерно-морские отложения, мощностью до 6 м, подстилаемые скальным основанием, представленные серыми и черными песками с косой слоистостью и специфическим запахом органических веществ. Для песков была характерна массивная криотекстура, редкие включения камней и пластового льда, содержание биогенного метана 0,011–0,986 мл/кг (Демидов и др., 2013). Среднегодовая температура отложений составила –9,5 °C (Демидов и др., 2013).

Всего было исследовано 20 микробиологических образцов.

Численность культивируемых аэробных бактерий составляла от 0 до 10^5 КОЕ/г. Хороший рост наблюдали на всех средах, хотя наибольшая численность была получена при 20 °C. В целом наибольшие показатели КОЕ были отмечены в озерно-морских отложениях, при этом максимальное КОЕ было отмечено в озерно-лагунных отложениях (рис. 2). Выделенные из исходных образцов культуры не были идентифицированы.

Из накопительных культур двух образцов скважины lars_bur-6 в среде 1/10 R₂A были выделены культуры Lars-130, Lars-144-1, 2, 3.

Lars-130, Lars-144-3 — *Stenotrophomonas sp.* — грамотрицательные подвижные палочки, образующие бежевые полупрозрачные круглые плоские колонии, показавшие для Lars-130 всего 96 % родства с разлагающей ЭДТА *Stenotrophomonas chelatiphaga*, выделенной из сточных вод (Kaparullina et al., 2009), для Lars-144-3 — 98 % с *Stenotrophomonas rhizophila*, изолированной из ризосферы рапса *Brassica napus* L. (Wolf et al., 2002).

Lars-144-1 — *Tardiphaga robiniae* — грамотрицательные палочки, образующие небольшие круглые колонии ярко-красного цвета, показавшие 99 % сходства с *T. robiniae*, выделенной из клубеньков акации *Robinia pseudoacacia* (Meyer et al., 2012).

Lars-144-2 — *Microbacterium paraoxidans* — грамположительные коринеформные палочки, образующие желтые колонии, показавшие 99 % сходства с *M. Paraoxidans*, выделенной из человеческой крови (Laffineur et al., 2003), а также из рыб *Nile tilapia*, для которых является патогеном (Soto-Rodriguez et al., 2013).

Оазис Бангера (станция Оазис-2)

Скважина А5-08 глубиной 7 м выявила озерные осадочные породы с дна временного водотока оазиса Бангера, протекающего по пересохшему озеру к озеру Фигурное под горой Черная (66,275 °ю.ш., 100,760 °в.д., 7 м). Мерзлые осадки начинаются с глубины 1 м. Они представлены песчаными, супесчаными и суглинистыми разностями с обильными включениями гальки, щебня и остатков фауны при полном отсутствии створок диатомей. Как и в породах острова Кинг Джордж, в осадках оазиса Бангера спор и пыльцы не обнаружено. Доминирующими ионами в водной вытяжке являются Na⁺, HCO₃⁻ и SO₄⁻², ее минерализация составляла 1–3 г/л. Значение Eh отложений варьирует от –489 на глубине –5,8 м до +267 на глубине 1,65 м. Значение pH варьируют от 7,23 до 9,82 на глубине 6,5 м. Среднегодовая температура отложений составила –7,9 °C (Абрамов и др., 2011). Всего было исследовано 5 микробиологических образцов.

Общая численность клеток на глубине составила от 10^6 клеток/г на глубине 1 м до 10^8 клеток/г на глубине 2,65 м, культивируемых аэробов было 0– 10^1 КОЕ/г на средах R₂A и 1/2TSA с максимумом 10^4 КОЕ/г на среде 1/2TSA на глубине 1 м (рис. 2).

Культивируемые аэробы отложений скважины А5-08 представляли собой единичные колонии без доминирования определенной группы. Из них было идентифицировано два фило типа *Cryobacterium sp.* (Bng-110-1, 2, 3) и *Bacillus sp.* (Bng-580).

Bng-110-1, 2, 3 — *Cryobacterium sp.* — грамположительные бактерии, делящиеся на неравные палочки и образующие желто-бежевые плоские колонии. Выделены из слоя 110–120 см и показали наибольшее сходство (95%) со штаммом *Cryobacterium psychrotolerans* 0549 (Zhang et al., 2007), выделенным из ледника.

Bng-580 — *Bacillus sp.* — грамположительная спорообразующая бактерия, выделенная из слоя 580 см и показавшая 98 % сходства со штаммом *Bacillus mojavensis* IFO15718 (Vardhan et al., 2011). Этот вид впервые был выделен из пустынной почвы Мойявы, штамм KJS-3 (Kim et al., 2011), эндофит, защищающий растения от болезней и противодействующий микромицетам рода *Fusarium*.

Берег Хоббса (станция Русская)

Оазис Берег Хоббса представляет собой скалистый мелкосопочник, полого поднимающийся от берега моря до высот 140–150 м. Скважины A6-08 и A8-08 вскрыли гравийные и мелкозернистые осадочные породы (74,763° ю.ш., 136,798° з.д., 64 и 76 м).

Значения Eh варьировали от –328 в скважине 8-08 на глубине 1,2–1,25 м до +348 в скважине 6-06 на глубине 0,26–0,33 м. Значение pH колебалось от 6,4 до 6,7 в скважине 6-08 и от 6,0 до 7,1 в скважине 8-08. Среднегодовая температура отложений составила –10,4 °C (Абрамов и др., 2011). Всего было исследовано 2 микробиологических образца.

В отложениях было обнаружено 10^6 – 10^7 клеток/г и 10^3 – 10^5 КОЕ/г при 20 °C (рис. 2).

Идентификация выделенных культур не была проведена.

Культивирование анаэробных микроорганизмов

Образцы скважины 1B-09 с глубин 6,6 и 9,4 м, показавшие наибольшее количество метана, были помещены в среду для сульфатредукторов, содержащую лактат и пируват, которую инкубировали на +6, +20 и +30 °C. Спустя 10 месяцев культивирования в полученных накопительных культурах с помощью световой микроскопии была определена численность микроорганизмов в образцах: для всех вариантов она составила 10^8 клеток/г, соответствуя общей численности клеток в образце по данным прямого счета. Видимые клетки представляли собой как кокки, так и палочки разной толщины и длины. Явного процесса сульфатредукции методом цветовой реакции определения содержания сульфида ни в одной из повторностей обнаружено не было. Накопительные культуры тех же образцов в той же среде, поставленные двумя годами ранее при двух разных температурах (6,6: +6 °C, 9,4: +20 °C) и показавшие положительный результат по этому методу, были пересеяны на среды, содержащие лактат и пируват или ацетат и водород. В течение двух месяцев при измерении их оптической плотности тем же методом наблюдали ее небольшое увеличение, что однозначно говорит о сульфатредуцирующей активности в этих образцах, причем в большей степени в образце 6,12 м при 6 °C, более близкой к температуре океанической воды и многолетнемерзлых осадков температуре (рис. 3).

Еще одна накопительная культура образца с глубины 1,9 м скважины 1-07, содержащего 16,13 мл/кг метана, на среде для сульфатредуцирующих бактерий с лактатом и пируватом, спустя 2 года культивирования при +6 °C показавшая положительный результат в цветовой реакции определения содержания сульфида, была пересеяна на среды, содержащие в качестве источников углерода как только лактат и пируват, так и с добавкой ацетата и водорода. В течение двух месяцев наблюдали небольшое увеличение оптической плотности при измерении содержания сульфида (рис. 3).

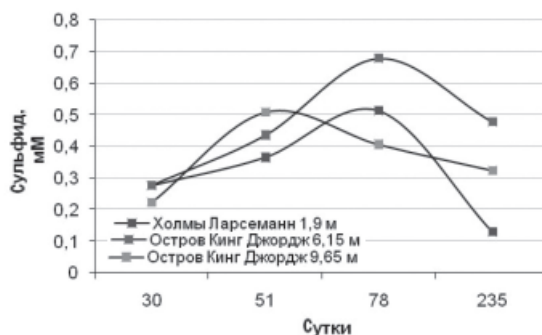


Рис. 3. Увеличение количества сульфида в накопительных культурах озерных ММП холмов Ларсеманн и морских ММП острова Кинг Джордж.

Предварительный анализ микробных сообществ методом прямого ДНК-анализа

Пилотное исследование библиотек клонов, созданных на основе амплифицированной с помощью специфических на область $v3-v5$ (590 п.н.) бактериальных генов 16S рРНК ДНК, выявило в скважине 1В09 (остров Кинг Джордж) с глубины 6,6 м филоотипы, относящиеся в основном к альфа-протеобактериям, тогда как с глубины 9,4 м — преимущественно к бета-протеобактериям. Среди других филоотипов были «родственные» умеренным термофильным, ацецифильным, метилотрофным, аммоний-окисляющим бактериям, метаногенным археонам, а также бактериям-продуцентам антибиотиков и бактериохлорофилла А. Принадлежность одного филоотипа (97 % сходства) к роду *Desulfosporosinus*, еще одного (96 % сходства) к роду *Algidimarina*, а также очень далекое сходство других двух филоотипов (86 % сходства — уровень класса и выше) с родом *Desulfobacterium* может говорить о присутствии в этих отложениях не только в прошлом, но и в настоящем процесса сульфатредукции.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Условия ММП в районе скважин А11-08 и 1В09 на острове Кинг Джордж характеризуются высокой среднегодовой температурой пород ($-0,6^{\circ}\text{C}$), что может объяснять низкую активность этих отложений при аэробном культивировании. Температуры пород ММП оазисов Ширмахера ($-8,3^{\circ}\text{C}$), Холмы Ларсеманн ($-9,5^{\circ}\text{C}$) и Бангера ($-7,9^{\circ}\text{C}$) более благоприятны для сохранения жизнеспособности клеток микроорганизмов, сохранившихся в них, хотя ММП оазиса Бангера показали низкие значения КОЕ/г, что может быть связано с флювиогляциальным происхождением отложений. Особую роль в сохранении микробных сообществ мерзлоты играет величина льдистости рыхлых пород. Так, в образцах поверхностного мелкозема оазиса Ширмахера (0–10 см, 2 % льда), подверженного ежегодным перепадам температур от $-44,4$ до $+35,9^{\circ}\text{C}$ (Кручинин, Симонов, 1967; Bormann, Fritzsche, 1995), выявлено на порядок меньше КОЕ/г (10^2), чем в цементированном льдом грунте (85–100 см, 20 % льда) с ежегодным колебанием температур от $-17,9$ до $+0,6^{\circ}\text{C}$ (10^3 КОЕ/г). Этот пример иллюстрирует возможные условия сохранения микроорганизмов (в частности, аэробных бактерий) в аналогичных горизонтах Марса. Показано, что в морских ММП острова Кинг Джордж (возраст 7,5 тыс. лет) и лагунных ММП в холмах Ларсеманн (30 тыс. лет) численность КОЕ/г не превышала 10^4 , при этом в ММП острова Кинг

Джордж в целом она была ниже, что может быть связано с высокой температурой ММП последних — $-0,6^{\circ}\text{C}$. В то же время при сравнении в озерных ММП холмов Ларсеманн (возраст 20 тыс. лет) и оазиса Ширмахера (более 50 тыс. лет) максимальная численность (10^6 КОЕ/г) была обнаружена в последних, хотя среднегодовые температуры ММП в них практически не различались (оазис Ширмахера — $-8,3^{\circ}\text{C}$, Холмы Ларсеманна — $-9,5^{\circ}\text{C}$). Озерно-лагунные отложения холмов Ларсеманн характеризовались большим числом КОЕ/г и большим разнообразием грамотрицательных и пигментированных бактерий по сравнению с мореной, обнаружившей в основном только спорообразующие бактерии. Культуральное аэробное разнообразие морских ММП острова Кинг Джордж оказалось менее богатым и было представлено в основном спорообразующими формами, тогда как разнообразие озерных ММП (особенно, в ММП оазиса Ширмахера) включало большое количество грамотрицательных бактерий, встречающихся в морских водах и ледниках.

Большинство выделенных нами из ММП оазисов штаммов относятся к бактериям, ранее изолированным из почв, пресноводных и морских отложений и холодных местообитаний. Так, 30 % выделенных культур оказались принадлежащими родам *Cryobacterium*, *Frigobacterium*, *Polaromonas*, которые являются обитателями холодных экосистем. Вместе с тем 70 % культур показали менее 98 % сходства по последовательности гена 16S rRNA с коллекционными штаммами и могут представлять новые виды.

Молекулярно-биологическое исследование бактериального сообщества морских отложений острова Кинг Джордж показало, что большинство из выявленных фило-типов имело высокое сходство с фило-типами в GenBank, являющимися гетеротрофами и хемохетеротрофами. Обнаружение в ДНК морских ММП острова Кинг Джордж фило-типов, родственных бактериям сульфатредуцирующих родов, подкрепляется наличием сульфатредуцирующей активности в накопительных культурах тех же образцов. Это позволяет предположить наличие в них жизнеспособных сульфатредуцирующих бактерий. Также как и в случае культур, 73 % выявленных фило-типов показали менее 98 % сходства с ближайшими коллекционными штаммами, подтверждая вывод о малой изученности биоразнообразия ММП Антарктиды.

Работа выполнена на базе лаборатории криологии почв ИФХиБПП РАН, лаборатории анаэробных микроорганизмов ИБФМ РАН (Пушино) и лаборатории криоастробиологии НИЦ Курчатовский институт ПИЯФ (Гатчина). Авторы выражают благодарность всем сотрудникам лабораторий, оказавшим поддержку при выполнении работы, в том числе Д.Г. Федорову-Давыдову, Е.В. Спириной, Г.А. Солдатенковой, В.А. Щербаковой и Д.С. Карлову.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абашина Т.Н., Вайнштейн М.Б., Хаустов С.А. Бактериальная коррозия бетона и биовыщелачивание отходов горнорудной промышленности: Методическое руководство для микробиологических исследований. Пушино: ТулГУ, 2015. С. 55–56.
- Абрамов А.А., Слеттен Р.С., Ривкина Е.М., Миронов В.А., Гиличинский Д.А. Геокриологические условия Антарктиды // Криосфера Земли. 2011. Т. 15. № 3. С. 3–19.
- Бабьева И.П., Голубев В.И. Психрофильные дрожжи в оазисах Антарктиды // Микробиология. 1969. Т. 38. № 3. С. 518–524.
- Демидов Н.Э., Гиличинский Д.А., Миронов В.А., Шмакова Л.А. Криобиосфера Земли и поиск жизни на Марсе // Криосфера Земли. 2012. Т. XVI. № 4. С. 67–82.

Звягинцев Д.Г., Гиличинский Д.А., Благодатский С.А., Воробьева Е.А., Хлебникова Г.М., Архангелов А.А., Кудрявцева Н.Н. Длительность сохранения микроорганизмов в постоянно мерзлых осадочных породах и погребенных почвах // Микробиология. 1985. Т. 54. С. 155–161.

Дмитриев В.В., Сузина Н.Е., Русакова Т.Г., Гиличинский Д.А., Дуда В.И. Ультраструктурные особенности природных форм микроорганизмов, изолированных из грунтов вечной мерзлоты Восточной Сибири методом низкотемпературного фракционирования // Доклады Академии наук. 2001. Т. 378. № 6. С. 846–849.

Исаченко Б.Л. Некоторые данные о бактериях из вечной мерзлоты // Известия Санкт-Петербургского Ботанического сада. 1912. Т. 2. Вып. 5–6. С. 140–168.

Каляев А.В. Об анабиозе в условиях вечной мерзлоты // Микробиология. 1947. Т. 16. Вып. 2. С. 121–125.

Кантерев П.Н. Новые материалы по оживлению организмов из вечной мерзлоты // Доклады Академии наук СССР. 1938. Т. 20. № 4. С. 315.

Карасев С.Г., Гурина Л.В., Гавриш Е.Ю., Аданин В.М., Гиличинский Д.А., Евтушенко Л.И. Жизнеспособные актинобактерии из древних вечномерзлых отложений Сибири // Криосфера Земли. 1998. Т. 2. № 2. С. 69–75.

Карлов Д.С., Мари Д., Чувочина М.С., Алехина И.А., Булат С.А. Микробное сообщество водной толщи озера Радок (восточная Антарктида) с доминированием актинобактерии “*Candidatus Planktophila limnetica*” // Микробиология. 2011. Т. 80. № 4. С. 571–574.

Кочкина Г.А., Иванушкина Н.Е., Карасев С.Г., Гавриш Е.Ю., Гурина Л.В., Евтушенко Л.И., Спирина Е.В., Воробьева Е.А., Гиличинский Д.А., Озерская С.М. Микромитеты и актинобактерии в условиях многолетней естественной криоконсервации // Микробиология. 2001. Т. 70. № 3. С. 412–420.

Красс А.Е. О микроорганизмах в вечной мерзлоте // Микробиология. 1944. Т. 13. Вып. 5. С. 789.

Кручинин Ю.А., Симонов И.М. «Солярий» в антарктическом оазисе // Информационная бюллетень Советской антарктической экспедиции. 1967. № 65. С. 162–164.

Озерская С.М., Кочкина Г.А., Иванушкина Н.Е., Князева Е.В., Гиличинский Д.А. Структура комплексов микромитетов в многолетнемерзлых грунтах и криопегах Арктики // Микробиология. 2008. Т. 77. № 4. С. 542–550.

Омельянский В.Л. Бактериологическое изучение Санг-Юрхского мамонта и окружающей почвы // Архив биологических наук. 1911. Т. 16. № 4. С. 335.

Соина В.С., Лебедева Е.В., Гольшина О.В., Федоров-Давыдов Д.Г., Гиличинский Д.А. Нитрифицирующие бактерии из многолетнемерзлых отложений Колымской низменности // Микробиология. 1991. Т. 60. Вып. 1. С. 187–190.

Хмеленина В.Н., Макутина В.А., Калюжная М.Г., Ривкина Е.М., Гиличинский Д.А., Троценко Ю.А. Обнаружение жизнеспособных метанотрофных бактерий в многолетнемерзлых осадочных породах северо-восточной Сибири // Доклады Академии наук. 2002. Т. 384. № 2. С. 283–285.

Хлебникова Г.М., Гиличинский Д.А., Федоров-Давыдов Д.Г., Воробьева Е.А. Количественная оценка микроорганизмов в многолетнемерзлых отложениях и погребенных почвах // Микробиология. 1990. Т. 59. № 1. С. 148–155.

Шатилович А.В., Шмакова Л.А., Губин С.В., Гудков А.В., Гиличинский Д.А. Жизнеспособные простейшие в позднелейстоценовых и голоценовых многолетнемерзлых отложениях // Доклады Академии наук. 2005. Т. 401. № 5. С. 715–717.

Шатилович А.В., Шмакова Л.А., Губин С.В., Гиличинский Д.А. Жизнеспособные простейшие в вечной мерзлоте Арктики // Криосфера Земли. 2010. Т. XIV. № 2. С. 69–78.

Alavi P., Starcher M.R., Thallinger G.G., Zachow Ch., Müller H. Stenotrophomonas comparative genomics reveals genes and functions that differentiate beneficial and pathogenic bacteria // BMC genomics. 2014. Vol. 15. № 1. P. 482.

- Altschul S.F., Gish W., Miller W., Myers E.W., Lipman D.J. Basic local alignment search tool // Journal of Molecular Biology. 1990. Vol. 215. № 3. P. 403–410.
- Arai T., Kuroda S., Yamagishi S., Katoh Y. A new hydroxystreptomycin source, *Streptomyces subrutilus* // Journal of Antibiotics. 1964. № 17. P. 23–38.
- Backermans C., Ayala-del-Ri'o H.L., Ponder M.A., Vishnivetskaya T., Gilichinsky D., Thomashow M.F., Tiedje J.M. *Psychrobacter cryohalolentis* sp. nov. and *Psychrobacter arcticus* sp. nov., isolated from Siberian permafrost // International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology. 2006. № 56. P. 1285–1291.
- Behrendt U., Ulrich A., Schumann P. Description of *Microbacterium foliorum* sp. nov. and *Microbacterium phyllosphaerae* sp. nov., isolated from the phyllosphere of grasses and the surface litter after mulching the sward, and reclassification of *Aureobacterium resistens* (Funke et al. 1998) as *Microbacterium resistens* comb. nov. // International journal of systematic and evolutionary microbiology. 2001. Vol. 51. № 4. P. 1267–1276.
- Bormann P., Fritzsche D. The Schirmacher Oasis, Queen Maud Land, East Antarctica, and its surroundings. Petermann Geogr Mitt Erg -h 289. Perthes, Gotha. 1995. 448 p.
- Bulat S.A., Alekhina I.A., Blot M., Petit J.R., de Angelis M., Wagenbach D., Lipenkov V.Ya., Vasilyeva L.P., Wloch D., Raynaud D., Lukin V.V. DNA Signature of Thermophilic Bacteria from the Aged Accretion Ice of Lake Vostok, Antarctica: Implications for Searching for Life in Extreme Icy Environments // International Journal of Astrobiology. 2004. Vol. 3. P. 1–7.
- Chen H.H., Zhao G.-Z., Park D.-J., Zhang Y.-Q., Xu L.-H., Lee J.-Ch., Kim J.-Ch., Lee W.-J. *Micrococcus endophyticus* sp. nov., isolated from surface-sterilized *Aquilaria sinensis* roots // International journal of systematic and evolutionary microbiology. 2009. Vol. 59. № 5. P. 1070–1075.
- Dastager S. G., Lee J.-Ch., Ju Y.-J., Park D.-J., Kim Ch.-J. *Frigoribacterium mesophilum* sp. nov., a mesophilic actinobacterium isolated from Bigeum Island, Korea // International journal of systematic and evolutionary microbiology. 2008. Vol. 58. № 8. P. 1869–1872.
- De Meyer S.E., Coorevits A., Willems A. *Tardiphaga robiniae* gen. nov., sp. nov., a new genus in the family Bradyrhizobiaceae isolated from *Robinia pseudoacacia* in Flanders (Belgium) // Systematic and applied microbiology. 2012. Vol. 35. № 4. P. 205–214.
- Gilichinsky D.A., Wilson G.S., Friedmann E. I., McKay C.P., Sletten R.S., Rivkina E.M., Vishnivetskaya T.A., Erokhina L.G., Ivanushkina N.E., Kochkina G.A., Shcherbakova V.A., Soina V.S., Spirina E.V., Vorobyova E.A., Fyodorov-Davydov D.G., Hallet B., Ozerskaya S.M., Sorokovikov V.A., Laurinavichyus K.S., Shatilovich A.V., Chanton I.P., Ostroumov V.E., Tiedje J.M. Microbial Populations in Antarctic Permafrost: Biodiversity, State, Age and Implication for Astrobiology // Astrobiology. 2007. Vol. 7. № 2. P. 275–311.
- Gilichinsky D.A., Rivkina E.M. Permafrost microbiology // Encyclopedia of Geobiology. Springer-Verlag, 2011. P. 726–732.
- Jeon C.O., Park W., Ghiorse W.C., Madsen E.L. *Polaromonas naphthalenivorans* sp. nov., a naphthalene-degrading bacterium from naphthalene-contaminated sediment // International journal of systematic and evolutionary microbiology. 2004. Vol. 54. № 1. P. 93–97.
- Goordial J., Davila A., Lacelle D., Pollard W., Marinova M.M., Greer Ch.W., DiRuggiero J., McKay Ch. P., Whyte L.G. Nearing the cold-arid limits of microbial life in permafrost of an upper dry valley, Antarctica // The ISME journal. 2016. Vol. 10. № 7. P. 1613–1624.
- Jørgensen N.O.G., Brandt K.K., Nybroe O., Hansen M. *Delftia lacustris* sp. nov., a peptidoglycan-degrading bacterium from fresh water, and emended description of *Delftia tsuruhatensis* as a peptidoglycan-degrading bacterium // International journal of systematic and evolutionary microbiology. 2009. Vol. 59. № 9. P. 2195–2199.
- Kaparullina E., Doronina N., Chistyakova T., Trotsenko Y. *Stenotrophomonas chelatiphaga* sp. nov., a new aerobic EDTA-degrading bacterium // Systematic and applied microbiology. 2009. Vol. 32. № 3. P. 157–162.

- Kim K. M. Jung T.S., Ok S., Ko C.Y. In vitro characterization study of *Bacillus mojavensis* KJS-3 for a potential probiotic // Food Science and Biotechnology. 2011. Vol. 20. № 4. P. 1155–1159.
- Krivushin K.V., Shcherbakova V.A., Petrovskaya L.E., Rivkina E.M. *Methanobacterium veterum* sp. nov., from ancient Siberian permafrost // International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology. 2010. № 60. P. 455–459.
- Laffineur K., Avesani V., Cornu G., Charlier J., Janssens M., Wauters G., Delmee M. Bacteremia Due to a Novel Microbacterium Species in a Patient with Leukemia and Description of *Microbacterium paraoxydans* sp. nov. // Journal of clinical microbiology. 2003. Vol. 41. № 5. P. 2242–2246.
- Lee H.G. Kim S.-G., Im W.-T., Oh H.-M., Lee S.-T. *Pedobacter composti* sp. nov., isolated from compost // International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology. 2009. Vol. 59. № 2. P. 345–349.
- Mayilraj S., Mayilraj S., Krishnamurthi S., Saha P. and Saini H.S. *Rhodococcus kroppenstedtii* sp. nov., a novel actinobacterium isolated from a cold desert of the Himalayas, India // International journal of systematic and evolutionary microbiology. 2006. Vol. 56. № 5. P. 979–982.
- Miteva V.I., Sheridan P.P., Brenchley J.E. Phylogenetic and physiological diversity of microorganisms isolated from a deep greenland glacier ice core // Applied and Environmental Microbiology. 2004. Vol. 70. № 1. P. 202–213.
- Rivkina E.M., Gilichinsky D.A., Wagener S., Tidjie J.M., McGrath J. Biogeochemical activity of anaerobic microorganisms from buried permafrost sediments // Geomicrobiology Journal. 1998. № 15. P. 187–193.
- Rivkina E., Shcherbakova V., Laurinavichius K., Petrovskaya L., Krivushin K., Kraev G., Pecheritsina S., Gilichinsky D. Biogeochemistry of methane and methanogenic archaea in permafrost // FEMS Microbiology Ecology. 2007. Vol. 61. № 1. P. 1–15.
- Rodrigues D.F., Goris J., Vishnivetskaya T., Gilichinsky D., Thomashow M.F., Tiedje J.M. Characterization of *Exiguobacterium* isolates from the Siberian permafrost. Description of *Exiguobacterium sibiricum* sp. nov. // Extremophiles. 2006. Vol. 10. № 4. P. 285–294.
- Shcherbakova V., Rivkina E., Pecheritsyna S., Laurinavichius K., Suzina N., Gilichinsky D. *Methanobacterium arcticum* sp. nov., a methanogenic archaeon from Holocene Arctic permafrost // International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology. 2011. Vol. 61. № 1. P. 144–147.
- Soto-Rodriguez S.A., Cabanillas-Ramos J., Alcaraz U., Gomez-Gil B., Romadlde J.L. Identification and virulence of *Aeromonas dhakensis*, *Pseudomonas mosselii* and *Microbacterium paraoxydans* isolated from Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*, cultivated in Mexico // Journal of applied microbiology. 2013. Vol. 115. № 3. P. 654–662.
- Stackebrandt E. Koch K., Gvozdiak O., Schumann P. Taxonomic Dissection of the Genus *Micrococcus*: *Kocuria* gen. nov., *Nesterenkonia* gen. nov., *Kytococcus* gen. nov., *Dermacoccus* gen. nov., and *Micrococcus* Cohn 1872 gen. emend // International journal of systematic bacteriology. 1995. Vol. 45. № 4. P. 682–692.
- Steven B., Lévêillé R., Pollard W.H., Whyte L.G. Microbial ecology and biodiversity in permafrost // Extremophiles. 2006. № 10. P. 259–267.
- Steven B., Briggs G., McKay Ch.P., Pollard W.H., Greer C.W., Whyte L.G. Characterization of the microbial diversity in permafrost sample from the Canadian high Arctic using culture-dependent and culture-independent methods // FEMS Microbiology Ecology. 2007. DOI: 10.1111/j.1574-6941.2006.00247.x
- Steven B., Chen M.Q., Greer Ch.W., Whyte L.G., Niederberger T.D. *Tumebacillus permanentifrigoris* gen. nov., sp. nov., an aerobic, spore-forming bacterium isolated from Canadian high Arctic permafrost // International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology. 2008. № 58. P. 1497–1501.
- Suetin S.V., Shcherbakova V.A., Chuviskaya N.A., Rivkina E.M., Suzina N.E., Lysenko A.M., Gilichinsky D.A. *Clostridium tagluense* sp. nov., a psychrotolerant, anaerobic, spore-forming bacterium from permafrost // International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology. 2009. Vol. 59. № 6. P. 1421–1426.

- Vanparys B., Heylen K., Lebbe L., De Vos P.* *Devosia limi* sp. nov., isolated from a nitrifying inoculum // International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology. 2005. Vol. 55. № 5. P. 1997–2000.
- Vishnivetskaya T. A., Vorobyova E. A., Gilichinsky D. A.* Viable green algae and cyanobacteria within terrestrial permafrost // Exo-Astrobiology. 2002. Vol. 518. P. 295–298.
- Vorobyova E. A., Soina V.S., Gorlenko M., Minkovskaya N., Zalinova N., Mamukelashvili A., Gilichinsky D.A., Rivkina E.M., Vishnivetskaya T.A.* The deep cold biosphere: facts and hypothesis // FEMS Microbiol Reviews. 1997. № 20. P. 277–290.
- Wolf A., Fritze A., Hagemann M., Berg G.* *Stenotrophomonas rhizophila* sp. nov., a novel plant-associated bacterium with antifungal properties // International journal of systematic and evolutionary microbiology. 2002. Vol. 52. № 6. P. 1937–1944.
- Yoon J. H., Kim I.-G., Kang K.H., Oh T.-K., Park Y.-H.* *Bacillus marisflavi* sp. nov. and *Bacillus aquimaris* sp. nov., isolated from sea water of a tidal flat of the Yellow Sea in Korea // International journal of systematic and evolutionary microbiology. 2003. Vol. 53. № 5. P. 1297–1303.
- Zhang D.C., Wang H.-X., Cui H.-L., Yang Y., Liu H.-C., Dong X.-Z., Zhou P.-J.* *Cryobacterium psychrotolerans* sp. nov., a novel psychrotolerant bacterium isolated from the China No. 1 glacier // International journal of systematic and evolutionary microbiology. 2007. Vol. 57. № 4. P. 866–869.

E.S. KARAEVSKAYA, N.E. DEMIDOV, D.G. SHMELEV, E.M. RIVKINA, S.A. BULAT

THE STUDY OF THE BACTERIAL COMMUNITIES IN THE ANTARCTIC OASES' PERMAFROST BY MEANS OF CULTURING

Aerobic and anaerobic bacteria from the permafrost of King George Island, Schirmacher, Larsemann, Banger oases and Hobbs Coast have been cultured. Based on the qualitative and quantitative composition of the cultivated community of samples, a comparative analysis of the biodiversity of marine, lake and fluvio-glacial deposits of different geocryological conditions and age was made.

Keywords: aerobic bacteria, anaerobic rich culture, permafrost, oases, Antarctica.

УДЕЛЬНОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН ДЕЦИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА В ВОДЕ ЛАДОЖСКОГО ОЗЕРА (ЛЕНИНГРАДСКАЯ ОБЛАСТЬ)

С.В. ПОПОВ¹, М.П. КАШКЕВИЧ², В.И. КАШКЕВИЧ³, В.В. ХАРИТОНОВ⁴,
Е.В. ЙОВЕНКО²

¹ — Полярная морская геологоразведочная экспедиция, Санкт-Петербург, e-mail: sporov67@yandex.ru

² — Институт наук о Земле СПбГУ, Санкт-Петербург, e-mail: m.kashkevich@spbu.ru

³ — ООО «ГеофизПоиск», Санкт-Петербург, e-mail: v.kashkevich@inbox.ru

⁴ — ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, e-mail: kharitonov@aari.ru

В настоящей работе обсуждаются результаты определения удельного поглощения электромагнитных волн в пресной воде Ладожского озера методом зондирования наклонной плоскости. В качестве наклонной плоскости использовался лист плоского шифера толщиной 10 мм, установленный в бассейне. Лоцирование осуществлялось с помощью георадаров «ОКО-2» и «Zond 12e». Удельное сопротивление воды при температуре около 24°C составляло 22 Ом·м. По результатам работ установлено, что удельное поглощение электромагнитных волн на частоте 400 МГц составляет 21 дБ/м, на частоте 900 МГц — 38 и 40 дБ/м для разных серий экспериментов и на частоте 1500 МГц — 48 дБ/м.

Ключевые слова: георадиолокация, обработка георадарных данных, Ладожское озеро.

ВВЕДЕНИЕ

Георадарные исследования, направленные на изучение приповерхностного слоя нашей планеты, достаточно активно используются при выполнении научных работ и инженерных изысканий более двух десятилетий. Помимо лоцирования грунта, снежного покрова и ледников (Jol, 2009; Попов, Эберляйн, 2014; Попов, Лунев, 2016; Попов, Поляков, 2016), они могут успешно использоваться и на пресноводных водоемах. Это продемонстрировали, в частности, работы сотрудников ААНИИ на заре использования радиолокационного метода в геофизике (Богородский и др., 1970а, 1970б). Некоторые антенны современных георадаров, в частности ОКО-2 АБДЛ «Тритон» (рис. 1а), непосредственно ориентированы на лоцирование водной среды. Однако для проведения успешных измерений, особенно связанных с анализом амплитуд отраженных сигналов, необходимо знать вещественную часть диэлектрической проницаемости воды и удельное поглощение электромагнитных волн в ней (т.е. мнимую составляющую).

Первая из указанных величин изучена достаточно хорошо. Она практически не зависит от минерализации и частоты в диапазоне метровых и дециметровых длин волн (Мачерет, 2006), однако изменяется от температуры. В работе (Ray, 1972) при-

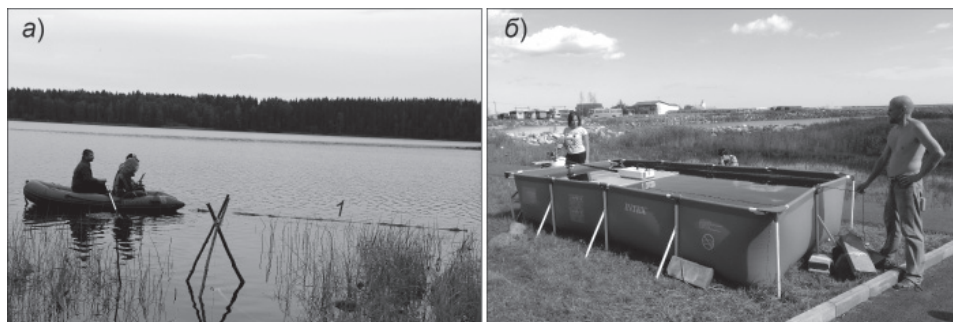


Рис. 1. Рабочие фотографии: *а* — геофизическая съемка с антенной АБДЛ «Тритон»; *б* — выполнение измерений в бассейне; *1* — антенна АБДЛ «Тритон».

водится эмпирическое соотношение зависимости диэлектрической проницаемости воды ϵ_w от температуры T :

$$\epsilon_w = 78,54 \left(1 - 4,579 \cdot 10^{-3} \tilde{T} + 1,19 \cdot 10^{-5} \tilde{T}^2 - 2,8 \cdot 10^{-8} \tilde{T}^3 \right),$$

где $\tilde{T} \equiv T - 25$.

Похожие значения могут быть получены по формуле, приведенной Г.Я. Черняком (1987):

$$\epsilon_w = 80 / [1 + 0,0048(T - 20)].$$

Зависимости $\epsilon_w(T)$ для каждого из приведенных соотношений для метровых и дециметровых волн показаны на рис. 2.

Мнимая часть диэлектрической проницаемости отвечает за поглощение электромагнитных волн в среде. Измерения этой величины для различных материалов и природных сред достаточно малочисленны, причем их востребованность весьма значительна для последующего прикладного использования. В частности, при из-

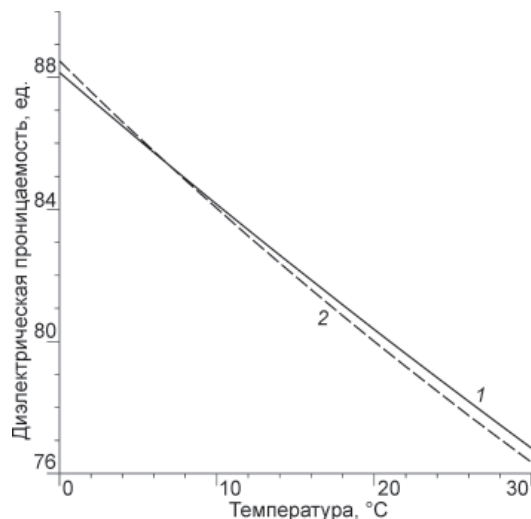


Рис. 2. Зависимость вещественной части диэлектрической проницаемости пресной воды от температуры для различных эмпирических моделей: *1* — по (Ray, 1972); *2* — по (Черняк, 1987).

учении придонной части водоемов и геологической интерпретации полученных данных на основе характера отражений от целевых границ важно знать степень ослабления сигнала в вышележащей среде. В данном случае в воде. С другой стороны, при выполнении не только производственных, но и научных работ не всегда имеется практическая возможность измерений удельного поглощения волн *in situ*. Несмотря на обилие справочной литературы и различных эмпирических зависимостей этой величины от солености и других факторов, разброс значений велик. На это, в частности, указывают сводные графики, приведенные в работе (Богородский и др., 1970а): в наиболее востребованном метровом и дециметровом диапазонах длин волн отличия, полученные по данным разных источников, составляют два порядка. Это, в свою очередь, указывает на важность подобных измерений и последующих обобщений для пресноводных водоемов, значимых с позиций последующего изучения их дистанционными методами. Подобная статистика важна также и для решения фундаментальных вопросов науки, в частности лоцирования подледниковых водоемов (Попов, 2010; Попов и др., 2012; Попов, Попков, 2015).

Для измерения удельного поглощения имеется два основных способа: (1) — измерения *in situ*, (2) — измерение удельной проводимости среды с последующим пересчетом. Первый способ предпочтителен, поскольку позволяет безошибочно определить требуемую величину для конкретной частоты лоцирования. Именно он и использовался в настоящей работе.

МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ И ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Если вещественная часть диэлектрической проницаемости воды без потери точности может быть получена вышеуказанными способами, то ее мнимая часть зависит главным образом от минерализации, т.е. требует более пристального внимания в каждом отдельном случае. С целью изучения данного вопроса в августе 2016 г. на полевой базе «Ладога» ААНИИ была выполнена серия экспериментов. В них использовался каркасный бассейн Intex 28273 размером 450×220×84 см, заполненный пресной водой Ладожского озера с удельным сопротивлением 22 $\Omega \cdot \text{м}$ (определение выполнено портативным кондуктометром HI 9033) и температурой около 24 °С. Лоцирование осуществлялось на частотах 400 МГц («ОКО-2»), 900 МГц и 1500 МГц («Zond 12е»). Георадар устанавливался на тонкую пенопластовую пластину и с помощью лебедки равномерно перемещался по водной поверхности (рис. 1б).

В ходе экспериментов осуществлялось лоцирование листа шифера, установленного наклонно под углом 18° в бассейне с водой на частотах 400 МГц, 900 МГц и 1500 МГц. Данные обрабатывались в программе matGPR и Geoscan32. На временных георадарных разрезах, представленных на рис. 3, отчетливо наблюдается прямая волна 1 и отражение 2, сформированное ровной поверхностью шифера. Последнее характеризуется постепенным ослаблением с глубиной в связи со значительным удельным затуханием электромагнитных волн в воде. Поскольку выполняется условие зеркальности отражения (величина шероховатости поверхности значительно меньше длины волны зондирующих импульсов в среде), то дифрагированные волны, сформированные поверхностными шероховатостями, отсутствуют. Рельефное отражение 3 связано с поверхностью грунта, на котором установлен бассейн. Дифрагированные волны 4 и 5 сформированы, соответственно, бортами бассейна и краями листа шифера.

Анализ амплитуд отраженного сигнала является классическим способом определения удельного затухания волн в диссипативной среде, каковой является вода.

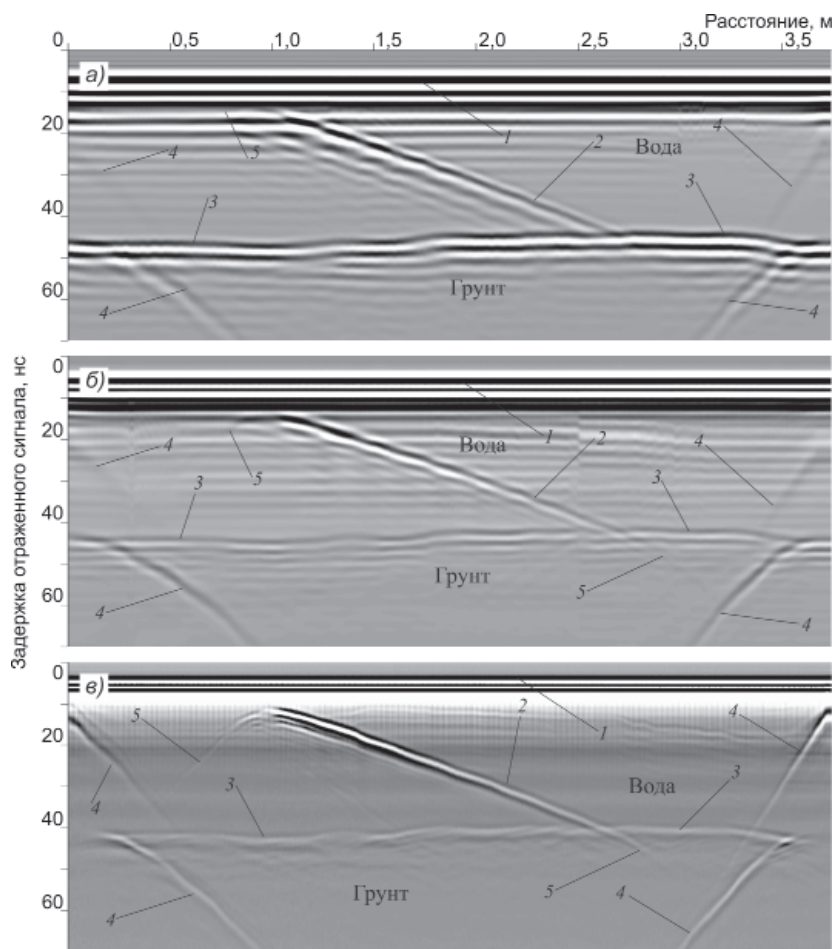


Рис. 3. Временные георадарные разрезы, полученные при лоцировании наклонного листа шифера в водной среде на частотах 400 МГц (а), 900 МГц (б) и 1500 МГц (в): 1 — прямая волна; 2 — отражение от поверхности листа шифера; 3 — отражение от грунта, на котором установлен бассейн; 4 — дифрагированные волны, сформированные краями бассейна; 5 — дифрагированные волны, сформированные краями листа шифера.

Обратимся к уравнению дальности радиолокации, впервые полученному Д. Керром (Kerr, 1951):

$$\frac{P_R}{P_T} = \Psi(\alpha) A_r R^2 \frac{\sigma(L) N^2}{(4\pi L^2)^2}, \quad (1)$$

где P_R и P_T — мощности принятого и излученного импульсов, $\Psi(\alpha)$ — диаграмма направленности антенны, A_r — эффективная площадь апертуры приемной антенны, L — половина пути импульса от передающей антенны до приемной, $\sigma(L)$ — эффективная площадь рассеяния, R — коэффициент отражения, и N — поглощение в среде. В случае общей антенны для передачи и приема или их схожести (что реализуется на практике), A_r и $\Psi(\alpha)$ связаны соотношением $\Psi(\alpha) = 4\pi A_r / \lambda_0^2$, где λ_0 — длина волны в той среде, где расположены антенны. Ослабление при распространении волны в

диссипативной среде по мощности при двукратном прохождении составляет $2\xi L$, где ξ — удельное поглощение в среде, выраженное в дБ/м. Кроме того, представим эффективную площадь рассеяния σ в виде круга с эффективным радиусом $\mathbb{R}$. Тогда $\sigma(L) = \pi[\mathbb{R}(L)]^2$. После соответствующих преобразований (1) получим

$$\frac{P_R}{P_T} = \frac{[\Psi(\alpha)]^2 [\mathbb{R}(L)]^2}{64\pi^2 L^4} \lambda_0^2 R^2 \times 10^{-\frac{L\xi}{5}}. \quad (2)$$

Поскольку мощность сигнала пропорциональна квадрату его амплитуды, то соотношение (2) может быть представлено как

$$\frac{A_R}{A_T} = \frac{\Psi(\alpha)\mathbb{R}(L)}{8\pi L^2} \lambda_0 R \times 10^{-\frac{L\xi}{10}}, \quad (3)$$

где A_R и A_T — амплитуда отраженного и излученного импульсов. Прологарифмировав обе части выражения (3) по основанию 10, получим соотношение

$$\lg \left[\frac{A_R}{A_T} \right] = \lg \left[\frac{\Psi(\alpha)}{8\pi} \lambda_0 R \right] + \lg \left[\frac{\mathbb{R}(L)}{L^2} \right] - \frac{L}{10} \xi. \quad (4)$$

Второе слагаемое в правой части уравнения (4) учитывает расхождение фронта электромагнитной волны и радиус эффективной площади рассеяния. Последняя, в нашем случае, определяется радиусом первой зоны Френеля, т.е. $\mathbb{R}(L) \sim \sqrt{L}$. В целом это слагаемое значительно меньше последнего в правой части и изменяется медленнее него при различных L , что позволяет отнести его к разряду констант. Принимая $L = v\Delta\tau/2$, где v — скорость распространения электромагнитных волн в среде, а $\Delta\tau$ — задержка отраженного сигнала от целевой границы (наклонной поверхности шифера), с учетом вышеизложенного получаем

$$20 \lg \left[\frac{A_R}{A_T} \right] = \mathbb{C} - v\Delta\tau\xi, \quad (5)$$

где $\mathbb{C} \equiv 20 \left\{ \lg \left[\frac{\Psi(\alpha)}{8\pi} \lambda_0 R \right] + \lg \left[\frac{\mathbb{R}(L)}{L^2} \right] \right\}$.

Левая часть выражения (5) представляет собой отношение амплитуд зондирующего и отраженного импульса, выраженное в децибелах. Построим график (рис. 4), по оси абсцисс которого отложим величину задержки отраженного сигнала $\Delta\tau$, а по оси ординат — соответствующее ей отношение амплитуд отраженного сигнала в децибелах для различных частот зондирования. Аппроксимируем каждую серию измерений полиномом первой степени. Тогда коэффициент при линейном члене будет равен $v\xi$, откуда может быть получена величина удельного поглощения электромагнитных волн в среде. Измерения показали, что $v = 3,4$ см/нс ($\epsilon_w = 77,75$). Это вполне соответствует диэлектрической проницаемости воды при температуре около 24 °C (рис. 2).

Приведенные на рис. 4 данные показывают, что удельное поглощение электромагнитных волн в воде Ладожского озера на частоте 400 МГц составляет 21 дБ/м; на частоте 900 МГц — 38 дБ/м и 40 дБ/м, для разных серий экспериментов, и на частоте 1500 МГц — 48 дБ/м. Полученные значения не противоречат опубликованным (Богородский и др., 1970а, 1970б).

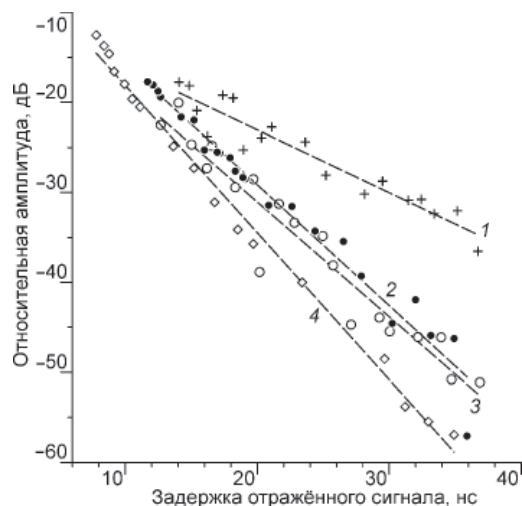


Рис. 4. Зависимость относительных амплитуд отраженного сигнала от задержки при лоцировании наклонного листа шифера в водной среде на различных частотах.

Крестами показаны измерения при лоцировании на частоте 400 МГц, черными и белыми кружками — на частоте 900 МГц, ромбами — на частоте 1500 МГц. Цифрами обозначены линии аппроксимации для данных при зондировании на частотах: 1 — 400 МГц, 2, 3 — 900 МГц, 4 — 1500 МГц.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Таким образом, в ходе проделанной работы произведено определение удельного поглощения электромагнитных волн дециметрового диапазона в пресной воде Ладожского озера методом зондирования наклонной плоскости. Как отмечалось выше, полученные значения не противоречат опубликованным данным. К сожалению, авторам не удалось выполнить измерения на более низких частотах: в диапазоне метровых волн, также востребованных в георадиолокации. Авторы надеются провести эти измерения в будущем.

Авторы благодарят руководство ААНИИ за возможность использования полевой базы «Ладога» для выполнения научных исследований, а также сотрудников ААНИИ Е.И. Новохатского и Г.А. Дешевых за помощь в организации работ. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-05-00579-А.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Богородский В.В., Трепов Г.В., Федоров Б.А., Хохлов Г.П. Использование электромагнитных волн, распространяющихся в пресной воде, для активной локации и других целей // Труды ААНИИ. 1970а. Т. 295. С. 116–119.
- Богородский В.В., Трепов Г.В., Федоров Б.А., Хохлов Г.П. Радиолокационное зондирование пресной воды // Труды ААНИИ. 1970б. Т. 295. С. 185–187.
- Мачерет Ю.Я. Радиозондирование ледников. М.: Научный мир, 2006. 392 с.
- Попов С.В. Радиолокационное зондирование неглубоких подледниковых водоемов: теоретические предпосылки и практические результаты // Лед и снег. 2010. № 4 (112). С. 5–14.
- Попов С.В., Лунев П.И. Результаты современных отечественных наземных радиолокационных исследований во внутренних районах Восточной Антарктиды // Проблемы Арктики и Антарктики. 2016. № 1 (107). С. 19–27.

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., Поляков С.П. Георадарное лоцирование трещин в районе российских антарктических станций Прогресс и Мирный (Восточная Антарктида) в сезон 2014/15 года // Криосфера Земли. 2016. Т. XX. № 1. С. 90–98.

Попов С.В., Попков А.М. Сейсморадиолокационные исследования района подледникового озера Пионерское, Восточная Антарктида // Криосфера Земли. 2015. Т. XIX. № 2. С. 107–113.

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.

Черняк Г.Я. Электромагнитные методы в гидрогеологии и инженерной геологии. М.: Недра, 1987. 211 с.

Jol H.M. Ground penetrating radar Theory and applications // Elsevier Science. 2009. 544 p.

Kerr D.E. Propagation of short radio waves. N.Y.: McGraw-Hill Book Company, 1951. 728 p.

Ray P.S. Broadband complex refractive indices of ice and water // Appl. Opt. Vol. 11. № 8. P. 1836–1844. doi:10.1364/AO.11.001836

S.V. POPOV, M.P. KASHKEVICH, V.I. KASHKEVICH, V.V. KHARITONOV, E.V. YOVENKO

ABSORPTION OF UHF ELECTROMAGNETIC WAVES IN THE WATER OF LAKE LADOGA (LENINGRAD REGION)

Measurements of the attenuation of the electromagnetic waves in fresh water of Lake Ladoga by sounding of the inclined plane installed in the pool are discussed in this paper. GPRs “OKO-2” and “Zond 12e” were used in the investigations. The resistivity of the water was 22 $\Omega \cdot \text{m}$ at a temperature of about 24°C. According to the results of the measurements the attenuation of the electromagnetic waves at a frequency of 400 MHz is 21 dB/m; of 900 MHz are 38 dB/m and 40 dB/m for different series of experiments, and at a frequency of 1500 MHz is 48 dB/m.

Keywords: attenuation, GPR technique, processing of GPR data, Lake Ladoga.

МНОГОЛЕТНЯЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ХАРАКТЕРИСТИК КЛИМАТА СЕВЕРНОЙ ЯКУТИИ — ЭКСТРЕМУМЫ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА

Н.Е. ИВАНОВ, А.П. МАКШТАС

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

Статья продолжает цикл работ по описанию современного климата приземной атмосферы Северной Якутии и, более подробно, района Гидрометеорологической обсерватории Тикси. Климатические характеристики минимальной и максимальной температуры воздуха получены по данным стандартных метеорологических измерений с 1978 по 2010 г. на 22 морских и континентальных ГМС, а для ГМО Тикси — по всем доступным данным с 1936 по 2015 г. Приведенные оценки дополняют информацию климатических справочников, основанную на данных, полученных до 1980 г., а на ряде ГМС и до 1965 г. Представлены таблицы основных характеристик экстремумов по месяцам, карты пространственного распределения и сопряженности, годовые экстремумы (наибольшие и наименьшие значения, их распределение по месяцам и тренды), климатические параметры амплитуды годового хода, оценки экстремальных значений температуры, возможных один раз в 5, 10, 25, 50 и 100 лет. Дополнительно исследованы синоптические условия возникновения штормов и резких перепадов температуры.

Ключевые слова: Гидрометеорологическая обсерватория Тикси, Северная Якутия, минимум и максимум температуры воздуха, годовая амплитуда, синоптические условия штормов и резких перепадов температуры.

ВВЕДЕНИЕ

Статья продолжает цикл работ по описанию современного климата в приземной атмосфере Северной Якутии, инициированный созданием в рамках программы Международного полярного года (МПП 2007/08) Гидрометеорологической обсерватории (ГМО) Тикси на базе гидрометеорологической станции (ГМС) «Полярка» (Иванов и др., 2009а, 2009б; Иванов, Макштас, 2012, 2014; Макштас и др., 2011, 2015). Исследование экстремальных ситуаций является одним из самых интересных и одновременно наиболее практически важных разделов описательной климатологии (Брызгин, Дементьев, 1996; Руководство..., 2008). Для Якутии особенно важны низкие температуры воздуха (T) зимой и усиления ветра (V) на побережье Северного Ледовитого океана (СЛО). Именно в Якутии расположен полюс холода Северного полушария. Согласно работе (Мещерская, Голод, 2006) абсолютный многолетний минимум T составил в Верхоянске $-67,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, а в Оймяконе $-69,8\text{ }^{\circ}\text{C}$. В этом регионе отмечены максимальные для всего Северного полушария годовые амплитуды T (Визе, 1927, Справочник..., 1966).

Оценки многолетних экстремумов метеорологических параметров за последние десятилетия представляют интерес в связи с обсуждаемым изменением (потепле-

нием) современного климата полярных районов. Актуальность настоящей статьи связана также с тем обстоятельством, что последние климатические обобщения для региона Северной Якутии были выполнены по данным до 1965 г. (Справочник..., 1966), а позднее, и только для 9 ГМС, по данным до 1980 г. (Научно-прикладной справочник..., 1989). В настоящей статье использованы данные 22 ГМС за период с 1978 по 2010 г. Из них 16 ГМС являются континентальными, а 6 ГМС — морскими. Длина исследованных рядов данных стандартных метеорологических наблюдений примерно соответствует принятой Всемирной метеорологической организацией продолжительности базового климатического периода — 30 лет. Кроме этого для ГМО Тикси дополнительно выполнен анализ данных регулярных измерений за 80 лет с 1936 по 2015 г., размещенный на сайте ААНИИ (http://www/aari.ru/архивные_данные/).

Многолетние характеристики экстремумов получены по рядам ежесуточных минимумов $T_{\min}$ и максимумов $T_{\max}$ температуры воздуха, измеренных минимальным и максимальным термометрами. Для характеристики повторяемости, непрерывной продолжительности низкой температуры и резких изменений T дополнительно использованы данные срочных измерения (8 раз в сутки).

В первой части статьи приведены традиционные для климатических справочников таблицы за каждый месяц средних (по годам) и абсолютных многолетних экстремумов температуры воздуха. Особенности годового хода и пространственного распределения проиллюстрированы соответствующими графиками и картами. Дополнительно приведены таблица и карты пространственной корреляции зимних минимумов и летних максимумов температуры и климатические оценки повторяемости и непрерывной продолжительности низкой температуры воздуха в холодный сезон с ноября по март.

Далее рассмотрена климатическая изменчивость годовых минимумов $T_{\min}$ и максимумов $T_{\max}$ температуры. Помимо самих значений, следуя работам (Алексеев и др., 1999; Бухановский и др. 1999; Иванов и др., 2012), получено распределение годовых экстремумов $T_{\min}$ и $T_{\max}$ по месяцам.

Корифей арктической гидрометеорологии В.Ю. Визе (Визе, 1927) отмечал, что именно в Якутии зафиксированы рекордные для Северного полушария амплитуды годового хода температуры. Наибольшие значения приурочены к очагам самых сильных зимних минимумов T . В Верхоянске при абсолютных за многолетний период значениях $T_{\min} -68^{\circ}\text{C}$, $T_{\max} +35^{\circ}\text{C}$ потенциально возможная амплитуда составляет около 100°C . В статье приведены параметры распределения ежегодных амплитуд на отдельных ГМС и их пространственное распределение.

Традиционной задачей прикладной климатологии является оценивание экстремумов редкой повторяемости (Руководство, 2008). В статье приведены экстремумы $T_{\min}$ и $T_{\max}$, возможные 1 раз в 5, 10, 25 и 100 лет. Теория и методы получения этих оценок описаны в монографиях и таблицах (Большев, Смирнов, 1968; Гумбель, 1965; Лидбеттер и др., 1989; Рожков, 2001).

Важной особенностью Якутии являются резкие внутрисуточные изменения температуры воздуха. Так, на ГМС Яролын 18 декабря 1978 г. всего за 12 ч T увеличилась на 25 градусов от $-44,7$ до $-19,5^{\circ}\text{C}$. Эти перепады температуры особенно велики в холодный сезон с ноября по март. Основной причиной этих экстремальных событий являются циклоны, зарождающиеся в восточной ложбине исландского минимума давления и перемещающиеся на восток вдоль сибирского побережья

Северного Ледовитого океана. С этими циклонами связаны также зимние штормы в районе Тикси с ветром до 40–45 м/с. Климатическая характеристика зимних выбросов температуры завершает статью. Здесь же описаны синоптические ситуации, при которых возникают наиболее резкие выбросы температуры и (для Тикси) особенно сильные штормы. Использованы данные реанализа NCEP (Kalnay at al., 1996) и база данных по циклонам Северного полушария (Tilinina at al., 2013).

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКАЯ СЕТЬ И РЕЛЬЕФ СЕВЕРНОЙ ЯКУТИИ

Для описания климатической изменчивости экстремумов температуры приземного слоя воздуха *T* использованы данные стандартных метеорологических измерений на 22 ГМС за 33 года с 1978 по 2010 г. Для ГМО Тикси дополнительно использован полный ряд измерений за 80 лет с 1936 по 2015 г. Названия, коды и координаты ГМС, на основе данных которых выполнена настоящая работа, приведены в табл. 1.

Следует отметить, что имеющиеся в распоряжении авторов ряды данных на ГМС Андрушкино, Кюсюр, Юбилейное и Усть-Оленёк содержат в отдельные годы значительное количество продолжительных (1 месяц и более) пропусков. Поэтому оценки абсолютных и средних за многолетний период экстремумов были получены по всем 22 ГМС, а остальные характеристики определены без учета указанных станций.

Таблица 1

Гидрометеорологические станции Северной Якутии

№ п/п	Название и код ГМС	Широта, ° с.ш.	Долгота, ° в.д.
1	Андрушкино, <i>AND</i>	69,1	154,3
2	Черский, <i>CHE</i>	68,5	161,2
3	Чокурдах, <i>CHO</i>	70,4	147,5
4	Депутатский, <i>DPT</i>	69,2	139,5
5	Колымская, <i>KLM</i>	68,4	158,4
6	Среднеколымская, <i>SRK</i>	67,5	153,4
7	Верхоянск, <i>VRH</i>	67,3	133,2
8	Тикси, <i>TKS</i>	71,3	128,5
9	Джалинда, <i>GLN</i>	70,1	113,8
10	Джаржан, <i>GAR</i>	68,7	124,0
11	Оленёк, <i>OLN</i>	68,5	112,6
12	Усть-Оленёк, <i>UOL</i>	73,0	119,5
13	Саскылах, <i>SAS</i>	72,0	114,1
14	Сухана, <i>SUH</i>	68,8	118,0
15	Ярольин, <i>YAR</i>	68,2	108,5
16	Тюмяти, <i>TUM</i>	71,9	123,4
17	Юбилейное, <i>UBL</i>	70,8	136,2
18	Кюсюр, <i>KUS</i>	70,7	127,4
19	Дунай, <i>DUN</i>	73,56	124,3
20	Котельный, <i>KOT</i>	76,00	137,5
21	Санникова, <i>SAN</i>	74,4	138,5
22	Кигилях, <i>KIG</i>	73,2	139,8

Карта сети ГМС и их высоты над уровнем моря приведены на рис. 1а. Выделены морские и континентальные ГМС. В следующих таблицах ГМС обозначены буквенным кодом из табл. 1.

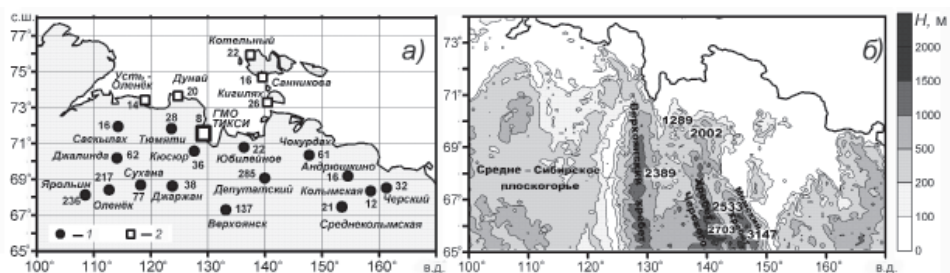


Рис. 1. Сеть континентальных (1) и морских (2) гидрометеорологических станций (а) и рельеф Северной Якутии (б). Цифрами обозначена высота над уровнем моря в м.

Экстремумы T в Якутии (особенно зимой) в значительной степени обусловлены удаленностью от моря, особенностями атмосферной циркуляции и рельефом (Визе, 1927; Справочник..., 1966). В холодный сезон основные особенности циркуляции определяет Сибирский антициклон. Основной ветрораздел проходит по линии оз. Байкал – о. Врангеля. Севернее и западнее, особенно на побережье Северного Ледовитого океана, заметно влияние циклонов, образующихся в восточной ложбине исландского минимума. Они в ряде случаев вызывают резкие потепления в континентальной части Якутии и штормы на побережье. Восточнее ветрораздела зимние потепления связаны с тихоокеанскими циклонами, но их влияние слабее, чем у атлантических циклонов.

Рельеф Северной Якутии неоднороден (рис. 1б). Вдоль побережья СЛО в основном расположены участки низменности. Река Лена разделяет регион на западную и восточную части, примерно равные по площади. В западной части основной формой рельефа является Средне-Сибирское плоскогорье с высотами 250–500 м. Особенности восточной части являются хребты Верхоянский, Момский и Черского. Они вытянуты в меридиональном направлении. Особенно важен Верхоянский хребет с отдельными пиками до 2,5–3 км над уровнем моря. Роль рельефа важна в формировании зимних локальных очагов холода во впадинах и узких горных долинах, где при большой повторяемости штиля формируются устойчивые приземные инверсии. Так, в Верхоянске (137 м над уровнем моря) средняя T января составляет -50°C , а почти рядом, на восточном склоне Верхоянского хребта, но на высоте 1350 м — всего -28°C .

МЕТОДЫ СТАТИСТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ КЛИМАТИЧЕСКОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ЭКСТРЕМУМОВ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА

Для характеристики экстремумов температуры воздуха нами использованы традиционные для описательной климатологии методы теории вероятностей и математической статистики (Гумбель, 1965; Литбеттер и др., 1989; Рожков, 2001). Параметры многолетних трендов определены по линейной регрессионной модели (Дрейпер, Смит, 1986). Статистическая значимость корреляций и трендов определена по таблицам (Большев, Смирнов, 1968). Полный перечень использованных статистических моделей и методов с подробной библиографией приведен в статьях (Иванов и др., 2009 а,б, 2012, 2014). Отсылая читателя к указанным работам, рассмотрим метод оценивания экстремумов редкой повторяемости.

Как было указано выше, для прикладных задач важны оценки экстремумов редкой повторяемости T_{M_p} возможные 1 раз в M (5, 10, 25, 50 и 100) лет. При этом

длина имеющихся рядов данных n может быть соизмерима и даже меньше M . Следуя рекомендациям (Бухановский и др., 1999; Иванов и др., 2012), в работе использован комплекс эмпирических, квантильных и параметрических оценок T_M . Эмпирические оценки T_M получены непосредственно по рядам T_i ежегодных экстремумов. Для этого ряд T_i разбивают на отрезки продолжительностью M лет. Оценкой T_M является средний по всем отрезкам абсолютный экстремум. Квантильные оценки T_M также получены по измеренным значениям. Квантили X_p определены как порядковые статистики – члены вариационного ряда $x_1 \leq \dots \leq x_i \leq \dots \leq x_n$ с номерами, равными наибольшему целому числу в $np + 1$. Оценкой T_M является квантиль X_p порядка $p = M^{-1}$.

Эмпирические и квантильные оценки T_M можно получить лишь при $M < n$. При $M \geq n$ (1 раз за 50 и 100 лет) используются параметрические оценки T_M на основе аппроксимации эмпирического распределения вероятностей теоретическим с параметрами, определенными по данным измерений. При любом исходном распределении для экстремумов существует лишь три предельных распределения (Литбеттер и др., 1989; Рожков, 2001). Согласно работам (Алексеев и др., 1999; Бухановский и др., 1999; Герман, Левиков, 1988; Иванов и др., 2012; Колосова, 1982; Рождественский, Чеботарев, 1974; Рожков, 2001) в гидрометеорологии наиболее часто используется двойное экспоненциальное распределение (Гумбель, 1965):

$$P(x \geq x_0) = 1 - \exp[-\exp(-y)]$$

с параметрами $y = \alpha(x - q)$, $q = (m_x - 0,45\sigma_x)$, $\alpha = 1,28/\sigma_x$, где m_x и σ_x — среднее значение и стандартное отклонение.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Оценки экстремумов температуры воздуха по месяцам

В климатических справочниках оценки экстремумов T определены по наибольшим значениям суточных минимума и максимума T для каждого месяца каждого года. В табл. 2 приведены абсолютные многолетние экстремумы $T_{\min}$, $T_{\max}$ и их средние многолетние значения $\bar{T}_{\min}$, $\bar{T}_{\max}$. Оценки $\bar{T}_{\min}$, $\bar{T}_{\max}$ являются первым приближением к значению, возможному 1 раз в M лет. В таблице выделены месяцы с наибольшими за год экстремумами. Средние многолетние и наибольшие максимумы на всех ГМС отмечаются в июле, а средние минимумы в январе. Более широким является распределение наибольших зимних минимумов. Для периода с 1978 по 2010 г. они отмечены в декабре, январе и феврале на 3, 7 и 12 ГМС соответственно.

Таблица 2

Абсолютные и средние многолетние экстремумы температуры воздуха (°C) за 1978–2010 гг.

Код ГМС	Месяц											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Средний многолетний минимум												
AND	–48,0	–46,9	–44,3	–37,2	–21,7	–4,1	1,3	–0,8	–6,9	–28,2	–40,1	–45,6
CHE	–45,2	–43,0	–39,5	–31,6	–17,3	–2,6	1,6	0,0	–6,2	–24,7	–37,3	–43,4
CHO	–45,6	–43,9	–40,5	–33,1	–20,0	–4,7	0,6	–1,1	–7,6	–26,0	–38,1	–43,3
DPT	–51,2	–50,1	–46,8	–37,8	–21,6	–3,5	0,4	–3,5	–2,5	–34,3	–44,9	–49,3
KLM	–47,0	–46,0	–42,1	–35,1	–20,8	–3,5	0,8	–0,9	–6,6	–26,2	–38,8	–45,5
SRK	–48,2	–47,1	–43,0	–33,6	–15,6	–1,4	3,3	0,0	–6,2	–26,4	–39,9	–46,7
VRH	–55,8	–54,2	–49,2	–37,7	–14,6	–1,7	1,7	–2,7	–11,1	–35,0	–48,3	–53,6

Код ГМС	Месяц											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
<i>TKS</i>	-43,6	-43,6	-40,7	-34,9	-21,7	-5,4	-0,4	-0,6	-9,3	-26,9	-37,0	-41,1
<i>GLN</i>	-53,7	-51,9	-47,2	-36,5	-20,1	-3,5	2,1	-2,6	-11,9	-33,2	-46,2	-51,9
<i>GAR</i>	-51,8	-49,0	-42,5	-31,3	-14,8	-1,6	3,7	-0,8	-9,5	-31,4	-45,2	-50,0
<i>OLN</i>	-52,2	-48,5	-40,7	-29,7	-15,8	-3,1	2,7	-0,6	-10,1	-29,5	-44,9	-51,0
<i>UOL</i>	-45,0	-44,0	-40,8	-33,2	-21,0	-6,6	-0,7	-0,3	-8,0	-27,4	-37,5	-42,7
<i>SAS</i>	-49,8	-48,9	-45,0	-36,7	-23,1	-6,0	1,0	-1,5	-9,9	-30,7	-42,7	-48,1
<i>SUH</i>	-55,8	-53,1	-48,1	-36,8	-18,8	-2,2	0,6	-4,0	-12,3	-34,2	-48,3	-53,3
<i>YAR</i>	-53,8	-52,6	-47,4	-37,5	-20,2	-2,4	0,1	-3,3	-12,1	-34,0	-47,4	-52,6
<i>KUS</i>	-52,1	-49,7	-44,3	-35,0	-18,0	-3,2	1,8	-0,8	-10,9	-31,0	-45,1	-49,8
<i>TUM</i>	-52,5	-51,4	-46,9	-37,6	-21,5	-4,8	1,0	-1,5	-10,4	-32,5	-45,0	-49,3
<i>UBL</i>	-47,2	-46,0	-41,6	-35,2	-19,6	-3,9	0,6	-0,3	-7,4	-28,4	-41,1	-45,2
<i>DUN</i>	-41,5	-41,1	-38,7	-31,2	-19,2	-6,3	-0,5	0,3	-5,5	-23,3	-33,8	-39,1
<i>KOT</i>	-39,3	-39,4	-38,0	-31,8	-19,0	-6,7	-1,8	-2,8	-9,6	-24,6	-32,9	-37,1
<i>KIG</i>	-39,6	-39,2	-36,8	-30,8	-18,7	-6,1	-1,4	-1,4	-5,7	-22,0	-32,2	-37,2
<i>SAN</i>	-0,7	-40,6	-38,9	-32,7	-19,8	-6,4	-1,6	-2,5	-8,4	-23,8	-33,5	-38,4

Абсолютный минимум

<i>AND</i>	-53,3	-55,2	-51,6	-42,9	-29,7	-9,5	-0,7	-4,4	-15,4	-36,5	-45,0	-51,4
<i>CHE</i>	-51,9	-49,5	-45,6	-36,8	-26,3	-8,0	-0,8	-4,9	-11,0	-33,0	-43,8	-49,8
<i>CHO</i>	-49,4	-50,3	-48,2	-40,5	-28,8	-11,2	-1,1	-4,2	-13,5	-33,1	-42,9	-49,2
<i>DPT</i>	-56,1	-57,5	-53,5	-45,2	-35,2	-9,2	-3,5	-7,9	-22,1	-41,3	-50,9	-54,7
<i>KLM</i>	-52,1	-55,2	-49,0	-41,8	-29,5	-7,7	-0,8	-4,3	-14,7	-33,3	-43,7	-50,5
<i>SRK</i>	-53,1	-56,0	-48,9	-39,1	-28,3	-5,2	0,1	-3,4	-10,4	-34,8	-46,2	-51,2
<i>VRH</i>	-63,0	-61,1	-57,6	-44,2	-28,3	-7,9	-2,6	-8,3	-18,9	-43,6	-54,6	-59,9
<i>TKS</i>	-49,7	-50,5	-47,2	-42,0	-29,2	-15,8	-3,9	-3,2	-17,4	-33,1	-43,9	-48,9
<i>GLN</i>	-61,4	-61,7	-54,2	-44,9	-27,9	-11,0	-1,1	-8,7	-24,1	-40,0	-54,0	-63,0
<i>GAR</i>	-60,3	-58,9	-51,8	-39,6	-23,7	-5,6	0,1	-4,0	-17,1	-41,5	-53,7	-60,1
<i>OLN</i>	-59,6	-59,1	-47,0	-40,7	-23,4	-8,8	-0,6	-4,0	-19,1	-38,2	-56,6	-58,4
<i>UOL</i>	-51,6	-53,0	-45,9	-40,3	-30,7	-12,3	-2,2	-2,9	-16,2	-31,5	-46,2	-51,4
<i>SAS</i>	-58,8	-60,3	-54,7	-46,8	-32,0	-13,6	1,1	-5,6	-18,1	-36,8	-50,4	-59,9
<i>SUH</i>	-64,2	-60,3	-53,0	-46,0	-28,0	-7,8	-2,8	-10,0	-24,0	-41,8	-60,0	-62,0
<i>YAR</i>	-61,5	-61,0	-54,4	-48,9	-30,1	7,0	-3,5	-8,4	-22,3	-40,5	-58,3	-58,1
<i>KUS</i>	-60,0	-58,3	-51,6	-46,5	-26,2	-8,9	-1,0	-4,0	-18,2	-40,2	-52,1	-61,6
<i>TUM</i>	-57,4	-59,2	-55,9	-46,2	-34,8	-10,4	-1,6	-4,2	-22,9	-40,1	-52,4	-56,8
<i>UBL</i>	-52,5	-52,2	-45,7	-41,4	-27,7	-7,5	-1,7	-4,2	-15,0	-34,5	-47,7	-52,9
<i>DUN</i>	-48,0	-49,7	-43,5	-36,6	-28,1	-11,6	-2,5	-3,3	-13,4	-30,4	-40,4	-46,0
<i>KOT</i>	-42,5	-42,0	-41,8	-37,8	-26,4	-13,4	-5,8	-8,4	-18,3	-40,2	-38,0	-41,8
<i>KIG</i>	-44,5	-44,7	-41,5	-35,9	-25,1	-11,5	-2,7	-5,6	-13,4	-30,6	-37,5	-43,4
<i>SAN</i>	-44,7	-45,8	43,0	-37,0	-26,4	-9,9	-5,0	-6,9	-16,7	-37,7	-38,8	-43,8

Средний многолетний максимум

<i>AND</i>	-18,1	-18,7	-10,5	-1,0	12,6	24,9	27,7	23,2	15,1	1,8	-8,8	-14,5
<i>CHE</i>	-13,6	-12,0	-5,4	2,5	17,8	26,2	28,7	24,1	17,2	3,4	-4,5	-9,0
<i>CHO</i>	-19,4	-20,2	-12,7	-3,2	9,2	23,5	26,3	22,5	13,9	0,2	-11,1	-16,0
<i>DPT</i>	-20,4	-19,4	-11,0	0,0	14,8	26,1	28,5	23,9	14,7	0,4	-12,5	-17,6

Код ГМС	Месяц											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
<i>KLM</i>	-16,2	-16,2	-9,0	0,7	15,3	25,1	28,0	23,2	16,1	2,4	-8,0	-13,0
<i>SRK</i>	-21,4	-18,5	-7,3	3,5	19,0	28,3	30,2	25,6	18,0	3,9	-10,4	-17,9
<i>VRH</i>	-24,9	-21,7	-5,8	6,5	19,9	29,5	32,0	27,2	18,4	4,1	-14,5	-21,2
<i>TKS</i>	-17,1	-15,8	-9,3	-1,1	7,4	22,0	26,0	23,1	12,3	1,1	-9,7	-13,6
<i>GLN</i>	-17,3	-15,5	-5,3	4,4	12,6	26,3	30,0	25,2	15,0	2,2	-8,8	-11,9
<i>GAR</i>	-21,3	-17,8	-5,8	4,1	15,0	26,7	29,2	25,1	15,7	1,7	-1,7	-17,7
<i>OLN</i>	-16,7	-15,3	-4,5	4,6	13,3	26,9	29,9	25,8	15,8	2,9	-8,6	-11,8
<i>UOL</i>	-17,6	-16,9	-11,5	-2,9	4,9	19,5	25,3	21,1	11,5	0,1	-10,3	-14,0
<i>SAS</i>	-16,2	-14,6	-8,4	-0,8	6,2	22,8	28,3	23,7	13,4	1,3	-9,0	-12,3
<i>SUH</i>	-19,0	-16,9	-4,2	6,1	16,0	28,1	30,9	26,4	16,8	2,9	-10,0	-13,2
<i>YAR</i>	-12,4	-11,9	-1,8	5,9	15,7	27,7	30,7	26,5	17,7	5,0	-5,2	-9,3
<i>KUS</i>	-18,9	-16,5	-7,9	1,8	10,6	25,6	29,0	24,3	14,7	1,4	-10,6	-15,2
<i>TUM</i>	-18,7	-14,6	-9,5	-0,3	7,4	24,3	28,7	24,2	13,3	0,9	-8,8	-15,0
<i>UBL</i>	-19,2	-16,5	-10,1	0,0	11,4	25,6	28,8	24,3	14,9	0,9	-11,3	-15,4
<i>DUN</i>	-19,4	-18,6	-13,9	-6,7	0,4	9,7	17,1	16,3	7,6	-0,7	-10,0	-13,9
<i>KOT</i>	-16,7	-18,7	-14,8	-8,4	-0,3	7,9	14,4	12,4	5,0	-1,4	-9,5	-13,9
<i>KIG</i>	-18,2	-19,4	-15,0	-8,2	0,9	9,8	12,7	11,2	4,8	-0,6	-9,9	-14,5
<i>SAN</i>	-17,4	-19,2	-15,1	-8,3	0,1	7,3	10,7	9,1	3,6	-0,9	-9,6	-14,3
Абсолютный максимум												
<i>AND</i>	-6,4	-3,0	0,6	6,1	23,3	29,8	32,0	29,6	20,3	9,4	3,0	0,5
<i>CHE</i>	0,6	-0,6	3,1	8,3	24,3	32,1	33,3	29,8	23,7	11,5	4,7	3,1
<i>CHO</i>	-8,1	-13,9	-5,0	4,9	22,8	28,9	31,3	28,7	20,6	3,6	-3,7	-6,0
<i>DPT</i>	-8,2	-11,2	-1,8	9,0	25,0	32,0	34,9	30,7	21,2	9,6	-2,8	-7,7
<i>KLM</i>	-4,6	0,4	2,0	6,6	23,2	30,1	32,7	29,7	22,7	8,6	4,2	-3,8
<i>SRK</i>	-5,9	-8,5	2,3	10,0	28,4	32,3	36,7	32,2	24,6	13,4	5,1	-5,3
<i>VRH</i>	-7,2	-7,9	3,4	13,3	28,1	34,0	37,3	33,4	24,4	10,0	0,0	-5,3
<i>TKS</i>	-9,0	-9,5	-1,1	8,1	16,3	30,9	34,3	29,8	23,0	5,0	-1,2	-4,9
<i>GLN</i>	-0,4	-3,9	7,0	11,5	18,6	33,2	34,4	30,5	25,4	7,2	3,0	0,0
<i>GAR</i>	-1,7	-10,2	1,8	10,0	22,9	31,1	32,3	31,4	22,7	6,4	-2,0	-8,2
<i>OLN</i>	-6,4	-3,1	3,7	12,2	20,2	32,0	35,2	30,2	24,6	8,6	3,6	-0,2
<i>UOL</i>	-7,9	-7,0	-1,7	3,5	12,0	29,1	31,1	26,1	21,0	4,4	-0,1	-6,3
<i>SAS</i>	-5,3	-2,4	2,3	7,5	12,7	29,5	35,6	27,8	24,2	5,1	1,5	-2,3
<i>SUH</i>	0,0	-4,1	4,1	13,6	23,0	33,1	35,7	32,3	25,9	8,4	3,6	0,0
<i>YAR</i>	-2,1	-1,9	7,4	14,1	29,4	32,6	34,1	30,2	26,3	12,3	4,9	2,4
<i>KUS</i>	-6,8	-8,9	1,7	8,8	16,4	30,7	33,7	31,0	22,1	6,1	0,0	-4,4
<i>TUM</i>	-6,9	-8,0	0,6	7,1	16,2	32,7	34,8	30,4	23,6	4,8	-3,0	-7,2
<i>UBL</i>	-8,7	-10,6	-2,2	6,5	26,6	31,5	35,3	30,7	22,6	4,8	-3,0	-7,7
<i>DUN</i>	-11,1	-8,8	-1,6	2,0	2,8	21,7	25,7	26,4	15,3	1,5	-1,8	-7,4
<i>KOT</i>	-10,2	-9,2	-5,1	-0,4	3,0	19,2	24,9	20,1	10,6	0,8	-2,7	-5,1
<i>KIG</i>	-11,5	-11,3	-5,2	1,0	6,4	17,2	20,7	19,0	9,4	1,9	-2,4	-6,4
<i>SAN</i>	-10,9	-10,1	-7,0	0,0	3,9	13,3	19,1	14,3	8,1	1,7	-3,3	-6,5

Примечание: Жирным шрифтом выделены месяцы с годовыми экстремумами.

В верхней части рис. 2 приведены графики годового хода абсолютных экстремумов $T_{\min}$ и $T_{\max}$ за 1978–2010 гг., сгруппированных по морским (а), восточным (б) и западным (в) ГМС с выделением ГМО Тикси и карты зимних минимумов $T_{\min}$ (г) и летних максимумов $T_{\max}$ (д). Как видно из рисунка, основной особенностью пространственной и сезонной изменчивости экстремумов является контраст континент – океан. Над сушей экстремальность заметно сильнее по сравнению с морскими ГМС. Этот контраст особенно велик для летних максимумов температуры (рис. 2д). На морских ГМС $T_{\max}$ не превышает $+25^{\circ}\text{C}$, а на континентальных она достигает от $+33$ до $+37^{\circ}\text{C}$. В холодный сезон на континентальных ГМС, согласно рис. 2г, заметна также западно-восточная оппозиция. Зимой $T_{\min}$ составлял около -45°C на морских ГМС, от -50 до -55°C на востоке континентальной части Северной Якутии и от -60 до -64°C в Верхоянске и на западе. Как следствие годовая амплитуда $T_{\min}$ и $T_{\max}$ (рис. 2а,б,в) заметно больше на континентальных ГМС по сравнению с морскими.

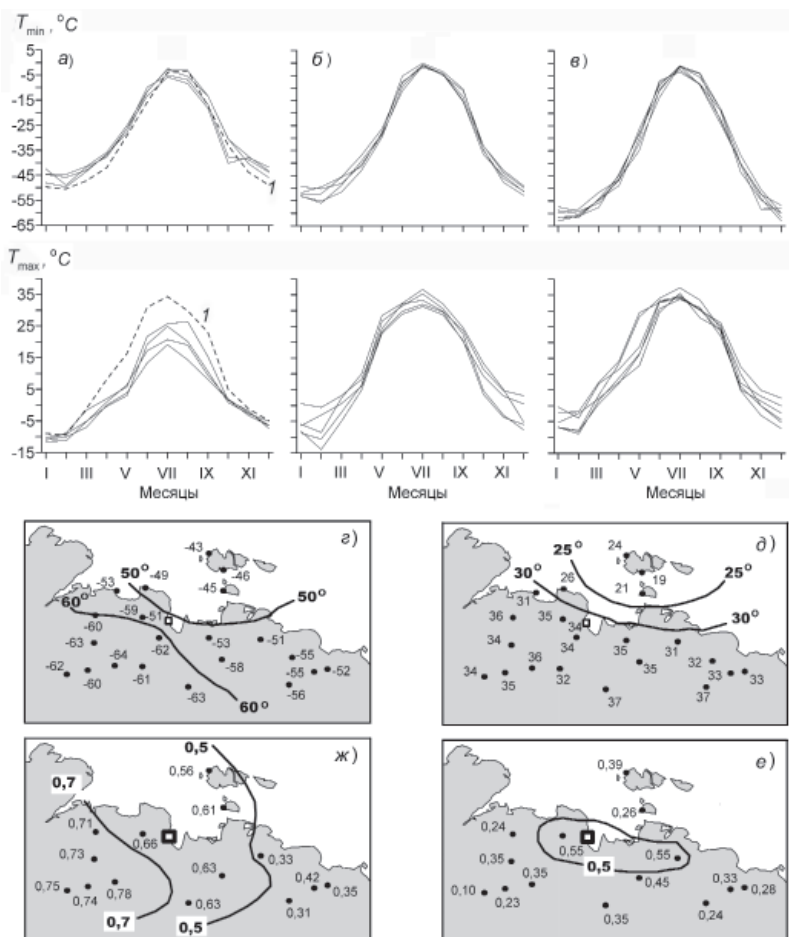


Рис. 2. Пространственно-временная изменчивость абсолютных за 1978–2010 гг. ежемесячных экстремумов $T_{\min}$ и $T_{\max}$ на морских (а), восточных (б) и западных (в) ГМС (с выделением ГМО Тикси цифрой 1), годовых экстремумов $T_{\min}$ (г), $T_{\max}$ (д) и коэффициентов корреляции в январе (е) и июле (ж) с «полюсом» в Тикси.

При этом увеличение амплитуды $T_{\min}$ в Верхоянске и на западных континентальных станциях по сравнению с восточными обусловлено в основном указанной особенностью пространственного распределения $T_{\min}$ зимой.

Анализ графиков годового хода (рис. 2 а, б, в) показывает, что на континентальных ГМС пространственная изменчивость $T_{\min}$ и $T_{\max}$ увеличена в холодные месяцы года, а на морских ГМС пространственная изменчивость $T_{\max}$ увеличена летом. ГМО Тикси занимает промежуточное положение. Здесь годоводой ход $T_{\min}$ ближе к морскому типу, а годоводой ход $T_{\max}$ ближе к континентальному типу.

Пространственная сопряженность абсолютных экстремумов определена коэффициентом корреляции r ежегодных значений $T_{\min}$ в январе и $T_{\max}$ в июле. Уровень 95-процентной значимости $\text{abs}(r) > 0$ при объеме выборки $n = 33$ составляет 0,35. Значения r приведены в табл. 3. для января (выше диагонали) и для июля (ниже диагонали) с выделением ячеек с незначимой и слабой корреляцией $\text{abs}(r) < 0,5$. Карты пространственной корреляции для января и июля с «полусомом» в Тикси приведены на рис. 2 ж, е.

Таблица 3

Пространственная корреляция годовых минимумов (выше диагонали) и максимумов (ниже диагонали) температуры воздуха (°C) за 1978–2010 гг.

Код ГМС	CHE	CHO	DPT	KLM	SRK	VRH	TKS	GLN	GAR	OLN	SAS	SUH	YAR	TUM	KOT	KIG
CHE	1	0,60	0,40	0,62	0,66	0,34	0,35	0,20	0,41	0,29	0,28	0,45	0,40	0,41	0,52	0,50
CHO	0,52	1	0,58	0,63	0,73	0,45	0,33	0,31	0,50	0,22	0,27	0,38	0,30	0,55	0,45	0,53
DPT	0,20	0,72	1	0,50	0,48	0,85	0,63	0,51	0,75	0,51	0,48	0,49	0,42	0,73	0,51	0,75
KLM	0,73	0,68	0,38	1	0,70	0,45	0,42	0,30	0,46	0,27	0,31	0,47	0,33	0,55	0,62	0,76
SRK	0,63	0,51	0,42	0,79	1	0,39	0,31	0,27	0,43	0,22	0,16	0,36	0,25	0,51	0,42	0,57
VRH	-0,04	0,52	0,64	0,14	0,15	1	0,63	0,46	0,69	0,48	0,42	0,50	0,39	0,67	0,49	0,68
TKS	0,28	0,53	0,47	0,33	0,24	0,35	1	0,73	0,59	0,74	0,71	0,78	0,75	0,66	0,56	0,61
GLN	-0,32	-0,11	0,00	-0,27	-0,18	0,11	0,35	1	0,74	0,87	0,90	0,86	0,75	0,76	0,40	0,37
GAR	-0,13	0,11	0,19	-0,13	-0,16	0,27	0,59	0,73	1	0,71	0,66	0,74	0,62	0,76	0,46	0,57
OLN	-0,24	-0,23	-0,17	-0,26	-0,17	-0,10	0,23	0,87	0,57	1	0,79	0,88	0,90	0,65	0,37	0,38
SAS	-0,22	-0,22	-0,12	-0,32	-0,25	-0,04	0,24	0,87	0,69	0,76	1	0,83	0,73	0,75	0,43	0,34
SUH	-0,33	-0,16	0,05	-0,28	-0,17	0,11	0,35	0,88	0,72	0,84	0,82	1	0,84	0,71	0,49	0,41
YAR	-0,23	-0,44	-0,31	-0,39	-0,26	-0,09	0,09	0,74	0,55	0,85	0,73	0,67	1	0,61	0,40	0,38
TUM	-0,11	0,14	0,15	-0,05	-0,22	0,30	0,53	0,56	0,66	0,39	0,59	0,44	0,41	1	0,63	0,62
KOT	0,34	0,41	0,24	0,24	0,07	0,27	0,39	0,22	0,33	0,12	0,15	0,07	0,06	0,46	1	0,71
KIG	0,33	0,42	0,32	0,26	0,19	0,21	0,26	0,05	0,16	-0,08	0,01	-0,07	-0,15	0,12	0,70	1

Примечание: Выделены ячейки с незначимой и слабой корреляцией $r < 0,5$.

Таблица показывает увеличение пространственной корреляции для зимних минимумов температуры по сравнению с летними максимумами. Карты на рис. 2 ж, е подчеркивают также увеличение в холодный сезон не только самой величины r , но и радиуса корреляции. Зимой все корреляции положительные. Среди всех возможных 120 сочетаний двух ГМС из использованных незначимыми и слабыми ($r < 0,5$) зимой являются 55 корреляций. Летом количество незначимых корреляций увеличивается почти в 2 раза — до 90 случаев, среди которых присутствуют как положительные, так и отрицательные значения r .

Наиболее сильные корреляции от 0,7 до 0,9 зимой отмечены для 30 пар станций, а летом только в 14 случаях. Все они показывают значительную коррелированность

экстремумов температуры в Западной Якутии (Средне-Сибирское плоскогорье) и на островах (ГМС Котельный и Кигилях). В Восточной Якутии с более сложным рельефом сильная корреляция на уровне 0,8 зафиксирована только летом на близко расположенных ГМС Колымская и Среднеколымская. Роль рельефа отчетливо видна на рис. 2ж. Как видно из рисунка, корреляция зимних минимумов в Тикси (прибрежная низменность) с минимумами на западных ГМС (плоскогорье) достигает от 0,7 до 0,8. Однако для ГМС Депутатский и Верхоянск, которые удалены от Тикси на меньшее расстояние, но расположены в районе Верхоянского хребта, корреляция уменьшается до 0,6.

Для характеристики современной климатической изменчивости в контексте гипотезы глобального потепления в табл. 4 абсолютные за 1978–2010 гг. годовые экстремумы (табл. 2) сопоставлены с оценками, полученными по данным до 1978 г. за весь период регулярных измерений. Для Тикси они были определены нами на основании данных электронного архива для периода с 1936 по 1977 г. (Архив...), а для остальных ГМС по вышеуказанным справочникам. На всех ГМС современные значения $T_{\min}$ не достигли абсолютного многолетнего зимнего минимума, хотя различие между ними относительно невелико. Максимальные различия можно отметить на ГМС Чокурдах, Верхоянск, Оленёк (от 5 до 7 °C). Значения современного и многолетнего летних максимумов $T_{\max}$ практически не различаются.

Таблица 4

Абсолютные годовые экстремумы (°C) за 1978–2010 гг. (а) и ранее 1978 г. (б)

Экстремум		Код ГМС														
		<i>TKS</i>	<i>UOL</i>	<i>SAS</i>	<i>TUM</i>	<i>UBL</i>	<i>KUS</i>	<i>CHO</i>	<i>GLN</i>	<i>GAR</i>	<i>KLM</i>	<i>SUH</i>	<i>OLN</i>	<i>VRH</i>	<i>SRK</i>	<i>YAR</i>
$T_{\min}$	<i>a</i>	–51	–53	–60	–59	–53	–62	–50	–63	–60	–55	–64	–60	–63	–56	–62
	<i>б</i>	–54	–54	–62	–60	–58	–63	–57	–64	–61	–59	–65	–65	–68	–60	–65
$T_{\max}$	<i>a</i>	34	31	36	35	35	34	31	34	32	33	36	35	37	37	34
	<i>б</i>	34	32	36	35	35	34	32	35	37	33	37	36	37	37	35

Годовые экстремумы температуры воздуха

Помимо самих значений T , следуя работам (Алексеев и др., 1999; Иванов и др., 2012; Бухановский и др., 1999), рассмотрим распределение годовых экстремумов по месяцам. Согласно табл. 2 наименьшие за 1978–2010 гг. значения $T_{\min}$ отмечены только в январе и феврале (и на трех ГМС в декабре), а наибольшие значения $T_{\max}$ только в июле. Распределение ежегодных экстремумов значительно шире. В табл. 5 приведена по месяцам повторяемость (%) абсолютных минимумов $T_{\min}$ и максимумов $T_{\max}$ в трех районах: на морских (включая Тикси), континентальных западных (включая Верхоянск) и континентальных восточных ГМС.

Таблица 5

Повторяемость (%) по месяцам абсолютных годовых экстремумов температуры воздуха

Район	Абсолютный зимний минимум					Абсолютный летний максимум		
	Месяц					Месяц		
	XI	XII	I	II	III	VI	VII	VIII
Морские ГМС	1	9	38	41	12	13	61	26
Западные ГМС	3	20	54	23	–	17	76	7
Восточные ГМС	–	24	54	22	–	25	64	11

Различия $T_{\min}$ и $T_{\max}$ на отдельных ГМС внутри групп заметно меньше, чем между районами. Согласно табл. 5 во всех районах максимумы повторяемости $T_{\min}$ и $T_{\max}$ отмечены в январе и июле, но сами значения повторяемости в эти и другие месяцы имеют пространственные особенности. Зимой основное различие состоит в том, что на континентальных ГМС максимум $T_{\min}$ около 55 % отмечен в январе, а на морских ГМС в январе и феврале — около 40 %. В декабре и феврале на континентальных станциях $T_{\min}$ примерно одинаковая (от 20 до 25 %), а на морских ГМС в декабре уменьшена до 10 %. Редкие случаи $T_{\min}$ в марте зафиксированы лишь на морских ГМС, а единичные случаи $T_{\min}$ в ноябре — только в Тикси и на отдельных западных ГМС.

Летом наибольшее значение $T_{\max}$ в июле на западных ГМС составило 75 %, а на морских и восточных ГМС от 60 до 65 %. Повторяемость $T_{\max}$ на континентальных ГМС в июне примерно в 2 раза больше, чем в августе, а на морских ГМС это соотношение обратное. На всех ГМС ряды ежегодных экстремумов температуры $T_{\min}$ и $T_{\max}$ демонстрируют значительные изменения от года к году без явно выраженного тренда.

Амплитуда годового хода температуры воздуха

В Якутии зафиксированы наибольшие для всего Северного полушария годовые амплитуды температуры воздуха A . Как видно из рис. 3, на морских ГМС (Котельный, Санникова) амплитуда существенно меньше по сравнению с континентальными ГМС. В континентальной области A особенно велика на ГМС Верхоянск и Сухана. При этом на всех станциях ярко выражена межгодовая изменчивость A при практическом отсутствии трендов.

В табл. 6 приведены средние значения m , квантили x и масштабы распределения A — интерквартильное расстояние $Q = X_{0,75} - X_{0,25}$ (50 % значений в окрестностях медианы $Me = x_{0,50}$) и размах $R = x_{\min} - x_{\max}$. Численная близость оценок центра распределения m и Me свидетельствует о почти симметричном распределении A . Соотношение Q и R показывает, что изменения на всех ГМС значительные и примерно одинаковые, несмотря на различное среднее значение A . Пространственные диапазоны $\Delta_R = 17^\circ\text{C}$ (8,2 – 25,3 $^\circ\text{C}$) и $\Delta_Q = 3^\circ\text{C}$ (3,2 – 6,3 $^\circ\text{C}$) составили по отношению к средним по 16 ГМС значениям $\bar{R}$ и $\bar{Q}$ около 1,0 и 0,5 соответственно. Следовательно, значительная дисперсия амплитуды формируется во все годы, а не только при аномально больших и малых значениях A .



Рис. 3. Пространственно-временная изменчивость годовой амплитуды температуры воздуха за 1978–2010 гг.

Среднее значение m , квантили X_p , интерквартильное расстояние Q и размах R многолетнего распределения годовых амплитуд температуры за 1978–2010 гг.

Код ГМС	m	X_{MIN}	$X_{0,25}$	$X_{0,50}$	$X_{0,75}$	X_{MAX}	Q	R
CHE	75,0	70,9	73,3	74,8	76,5	79,1	3,2	8,2
CHO	73,5	68,8	72,0	74,0	75,6	77,6	3,6	8,8
DPT	80,7	75,2	78,4	80,9	82,5	87,1	4,1	11,9
KLM	76,4	71,9	74,7	76,0	77,9	83,4	3,2	11,5
SRK	79,8	74,7	77,8	79,4	81,5	86,3	3,7	11,6
VRH	88,6	82,4	86,2	88,6	90,4	95,2	4,2	12,8
TKS	72,5	64,9	70,2	73,6	75,2	77,2	5,0	12,3
GLN	85,8	75,5	83,6	85,5	87,7	93,5	4,1	18,0
GAR	82,3	75,0	79,3	81,7	84,6	89,5	5,3	14,5
OLN	83,4	73,0	80,9	83,4	86,7	91,0	5,8	18,0
SAS	81,0	67,3	78,4	80,8	84,7	92,6	6,3	25,3
SUH	88,0	78,0	85,8	88,0	91,6	97,6	5,8	19,6
YAR	85,7	76,7	82,7	86,7	88,4	94,6	5,7	17,9
TUM	82,0	74,1	80,3	82,6	84,9	92,4	4,6	18,3
KOT	57,5	50,7	55,0	56,7	60,1	68,0	5,1	17,3
SAN	53,8	47,8	52,0	53,8	55,7	59,6	3,7	11,8

На рис. 4 приведены карты средних и максимальных значений годовой амплитуды температуры воздуха. При сопоставлении с экстремумами самой температуры T_{min} , T_{max} (табл. 2, рис. 2) необходимо учитывать, что на континентальных и прибрежных ГМС амплитуда зависит в основном от зимних минимумов T_{min} , а роль T_{max} вторична. Поэтому естественно, что амплитуда на континентальных ГМС заметно больше, чем на морских ГМС. Наибольшие А отмечены в Верхоянске (в среднем 89 °С, максимальная 95 °С), на ГМС Депутатский и на ряде западных ГМС. В Тикси эти значения составили 73 и 77 °С, а на Новосибирских островах 55 °С и от 60 до 68 °С.

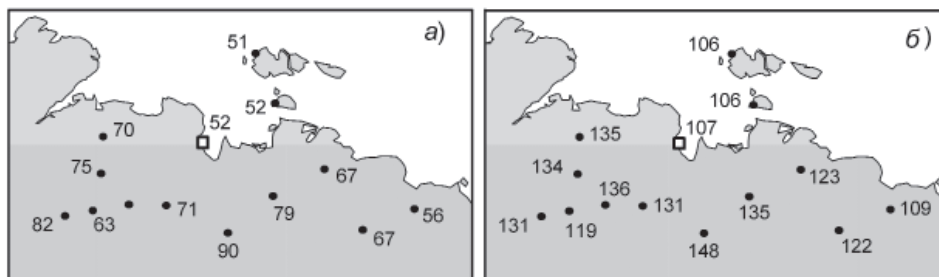


Рис. 4. Среднее значение (а) и максимум (б) годовой амплитуды температуры воздуха.

Повторяемость и непрерывная продолжительность низкой температуры

Для характеристики воздействия низкой температуры воздуха на условия жизни и социально-экономическую деятельность региона важно знать повторяемость и непрерывную продолжительность периодов, когда $T \leq T_{кр}$ (Руководство..., 2008). Согласно работе (Брызгин, Дементьев, 1996) пороговым значением $T_{кр}$ для Арктики принято -30 °С. Повторяемость $P_{кр}$ определяется числом дней $N_{кр}$, в течение которых



Рис. 5. Пространственно-временная изменчивость числа дней с температурой ниже $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ за 1978–2010 гг. в холодный сезон с ноября по март.

температура воздуха хотя бы один раз в сутки понижалась ниже $T_{\text{кр}}$. Непрерывная продолжительность $\theta_{\text{кр}}$ событий $T \leq T_{\text{кр}}$ определяется количеством часов (по данным срочных наблюдений). В соответствии с определением зимнего периода месяцами с ноября по март (Алексеев и др., 1999; Иванов и др., 2009а, б) оценки были выполнены только для указанного периода. Учитывая, что количество дней $N_{\text{кр}}$ и продолжительность $\theta_{\text{кр}}$ целочисленные значения, параметрами распределения приняты не моменты, а квантили x_p порядка p . Поскольку оценки $N_{\text{кр}}$ и $\theta_{\text{кр}}$ особенно чувствительны к пропускам данных, использованы данные только 14 ГМС (табл. 7).

Таблица 7

Квантили x_p распределения ежегодного числа дней $N_{\text{кр}}$ и непрерывной продолжительности $\theta_{\text{кр}}$ за 1978–2010 гг.

Код ГМС	Число дней $N_{\text{кр}}$ с $T \leq -30\text{ }^{\circ}\text{C}$					Непрерывная продолжительность $\theta_{\text{кр}}$, часы				
	x_{MIN}	$x_{0.25}$	$x_{0.50}$	$x_{0.75}$	x_{MAX}	x_{MIN}	$X_{0.25}$	$X_{0.50}$	$X_{0.75}$	X_{MAX}^*
СНЕ	61	77	87	92	109	6	6	12	30	720 (30)
СНО	84	96	103	112	123	6	6	12	30	726 (30)
ДРТ	97	111	123	127	135	6	6	12	24	846 (35)
СРК	87	94	102	107	122	6	6	12	24	1086 (45)
ВРН	117	132	137	140	148	6	6	12	24	2790 (115)
ТКС	30	64	84	96	107	6	6	12	24	648 (25)
ГЛН	90	109	114	121	134	6	6	12	24	1380 (55)
ГАР	77	100	109	118	131	6	6	12	24	960 (40)
ОЛН	69	88	96	107	119	6	6	12	36	1356 (55)
САС	72	96	107	118	135	6	6	12	42	1278 (55)
СУН	111	119	124	129	136	6	6	12	30	1164 (50)
ЯАР	82	103	111	117	131	6	6	12	24	840 (35)
КОТ	54	67	75	96	106	6	6	18	48	540 (20)
КИГ	44	67	78	91	106	6	12	18	48	690 (25)

* — для $\theta_{\text{кр}}$ в скобках приведен максимум продолжительности в днях (с округлением до 5 суток).

Как видно из рис. 5, на котором приведены графики $N_{\text{кр}}$ для 6 станций (морских ГМС Котельный и Кигилях, западной и восточной ГМС Джалинда и Среднеколымская,

ГМО Тикси и континентальной ГМС Верхоянск), изменчивость $N_{кр}$ с 1978 по 2010 г. характеризуется сильными вариациями от года к году при отсутствии значимого в соответствии с работой (Дрейпер, Смит, 1986) тренда. Этот рисунок иллюстрирует основные пространственные различия в величине $N_{кр}$, связанные с географическим положением ГМС и локальными особенностями рельефа. На морских и прибрежных ГМС (Котельный, Кигилях, Тикси) величина $N_{кр}$ существенно меньше по сравнению с континентальными ГМС. В континентальной области $N_{кр}$ максимальна в Верхоянске и заметно увеличена на ГМС Депутатский и ряде станций Западной Якутии.

В табл. 7 приведены квантили распределения ежегодного числа дней $N_{кр}$ и соответствующей непрерывной продолжительности $\theta_{кр}$. Для $\theta_{кр}$ значения x_p приведены в часах, а для максимума еще и в днях (с округлением до 5 суток). Карты общей с 1978 по 2010 г. повторяемости и максимального за год числа дней $N_{кр}$ приведены на рис. 6 а, б.

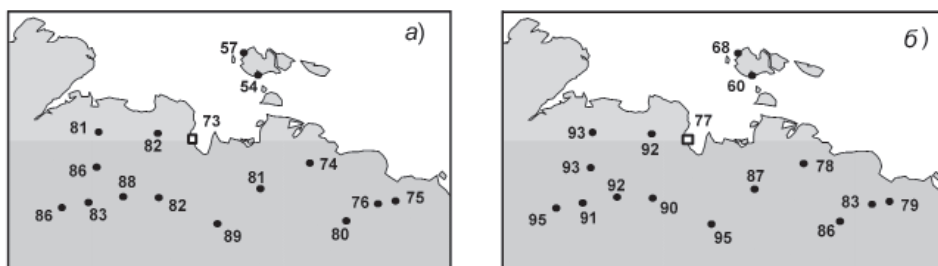


Рис. 6. Повторяемость (а, %) и годовой максимум (б) числа дней с температурой $T \leq -30$ °C с ноября по март за 1978–2010 гг.

Основные особенности пространственного распределения $P_{кр}$, $N_{кр}$, $\theta_{кр}$ взаимно согласованы и соответствуют распределению зимнего минимума $T_{мин}$ (табл. 2, рис. 2). Наибольшая повторяемость (90 %) дней с $T \leq -30$ °C отмечена на полюсе холода (Верхоянск). На ГМС Депутатский и западных ГМС она составляет 70–80 %, уменьшаясь до 50–55 % в Тикси, на островах и на восточной ГМС Черский. Соответствующее число дней $N_{кр}$ составляет в среднем 137, 110–125 и 90–95, а в самые холодные годы — 148, 130–135 и 105–110 соответственно.

Непрерывная продолжительность $\theta_{кр}$ составила в 50 % случаев 12 ч на континентальных ГМС и 18 ч на островных ГМС, а в 75 % случаев не превысила 2 суток. Однако в отдельные годы $\theta_{кр}$ была очень велика. Наибольшая продолжительность температуры воздуха ниже -30 °C в Верхоянске составила почти 3 месяца (115 суток), на ГМС Депутатский и на западных ГМС от 35 до 55 суток, в Тикси и на островах — от 20 до 25 суток.

Экстремумы редкой повторяемости, возможные 1 раз в 5, 10, 25, 50 и 100 лет

Для оценки экстремумов $T_{мин}$ и $T_{макс}$, возможных 1 раз в 5, 10, 25 и 100 лет, использованы методы, описанные в монографиях и таблицах (Большев, Смирнов, 1968; Гумбель, 1965; Лидбеттер и др., 1989; Рожков, 2001). Экстремумы $T_{МР}$ возможные один раз в 5, 10, 25, 50 и 100 лет, получены для шести ГМС, характеризующих особенности различных районов Северной Якутии (см. табл. 1, рис. 1а), по данным наблюдений с 1978 по 2010 г. Этот период можно считать репрезентативным, поскольку сопоставление результатов для ГМО Тикси по этому ряду и за 1936–2015 гг. показало, что различия оценок $T_{М}$ за 33 года и за 80 лет не превышает 0,5 °C.

При длине ряда 33 года для экстремумов T_M , возможных 1 раз за 5, 10 и 25 лет, наиболее обоснованными являются эмпирические и квантильные оценки, полученные непосредственно по данным наблюдений. Расчеты показали, что на всех ГМС при $M = 5, 10$ и 25 лет значения T_M , полученные этими методами, почти не различаются. В то же время для рядов продолжительностью 33 года оценки T_M , возможной 1 раз за 25 лет, непосредственно по данным измерений становятся ненадежными, а значения T_M за 50 и 100 лет можно оценить лишь параметрическим методом. В таблице 8 сопоставлены квантильные и параметрические оценки T_M , возможной 1 раз за 5, 10, 25 лет, и приведены параметрические оценки T_M за 50 и 100 лет.

Таблица 8

Квантильные (А) и параметрические (Б) оценки экстремумов температуры воздуха, возможной 1 раз за 5, 10, 25 и 50 и 100 лет

Период M и метод оценки		Максимальная температура						Минимальная температура					
		Код ГМС						Код ГМС					
		<i>TKS</i>	<i>VRH</i>	<i>SRK</i>	<i>KOT</i>	<i>SAS</i>	<i>YAR</i>	<i>TKS</i>	<i>VRH</i>	<i>SKR</i>	<i>KOT</i>	<i>SAS</i>	<i>YAR</i>
5 лет	А	29,3	34,0	32,8	17,0	31,1	32,1	-46,2	-58,3	-51,2	-41,4	-52,8	-57,7
	Б	29,7	33,8	32,7	17,9	31,4	32,4	-46,3	-58,2	-50,3	-41,1	-52,2	-57,4
10 лет	А	30,4	34,6	34,0	19,5	32,1	33,0	-47,1	-58,5	-51,9	-42,0	-53,3	-58,2
	Б	32,7	35,2	34,6	20,7	33,8	33,7	-48,3	-60,1	-52,0	-42,5	-55,3	-59,9
25 лет	А	31,2	35,6	35,4	21,5	33,9	34,0	-47,3	-60,6	-52,3	-42,1	-58,3	-60,2
	Б	34,4	36,8	37,0	24,1	35,8	35,4	-49,9	-62,4	-54,1	-44,3	-58,4	-60,8
50 лет	Б	39,1	38,2	38,8	26,7	39,0	36,5	-52,9	-64,2	-5,7	-45,6	-60,6	-63,7
100 лет	Б	40,9	39,6	40,6	29,2	41,3	37,8	-54,8	-67,0	-57,2	-47,0	-63,8	-66,6

Наиболее важны оценки за периоды 50 и 100 лет, превышающие продолжительность рядов измерений. Таблица воспроизводит отмеченное выше резкое усиление экстремальности в Верхоянске и в западной части континентальной Якутии по сравнению с побережьем и островами. Этот пространственный контраст особенно увеличен зимой. В Верхоянске значения экстремумов, возможных 1 раз в 100 лет, составили около -67°C и $+40^\circ\text{C}$, в Тикси -55°C и $+40^\circ\text{C}$, на Новосибирских островах (о. Котельный) -47°C и $+29^\circ\text{C}$.

Значения минимума, возможного 1 раз в 100 лет, в Верхоянске почти совпало с абсолютным многолетним значением, полученным по данным измерений с 1891 г. (Мещерская, Голод, 2006). Другими подтверждениями реалистичности модельных оценок T_M , возможных 1 раз в 50 и 100 лет, являются близость эмпирических, квантильных и параметрических оценок при $M \leq 25$ лет и согласованность параметрических оценок при $M = 25$ лет с экстремумами по данным измерений за 33 года (табл. 2).

Резкие перепады температуры — климатическая характеристика и возможные причины

Особенностью климата Якутии являются резкие и кратковременные (продолжительностью до 1–2 суток) изменения температуры воздуха. Особенно интересны резкие повышения T в холодный сезон. Основной причиной этих экстремальных событий являются циклоны, зарождающиеся в восточной ложбине исландского минимума давления и перемещающиеся на восток вдоль сибирского побережья Северного Ледовитого океана. С циклонами этого типа связаны также зимние штормы в районе Тикси с ветром до 40–45 м/с.

Статистическое описание событий увеличения температуры (δT) на 10 °C и более за 12 ч с ноября по март получено по рядам данных срочных (8 раз в сутки) измерений с 1978 по 2010 г. Основными параметрами приняты общее за 33 года количество, медиана и максимальная величина выброса δT . Величина каждого из выбросов определялась индивидуально.

По значениям повторяемости и мощности выбросов δT на 10 °C и более с ноября по март пространственный контраст особенно отчетливо выражен между Верхоянском, западными континентальными ГМС и наиболее южными восточными ГМС (Среднеколымская и Депутатский), с одной стороны, и морскими ГМС (Новосибирские острова, ГМС Дунай) — с другой стороны. ГМС Тикси занимает промежуточное положение (ближе к морским ГМС). Повторяемость числа дней с событиями $\delta T \geq 10$ °C за 33 года в процентах составила на морских не более 1 %, в Тикси 1,5 %, на северо-восточных ГМС около 5 %, а на западных ГМС (включая Верхоянск и Депутатский) — от 5 до 15 %, с максимумами на ГМС Ярোলын и Сухана. Медиана многолетнего распределения δT на морских ГМС составила 11 °C, в Тикси 12 °C, на континентальных ГМС — от 13 до 15 °C с максимумами в Ярোলыне, Сухане и Верхоянске. Максимальные за 33 года значения δT на морских ГМС не превышали 20 °C, в Тикси 26 °C, а на ряде континентальных ГМС — от 40 до 45 °C.

Для того чтобы вызвать значительное изменение температуры в континентальной области Северной Якутии, циклон со значительным градиентом давления должен быть глубоким и, что особенно важно, быстро перемещающимся. В качестве примера на рис. 7 рассмотрена синоптическая ситуация 18 декабря 1978 г., когда на ГМС Ярোলын всего за 12 ч T возросла на 25 градусов от –44,7 до –19,5 °C. Используются данные реанализа NCEP (Kalnay at al., 1996) и база данных по циклонам Северного полушария (Tilinina at al., 2013).

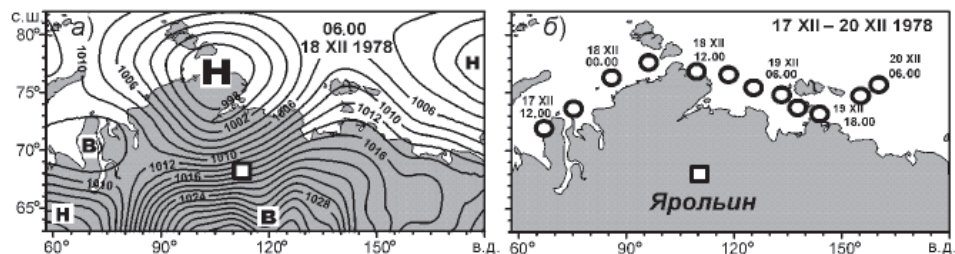


Рис. 7. Синоптические условия резкого увеличения температуры воздуха на ГМС Ярোলын — синоптическая карта за 12 ч 18 декабря 1978 г. (а) и траектория центра циклона за 17–20 декабря 1978 г. (б).

Согласно рисунку резкое повышение температуры вызвано циклоном, который зародился в юго-западной части Карского моря и примерно через трое суток заполнился в Восточно-Сибирском море. Его траектория воспроизводит конфигурацию береговой линии, а за счет оппозиции с Сибирским антициклоном в его теплом секторе над континентальной областью Северной Якутии сформировался сильный градиент давления. Особенно интересна необычно большая путевая скорость центра циклона. В среднем она составила около 45 км/ч (10–12 м/с на различных участках траектории).

Синоптические условия возникновения штормов в районе ГМО Тикси

Наиболее сильные ветры в Северной Якутии были зафиксированы на побережье Северного Ледовитого океана, в районе ГМС Тикси (Иванов, Макштас, 2009а, 2012).

Согласно работе (Иванов, Макштас, 2014) важнейшими особенностями штормов являются: интенсификация в холодный сезон (с ноября по март до 40 м/с и более), стабильность направления (от Ю–ЮЗ–З к С–СВ–В) во все месяцы и от года к году и небольшая непрерывная продолжительность резких усиления ветра (не более 1–2 суток). В табл. 9 приведены данные о модуле и направлении ветра в максимальных штормах за период с 1936 по 2016 г. в Тикси.

Таблица 9

Модуль и направление многолетних максимумов ветра в ГМО Тикси

Параметр		Месяц											
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
V_{max}	V , м/с	42	38	40	34	24	28	26	25	28	34	40	40
	φ , град.	250	200	250	230	250	260	230	260	290	230	230	200

Устойчивость направления скорости ветра во время сильных штормов позволяет предположить, что, как и при резких перепадах температуры, особенно сильные штормы в Тикси в холодный сезон обусловлены циклонами, зарождающимися в восточной ложбине исландского минимума и движущиеся вдоль евразийского побережья Северного Ледовитого океана на восток. Сильные штормы отмечались значительно реже, чем резкие перепады температуры. Следовательно, синоптические условия возникновения штормов и выбросов температуры хотя и совпадают по общей причине (атлантические циклоны), но имеют еще и специфические особенности.

Для проверки этой гипотезы проанализированы синоптические ситуации 19 ноября 1951 г., 20 января 1951 г. и 25 марта 1954 г. с абсолютными для этих месяцев за весь период инструментальных наблюдений максимумами скорости ветра 40, 42 и 34 м/с. На рис. 8 (а, в, д) показаны поля атмосферного давления на уровне моря. Во всех трех случаях четко выделяются основной глубокий циклон и частный циклон. На рис. 8 (б, г, е) показаны траектории этих циклонов за несколько суток и векторы максимального ветра.

Рисунок подтверждает нашу гипотезу и одновременно показывает специфику синоптических условий возникновения особенно сильных штормов. Во всех случаях основной циклон перемещается на восток несколько южнее, чем большинство аналогичных циклонов, — его центр проходит над континентальной областью Восточной Сибири. Другим необходимым условием является частный циклон перед фронтом основного циклона непосредственно в районе Тикси. Одновременное выполнение этих редких условий (зимой преобладает Сибирский антициклон) при формальном выборе дат (только по максимуму ветра) вряд ли является случайным совпадением.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования современного климата Северной Якутии были инициированы созданием в рамках программы Международного полярного года Гидрометеорологической обсерватории Тикси. В продолжение ранее опубликованных данных о климатических особенностях региона в настоящей статье приведены оценки экстремумов температуры приземного слоя воздуха на 22 континентальных и морских ГМС за период с 1978 по 2010 г. Они дополняют сведения климатических справочников, полученные на основании измерений, выполненных до 1980 г., а на ряде станций только до 1965 г.

В Северной Якутии зафиксированы максимальные для Северного полушария амплитуды годового хода температуры воздуха. За проанализированные 33 года

по данным измерений в Тикси с 1936 г. и в Верхоянске с 1891 г. показало надежность модельных оценок. Это позволяет использовать разработанную методику оценки экстремумов большой заблаговременности и для ГМС с более короткими рядами измерений.

Современный уровень гидрометеорологии обеспечивает для рассматриваемого района хорошую (в большинстве случаев) оправдываемость прогнозов полей атмосферного давления с заблаговременностью до 3–5 суток. Поэтому выявленные синоптические условия возникновения сильных штормов и резких перепадов температуры воздуха могут быть полезными для принятия оперативных решений и действий при угрозе возникновения этих опасных и особо опасных явлений погоды.

Авторы выражают искреннюю признательность сотрудникам Института океанологии им. П.П. Ширинова РАН и ААНИИ: чл.-кор. РАН д-ру физ.-мат. наук С.К. Гулеву, науч. сотр. Н.Д. Тилининой и канд. геогр. наук А.В. Попову за возможность использования базы данных по циклонам Северного полушария. Работа выполнена в рамках темы ЦНТП Росгидромета 1.5.3.2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев Г.В., Бухановский А.В., Иванов Н.Е., Рожков В.А. Распределение годовых экстремумов температуры воздуха // Известия РГО. 1999. Т. 131. Вып. 4. С. 26–30.
- Архив метео- и аэрологических данных ГМО Тикси. URL: http://www/aari.ru/архивные_данные/ [дата обращения 01.03.2017]
- Большев Л.Н., Смирнов Н.В. Таблицы математической статистики. М.: ВЦ АН СССР, 1968. 474 с.
- Брызгин Н.Н., Дементьев А.А. Опасные метеорологические явления в Российской Арктике. СПб.: Гидрометеиздат, 1996. 156 с.
- Бухановский А.В., Иванов Н.Е., Рожков В.А. Вероятностные модели и экстремумы годовой ритмики // Навигация и гидрография. 1999. № 9. С. 57–72.
- Визе В.Ю. Климат Якутии. Л.: Изд-во АН СССР, 1927. 33 с.
- Герман В.Х., Левиков С.П. Вероятностный анализ и моделирование колебаний уровня моря. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 231 с.
- Гумбель Э. Статистика экстремальных значений. М.: Мир, 1965. 450 с.
- Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. Т. 1. М.: Финансы и статистика, 1986. 366 с.
- Иванов Н.Е., Иванов Б.В., Андреев О.М. Оценки максимальных толщин припайного льда в северной части Каспийского моря, возможных один раз в 5, 10, 25, 50 и 100 лет // Метеорология и гидрология. 2012. № 6. С. 46–53.
- Иванов Н.Е., Макистас А.П. Многолетняя изменчивость характеристик климата Северной Якутии. Синоптическая изменчивость // Проблемы Арктики и Антарктики. 2012. № 4 (94). С. 5–21.
- Иванов Н.Е., Макистас А.П. Оценка влияния климата на социально-экономическую деятельность в Северной Якутии // Проблемы Арктики и Антарктики. 2014. № 2 (100). С. 57–74.
- Иванов Н.Е., Макистас А.П., Шутилин С.В., Гунн Р.М. Многолетняя изменчивость характеристик климата района гидрометеорологической обсерватории Тикси // Проблемы Арктики и Антарктики. 2009. № 1 (81). С. 24–41.
- Иванов Н.Е., Макистас А.П., Шутилин С.В. Многолетняя изменчивость характеристик климата в районе Гидрометеорологической обсерватории Тикси. Часть 2 – годовой ход // Проблемы Арктики и Антарктики. 2009. № 3 (83). С. 97–113.
- Колосова Н.В. Структура приземного ветра в Антарктиде. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 174 с.

Лидбеттер М., Ротсен Х., Линдгрен Г. Экстремумы случайных последовательностей и рядов. М.: Мир, 1989. 392 с.

Макишас А.П., Большакова И.И., Гунн Р.М., Жукова О.Л., Иванов Н.Е., Шутилин С.В. Климат района Гидрометеорологической обсерватории Тикси // Вклад России в Международный полярный год. Метеорологические и геофизические исследования. М.; СПб.: Изд. ООО «Паульсен», 2011. С. 49–74.

Макишас А.П., Уттал Т., Лаурила Т., Парамонова Н.А. Гидрометеорологическая обсерватория Тикси (к пятилетию открытия) // Проблемы Арктики и Антарктики. 2015. № 2 (104). С. 5–12.

Мещерская А.В., П. Голод М.П. К вопросу о «полюсе холода» в Северном полушарии // Метеорология и гидрология. 2006. № 10. С. 54–59.

Научно-прикладной справочник по климату СССР. Сер. 3. Многолетние данные. Ч. 1–6. Вып. 24. Якутская СССР. Книга 1. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 607 с.

Рожественский А.В., Чеботарев А.И. Статистические методы в гидрологии. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 424 с.

Рожков В.А. Теория и методы статистического оценивания вероятностных характеристик случайных величин и функций с гидрометеорологическими примерами. Кн. 1. СПб.: Гидрометеиздат, 2001. 340 с.

Руководство по специализированному климатологическому обеспечению экономики / Под ред. Н.В. Кобышевой. СПб.: ГГО, 2008. 334 с.

Справочник по климату СССР. Вып. 24. Якутская АССР. Часть II. Температура воздуха и почвы. Л.: Гидрометеиздат, 1966. 397 с.

Kalnay E. et al. “The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project” // Bul. Amer. Meteor. Soc. 1996. Vol. 77. P. 437–470.

Tilina N.D., Gulev S.K., Rudeva I., Kollermann P. Comparing Cyclone Life Characteristics and their Interannual Variability in Different Reanalyses // J. of Climate. 2013. № 26. P. 6419–6438.

N.E. IVANOV, A.P. MAKSHITAS

CHARACTERISTICS OF CLIMATE VARIABILITY IN THE NORTHERN YAKUTIA — EXTREMES OF AIR TEMPERATURE

The article continues the series of publications, describing the modern climate of atmospheric surface layer in the Northern Yakutia and, in details, in the area of Tiksi Hydrometeorological observatory. Climatic characteristics of minimal and maximal air temperatures are estimated with data of standard meteorological measurements, executed at 22 marine and continental meteorological stations in 1978–2010 years, and at HMO Tiksi — during 1936–2015 years. These estimates supplement the information of climatic reference books, based on the data executed before 1980 year, and for some meteorological stations — before 1965 year. The basic characteristics of extremes by months, maps of its spatial distribution and conjugation, annual extremes (the largest and smallest values, its distributions by months, and trends), climatic parameters of seasonal amplitude, and estimates of extreme temperatures, possible one time during 5, 10, 50 and 100 years periods are presented. In addition, the synoptic conditions of storms and sharp temperature changes are investigated.

Keywords: Hydrometeorological observatory Tiksi, Northern Yakutia, extreme air temperature, annual amplitude, synoptic conditions, storms.

ОСОБЕННОСТИ КОНФИГУРАЦИИ ПРОТЯЖЕННЫХ ФОРМ РЕЛЬЕФА И БЕРЕГОВ ОЗЕР СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ПЛАТО ПУТОРАНА

В.М. АНОХИН¹, М.А. ХОЛМЯНСКИЙ²

1 — ФГБУН Институт озероведения РАН, Санкт-Петербург,
e-mail: vladanokhin@yandex.ru

2 — ФГБУ ВНИИОкеангеология им. И.С. Грамберга, Санкт-Петербург,
e-mail: holm936@rambler.ru

В результате проведенного линеamentного анализа рельефа и берегов озер северо-западной части плато Путорана выявлен ряд особенностей морфологии района — соответствие направлений берегов крупных озер направлениям линейных форм рельефа; преобладание субширотных направлений линейного рельефа в западной и южной частях района, диагональных — в северной и северо-восточных частях; высокая степень хаотичности направлений рельефа на уровне первичных линий; хорошая выраженность четырех систем направлений на уровне линеamentов; соответствие систем линеamentной сети района планетарной регматической сети.

Ключевые слова: озеро, плато Путорана, рельеф, линеament, анализ, направление.

Плато Путорана расположено на северо-западной окраине Среднесибирского плоскогорья, на территории Таймырского автономного округа Красноярского края. Это базальтовое плато, образованное траппами — комплексом пластовых интрузий и эффузивов пермско-триасового возраста с высотами до 1365 м (Ламские горы). На плато преобладают низко- и среднегорные ландшафты. На западных склонах плато Путорана довольно часто встречаются глубокие субширотные долины с крутыми склонами, многие из которых заполнены озерами.

Озера занимают около 10 % площади плато, где имеет место уникальная концентрация длинных (50–150 км) и глубоких (50–420 м) озер. Самые крупные из них: Мелкое, Лама, Глубокое, Собачье, Кутарамакан, Кета, Хантайское. Озера имеют вытянутую форму, напоминающую форму фьордов. Наиболее крупное Хантайское озеро имеет длину до 110 км. Глубина озер достигает 50–300 м. Дно некоторых озер лежит ниже уровня океана. В озера впадают многочисленные реки — большей частью притоки Енисея. Многие озера соединены протоками.

В окрестностях озер Лама, Глубокое, Хантайское и в Норильской долине имеются богатейшие месторождения полиметаллических и медно-никелевых руд, что объясняет повышенный интерес исследователей к этому району (География, 2017).

Авторы поставили себе задачей выявление общих характеристик направленности и форм линейных форм рельефа и берегов озер северо-западной части плато Путорана.

МЕТОДИКА

Район исследования ограничен пределами листа Географической карты R-46-B, Г масштаба 1:500 000 (Топографическая карта, 1988).

На этой картографической основе авторами был проведен линеаментный анализ протяженных форм рельефа — осей долин, хребтов, речной сети и берегов озер. При этом направления берегов озер измерялись отдельно. Методика анализа использовалась авторами ранее (Анохин, 2006, 2009, 2011) и сводилась к выделению первичных линий по осям протяженных элементов рельефа (в данном случае — по осям хребтов, долин) с последующим объединением первичных линий в более крупные протяженные линеаменты. Выделение производилось в векторной программной среде *MapInfo* с привязкой к системе координат СК-42. Затем данные переводились в среду *ArcView*, в которой строились розы-диаграммы.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Рисунок первичных линий и берегов озер показан на рис. 1. На рисунке видно, что крупные озера района имеют в основном вытянутую форму, их берега обычно вписаны в рисунок речной сети и повторяют направления речных долин, которые они выполняют.

Несколько отличную морфологию имеют мелкие озера района, которые чаще всего расположены в верхних концах долин, откуда берут начало многие реки. Мелкие озера обычно имеют форму, вытянутую вдоль долин, но часто она близка к изометричной.

Розы-диаграммы к рис. 1 показывают господство широтных направлений как для осей линейных форм рельефа, так и для берегов озер. В широких «лепестках» объединены системы всех направлений в секторе 30–140° с плохо различимым макси-

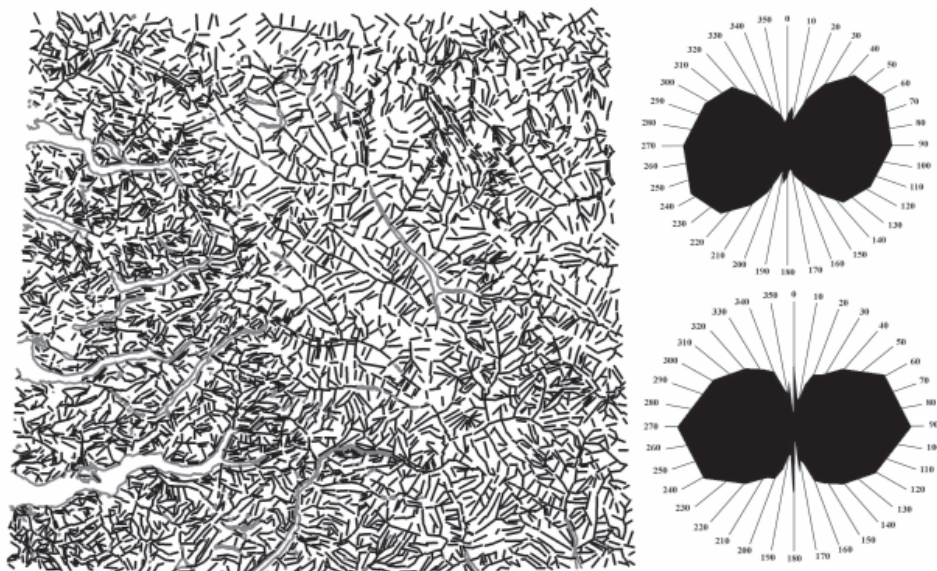


Рис. 1. Рисунок осей протяженных форм рельефа (черные линии) и берегов озер (серые линии) в северо-западной части плато Путорана. На розах-диаграммах справа: сверху — направления протяженных форм рельефа (первичные линии), внизу — направления берегов озер. На круговых шкалах — градусы лимба.

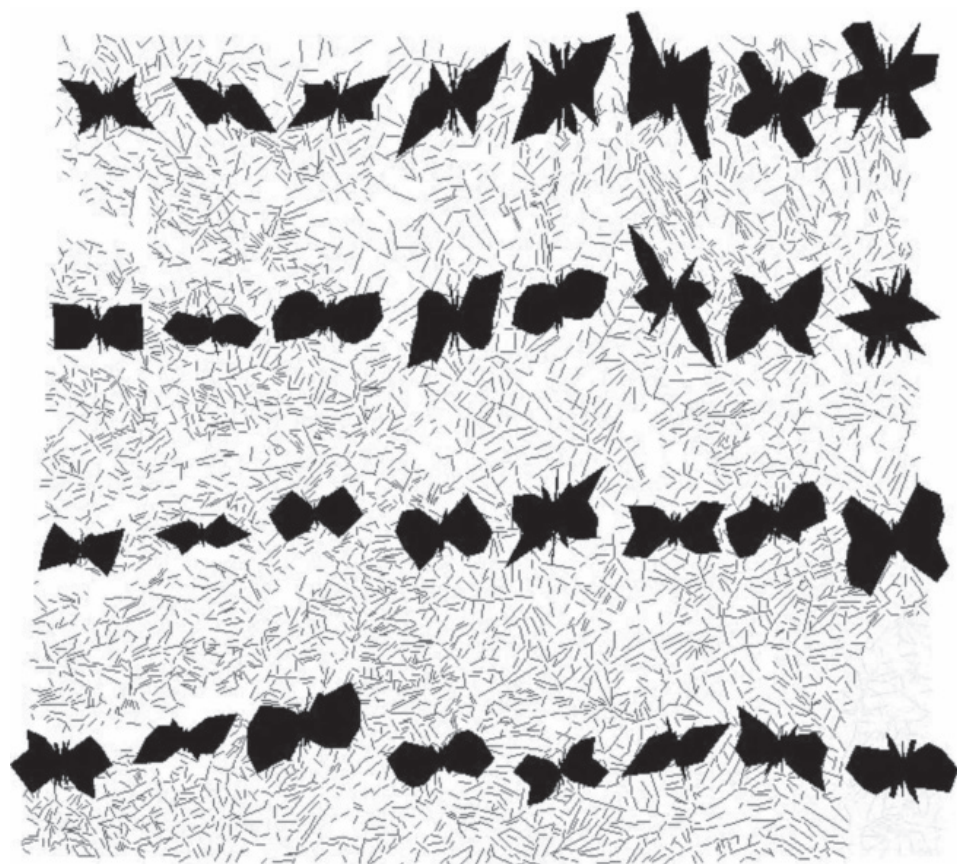


Рис. 2. Розы-диаграммы направлений линейных форм рельефа в пределах 32 участков более дробного деления района исследований.

мумом на субширотном направлении; имеется слабо проявленная субмеридиональная система. Формы обеих роз довольно сходны между собой, что подтверждает пространственную связь конфигурации озер района с протяженными формами рельефа. Подобная хаотичность направлений линейного рельефа на уровне первичных линий встречается довольно редко (Анохин, 2006, 2011).

Более подробно структуру направлений линейных форм северо-западной части плато Путорана (включая берега озер) можно видеть на рис. 2, где район исследования разбит на 32 участка и к каждому из них построена роза-диаграмма. Заметно, что на небольших участках направления первичных линий значительно лучше выражены, чем в сумме по району. В частности, видно преобладание широтных систем в западной и южной частях района и диагональных — в северной — северо-восточной частях.

Путем последовательного укрупнения линий осей протяженных форм рельефа был получен рисунок наиболее крупных линеаментов северо-западной части плато Путорана (рис. 3), предположительно соответствующий рисунку разрывных нарушений. Здесь уже довольно четко видны главные системы направленности линейных форм — субширотная, диагональные СВ, диагональные ЮВ и несколько менее выраженная субмеридиональная. Роза-диаграмма подтверждает четкое наличие

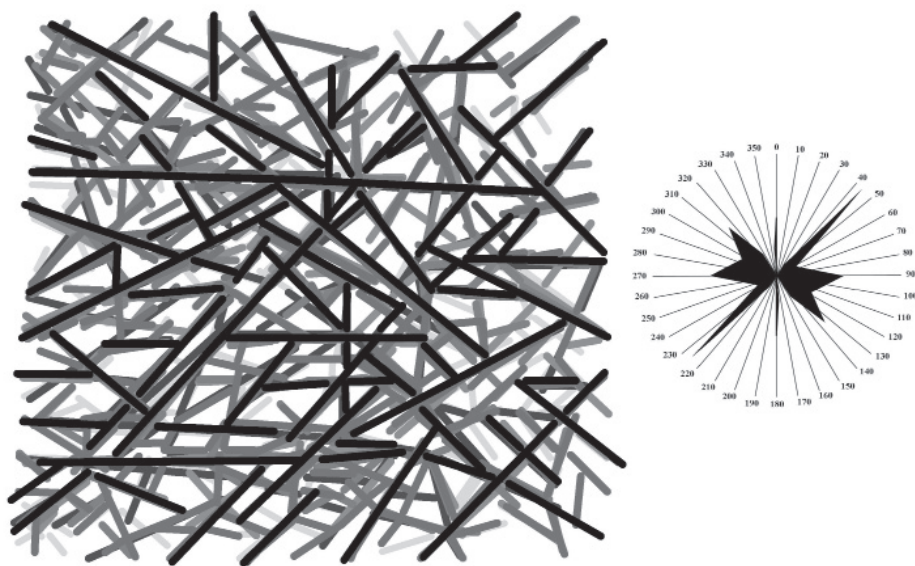


Рис. 3. Рисунок крупных линейментов северо-западной части плато Путорана.

Черные линии — линейменты высокой стадии укрупнения, серые линии — линейменты более низких стадий укрупнения. На розе-диаграмме — направления линейментов высокой стадии укрупнения. На круговых шкалах — градусы лимба.

этих четырех систем с хорошо выдержанными направлениями меридиональной и северо-восточной систем и менее выраженными — широтная и юго-восточная системы (впрочем, и они имеют четкие максимумы). При этом системы линейментов обнаруживают тенденцию к чередованию с шагом около 40 км.

Выделение в районе хорошо выраженных систем крупных линейментов с выдержанными направлениями и их связь с линейным рельефом и берегами крупных озер говорит о прямой зависимости рельефа и берегов озер с разрывной тектоникой района.

Примечателен факт соответствия главных систем направленности рельефа района четырем главным системам планетарной регматической сети (Анохин, 2006). Чередование однонаправленных систем с постоянным для данного масштаба шагом также есть характерная черта регматической сети.

ВЫВОДЫ

1. Общий рисунок осей протяженных форм рельефа (первичных линий) северо-западной части плато Путорана не имеет выраженных систем главных направлений.
2. Направленность первичных линий рельефа на более мелких участках в районе значительно лучше выражена в конкретных системах направлений и имеет тенденцию к преобладанию субширотной системы в западной и южной частях района и диагональных систем — в северной и северо-восточной частях.
3. Направления берегов крупных озер северо-западной части плато Путорана соответствуют направлениям линейных форм рельефа района.
4. Крупные линейменты района образуют ярко выраженные системы направленности: субширотную, меридиональную, диагональную северо-восточную и диа-

гональную юго-восточную; обнаруживают тенденцию к чередованию однонаправленных систем с постоянным шагом около 40 км и, таким образом, соответствуют характеристикам планетарной регматической сети.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Анохин В.М. Глобальная дизъюнктивная сеть Земли: строение, происхождение и геологическое значение. СПб.: Недра, 2006. 161 с.

Анохин В.М., Маслов Л.А. Закономерности направленности линейментов и разломов дна Российской части Японского моря // Тихоокеанская геология. 2009. № 2. С. 3–16.

Анохин В.М. Строение планетарной линейментной сети. Saarbrücken, Germany, LAP Lambert Academic Publishing, GmbH & Co. KG. 2011. 256 с.

География. URL: <http://geographyofrussia.com/karta-plato-putorana-foto-iz-kosmosa/> [дата обращения 01.06.2017]

Топографическая карта М 1:500 000 лист R-46-B, Г. М.: ГУГК при ЦМ СССР, 1988.

V.M. ANOKHIN, M.A. KHOLMIANSKII

FEATURES OF CONFIGURATION OF LINEAR RELIEF AND LAKES COASTS FOR NORTHWESTERN PUTORAN PLATEAU

We realized lineament analysis of the relief and the shores of lakes for NW part of the Putoran plateau. As a result identified next features of morphology: compliance with the directions the shores of large lakes and linear forms of relief; prevalence sublatitudinal linear relief in W and S parts of the area, and diagonal linear relief — in N and NE parts; high degree of randomness of the directions of the primary relief lines; good expression of the 4 directions of lineaments systems; conformity lineament systems of the area to planetary regmatic network.

Keywords: lake, Putoran plateau, relief, lineament, analysis, direction.

ПОВТОРНО-ЖИЛЬНЫЕ ЛЬДЫ В АНОМАЛЬНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ: ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Л.В. ЦИБИЗОВ^{1, 2}

¹ — Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск, e-mail: TsibizovLV@ipgg.sbras.ru

² — Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск

Повторно-жильные льды благодаря пониженному значению магнитной восприимчивости в сравнении с вмещающими их многолетнемерзлыми породами могут быть источниками отрицательных магнитных аномалий. Это делает возможным их картирование методом прецизионной магнитной съемки. В работе рассмотрены некоторые типичные модели полигонально-жильных структур криолитозоны. Рассчитаны аномалии модуля вектора магнитной индукции на высотах 1–5 м над уровнем верхней границы ледяных жил. Ширина жил варьируется в пределах от 1 до 3 м при размере полигонов от 6 до 15 м соответственно. Магнитная восприимчивость мерзлых грунтов считается равной 10^{-3} СИ. Амплитуда расчетных аномалий составляет от нескольких единиц до нескольких десятков нТл. Приведенные оценки позволяют определить точность съемки, необходимую для картирования повторно-жильных льдов. В условиях относительной латеральной однородности перекрывающих осадков и магнитной восприимчивости мерзлых грунтов порядка 10^{-3} СИ возможно уверенное выявление скрытых ледяных жил шириной более 3 м в аномальном магнитном поле при мощности перекрывающих отложений до 4 м.

Ключевые слова: многолетнемерзлые породы, магнитная съемка.

ВВЕДЕНИЕ

Повторно-жильные льды (ПЖЛ) — ледяные полигонально-жильные структуры в криолитозоне, формирующиеся в результате многократного морозного растрескивания грунтов и заполнения трещин льдом (рис. 1). Для решения ряда инженерных и научных задач весьма актуальна информация о распределении ПЖЛ верхнем слое многолетнемерзлых отложений, наиболее подверженном воздействию природных и техногенных процессов. Гидрологические и климатические процессы в криолитозоне в существенной степени обуславливают деградацию многолетнемерзлых пород по ледяным жилам (Liljedahl et al., 2016). Кроме того, информация о расположении ледяных жил, скрытых под слоем осадков, крайне важна при проектировании объектов инфраструктуры (рис. 2) (Andersland, Ladanyi, 2013; Станиловская, Мерзляков, 2013; Васильчук, 2013).

Для решения подобных задач успешно применяются разнообразные геофизические методы (Рекомендации..., 1987; Scott et al., 1990; Зыков, 2007; Kneisel et al., 2008; Nauck, Kneisel, 2008), при этом значение магнитометрии среди них выглядит сильно недооцененным. Несмотря на то, что возможность обнаружения подземных



Рис. 1. Ледяные жилы в ледовом комплексе о. Курунгнах-Сисё в дельте р. Лены. Фото автора.



Рис. 2. Надземный трубопровод в Якутии, проложенный по территории с реликтовыми мощными повторно-жильными льдами. Фото А.Н. Федорова, Институт мерзлотоведения (Станиславская, Мерзляков, 2013).

льдов при помощи прецизионной магнитной съемки известна относительно давно (Рекомендации..., 1987; Scott et al., 1990), метод до сих пор не получил широкого распространения. Метод прецизионной магнитометрии, известный также как «микро-магнитная съемка» (Lauterbach, 1953), представляет собой особо точные измерения приращений модуля вектора магнитной индукции на небольшой площади, гарантирующие уверенное выделение слабых аномалий, составляющих менее 10 нТл ($1 \text{ нТл} = 10^{-9} \text{ Тл}$, тесла — единица магнитной индукции в системе СИ).

Прецизионная магнитная съемка в начале своего развития отличалась высокой трудоемкостью и, вероятно, по этой причине редко применялась при исследованиях на значительных площадях. Современная магнитометрическая аппаратура позволяет производить прецизионную (с точностью порядка 1 нТл) съемку с весьма высокой скоростью. Примером тому может послужить ее широкое применение в археологии (Becker, Fassbinder, 2001; Kvamme, 2006), где она является одним из самых эффективных методов картирования слабых (несколько нТл) аномалий, вызванных нарушениями в осадочных отложениях на глубине первых метров. Эффективность магнитометрии при изучении особенностей строения почвенного слоя показана в диссертации М.В. Косныревой (2007). Имеются также зарубежные публикации по применению этого метода при почвенных обследованиях (Allred et al., 2008). Наиболее близким к теме исследования повторно-жильных льдов методом магнитометрии можно считать опыт археомагнитных исследований в криолитозоне, при котором было отмечено наличие аномалий, вероятно вызванных мерзлотными структурами (Hodgetts et al., 2011; Wolff, Urban, 2013; Landry et al., 2015).

Магнитная съемка имеет ряд преимуществ при изучении распределения льда в многолетнемерзлых отложениях в сравнении с широко применяемыми в настоящее время геофизическими методами. Среди них наибольшее распространение получили электротомография и георадиолокация, отличающиеся высокой скоростью съемки, незначительной зависимостью магнитных свойств многолетнемерзлых пород от их солености и температурного состояния (факторов, существенно влияющих на электрические свойства пород), а также отсутствием необходимости контакта с поверхностью. Стоит также отметить, что развитие беспилотных магнитометрических технологий (Cunningham et al., 2016; Паршин и др., 2016) в скором времени, вероятно, позволит реализовать более высокую скорость съемки, особенно в условиях тундры — при пологом рельефе и нулевой залесенности. Перечисленное выше делает магнитометрию одним из весьма перспективных методов для исследования многолетнемерзлых пород.

Настоящая работа посвящена оценке магнитных аномалий над ледяными жилами различной конфигурации на основе численного моделирования. Рассмотрен ряд моделей повторно-жильных льдов, соответствующих полевым наблюдениям, и рассчитаны значения аномалий модуля вектора магнитной индукции над ними на разных высотах. Выполненные расчеты позволяют оценить необходимую точность магнитной съемки для выявления повторно-жильных льдов, скрытых под слоем осадков, при различных параметрах: ширине жил, размере полигонально-жильных структур, магнитной восприимчивости мерзлых грунтов и мощности слоя вышележащих отложений.

МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ

Численная модель многолетнемерзлых отложений, содержащих повторно-жильные льды, представляет собой участок полупространства с однородной положительной магнитной восприимчивостью (мерзлые грунты), разделенной прямоугольной решеткой с нулевой магнитной восприимчивостью (система ледяных жил) (рис. 3). Такая геометрия отвечает одному из простейших распределений подземного льда, наблюдаемому в природе в полярных районах (Liljedahl et al., 2016) и образующему хорошо известный полигональный рельеф (рис. 4).

Численное моделирование было выполнено методом конечных элементов в программном пакете *Comsol Multiphysics* v. 4.4. Подход к моделированию магнитных

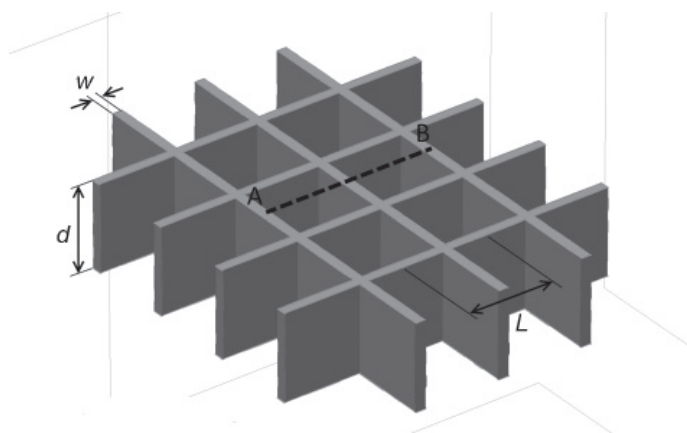


Рис. 3. Общий вид объемной модели полигонально-жильной структуры: серым цветом обозначены ледяные жилы, прозрачное заполнение между ними — мерзлый грунт; w — ширина жил, d — высота жил, L — расстояние между центрами полигонов; AB — линия профиля, на которой приводятся результаты расчета на рис. 5–8.

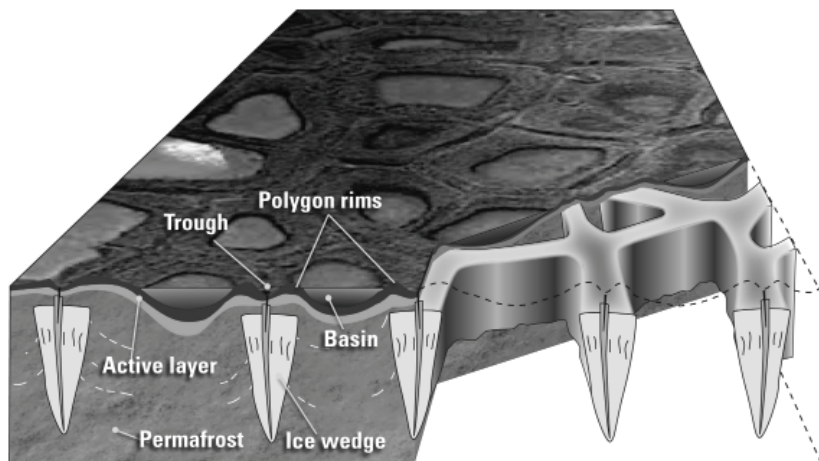


Рис. 4. Схема формирования полигонально-озерного рельефа (Martin et al., 2009).

аномалий в целом соответствовал описанному в работе (Butler, Sinha, 2012). Благодаря относительно низким значениям магнитной восприимчивости, а также пренебрегая остаточной намагниченностью материала и допуская однородное намагничение тел во внешнем поле, намагниченность можно записать в виде:

$$\vec{J} = \frac{1}{\mu_0} K \cdot \vec{B}, \quad (1)$$

где K — магнитная восприимчивость, B — намагничивающее поле, μ_0 — магнитная проницаемость вакуума ($4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Н/А}^2$). Значение K для льда составляет около -10^{-5} СИ (Lonsdale, 1949) и в модели было принято равным 0. K мерзлых грунтов может варьироваться в довольно широких пределах в зависимости от концентрации в них ферромагнетиков. Типичные значения составляют 10^{-4} – 10^{-3} СИ (Бабанин, Трухин, 1995).

В настоящей работе расчеты были выполнены для значения K мерзлого грунта 10^{-3} СИ. Вследствие линейности зависимости аномалии модуля вектора магнитной индукции от J источника полученные аномалии можно легко пересчитать для других значений K . Намагничивающее поле задано в модели вертикальным, поскольку криолитозона наиболее распространена в полярных районах, где вектор геомагнитного поля имеет наклонение 80° и более. Модуль вектора магнитной индукции намагничивающего поля в модели принят равным 60 000 нТл, что близко к типичным его значениям для полярных районов. Вектор магнитной индукции намагничивающего поля задан постоянным на всех внешних границах расчетной области. Размер расчетной области выбран так, чтобы влияние границы на расчет аномального поля вблизи объекта было пренебрежимо мало. Предварительные численные тесты показали, что при магнитной восприимчивости материала тестового объекта 10^{-3} СИ соотношение 5:1 размера области (R) к размеру объекта (s) удовлетворяет этому условию: разница решений для соотношений $R/s \geq 10:1$ и $R/s = 5:1$ составляет менее 0,2 нТл на расстоянии 1 м над объектом.

О необходимости трехмерного моделирования таких структур свидетельствует сравнительный тест (рис. 5): аномальное магнитное поле над системой перпендикулярных жил и над одиночной жилой при ширине жил 5 м и расстоянии между полигонами 10 м отличается более чем на 20 %. При увеличении отношения ширины жил к размеру полигонов различие возрастает.

Слой осадков, перекрывающий ледяные жилы, рассматривается как слой постоянной мощности с однородной магнитной восприимчивостью. Это позволяет произвести вычитание этого слоя из модели, что приводит к сдвигу уровня нормального F на некоторую постоянную величину (что не сказывается на величине аномалий от ледяных жил). Таким образом, расчет аномалий F был выполнен на высотах от 1 до 5 м над верхней границей ледяных жил. Если считать, что высота магнитной съемки составляет 1 м над поверхностью, это соответствует мощности перекрывающего слоя от 0 до 4 м.

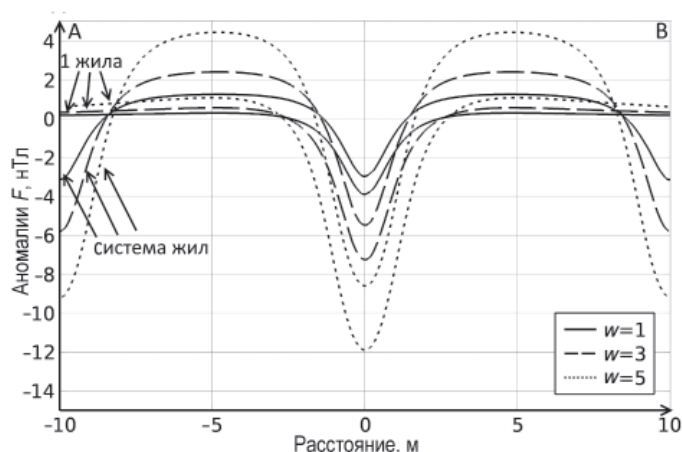


Рис. 5. Сравнение синтетических аномалий модуля вектора магнитной индукции (F) над одиночной жилой и над объемной полигонально-жилой структурой по профилю АВ (рис. 3) при различной ширине жил — w , высоте жил — $d = 5$ м, расстоянии между центрами полигонов — $L = 10$ м, магнитной восприимчивости мерзлого грунта — $K = 10^{-3}$ СИ.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Согласно опубликованным материалам, наиболее часто встречаются полигоны от 6–8 м до 15–20 м в диаметре. Мощность ледяных жил при этом может составлять 0,2–0,4 доли от их высоты (Дубиков, 1966; Washburn, 1979). Высота жил, в свою очередь, составляет 0,3–1 от расстояния между центрами полигонов. На основании этих данных рассмотрены две модели системы ледяных жил:

- модель 1: расстояние между жилами 6 м, высота жил 3 м и ширина 1 м;
- модель 2: расстояние между жилами 15 м, высота жил 10 м и ширина 3 м.

Отдельно было рассмотрено влияние формы верхних оконечностей жил на параметры магнитных аномалий. Различие формы верхних оконечностей ледяных жил

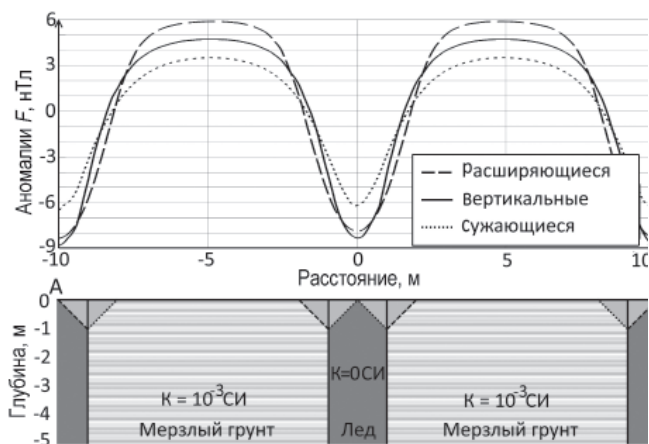


Рис. 6. Синтетические аномалии модуля вектора магнитной индукции (F) над полигонально-жильной структурой по профилю АВ (рис. 3) при различной форме жил в верхней части; ширина жил — $w = 2$, высота жил — $d = 5$ м, расстояние между центрами полигонов — $L = 10$ м, магнитная восприимчивость мерзлого грунта — $K = 10^{-3}$ СИ.

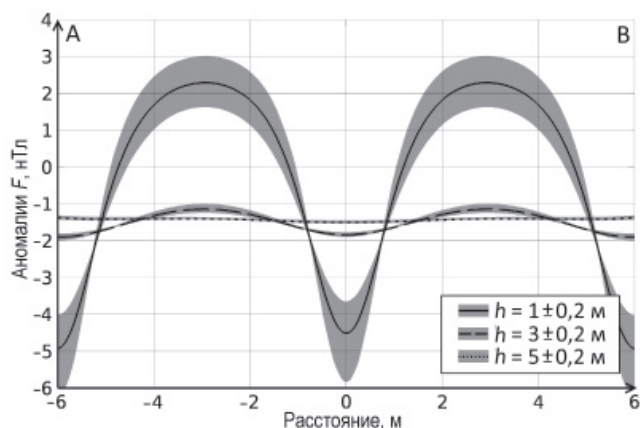


Рис. 7. Модель 1. Синтетические аномалии модуля вектора магнитной индукции (F) над полигонально-жильной структурой по профилю АВ (рис. 3) на разных высотах; ширина жил — $w = 1$, высота жил — $d = 3$ м, расстояние между центрами полигонов — $L = 6$ м, магнитная восприимчивость мерзлого грунта — $K = 10^{-3}$ СИ; полупрозрачной областью отмечены зоны разброса значений F при отклонении высоты от указанной на $\pm 0,2$ м.

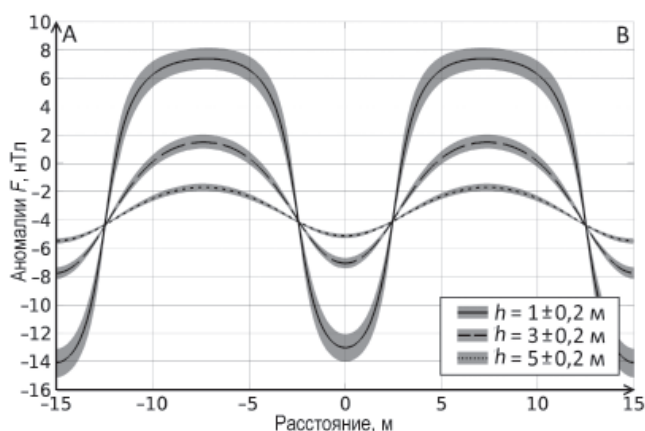


Рис. 8. Модель 2. Синтетические аномалии модуля вектора магнитной индукции (F) над полигонально-жильной структурой по профилю АВ (рис. 3) на разных высотах; ширина жил — $w = 3$, высота жил — $d = 10$ м, расстояние между центрами полигонов — $L = 15$ м, магнитная восприимчивость мерзлого грунта — $K = 10^{-3}$ СИ; полупрозрачной областью отмечены зоны разброса значений F при отклонении высоты от указанной на $\pm 0,2$ м.

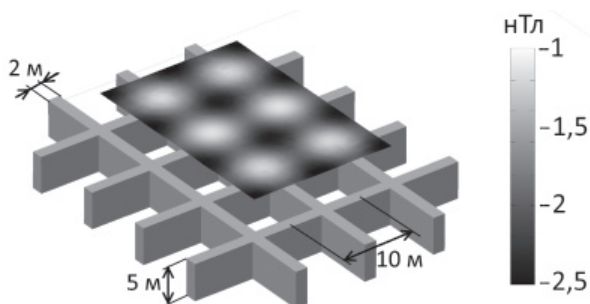


Рис. 9. Пример синтетического распределения аномального модуля вектора магнитной индукции (F) над полигонально-жильной структурой на высоте 3 м; ширина жил — $w = 2$, высота жил — $d = 5$ м, расстояние между центрами полигонов — $L = 10$ м, магнитная восприимчивость мерзлого грунта — $K = 10^{-3}$ СИ.

часто наблюдается в природе и зависит от условий их формирования (Washburn, 1979). Как видно из рис. 6, различие формы верхней границы незначительно влияет на ширину аномалий, при этом весьма существенно сказывается на их амплитуде (до 30 % разницы при сравнении случаев сужающихся и расширяющихся жил). В расчетах моделей 1 и 2 форма верхних границ ледяных жил была принята вертикальной. Результаты расчетов аномалий модуля вектора магнитной индукции на разных высотах приведены на рис. 7, 8.

На основании приведенных результатов расчетов можно заключить, что с учетом точности современной магнитометрической аппаратуры повторно-жильные льды могут быть уверенно выделены методом прецизионной магнитной съемки на высоте 1 м над уровнем верхней границы жил. На высоте 3 м выделение аномалий, связанных с жилами, возможно только при весьма низком (менее 0,5 нТл) уровне помех (в том числе вызванных неоднородностью вышележащего слоя). В модели 2 магнитные аномалии, превышающие 1 нТл, отчетливо прослеживаются до высоты 5 м над верхней границей жил. На высоте 1 м аномалии превышают 20 нТл, т.е. повторно-жильные льды такой геометрии могут

быть выявлены даже при значительно меньшем значении магнитной восприимчивости среды. Например, при $K = 10^{-4}$ СИ аномалии превысят 2 нТл. На рис. 9 приведена ожидаемая картина распределения магнитных аномалий на высоте 3 м, которая может быть построена по площадной сети измерений модуля вектора магнитной индукции над повторно-жильными льдами с параметрами, промежуточными для моделей 1 и 2: шириной жил 2 м, высотой 5 м и расстоянием между центрами полигонов 10 м при магнитной восприимчивости мерзлого грунта 10^{-3} СИ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Аномалии модуля вектора магнитной индукции на высотах нескольких метров над повторно-жильными льдами могут составлять единицы и первые десятки нТл в зависимости от размеров жил и магнитной восприимчивости вмещающих их мерзлых грунтов. Современная магнитометрическая аппаратура позволяет уверенно выделять такие аномалии, что дает возможность картировать методом наземной магнитной или низковысотной аэромагнитной съемки ледяные жилы, скрытые под слоем осадков мощностью до нескольких метров. Следует также отметить возможность применения для этой цели вертикального градиентометра, так как разница между рассчитанными значениями модуля вектора магнитной индукции в рассмотренных типичных случаях составляет несколько нТл на 2 м. Перспективным выглядит совмещение прецизионной магнитной съемки с электрическими и электромагнитными методами, поскольку сходные ледяные тела при различной температуре будут источниками близких по форме и величине магнитных аномалий, но при этом могут существенно различаться по электрическим свойствам. Метод магнитной съемки благодаря своим техническим преимуществам — скорости съемки и отсутствию необходимости прямого контакта с поверхностью — может занять важное место в комплексе методов исследований криолитозоны и эффективно решать задачи мерзлотной съемки, связанные с картированием распределения льда в верхнем слое многолетнемерзлых отложений.

Автор благодарит информационно-вычислительный центр Новосибирского государственного университета за предоставленные вычислительные ресурсы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бабанин В.Ф. Трухин В.И. и др. Магнетизм почв. Ярославль: Типография ЯГТУ, 1995. 222 с.
- Васильчук Ю.К. Повторно-жильные льды // Криосфера нефтегазоконденсатных месторождений полуострова Ямал. Криосфера Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения. Т. 2. М.: ООО «Газпром экспо», 2013. С. 318–325.
- Васильчук Г. И. Повторно-жильные льды Западной Сибири // Изв. АН СССР. Сер. геогр. 1966. № 5. С. 104–112.
- Коснырева М.В. Разработка комплекса геофизических методов для решения прикладных задач почвенного картирования: Автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. М., 2007. 135 с.
- Зыков Ю.Д. Геофизические методы исследования криолитозоны: Учебник. М.: Изд-во МГУ, 2007. 272 с.
- Паршин А.В. и др. Низковысотная беспилотная аэромагниторазведка в решении задач крупномасштабного структурно-геологического картирования и поисков рудных месторождений в сложных ландшафтных условиях // География и природные ресурсы. 2016. № 6. С. 144–149.
- Рекомендации по комплексированию геофизических методов при мерзлотной съемке / ПНИИИС М.: Стройиздат, 1987. 88 с.

Станиловская Ю.В., Мерзляков В.П. Вероятностная оценка опасности полигонально-жильных льдов для трубопроводов // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2013. № 3. С. 48–54.

Allred B.J., Daniels J.J., Reza Ehsani M. (ed.). Handbook of agricultural geophysics. CRC Press, 2008. 432 p.

Andersland O.B., Ladanyi B. An introduction to frozen ground engineering. Springer Science & Business Media, 2013. 352 p.

Becker H., Fassbinder J.W.E. Magnetic Prospecting in Archaeological Sites. Monuments and Sites VI. ICOMOS. 2001. 104 p.

Butler S.L., Sinha G. Forward modeling of applied geophysics methods using Comsol and comparison with analytical and laboratory analog models // Computational Geosciences. 2012. № 42. P. 168–176.

Cunningham M. et al. An experimental aeromagnetic survey with a rotary-wing unmanned aircraft system // SEG Technical Program Expanded Abstracts. 2016. P. 2129–2133.

Hauck C., Kneisel C. (Eds.). Applied geophysics in periglacial environments. Cambridge University Press, 2008. Vol. 240. 238 p.

Hodgetts L., Dawson P., Eastaugh E. Archaeological magnetometry in an Arctic setting: a case study from Maguse Lake, Nunavut // Journal of Archaeological Sciences. 2011. № 38. P. 1754–1762.

Kneisel C., Hauck C., Fortier R., Moorman B. Advances in geophysical methods of permafrost investigations // Permafrost and Periglacial Processes. 2008. № 19. P. 157–178.

Kvamme K.L. Magnetometry: Nature's gift to archaeology // Johnson, J.K. (ed.). Remote Sensing in Archaeology: An Explicitly North American Perspective. University of Alabama Press, Tuscaloosa, 2008. P. 205–234.

Landry D.B., Ferguson I.J., Milne I.J., Park R.W. Combined Geophysical Approach in a Complex Arctic Archaeological Environment: A Case Study from the LdFa-1 Site, Southern Baffin Island, Nunavut // Archaeological Prospection. 2015. № 22. P. 157–170.

Lauterbach R. Mikromagnetik-ein Hilfsmittel geologischer Erkundung // Wiss. Zeitschr. Univ. Leipzig. 1953. T. 3. S. 54.

Lonsdale K. Diamagnetic susceptibility and anisotropy of ice // Nature. 1949. № 164. P. 101.

Scott W., Sellmann P., Hunter J. Geophysics in the study of permafrost // Ward, S. (Ed.) Geotechnical and Environmental Geophysics. Society of Exploration Geophysics Tulsa. 1990. P. 355–384.

Martin P., Jenkin J., Adams F., Jorgenson M., Matz A., Payer D., Reynolds P., Tidwell A., Zelenak J. Wildlife Response to Environmental Arctic Change: Predicting Future Habitats of Arctic Alaska // Report of the Wildlife Response to Environmental Arctic Change (WildREACH): Predicting Future Habitats of Arctic Alaska Workshop, 17–18 November 2008. Fairbanks, Alaska: U.S. Fish and Wildlife Service, 2009. 138 p.

Washburn A.L. Geocryology – A Survey of Periglacial Processes and Environments. London, UK: Edward Arnold Ltd., 1979. P. 406.

Wolff C.B., Urban T.M. Geophysical analysis at the Old Whaling site, Cape Krusenstern, Alaska, reveals the possible impact of permafrost loss on archaeological interpretation // Polar Research. 2013. № 32. P. 1–12.

L.V. TSIBIZOV

ICE WEDGES IN ANOMALOUS MAGNETIC FIELD: NUMERICAL MODELING

Ice wedges could be sources of negative magnetic anomalies due to their low magnetic susceptibility in comparison with surrounding frozen ground. This allows their mapping using high-

precision magnetic survey. The work dedicated to analyze of typical models of polygonal-wedge structures in cryolithic zone. Total magnetic field anomalies are calculated at elevations of 1–5 m above the ice wedges upper boundary level. Ice wedge width varies from 1 to 3 m while polygon sizes vary from 6 to 15 m, respectively. Magnetic susceptibility of frozen ground assumed equal to 10^{-3} SI. Calculated anomalies magnitude amounts from several nT to several tens of nT. Provided estimations allows defining a necessary survey precision for ice wedge mapping. Ice wedges more than 3 m wide are observable in anomalous magnetic field even in the case of covering deposits thickness of up to 4 m on the condition that covering layers are laterally relatively uniform and magnetic susceptibility of frozen ground is about 10^{-3} SI.

Keywords: permafrost, magnetic survey.

СВЯЗЬ ТИПОВ КРИОЛИТОЗОНЫ ЗАПАДНО-АРКТИЧЕСКОГО ШЕЛЬФА С ЕГО ГЕОЛОГИЧЕСКИМИ ОСОБЕННОСТЯМИ

М.А. ХОЛМЯНСКИЙ¹, В.М. АНОХИН^{2,3,4}

¹ — ФГБУ «ВНИИОкеангеология», Санкт-Петербург, e-mail: holm936@rambler.ru

² — ФГБУН «Институт озероведения» РАН, Санкт-Петербург, e-mail: vladanokhin@yandex.ru

³ — Санкт-Петербургский научный центр РАН, Санкт-Петербург

⁴ — РГПУ им. А.И. Герцена, Санкт-Петербург

На основании интерпретации геофизических и геологических данных авторами была составлена карта криогенной геодинамики шельфа Баренцева и Карского морей, на которой выделены шесть основных типов строения разреза криолитозоны. Проведен анализ связи динамики криолитозоны с геоморфологическими, литологическими, геотермическими характеристиками шельфа Баренцева и Карского морей. По результатам этого анализа сделаны выводы о связи современного состояния слоя многолетнемерзлых и многолетнеохлажденных пород с глубиной их залегания, мощностью, температурой на поверхности, типом и литологическим составом отложений самой криолитозоны и вмещающих ее пород. Выявлено устойчивое соответствие стабильного состояния мерзлой зоны равнинным возвышенным участкам рельефа (плато), а нестабильного — пониженным участкам рельефа (синеклизам и желобам). Результаты анализа позволяют прогнозировать степень и позицию в разрезе оттайки криолитозоны в разных частях района исследования.

Ключевые слова: криолитозона, многолетнемерзлые породы, западно-арктический шельф, геоморфология, слой.

ВВЕДЕНИЕ

Формирование криолитозоны Западно-Арктического шельфа России в позднем кайнозое было обусловлено климатическими, литодинамическими и тектоническими процессами. Оно также определялось сформированными ранее геоморфологическим и тектоническими структурами. Вопросам, посвященным генезису, строению и развитию криолитозоны (КЛЗ) Баренцева, Карского и Белого морей посвящено сравнительно небольшое число отечественных и зарубежных работ.

К сожалению, все авторы опубликованных и фондовых материалов располагали скудными фактическими данными, не позволяющими в достаточной степени оценить реальные характеристики многолетнемерзлых пород (ММП), обычно определяемые по бурению и каротажу. Поэтому они использовали в первую очередь результаты термодинамического моделирования и метод аналогий, т.е. переноса характеристик ММП, детально изученных на суше, на близкие по геологическому строению и палеогеографии районы шельфа. Наиболее полное отображение известные материалы получили в атласах геокриологических карт, опубликованных на рубеже девяностых и

двухтысячных годов (Атлас, 2011; Атлас палеогеографических карт..., 1992; Баранов, 1977; Линдберг, 1972).

Один из основоположников геокриологического моделирования на шельфе А.А. Шарабатян выделяет четыре этапа формирования и развития ММП (Шарабатян, 1974). Он отмечает, что наибольший интерес представляют первые два этапа, связанные с регрессией и трансгрессией моря.

Первый этап — с начала периода многолетнего промерзания пород, предшествовавшего Ямальской трансгрессии, и до ее окончания. Промерзание началось в четвертичном периоде с похолоданием климата. С раннего плейстоцена и до казанцевского времени территория низменности была занята опресненными водами, южная граница которых проходила по 63-й параллели. На протяжении значительной части первого периода развития ММП водный бассейн располагался севернее 64–66 ° с.ш. Многолетнемерзлые породы в результате трансгрессии моря на юг оттаивали, оказавшись под слоем опресненных вод. Потому ММП, существующие в настоящее время к северу от этой широты, начали формироваться после регрессии моря.

Второй этап развития ММП охватывает вторую половину верхнего плейстоцена и часть голоцена (до климатического оптимума). По мере регрессии водного бассейна на протяжении казанцевского времени промерзание проходило на новых территориях, свободных от моря. На островах, появившихся на крайнем севере низменности при понижении уровня моря, началось эпигенетическое промерзание пород.

Последующее развитие ММП определялось потеплением климата и частичным протаиванием пород (климатический оптимум — третий этап) и последующим похолоданием и новым промерзанием пород (позднеголоценовое время — четвертый этап развития ММП).

Подробное описание строения позднеголоценовой мерзлой зоны в разрезе шельфа приводится канадскими и американскими исследователями для акватории моря Бофорта (Ferrians, 1994; Ferrians, Hobson, 1973; Hinz et al., 1998; Rogers, Morack, 1978; Permafrost in the Beaufort Sea, 1983), где буровыми работами установлено, что под поверхностными талыми отложениями общей мощностью 20 м залегает горизонт ММП, достигающий мощности несколько десятков метров. Большое количество скважин, пробуренных на шельфе Канады и Аляски, показывает, что этот горизонт встречается на значительной территории шельфа при глубине моря 10–20 м и на удалении от берега до десятков км.

Основная цель авторов настоящей работы — установить пространственную и, в меньшей степени, генетическую связь типов криолитозоны с основными геологическими элементами и на этом основании определить тенденции к изменению ее мощности на акватории шельфа Баренцева и Карского морей.

МЕТОДИКА

Настоящая работа тесно связана с анализом и обобщением результатов как предшествующих работ, так и работ самих авторов, проведенных в разные годы, в т.ч. морских работ на акватории Баренцева и Карского морей. В частности, для построения «Карты криогенной геодинамики шельфа Баренцева и Карского морей» мы использовали результаты выполненных нами электроразведочных работ методом становления электромагнитного поля в ближней зоне и сейсморазведочных работ. Горизонты многолетнемерзлых пород находят четкое отражение на кривых проводимости (Алхименко и др., 2004), что было использовано при построении карты, приведенной на рис. 1.

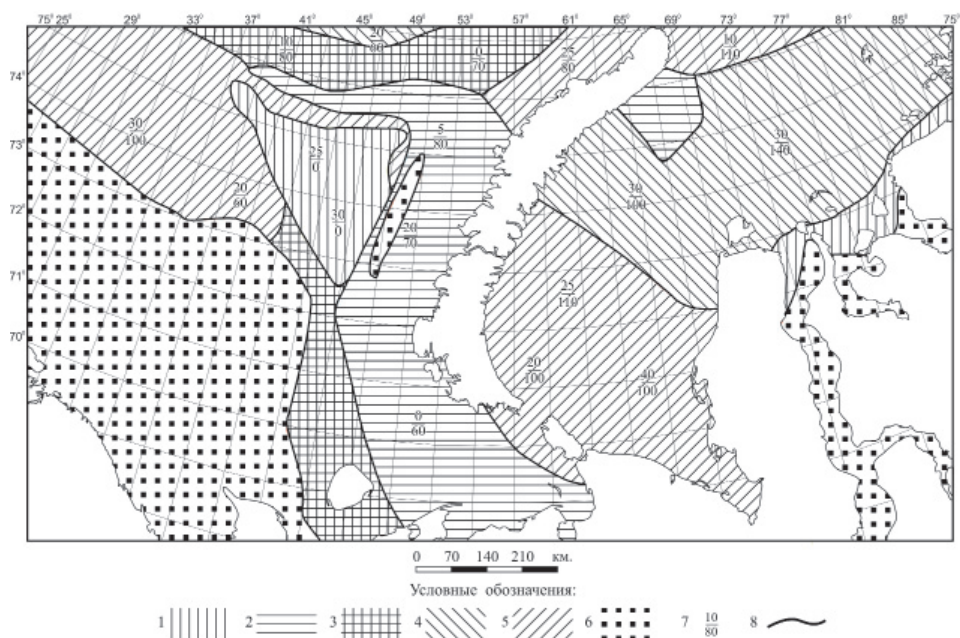


Рис. 1. Карта типов криолитозоны шельфа Баренцева и Карского морей.

1 — однослойная криолитозона, представленная верхнеплейстоцен-голоценовыми отложениями; 2 — однослойные реликтовые многолетнемерзлые отложения; 3 — двухслойные реликтовые многолетнемерзлые отложения; 4 — трехслойная криолитозона, представленная голоценовыми и двухслойными реликтовыми, преимущественно многолетнемерзлыми породами; 5 — трехслойная криолитозона, представленная голоценовыми и двухслойными реликтовыми, преимущественно многолетнеохлажденными породами; 6 — талые посткриогенные отложения; 7 — мощность криолитозоны: числитель — верхнеплейстоцен-голоценовых отложений, знаменатель — реликтовых многолетнемерзлых (многолетнеохлажденных) пород; 8 — границы геокриологических районов.

Авторами также использовались результаты моделирования, выполненного разными исследователями (Романовский и др., 1999; Соловьев, 1981; Криогеотермия и гидраты..., 1987; Шарабатян, 1974; Lozan et al., 2002). Эти результаты обобщены в работе Н.Н. Романовского (2011).

Сейсмические материалы (Hobson, 1967; Rogers, Morack, 1978) для геокриологических целей использовались избирательно. Если существует заверка выделенных на сейсмограммах геокриологических горизонтов материалами бурения или каротажа, пусть даже в ограниченном числе буровых скважин, на наш взгляд, данные сейсморазведки могут быть использованы. Это подтверждается материалами, полученными рядом авторов (Алхименко и др., 2004; Воронков, 2009; Зыков, 2007; Козлов, 2004; Скворцов и др., 2011; Ferrians, Hobson, 1973; Rogers, Morack, 1978).

При построении карты были детально проанализированы палеогеографические, геоморфологические и тектонические материалы, выполнена интерпретация собственных профильных электроразведочных измерений, определенного объема сейсмических данных и использованы геокриологические карты, построенные нами ранее самостоятельно или в соавторстве (Алхименко и др., 2004; Неизвестнов и др., 2005). Успешное использование геофизических материалов для геокриологических построений основывается на отличии петрофизических ха-

В качестве основной версии геоморфологического строения шельфа Баренцева и Карского морей была использована «Морфоструктурная схема Западно-Арктического шельфа России» В.В. Назимова, приведенная на рис. 2.

Для определения тенденций в изменении состояния криолитозоны были использованы следующие характеристики: геоморфологические, морфолитодинамические, литологические особенности; придонные температуры, элементы разломной тектоники.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Как известно, своим происхождением и последующей трансформацией многолетнемерзлые породы (ММП) обязаны этапам климатических похолоданий и потеплений. Пространственные границы криолитозоны, тип и мощность ММП в первую очередь определяются именно тектоно-океанологическим режимом арктического океана в разные геологические эпохи.

Характеристика этапов этого режима основана на анализе палеогеографических материалов с учетом схем, предложенных предшествующими исследователями (Абатурова и др., 2016; Атлас палеогеографических карт..., 1992; Баулин, 1970; Козлов, 2004; Мельников, Спесивцев, 1995; Неизвестнов и др., 2005; Рокос и др., 2009; Романовский, Тумской, 2011; Криогеотермия и гидраты..., 1987; Шарабатян, 1974; Lozan et al., 2002; Permafrost in the Beaufort Sea, 1983).

Конец самарского времени отмечен трансгрессией океана на юг, достигшей 61° с.ш. В основном вся площадь морского дна находилась тогда в немерзлом состоянии. На суше, расположенной южнее, мощность криолитозоны достигала 500–600 м. В конце казанцевского времени океан отступил на север до 65° с.ш., началось интенсивное промерзание освободившейся суши.

Конец зырянского времени ознаменован продолжением регрессии океана, южнее 61° мощность КЛЗ увеличивалась. То же характерно и для каргинского времени.

В сартанское время произошло похолодание климата, сменившееся потеплением, которое в голоцене опять сменилось похолоданием.

Потепление приводит к вытаяванию льда в подошве и кровле ММП, замене его охлажденной морской водой, что обеспечивает появление горизонтов многолетнеохлажденных пород (МОП), вмещающих ММП или полностью их заменивших. Мощность горизонтов охлажденных пород может меняться в широких пределах, зависящих от палеогеографических и современных температурных условий. В большинстве случаев сплошные ММП находятся между горизонтами охлажденных пород.

По заключению разных авторов (Баулин, 1970; Мельников, Спесивцев, 1995; Мельников и др. 2010; Морские инженерно-геологические исследования..., 2003; Неизвестнов и др., 2005; Рокос и др., 2009; Романовский и др., 1999; Соловьев, 1969; 1981; Криогеотермия и гидраты..., 1987; Lozan et al., 2002; Permafrost in the Beaufort Sea, 1983), мощности слоев могут достигать: ММП — до 800 м, МОП — до 100 м.

ММП, образованные на суше в периоды похолодания, переходят в субмаринные при затоплении и перекрываются, в случае трансгрессии моря, морскими осадками, накапливающимися в период потепления. Нам удалось установить четкую связь мощности ММП с геоморфологическим строением акватории. Во внешних частях шельфа состояние придонной толщи, прошедшей древнюю стадию преобразования, может быть охарактеризовано следующей структурой: верхний горизонт состоит из пород, в которых вытаявший лед заменен охлажденной морской водой с температурой

ниже 0 °С (МОП); средний горизонт представляют ненарушенные мерзлые горные породы, а еще ниже залегают породы, опять охлажденные за счет протаивания снизу.

Криолитозона имеет сплошное распространение до современных глубин моря 50–60 м. Прерывистое и островное распространение криолитозоны характерно для глубин от 50–60 до 80–100 м. Выше и ниже ММП находятся охлажденные породы мощностью до 100 м и более.

Наибольшая мощность криолитозоны в горстах — до 1000 м (в т.ч. мощность ММП до 700 м). Меньшая мощность криолитозоны свойственна грабенам (300–100 м). В них имеют место талики, возникшие в результате термокарстового процесса на этапе осушения и далее трансформировавшиеся в субмаринные после затопления.

В.А. Соловьев отмечал цикличность в смене холодных и теплых периодов в изучаемом регионе с периодичностью около 100 тыс. лет (Соловьев, 1981). Из этого следует, что криолитозона неоднократно подвергалась периодическим более или менее интенсивным оттайкам. Арктическому бассейну свойственны как сингенетические, так и эпигенетические ММП. Но в большинстве случаев мы наблюдаем полигенетический тип ММП.

По условиям формирования ММП шельфа подразделяются на два типа: реликтовые, сформировавшиеся в континентальных условиях и в дальнейшем перешедшие в субаквальное положение, и ММП, сформировавшиеся под припайным льдом. Первый тип характеризуется мощностью от единиц до первых сотен метров, разнообразием криогенных текстур, наличием подмерзлотных, внутримерзлотных вод. Мощности второго типа не превышают первые десятки метров.

На основании анализа палеогеографической, палеоклиматической и геоморфологической обстановок на акватории Баренцева и Карского морей в четвертичное время сформулированы различные варианты строения мерзлой зоны шельфа этих морей:

- ММП и МОП отсутствуют, но присутствуют посткриогенные талые породы;
- однослойная криолитозона, представленная ММП, или МОП верхнеплейстоцен-голоценового возраста;
- однослойная криолитозона, реликтовые ММП;
- двуслойная реликтовая криолитозона, состоящая из двух слоев ММП;
- трехслойная криолитозона, представленная голоценовым слоем ММП и двумя слоями реликтовых ММП.

Все вышеописанные типы разреза криолитозоны представлены на карте, приведенной на рис. 1.

Естественно, данная карта является одной из возможных версий строения криолитозоны. Версия, основанная на перечисленных выше материалах, требует для ее уточнения проведения какого-то объема буровых и связанных с ними каротажных работ. Но, по мнению авторов, она имеет право на существование.

Как отмечает С.А. Козлов (2004, с. 16), «современный рельеф шельфов Баренцева и Карского морей характеризуется высокой расчлененностью, подчеркиваемой присутствием обширных депрессий и желобов, платообразных подводных возвышенностей, валов, впадин и других крупных форм рельефа».

Такая характеристика соответствует использованной нами схеме, приведенной на рис. 2.

Современные морфоструктуры рельефа генетически тесно связаны с более древними — герцинскими, каледонскими, байкальскими тектоническими структу-

рами (Атлас, 2011; Атлас палеогеографических карт..., 1992). В свою очередь геоморфология, лито- и гидродинамика в определенной степени определяют придонные температуры и тренды их пространственного распределения.

Температуры на поверхности дна способствуют сохранению положения кровли ММП (постоянные отрицательные значения) или ее опусканию (постоянные положительные значения). Интенсивность этого процесса существенно зависит от теплопроводности донных отложений.

Изменение положения подошвы криолитозоны связано с влиянием положительного температурного градиента, обеспеченного поступлением теплового потока снизу.

Наши измерения, выполненные в период 1992–2004 гг. и нашедшие отражение на соответствующих картах (Алхименко и др., 2004), показывают устойчивую закономерность понижения придонной температуры с юга на север. Если в области Восточно-Печорской и Югорской впадин она составляет $+2... +3$ °С, то в Северо-Баренцевской синеклизе и в северной части Новоземельского желоба — понижается до -2 °С, а в Южно-Баренцевской синеклизе меняется от $+1$ до 0 °С.

На основании Геокриологической карты (рис. 1) проведен анализ влияния вышеуказанных характеристик шельфа на состояние криолитозоны в соответствии с ее типами.

Однослойная криолитозона, представленная верхнеплейстоценовыми-голоценовыми отложениями (рис. 1), имеет мощность 20–30 м. Выделяются две зоны ее распространения.

Первая зона — в пределах Южно-Баренцевской синеклизы и Лудловской мега-седловины. Средняя глубина залегания кровли КЛЗ от донной поверхности — 20 м. Придонные температуры: $-1... -1,5$ °С. Генерализованный литологический разрез представлен снизу вверх: доломитами, глинами, слоем с высоким содержанием льда, пелитом. Такой состав отложений обеспечивает (с учетом их теплопроводности) стабильное состояние КЛЗ.

Вторая зона — область шельфа, примыкающая к береговой зоне, расположенной между устьями Обской губы и Енисейского залива. Генерализованный литологический разрез: карбонатная глина, глина, известняк, алевроит. Средняя температура на поверхности дна $+1$ °С. Глубина залегания кровли КЛЗ 30–40 м, мощность 20–25 м. С учетом теплопроводности отложений, близости берега с ММП значительной мощности и в то же время активной литодинамики делается заключение о стабильном состоянии КЛЗ.

Реликтовая однослойная КЛЗ (рис. 1) протягивается с юга на север на значительной площади, примыкающей к архипелагу Новая Земля с запада, и имеет ограниченное распространение в Карском море (небольшой участок, примыкающий к северной части Новой Земли с востока). Западная часть лежит в пределах прогиба Седова и Южно-Новоземельского желоба, Гусиного плато, Куренцовской террасы. Литологический разрез: сильно льдистые отложения, доломиты, сильно льдистые отложения, пелиты. В северной части этой зоны — отрицательные температуры.

Имеет место ограниченное оттаивание поверхностной части КЛЗ, в нижней части ее состояние стабильно.

Южная часть расположена в области положительных температур, значения которых увеличиваются к югу до $2,5$ °С. Отмечается значительный темп оттаивания в верхней части КЛЗ и весьма медленный — в нижней.

Площадь распространения этого типа КЛЗ в Карском море находится в области Новоземельского желоба и имеет близкий описанному выше литологический разрез. Значительные отрицательные температуры обеспечивают стабильное состояние КЛЗ в ее приповерхностной части и медленное оттаивание снизу.

Двухслойные реликтовые многолетнемерзлые отложения (рис. 1) имеют сравнительно ограниченное распространение, протягиваясь полосой с востока на запад в пределах Северо-Баренцевской синеклизы и с юга на север от Южно-Баренцевской синеклизы до колгуевской возвышенности.

В северной части глубина залегания кровли КЛЗ составляет 50–69 м. Отрицательные температуры на поверхности дна равняются $-1,8... -2,2$ °С.

Литологический разрез: доломиты, известняки, пелит. Хорошая теплопроводность отложений приводит к значительной оттайке снизу и ограниченной сверху.

В южной области распространения КЛЗ литологический разрез представлен карбонатными глинами, известняками и пелитами. Температуры на поверхности дна составляют $2-2,5$ °С. Прогнозируется значительная оттайка сверху и снизу слоя КЛЗ.

Область трехслойной КЛЗ, представленной голоценовыми и двухслойными реликтовыми, преимущественно, многолетнемерзлыми породами (рис. 1), протягивается широкой полосой с юго-запада на северо-восток, прилегая с запада к берегу Новой Земли. Основные структуры, также протягивающиеся параллельно берегу Новой Земли: новоземельский желоб, мегавал Литке и Центральный Карский прогиб. Область характеризуется значительной суммарной мощностью ММП (до 190 м) при глубине залегания ее кровли до 25–40 м. В северной половине этой области литологический разрез представлен доломитами, известняками, пелитами; в южной — доломитами, глинами, известняками, пелитами. Температуры на севере отрицательные (до $-2,5$ °С), на юге — положительные (до $+1,5$ °С). Характеризуется интенсивным протаиванием КЛЗ снизу на севере и менее интенсивным (умеренным) в южной части этой области.

Область трехслойной КЛЗ, представленной голоценовыми и двухслойными реликтовыми многолетнеохлажденными породами, занимает обширную площадь в рассматриваемом регионе шельфа (рис. 1).

Мощность КЛЗ достигает 150 м. На западном участке этой области глубина залегания кровли ММП составляет 20–30 м. На северных участках значения мощности достигают 130 м, глубины залегания кровли 40 м. Температуры поверхности дна на всех участках равняются $-1,2... -2,0$ °С. Участки в основном расположены в области отрицательных геоморфологических структур, таких, как центрально-баренцевская синеклиза. Литологический разрез: сланцы, доломиты, глины, пелиты. Можно предположить умеренное оттаивание снизу.

Четвертый участок трехслойной КЛЗ, расположенный в пределах Югорской впадины и Центрального Карского прогиба, занимает обширную площадь шельфа Карского моря, примыкая с запада к берегу южной половины архипелага Новая Земля. Характеризуется положительными придонными температурами (около $+1$ °С). Суммарная мощность КЛЗ до 150 м, глубина залегания ее кровли — 30–50 м. Литологический разрез: доломиты, глины, известняки, алевроиты. Отметим умеренное растепление слоя ММП сверху и снизу.

Естественно предположить, что обширные области талых посткриогенных отложений в южной части акватории и Баренцева, и Карского морей находятся в стабильном состоянии.

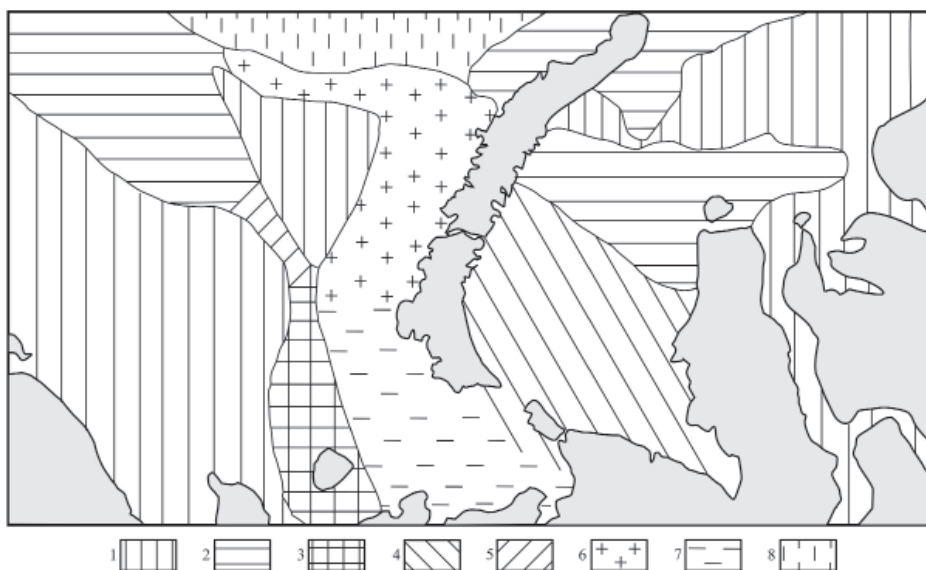


Рис. 3. Карта криогенной геодинамики шельфа Баренцева и Карского морей.

Состояние криолитозоны: 1 — стабильное; 2 — умеренное оттаивание снизу; 3 — интенсивное оттаивание снизу; 4 — умеренное оттаивание сверху и снизу; 5 — интенсивное оттаивание сверху и снизу; 6 — умеренное оттаивание сверху; 7 — интенсивное оттаивание сверху и умеренное снизу; 8 — интенсивное оттаивание снизу и умеренное сверху.

На рис. 3 приводится карта криогенной динамики, составленная нами для акватории Баренцева и Карского морей. На карте выделены площади криолитозоны, характеризующиеся:

- стабильным состоянием;
- умеренным оттаиванием снизу;
- интенсивным оттаиванием снизу;
- умеренным оттаиванием сверху и снизу;
- интенсивным оттаиванием сверху и снизу;
- умеренным оттаиванием сверху;
- интенсивным оттаиванием сверху и умеренным снизу;
- интенсивным оттаиванием снизу и умеренным сверху.

Отсутствие необходимого объема буровых и каротажных данных не позволяет придать этим грациям количественные оценки.

ВЫВОДЫ

Выполненный анализ динамики криолитозоны шельфа Баренцева и Карского морей позволяет сделать следующие выводы.

Современное состояние слоя многолетнемерзлых и многолетнеохлажденных пород определяется в первую очередь глубиной залегания и общей их мощностью, температурой на поверхности, типом и литологическим составом отложений самой криолитозоны и вмещающих ее пород.

Результаты анализа позволяют оценить состояние криолитозоны в разных частях района исследования как стабильное или нестабильное, а также прогнозировать степень и позицию в разрезе оттайки криолитозоны в разных частях района исследования.

Выявлено устойчивое соответствие стабильного состояния мерзлой зоны равнинным возвышенным участкам рельефа (плато), а нестабильного, связанного с процессами растепления в верхней и нижней части мерзлой зоны, — пониженным участкам рельефа (синеклизам и желобам). Таким образом, выявлена частичная связь состояния мерзлой зоны с геоморфологической позицией (при необходимости более детального изучения данного вопроса).

Составленная Карта криогенной геодинамики шельфа Баренцева и Карского морей может служить основой для дальнейших исследований в данном направлении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абатурова И.В., Стороженко Л.А. Петрова И.Г., Савинцев И.А.* Строение и закономерности распространения многолетнемерзлых пород в северной геокриологической зоне // Сергеевские чтения. М.: Российский институт дружбы народов, 2016. С. 531–535.
- Алхименко А.П., Великанов Ю.С., Карцев А.Ю., Холмянский М.А.* Экологическая безопасность при освоении нефтегазовых месторождений на шельфе Карского моря. СПб.: СПбГУ, 2004. 160 с.
- Атлас: Геология и полезные ископаемые шельфов России. Лист 3–12 Палеокриолитозона. М.: Изд-во ГИН РАН, 2011.
- Атлас палеогеографических карт шельфов Евразии в мезозое и кайнозое. Т. 1, 2. ГИН АН СССР, Робертсон ГРУИ, 1992.
- Баранов И.Я.* Геокриологическая карта СССР. Масштаб 1:5000000. М.: ГУГК СССР, 1977.
- Баулин В.В.* История «подземного оледенения» Западной Сибири в связи с трансгрессией Арктического бассейна // Северный Ледовитый океан и его побережье в кайнозое. Л.: Гидрометеиздат, 1970. С. 404–409.
- Воронков О.К.* Инженерная сейсмика в криолитозоне: Изучение строения и свойств мерзлых и талых горных пород и массивов. СПб.: Изд-во ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», 2009. 401 с.
- Зыков Ю.Д.* Геофизические методы исследования криолитозоны: Учебник. М.: Изд-во МГУ, 2007, 272 с.
- Козлов С.А.* Инженерная геология Западно-Арктического шельфа России. СПб.: ВНИИОкеангеология, 2004. 150 с.
- Линдберг Г.У.* Крупные колебания уровня океана в четвертичный период. Л.: Наука, 1972. 548 с.
- Мельников В.П., Спесивцев А.Н.* Инженерно-геологические и геокриологические условия шельфа Баренцева и Карского морей. Новосибирск: Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 1995. 198 с.
- Мельников В.П., Скворцов А.Г., Малкова Г.В. и др.* Результаты изучения геокриологических условий арктических территорий с помощью геофизических методов // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. № 1. С. 171–180.
- Морские инженерно-геологические исследования. СПб.: ВНИИОкеангеология, 2003. 177 с.
- Неизвестнов Я.В., Боровик О.В., Козлов С.А., Холмянский М.А.* Поддонная криолитозона Баренцева, Карского и Белого морей: Материалы третьей конференции геокриологов России. М.: МГУ, 2005. Т. 3. С. 184–190.
- Рокас С.И., Длугач А.Г., Локтев А.С., Костин Д.А., Куликов С.Н.* Многолетнемерзлые породы шельфа Печорского и Карского морей: генезис, состав, условия распространения и залегания // Инженерные изыскания. 2009. № 10. С. 38–41.
- Романовский Н.Н., Холодов А.Л., Гаврилов А.В.* Мощность мерзлых толщ восточной части шельфа моря Лаптевых (результаты моделирования) // Криосфера Земли. 1999. Т. 3. № 2. С. 22–32.
- Романовский Н.Н., Тумской В.Е.* Ретроспективный подход к оценке современного распространения и строения шельфовой криолитозоны восточной Арктики // Криосфера Земли. 2011. Т. XV. № 1. С. 3–14.

Скворцов А.Г., Царев А.М., Садуртдинов М.Р. Особенности использования сейсмических методов при инженерно-геокриологических исследованиях // Материалы Четвертой конференции геокриологов России (Москва, 7–9 июня 2011 г.). М., 2011. Т. 1. С. 225–232.

Соловьев В.А. О связи некоторых характеристик мерзлой зоны с тектоническим строением Усть-Енисейской впадины // Гидрогеология Енисейского Севера. Л.: НИИГА, 1969. Вып. 1. С. 90–96.

Соловьев В.А. Прогноз распространения реликтовой субаквальной мерзлой зоны (на примере восточно-арктических морей) // Криолитозона арктического шельфа. Якутск: ИМ СО АН СССР, 1981. С. 28–38.

Криогетермия и гидраты природного газа в недрах Северного Ледовитого океана. Л.: НИИГА, 1987. 226 с.

Холмянский М.А. Локальные естественные электрические поля арктического шельфа СССР: Автореф. ... д-ра геол.-минерал. наук. Л., 1986. 38 с.

Шарабатьян А.А. Экстремальные оценки в геотермии и геокриологии. М.: Наука, 1974. 124 с.

Ferrians O.J. Permafrost in Alaska // The Geology of North America. 1994. Vol. G-1. P. 845–854.

Ferrians O.J., Hobson G.D. Mapping and predicting permafrost in North America. A review 1963–1973 in Permafrost: North American contribution to the Second International Conference. Washington, National Academy of Sciences, 1973. P. 479–498.

Hinz K., Delisle G., Block M. Seismic evidence for the depth extent of permafrost in shelf sediments of the Laptev sea, Russian arctic // PERMAFROST – Seventh International Conference (proceedings). Yellowknife (Canada), Collection Nordicana. 1998. № 55. P. 53–57.

Hobson G.D. Hammer seismic investigation, Good Spirit Lake area // Geological Survey of Canada, Paper. 1967. № 1. P. 37–41.

Lozan J., Grabi H., Hupfer P. Climate of the 21 st century: changes and risks: scientific facts. Hamburg: Wissenschaftliche Auswertungen, 2001. 450 p.

Rogers J.C., Morack J.L. Geophysical investigation of offshore permafrost, PrudHoe Bay, Alaska // Proc. of the 3th Intern. Conf. on Permafrost, Edmonton, Canada. 1978. Vol. 1. P. 560–566.

Permafrost in the Beafort Sea, Alaska // Proc. of the 4th Intern. Conf. on Permafrost, Fairbanks, USA. 1983. Vol. 1. P. 894–898.

M.A. KHOLMYANSKII, V.M. ANOKHIN

THE CONNECTION BETWEEN THE CRYOLITHOZONE TYPES OF THE WEST ARCTIC SHELF AND ITS GEOLOGICAL FEATURES

Based on the interpretation of geophysical and geological data, the authors compiled the Map of cryogenic geodynamics of the shelf of the Barents and Kara Seas, where six basic types of the structure of the cryolithozone section were identified. The relationship between the dynamics of the cryolithozone and the geomorphological, lithological, and geothermal characteristics of the shelf of the Barents and Kara seas is analyzed. Based on the results of this analysis, conclusions have been drawn on the relationship between the current state of the layer of permafrost and multiyear-cooled rocks with the depth of their bedding, thickness, surface temperature, type and lithological composition of the deposits of the cryolithozone itself and its enclosing rocks. Steady correspondence of the stable state of the frozen zone to the flat elevated areas of the relief (plateau) was revealed, and unstable to the lowered relief areas (synclises and gullies). The results of the analysis make it possible to predict the degree and position in the section of defrosting of cryolithozone in different parts of the study area.

Keywords: cryolithozone, permafrost, western-Arctic shelf, geomorphology, layer.

СТРАНИЦЫ ИСТОРИИ

УДК 341.241:502.17(99(091))

Поступила 20 марта 2017 г.

ПРЕДПОСЫЛКИ СОЗДАНИЯ И СОВРЕМЕННАЯ РОЛЬ
МАДРИДСКОГО ПРОТОКОЛА В СИСТЕМЕ ДОГОВОРА ОБ АНТАРКТИКЕ

В.В. ЛУКИН

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

4 октября 2016 г. исполнилось 25 лет со дня подписания в испанской столице — г. Мадриде представителями 26 Консультативных Сторон Договора об Антарктике Протокола по охране окружающей среды к Договору об Антарктике, который в международной практике часто называется Мадридским Протоколом. Это событие стало значительной вехой развития практической деятельности антарктического сообщества, происходившего в конце XX в. на общем политическом фоне усиления заинтересованности многих западных держав в вопросах охраны окружающей среды на планете. Начиная с 1992 г. выполнение основных целей Мадридского Протокола и определение роли и места Антарктики в глобальных климатических изменениях стали ведущими в проблематике ежегодных Консультативных совещаний по Договору об Антарктике (КСДА) и других органов управления Системой Договора об Антарктике. Так, с XXII по XXXIX КСДА (с 1998 (год вступления в силу Мадридского протокола) по 2016 г.) правительственными делегациями Консультативных сторон было представлено 962 рабочих и 2109 информационных документов. Из них по проблематике Мадридского Протокола — 554 рабочих и 717 информационных документов, что составляет 58 % для рабочих и 46 % для информационных от общего числа таких документов. На этих же совещаниях была принята 161 Мера, из которых 153 — по проблематике Мадридского Протокола, что составляет 95 % от общего количества принятых Мер.

На XXXIX КСДА в г. Сантьяго (Чили), проходившем с 23 мая по 1 июня 2016 г., один из рабочих дней совещания был посвящен симпозиуму «25 лет принятия Мадридского Протокола». В ходе его проведения были заслушаны доклады по следующим направлениям:

«Протокол как важное всемирное рамочное соглашение о сохранении и охране окружающей среды» и «Эффективность Протокола». По первому направлению были представлены доклады: «История, цели и влияние Протокола» (США) и «Протокол в сравнении с глобальными и региональными рамочными соглашениями по вопросам окружающей среды» (Норвегия). По второму направлению — «Анализ Протокола по охране окружающей среды и Приложений к нему» (Чили), «Эффективность Протокола с точки зрения науки» — Научный комитет антарктических исследований (СКАР), «Влияние Протокола по охране окружающей среды на результаты и поддержку научной деятельности» — Совет управляющих национальных антарктических программ (КОМНАП), «Протокол по охране окружающей среды Антарктики с точки зрения экологических Негосударственных Организаций» — Коалиция стран Южного океана и Антарктики (АСОК), «Протокол по охране окружающей среды Антарктики с точки зрения Международной ассоциации антарктических туристических операторов» (МААТО), «Вопросы Приложения VI к Протоколу» (Германия).

Подготовленный к этому симпозиуму российский доклад организаторами совещания не был включен в список презентаций. Вероятной причиной тому стала особая позиция делегации нашей страны по данному вопросу, которая значительно контрастировала с предложенной западными странами точкой зрения.

Настоящая статья призвана ознакомить специалистов в области международных отношений, международного права и охраны окружающей среды с российской позицией по данному вопросу, которая на XXXIX КСДА докладывалась в ходе публичных обсуждений вышеуказанных докладов.

СИСТЕМА ДОГОВОРА ОБ АНТАРКТИКЕ

Международное сообщество в конце XIX и в первой половине XX в. дважды пыталось организовать комплексное исследование Антарктики по согласованным программам в ходе проведения первого (1882–1883 гг.) и второго (1932–1933 гг.) Международных полярных годов. Однако недостаточный уровень развития морских судов ледового класса и полярной авиации, а также экономический кризис многих ведущих мировых держав не позволили в полной мере реализовать эти проекты. В 1953 г. несколько ведущих американских геофизиков предложили Международному совету научных союзов (МСНС) новый крупный международный исследовательский проект в Антарктике, приуроченный к предстоящему в 1957–1958 гг. максимуму солнечной активности. В ходе обсуждения этого предложения Всемирная метеорологическая организация ООН, в целом поддержав это начинание, предложила распространить его на весь земной шар и назвать проект — Международный геофизический год (МГГ). Для подготовки и обсуждения комплексных научных программ МСНС создал в 1954 г. несколько специальных комитетов, один из которых был назван антарктическим (СКАИ). Несмотря на то, что СССР в те годы еще не был членом МСНС, отечественные специалисты из Академии наук СССР и некоторых заинтересованных министерств и ведомств приняли активное участие в разработке этого проекта на подготовительных сессиях СКАИ в сентябре–октябре 1954 г. в Риме, сентябре 1955 г. в Брюсселе и июле–августе 1956 г. в Париже. 22 декабря 1954 г. президент Академии наук СССР А.Н. Несмеянов, министр морского флота СССР В.Г. Бакаев, министр рыбной промышленности СССР А.А. Ишков и исполняющий обязанности начальника Главного управления Гидрометслужбы при Совете Министров СССР М.Е. Иванов направили письмо в адрес Первого Секретаря ЦК КПСС Н.С. Хрущева с предложением об организации Советской антарктической экспедиции, в условиях активизации некоторых западных держав в реализации своих ранее заявленных территориальных прав на «антарктические сектора» и с учетом предложений МСНС о Проекте МГГ. 13 июля 1955 г. было принято Постановление Совета Министров СССР «Об организации комплексной антарктической экспедиции» Академии наук СССР, а 30 ноября 1955 г. из порта Калининград в свой первый антарктический рейс вышел советский дизель-электроход «Обь» с участниками Первой КАЭ во

главе с заместителем директора АНИИ, Героем Советского Союза М.М. Сомовым. 13 февраля 1956 г. была открыта первая советская антарктическая станция Мирный, к которой в последующие два года добавились станции: Пионерская, Комсомольская, Восток, Советская, Оазис, Полюс недоступности. Наша страна не только уверенно вошла в состав государств, принявших активное участие в реализации программы МГГ, но и публично подтвердила свой высокий статус великой полярной державы в Арктике и в Антарктике.

Вместе с СССР непосредственное участие в натурных исследованиях Антарктики приняли национальные программы Австралии, Аргентины, Бельгии, Великобритании, Новой Зеландии, Норвегии, США, Франции, Чили, ЮАС, Японии. Одним из главных принципов выполнения работ по программе МГГ стало широкомасштабное международное сотрудничество между вышеназванными странами в области науки и логистики. Это обстоятельство во многом способствовало развитию предложения Государственного Департамента США о созыве международной конференции по Антарктике между участниками выполнения программы МГГ в этом регионе. Оно было разослано 2 мая 1958 г. Дипломатическим ведомством США в министерства иностранных дел 11 государств, среди которых был и МИД СССР. В этой ноте Госдеп США официально изложил свою позицию в отношении Антарктики и создания правового механизма международного управления этим регионом. Предлагалось объявить Антарктику зоной мира, международного сотрудничества и науки, в которой будут запрещены любые действия военного характера, хранение оружия, боеприпасов и ядерных отходов. Данный подход во многом соответствовал позиции СССР в ранее изложенном Меморандуме Совета Министров СССР по вопросам Антарктики от 9 июня 1950 г.

В ответной Ноте в адрес Госдепа США от 2 июня 1958 г. МИД СССР поддержал предложение США о созыве международной Антарктической конференции и изложил свою позицию в отношении этого региона планеты. Во многом, в том числе и в отношении ранее заявленных территориальных претензий в Антарктике, позиция СССР и США были схожи.

После согласования со всеми участниками натурных исследований Антарктики по программе МГГ, 15 октября 1959 г. в г. Вашингтоне была открыта Антарктическая конференция, которая завершилась 1 декабря 1959 г. подписанием Договора об Антарктике. Этот акт международного права объявил Южный полярный регион,

расположенный к югу от параллели 60° ю. ш., областью мира, международного сотрудничества и науки. Статьей IV этого Договора все ранее заявленные территориальные претензии в Антарктике были объявлены «замороженными». Этот оригинальный правовой термин означал невозможность заявления каких-либо новых территориальных претензий в регионе, а государства, ранее заявившие подобные претензии, не могли расширять свой статус владения такими территориями выше уровня, который существовал на 1 декабря 1959 г. В Антарктике было запрещено проведение ядерных взрывов и хранение радиоактивных отходов. Контроль за соблюдением требований Договора об Антарктике мог осуществляться с помощью национальных или коллективных инспекций объектов антарктической инфраструктуры Сторон Договора. Последний был открыт для присоединения любых государств — членов ООН, при этом Договор об Антарктике не входил в структуру этой международной организации. Для обсуждения любых вопросов в отношении международного сотрудничества и практической деятельности в регионе было образовано Консультативное совещание по Договору об Антарктике (КСДА) как высший орган управления Договора. В обсуждении вопросов на таких совещаниях, принятии решений или наложении права вето на них могли участвовать только те Стороны Договора, которые имели активно действующую национальную антарктическую программу или научную станцию. Все решения в результате обсуждения на КСДА принимались консенсусом. Такие решения КСДА до 1994 г. включительно назывались Рекомендациями, а начиная с 1995 г. — Мерами КСДА. Вступление их в правовую силу обеспечивалось только после их официального одобрения всеми Консультативными сторонами Договора, после чего они использовались как официальное дополнение к оригинальному тексту Договора об Антарктике 1959 г. 23 июня 1961 г. после ратификации текста Договора об Антарктике 1959 г. всеми 12 участниками Антарктической конференции в Вашингтоне он вступил в силу, а правительства стран, учредивших его, получили статус Консультативных сторон Договора (Австралия, Аргентина, Бельгия, Великобритания, Новая Зеландия, Норвегия, СССР, США, Франция, Чили, ЮАС, Япония). С этого момента на 23 мая 2016 г. к Договору об Антарктике присоединилось еще 41 государство, 17 из которых получили статус Консультативных сторон (Болгария, Бразилия, Германия, Индия, Испания, Италия, КНР, Ни-

дерланды, Перу, Польша, Украина, Уругвай, Финляндия, Чехия, Швеция, Эквадор, Южная Корея) и 24 — статус Неконсультативных сторон (Австрия, Белоруссия, Венгрия, Венесуэла, Гватемала, Греция, Дания, Исландия, Канада, Казахстан, Колумбия, КНДР, Куба, Малайзия, Монголия, Монако, Пакистан, Папуа-Новая Гвинея, Португалия, Румыния, Словакия, Турция, Швейцария, Эстония). Таким образом, в настоящее время статусом Консультативных сторон Договора обладают 29 государств. Рост количества участников Договора об Антарктике был связан с развитием системы правовых механизмов, вниманием к его деятельности со стороны ООН и желанием присоединиться к изучению шестого континента и окружающих его морей на благо развития своих стран и всего человечества. Наибольшее число стран, присоединившихся к Договору, было отмечено в период с 1979 по 1990 г.

Это обстоятельство во многом было связано со сменой направления основного вектора развития деятельности антарктического сообщества. Во второй половине 1960-х гг. закончился «романтический» период изучения Антарктики, когда главной целью национальных антарктических программ было выполнение задач МГТ 1957–1958 гг. и использование его научного наследия. В этот период во многих развитых западных странах разгорелся экономический кризис, поэтому правительства государств, представляющих Консультативные стороны Договора, стали требовать от своих национальных антарктических программ практической отдачи результатов их научных исследований. На более эффективной формой получения таких результатов в Антарктиде стали прикладные исследования по возможности использования морских биологических, минеральных и углеводородных ресурсов. Это направление деятельности не могло пройти мимо внимания участников КСДА, тем более что им был хорошо известен негативный опыт бесконтрольного и нерегулируемого зверобойного и китобойного промыслов в антарктических водах в XIX и первой половине XX в. В результате этого процесса в структуре КСДА были созданы: Конвенция по сохранению антарктических тюленей 1972 г., (вступила в силу в 1978 г., страна-депозитарий — Великобритания) и Конвенция по сохранению морских живых ресурсов Антарктики 1980 г. (вступила в силу в 1982 г., страна-депозитарий — Австралия). На 23 мая 2016 г. участниками 1-й Конвенции являлись: Австралия, Аргентина, Бельгия, Бразилия, Великобритания, Германия,

Италия, Канада, Норвегия, Пакистан, Польша, Россия, США, Франция, Чили, ЮАР, Япония и 2-й: Аргентина, Австралия, Бельгия, Болгария, Бразилия, Вануату, Великобритания, Германия, Греция, Европейский союз, Индия, Испания, Италия, Канада, КНР, Острова Кука, Республика Корея, Маврикий, Намибия, Нидерланды, Новая Зеландия, Норвегия, Пакистан, Панама, Перу, Польша, Россия, США, Украина, Уругвай, Финляндия, Франция, Чили, Швеция, ЮАР, Япония.

Северная граница Конвенции по сохранению антарктических тюленей проходит по параллели 60° ю. ш., т.е. совпадает с северной границей Договора об Антарктике. В то же время аналогичная граница Конвенции по сохранению морских живых ресурсов Антарктики в некоторых районах проходит значительно севернее, достигая параллелей 55° ю. ш., 50° ю. ш., 45° ю. ш. Дело в том, что авторы Конвенции 1980 г. отождествляют положение ее северной границы со среднесуточным положением Южного полярного океанического фронта — Антарктической конвергенцией (область схождения холодных антарктических и более теплых субантарктических поверхностных вод). Эта фронтальная зона является физической границей Антарктики.

Статьей II Конвенции по сохранению морских живых ресурсов в Антарктике сохранение морских живых ресурсов региона определяется главной целью этого акта международного права. Однако термин «сохранение» подразумевает и рациональное использование морских биологических ресурсов региона. Таким образом, настоящая Конвенция регулирует промысел плавниковых рыб, криля, кальмаров, крабов в антарктических водах, при создании специальных мер по естественному воспроизводству морских промысловых объектов. Наиболее эффективными мерами являются временный запрет в закрытых на промысел районах и проведение научного мониторинга состояния морского биологического разнообразия вод Южного океана.

Кроме биологических ресурсов Южного полярного региона, антарктическое сообщество проявляло серьезный интерес к освоению минеральных углеводородных ресурсов в Антарктике. К 1978 г. правительственными кругами Великобритании было получено более 50 заявок от британских промышленных компаний на проведение геологоразведочных работ по поиску запасов углеводородного сырья на шельфе Фолклендских островов, аналогичные заявки поступали в Великобританию и на антарктические районы. Подобные обращения в эти же годы имели место в США, Новой Зеландии, Франции,

а также в некоторых странах, не являющихся участниками Договора об Антарктике.

Эти шаги не могли быть не отмеченными участниками КСДА. Впервые Консультативные стороны подошли к вопросу освоения минеральных ресурсов Антарктики на VI КСДА в 1970 г. в г. Токио (Япония). Однако стороны не пришли к согласованному решению по данному вопросу. Лишь 11 лет спустя, на XI КСДА в г. Буэнос-Айресе (Аргентина) Консультативные стороны решили рекомендовать проведение Специального КСДА по выработке режима, регулирующего разработку минеральных ресурсов Антарктики. Консультативные стороны признали, что знания об Антарктике, которыми они обладали на тот момент, налагают на них обязательства рассмотреть возможные последствия воздействия деятельности, связанной с минеральными ресурсами, на окружающую среду Антарктики.

В Рекомендации XI-I, принятой на XI КСДА, указывалось, что правовой режим регулирования освоения минеральных ресурсов Антарктики должен включать такие положения, как:

- механизм по сбору научной информации, необходимой для эффективного контроля за состоянием окружающей среды, а также по прогнозированию последствий, вызванных конкретной деятельностью, связанной с разведкой и разработкой минеральных ресурсов;
- механизм по регулированию экологических аспектов деятельности, связанной с минеральными ресурсами, на основе полученной научной информации и в соответствии с правилами по охране окружающей среды;
- правила по охране окружающей среды;
- гарантии, что участвующие государства будут выполнять действующие рекомендации Консультативных совещаний по охране окружающей среды.

Потребовалось шесть лет (с 1982 по 1988 г.) для того, чтобы Четвертое Специальное Консультативное совещание (КСДА) в ходе 12 сессий подготовило согласованный текст Конвенции по регулированию освоения минеральных ресурсов Антарктики. Он был принят в ходе Заключительной сессии Четвертого Специального КСДА, проходившего со 2 мая по 2 июня 1988 г. в г. Веллингтоне (Новая Зеландия) всеми Консультативными сторонами, которые на тот момент включали 18 стран. Статьей 5 этой Конвенции район ее применения ограничен областью действия Договора об Антарктике — пространством, расположенным южнее параллели 60° ю.ш. Настоящая Конвенция регулировала освоение минеральных ресурсов Антарктики,

которое имеет место на антарктическом континенте и на всех антарктических островах, включая все шельфовые ледники, к югу от 60° ю. ш., а также на морском дне и в недрах прилегающих прибрежных районов вплоть до глубоководных районов морского дна. В заключительном акте IV СКСДА в г. Веллингтоне район регулирования освоения минеральных ресурсов Антарктики, определенный в Статье 5 (2) Конвенции 1988 г., не распространяется ни на какой континентальный шельф, примыкающий, в соответствии с международным правом, к островам, расположенным к северу от 60° ю. ш. Таким образом, в тексте по регулированию освоения минеральных ресурсов Антарктики впервые в практике Системы Договора об Антарктике были затронуты вопросы континентального шельфа этого региона.

Авторы Конвенции 1988 г. отдавали себе отчет в том, что сведения о месторождениях полезных ископаемых в Антарктике на тот период времени были очень ограничены, а их освоение может нанести непоправимый ущерб окружающей среде региона. В связи с этим в тексте данной Конвенции большое внимание было уделено вопросам окружающей среды. В этом смысле Конвенция о регулировании освоения минеральных ресурсов в Антарктике была одним из наиболее убедительно обоснованных актов международного права в отношении охраны окружающей среды Антарктики.

Советские геологи с 1971 г. серьезно изменили тактику и стратегию исследования литосферы Антарктики, сделав особый акцент на поиск полезных ископаемых и оценку возможности их разрабатывания в перспективных в этом отношении районах Западной и Восточной Антарктиды. В период с 1971 по 1991 г. были открыты геолого-геофизические полевые базы: Эймери с 1971 по 1974 г., Дружная-1 с 1975 по 1987 г., Геолог с 1981 по 1982 г., Дружная-2 с 1982 по 1986 г., Дружная-3 с 1987 по 1990 г., Дружная-4 с 1987 по 1995 г., Союз с 1982 по 1985 г., Прогресс-1 с 1986 по 1991 г. Антарктические полевые исследования отечественных специалистов осуществлялись с помощью привлечения большого количества разнотипных воздушных судов, для базирования которых подготавливались снежно-ледовые взлетно-посадочные полосы. В окраинных морях Антарктики стали проводиться судовые геофизические исследования шельфовых районов.

20 ноября 1985 г. Совмином СССР было опубликовано Постановление «О мерах по усилению геолого-геофизических работ в Антарктике и укреплению материально-технической

базы этих работ». Во исполнение требований этого постановления планировалось создать две крупные круглогодично действующие станции с аэродромами для приема тяжелых транспортных самолетов на колесных шасси для обеспечения работ по широкомасштабным геологоразведочным исследованиям в Западном и Восточном районах Антарктиды. Отечественные геологи принимали активное участие в разработке Конвенции 1988 г. в период проведения всех сессий IV СКСДА.

Кроме СССР большой объем геологических исследований в Антарктике в эти годы проводили специалисты Великобритании, США, Новой Зеландии, Японии, Германии. Имея серьезные научные обоснования на перспективы освоения минеральных ресурсов Антарктики, делегации этих стран также активно участвовали в разработке Конвенции 1988 г.

Однако после открытия этой Конвенции для ратификации она не нашла поддержки у правительств Австралии и Франции и поэтому не вступила в силу. В последующие годы премьер-министры Австралии и Франции тех лет, Роберт Хоук и Мишель Рокар, высказывались о том, что их решение было связано с активной позицией общественных организаций этих стран и политической волей правительств в борьбе за сохранение уникальной природы шестого континента и окружающих его морей. В то же время весьма правдоподобна и точка зрения о неготовности Австралии и Франции вступить в жесткую технологическую конкуренцию с наиболее экономически и научно развитыми странами – Консультативными сторонами Договора об Антарктике.

Отказ от ратификации Конвенции по регулированию освоения минеральных ресурсов Антарктики привел к тому, что на XV КСДА в г. Париже в 1989 г. была принята Рекомендация XV-1 «Всеобъемлющие меры по защите антарктической окружающей среды и зависимых и связанных экосистем», в которой предусматривалась разработка специального природоохранного акта в Системе Договора об Антарктике в рамках XI СКСДА. Инициаторами этого предложения по вполне понятным причинам стали делегации Франции и Австралии. Первая сессия этого СКСДА проходила с 19 ноября по 6 декабря 1990 г. в г. Вилья-Дель-Мар, Чили, а последующие три — с 22 по 30 апреля 1991 г., с 17 по 22 июня 1991 г. и с 3 по 4 октября 1991 г. в г. Мадриде, Испания. Разработанный в ходе XI СКСДА документ получил название Протокола по охране окружающей среды к Договору об Антарктике. Наибольший вклад в разработку этого правового

акта, кроме выше названных делегаций Франции и Австралии, внесли представители Бельгии, Италии и Норвегии. Символично, что Мадридский Протокол не получил статуса еще одной Конвенции, что давало право его участникам создать самостоятельную международную организацию по управлению природоохранными вопросами в Антарктике. Название этого документа подчеркивает его неразрывную связь с Договором об Антарктике, что не дает органу управления Мадридским Протоколом — Комитету по охране окружающей среды (КООС) принимать самостоятельные решения. Все решения КООС подлежат обязательному утверждению очередного КСДА, а заседание КООС в обязательном порядке проводится совместно с этим КСДА. Интересно, что в 2000 г. в связи с отказом Польши провести очередное XXIV КСДА. Нидерланды были вынуждены организовать XII Специальное КСДА в г. Гааге в основном для создания условий проведения III заседания КООС.

В Мадридском Протоколе и шести Приложениях к нему подробно изложены основные принципы сохранения уникальной природной среды Антарктики. Статья 2 Протокола определяет, что Стороны Протокола берут на себя ответственность за всеобъемлющую охрану окружающей среды Антарктики и зависящих от нее и связанных с ней экосистем и настоящим определяют Антарктику в качестве природного заповедника, предназначенного для мира и науки. «Краеугольным» камнем Протокола стала Статья 7, в которой запрещается любая деятельность в отношении минеральных ресурсов Антарктики кроме научной. В Протоколе предусматриваются меры контроля соблюдения правил этого акта международного права Сторонами Мадридского Протокола, которые реализуются с помощью национальных или коллективных инспекций объектов практической деятельности Сторон Договора в Антарктике (Статья 14 Протокола).

В шести Приложениях к Мадридскому Протоколу подробно изложены основные принципы регулирования практической деятельности Консультативных сторон в антарктическом регионе в отношении сохранения окружающей среды. Данные Приложения предусматривают:

- возможность осуществления любой деятельности в Антарктике только на основе предварительно подготовленной Оценки воздействия на окружающую среду предполагаемой деятельности. Такие оценки должны рассматриваться и утверждаться на основе специально разработанных национальных процедур (Приложение 1 «Оценка воздействия на окружающую среду»);

- меры по сохранению уникальной и уязвимой от внешних факторов антарктической флоры и фауны, включая не допущение ввоза в Антарктику неместных представителей животного и растительного мира (Приложение 2 «Сохранение антарктической флоры и фауны»);

- практические меры по удалению отходов жизнедеятельности человека из Антарктики включая мероприятия по управлению этим процессом (Приложение 3 «Удаление и управление ликвидацией отходов»);

- практические меры по предотвращению загрязнения антарктических вод с морских судов и береговых станций (Приложение 4 «Предотвращение загрязнения морской среды»).

Приложения 1–4 были включены в оригинальный текст Протокола по охране окружающей среды к Договору об Антарктике 1991 г. и вступили в силу после ратификации Консультативными сторонами Договора об Антарктике Мадридского Протокола 14 января 1998 г.;

- меры по созданию и дальнейшему управлению Особо охраняемых и Особо управляемых районов Антарктики, в которых запрещена или строго ограничена практическая деятельность, включая создание исторических мест и памятников в этом регионе (Приложение 5 «Охрана и управление районами» было принято на XVI КСДА в 1991 г. (Рекомендация XVI-10) и вступило в силу 24 мая 2002 г. после ее одобрения всеми Консультативными сторонами);

- административные и правовые меры, регулирующие материальную ответственность антарктических операторов в случае их действий (бездействия) при наступлении чрезвычайных экологических происшествий (Приложение 6 «Материальная ответственность в случае чрезвычайных экологических происшествий» принято на XXVIII КСДА в 2005 г. (Мера 1 (2005)), в настоящее время не вступило в силу).

По понятным причинам район действия Мадридского Протокола строго соответствует области действия Договора об Антарктике 1959 г. (пространство к югу от параллели 60° ю.ш.). Сторонами Протокола являются Консультативные и Неконсультативные стороны Договора об Антарктике, ратифицировавшие Мадридский Протокол. Российская Федерация выполнила эту правовую процедуру принятием Федерального Закона от 24 мая 1997 г. «О ратификации Протокола по охране окружающей среды к Договору об Антарктике» № 79-ФЗ. Мадридский Протокол вступил в силу 14 января 1998 г. после его ратификации всеми 27 Консультативными сторонами Договора. На 23 мая 2016 г., кроме 29

Консультативных сторон (правительства Украины и Республики Чехия присоединились к Мадридскому Протоколу уже после его вступления в силу), участниками Мадридского Протокола являются 8 (Беларусь — 15.08.2008 г., Венесуэла — 31.08.2014 г., Греция — 14.01.1998 г., Канада — 13.12.2003 г., Монако — 31.07.2009 г., Пакистан — 31.03.2012 г., Португалия — 10.10.2014 г., Румыния — 05.03.2003 г.) из 24 Неконсультативных сторон Договора. В 2010 г. на XXXIII КСДА в г. Пунта-дель-Эсте (Уругвай) делегациями Австралии, Испании и Франции было сделано предложение о необходимости проведения специальных мероприятий по содействию присоединению всех Неконсультативных сторон Договора к Мадридскому Протоколу в ознаменование 20-летия его подписания в 2011 г. Однако, несмотря на предпринятые усилия, только три государства, представляющие Неконсультативные стороны (Венесуэла, Пакистан и Португалия), присоединились к Мадридскому Протоколу. Несмотря на явную очевидность всех положительных факторов принятия мер по охране окружающей среды Антарктики, данный процесс весьма сложен и продолжителен по существующим государственным процедурам Неконсультативных сторон Договора об Антарктике. Ситуация особо осложнилась после принятия Приложения 6 Мадридского Протокола, когда сторонам Договора надлежит четко определиться с целями и задачами своего практического присутствия в регионе (правительственной и неправительственной деятельности), а также принять специальные законодательные акты в своих странах в отношении обязательного страхования деятельности в Антарктике и определения мер административного или уголовного наказания за нарушение экологического состояния окружающей среды Антарктики своими государственными и/или негосударственными операторами.

Таким образом, Договор об Антарктике 1959 г., Конвенция по сохранению антарктических тюленей 1972 г., Конвенция по сохранению морских живых ресурсов Антарктики 1980 г., Протокол по охране окружающей среды к Договору об Антарктике 1991 г., а также вступившие в силу Рекомендации и Меры КСДА и Меры по сохранению Ежегодных сессий Комиссии по сохранению морских живых ресурсов Антарктики составили Систему Договора об Антарктике. Органами ее международного управления являются: Консультативное совещание по Договору об Антарктике (с 1961 г.), Секретариат Договора об Антарктике (с 2004 г.), Комитет по охране окружающей среды (с 1998 г.), Ежегодные сес-

сии Комиссии по сохранению морских живых ресурсов Антарктики (АНТКОМ) (с 1982 г.), Секретариат АНТКОМ (с 1982 г.), Научный комитет по антарктическим исследованиям (с 1959 г.), Совет управляющих национальных антарктических программ (с 1989 г.).

ОБЩЕСТВЕННЫЕ И ПОЛИТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ПРИНЯТИЯ МАДРИДСКОГО ПРОТОКОЛА

После завершения Второй мировой войны многие передовые страны мирового сообщества начали обращать серьезное внимание на проблемы охраны окружающей среды. На первых порах внимание уделялось собственным территориям государств, которые подвергались серьезному антропогенному влиянию развивающихся отраслей промышленности, сельского хозяйства, транспорта, развития городской среды. Уже в 1960–1970-е гг. этот процесс стал приобретать глобальный масштаб, когда защитники природы начали оперировать в своих действиях территориями континентов и акваториями Мирового океана. Во многом этому способствовала активизация ядерных испытаний на земле, в атмосфере и в океанах.

5 августа 1963 г. правительства СССР, США и Великобритании приняли Договор о запрещении испытаний ядерного оружия в атмосфере, в космическом пространстве и под водой. Договор вступил в силу 10 октября 1963 г. Однако не все ядерные державы (Франция, КНР, Индия, Пакистан и КНДР) присоединились к этому важному акту международного права.

Одновременно завершение Второй мировой войны способствовало быстрому разрушению колониальной системы в Африке, Азии, Центральной и Южной Америке и, соответственно, появлению большого числа независимых государств «Третьего мира», которые весьма бурными темпами приступили к развитию своих национальных экономик, используя помощь лидеров социалистического и капиталистического миров. Этот процесс стал естественной проблемой по сдерживанию внедрения принципов охраны окружающей среды во внутреннюю и внешнюю политику многих стран послевоенного мира, тем более что государства, чьи территории в наибольшей степени пострадали от военных действий, интенсивными темпами развивали свою промышленность и сельское хозяйство.

Реальные изменения в вопросах социальной экологии международного сообщества стали происходить в 70-е гг. XX в. Если в начале 70-х гг. насчитывалось не более 10 стран, в которых имелись государственные органы регулирования

различных аспектов взаимоотношений общества и природы, то в середине 70-х гг. их было уже более 60, а к началу 80-х годов — более 100. Среди Консультативных сторон Договора об Антарктике были созданы государственные органы власти, уполномоченные решениями вопросов по охране окружающей среды, были учреждены: Агентство по охране окружающей среды США — 1970 г., Департамент окружающей среды Великобритании — 1970 г., Департамент окружающей среды, аборигенов и искусств (в настоящее время — Департамент окружающей среды) Австралии — 1971 г., Министерство окружающей среды Новой Зеландии к 1986 г., Министерство окружающей среды (в настоящее время — Министерство окружающей среды, энергетики и моря) Франции — 1971 г., Федеральное министерство окружающей среды, охраны природы, строительства и ядерной безопасности Германии — 1986 г., Министерство окружающей среды Бразилии — 1985 г., Министерство климата и окружающей среды Норвегии.

В СССР подобная правительственная структура была создана в 1978 г., когда Главное управление Гидрометеорологической службы при Совмине СССР было преобразовано в Государственный комитет СССР по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. В Российской Федерации вопросы сохранения окружающей среды с 1991 г. стало заниматься Министерство охраны окружающей среды и природных ресурсов РФ. В настоящее время эти функции возложены на Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации.

До 1970–1980-х гг. ведущую роль в решении проблем охраны окружающей среды играли не правительственные, а различные общественные природоохранные организации, некоторые из них носили международный характер.

В 1948 г. был основан Международный союз охраны природы (МСОП) со штаб-квартирой в г. Гланде, Швейцария. Данный Союз в настоящее время объединяет 82 государства (в том числе и Российскую Федерацию в лице Министерства природных ресурсов и экологии), 111 правительственных учреждений, более 800 неправительственных организаций и около 10000 ученых и экспертов из 181 страны мира. Основными задачами МСОП являются влияние, поощрение и помощь обществу во всем мире в сохранении целостности и разнообразия природы и обеспечение гарантии того, что любое использование природных ресурсов равноправно и экологически жизнеспособно.

В 1961 г. четырьмя физическими лицами (Дж. Хаксли, М. Николсон, П. Скотт, Г. Мон-форт) был основан Всемирный фонд дикой природы (WWF) со штаб-квартирой в том же швейцарском городе, что и МСОП. В настоящее время членами Фонда являются около 5 млн человек — граждан почти всех стран мира, в том числе члены многих королевских фамилий и всемирно известных деятелей культуры и науки. WWF насчитывает 5400 сотрудников. Общий доход Фонда составляет 447 млн долларов США. Основная сфера деятельности WWF — охрана природы на всей планете.

В 1971 г. в г. Амстердаме, Нидерланды, была учреждена Международная неправительственная организация «Гринпис Интернешнл». Число членов этой организации в настоящее время насчитывает около 2,8 млн человек, более 100 тыс. человек-добровольцев и около 1500 сотрудников. Сферой деятельности «Гринпис Интернешнл» является охрана окружающей среды и борьба за мир. Организация существует на добровольные частные пожертвования. «Гринпис Интернешнл» имела три специализированных судна, в том числе и ледового класса (“Arctic Sunrise”, “Gondwana”, “Rainbow Warrior”), которые проводят специальные мероприятия в различных акваториях Мирового океана, препятствующие практической деятельности государств в своих официальных исключительных экономических зонах, которая, по мнению специалистов «Гринпис Интернешнл», оказывает негативное влияние на окружающую среду.

Вышеназванные организации оказывали и продолжают оказывать существенное влияние на развитие деятельности различных государств по освоению минеральных, углеводородных и биологических ресурсов на континентах и морях, проведению изыскательных и строительных работ, осуществлению мероприятий военного характера различных государств, тем самым пытаясь изменить ранее принятые политические решения правительств этих государств и международных организаций. Иногда эти операции достигают успеха, а в некоторых случаях, как, например, с судном “Arctic Sunrise” в Баренцевом море, оканчиваются судебными разбирательствами. В Антарктике международные общественные организации на протяжении целого ряда лет осуществляли существенное вмешательство в деятельность китобойного промысла Японии в этом регионе. Иногда подобные действия природоохранных активистов приводили к серьезным человеческим травмам членов экипажей судов, однако борьба за сохранение

окружающей среды получает большое число сторонников из разных стран мира, и поэтому его нельзя сбрасывать со счетов при планировании операций в Мировом океане.

В 1970–1980-е гг. во многих экономически развитых странах мира общественное природоохранное движение достигло пика своего развития. В некоторых государствах, в том числе и в Консультативных сторонах Договора об Антарктике, подобные общественные движения были преобразованы в политические партии, которые стали оказывать существенное влияние на внутреннюю и внешнюю политику своих правительств. К ним относятся партии «Зеленых» в различных вариантах названий (Австралия, создана в 1980 г., Бельгия, 1982 г., Болгария, 2005 г., Бразилия, 2006 г., Великобритания, 1979 г., Германия, 1989 г., Испания, 1984 г., Италия, 1990 г., Нидерланды, 1989 г., Новая Зеландия, 1990 г., Норвегия, 1988 г., Перу, Польша, 2003 г., Россия, 2003 г., США, 1984 г., Украина, 1990 г., Финляндия, 1978 г., Франция, 1990 г., Чехия, 2006 г., Чили, 2008 г., Швеция, 1981 г., Япония, 2008 г., Южная Корея, 2004 г.). Это способствовало созданию необходимого базиса для правового закрепления природоохранных принципов как во внутреннем законодательстве некоторых стран, так и в международном праве.

В Системе Договора об Антарктике также были созданы свои международные природоохранные организации. Так, в деятельности КСДА, КООС, СКАР и КОМНАП начиная с 1978 г. активное участие принимает Коалиция за Антарктиду и Южный океан (АСОК). Она объединяет более 150 участников из 40 стран мира. АСОК является региональным членом «Гринпис Интернешнл». Основной целью АСОК стало сохранение Антарктиды и окружающих ее островов и вод Южного океана в качестве последнего не тронутого человеческой деятельностью резерва нашей планеты. Секретариат АСОК базируется в г. Вашингтоне, США. Коалиция осуществляет свою деятельность на добровольные пожертвования, членские взносы и гранты различных экологических фондов. На ежегодных КСДА АСОК готовит большое число документов, в которых делаются предложения по укреплению мер охраны природы в регионе. В первое десятилетие XXI в. значительно возросла роль АСОК при обсуждении многих вопросов повестки дня очередных КООС и КСДА. Во многом это объясняется значительным влиянием этой общественной организации на правительственные круги некоторых ведущих держав западного мира — Консультативных

сторон Договора об Антарктике. Подобная позиция используется АСОК в случае декларации поддержки принципов охраны природы в предвыборных кампаниях политических лидеров этих государств. Поэтому использование КСДА как межправительственного органа управления Антарктикой может достигать эффективных результатов при активной поддержке совместных усилий правительственных делегаций этих государств и «независимой» организации АСОК.

В ежегодных КСДА в качестве наблюдателей принимают участие делегации АСОК, ЮНЕП, МСОП, а в отдельных совещаниях — делегация WWF. Вышеназванные международные общественные природоохранные организации занимают весьма активную позицию на этих международных форумах, используя их в качестве переговорной площадки по достижению целей, поставленных перед этими организациями.

После создания АНТКОМ активное участие в его ежегодных сессиях и на межсессионных полях стала принимать международная природоохранная организация «Антарктический альянс». В ее структуру входят более 30 природоохранных организаций, в том числе WWF, «Гринпис интернешнл», Международный фонд защиты животных и Фонд Пью и др., а также всемирно известные киноактеры, деятели науки и бизнеса. Основной целью Антарктического альянса в Южном океане является создание крупномасштабных заповедных зон, которые обеспечат сохранение ключевых экосистем региона.

Кроме общественных природоохранных организаций на решение вопросов сохранения окружающей среды на планете продолжает оказывать серьезное влияние Организация Объединенных Наций (ООН), созданная в 1945 г. На основе резолюции Генеральной Ассамблеи ООН № 2997 от 15 декабря 1972 г. была создана программа ООН по окружающей среде (ЮНЕП) со штаб-квартирой в Найроби, Кения, способствующая координации охраны природы на общесистемном уровне. Основной целью ЮНЕП является организация и проведение мер, направленных на защиту и улучшение окружающей среды на благо нынешнего и будущих поколений. Деятельность ЮНЕП включает в себя различные проекты в области атмосферы Земли, морских и наземных экосистем. Также ЮНЕП играет значительную роль в развитии международных конвенций в области экологии и охраны окружающей среды, часто сотрудничает с государствами и неправительственными международными организациями. ЮНЕП часто спонсирует имплементацию связанных

с экологией проектов. В сферу деятельности ЮНЕП также входит разработка рекомендаций и международных договоров по таким вопросам, как потенциально опасные химикаты, трансграничное загрязнение воздуха и загрязнение международных судоходных русел. Всемирная метеорологическая организация совместно с ЮНЕП в 1988 г. основали Межправительственную группу экспертов по изменению климата. ЮНЕП является также одним из соучредителей Глобального экологического фонда.

Импульсом для создания ЮНЕП стало успешное проведение летом 1972 г. в г. Стокгольме, Швеция международной конференции ООН по вопросам окружающей среды. День открытия этой конференции — 5 июня впоследствии был определен ООН как Международный день охраны окружающей среды. В подготовленной на этой конференции Декларации некоторые принципы (2, 4, 5 и 7) имеют прямое отношение к Антарктике. Они указывают на необходимость охраны отдельных видов природных ресурсов, включая воду, воздух, землю, флору и фауну и особенно репрезентативные образцы естественных экосистем. Очевидным развитием Стокгольмской Декларации стала разработка в 1976–1978 гг. группой экспертов ЮНЕП принципов разделения природных ресурсов, которые были представлены на Генеральную Ассамблею ООН. Среди них — принцип предварительной оценки воздействия на окружающую среду, принцип предварительного уведомления, обмена информацией и взаимных консультаций, принцип материальной ответственности за экологический ущерб и др.

В 1987 г. ЮНЕП подготовил доклад для Всемирной комиссии по вопросам окружающей среды и развития, в котором один из разделов был посвящен Антарктике. В нем решение вопросов охраны окружающей среды увязывалось с обеспечением управления Антарктикой в интересах всего человечества, сохранением ее ценности для научных исследований и упрочением ее статуса как демилитаризованной, безъядерной зоны мира.

Большое внимание вопросам охраны окружающей среды глобального масштаба, касающимся и антарктического региона, было уделено в Конвенции по регулированию китобойного промысла 1946 г., в Международной конвенции по предотвращению загрязнения моря нефтью 1954 г., в Международной конвенции относительно вмешательства в открытом море в случаях аварий, приводящих к загрязнению нефтью 1969 г., в Конвенции по предотвращению загрязнения моря сбросами отходов и других

материалов 1972 г., в Конвенции по предотвращению загрязнения с судов 1973 г., в Протоколе о вмешательстве в открытом море в случае аварий, приводящих к загрязнению веществами, иными, чем нефть, 1973 г., в Конвенции ООН по морскому праву 1982 г., в Венской конвенции об охране озонового слоя 1985 г., в Конвенции о биологическом разнообразии 1992 г., в Рамочной конвенции ООН об изменении климата 1992 г., в Киотском Протоколе 1997 г. к Рамочной конвенции ООН об изменении климата.

Принятые в структурах ООН и в международных общественных природоохранных организациях нормы правового регулирования и практической деятельности человека на нашей планете, безусловно, нашли свое отражение и в антарктическом регионе. В то же время следует не забывать, что Система Договора об Антарктике не входит в структуру ООН и имеет свою собственную нормативно-правовую базу по осуществлению практической деятельности в Южном полярном регионе. Среди антарктического сообщества широко распространено мнение, что Протокол по охране окружающей среды к Договору об Антарктике 1991 г. был создан как своеобразный вызов и альтернативное решение основным положениям Конвенции по регулированию освоения минеральных ресурсов Антарктики 1988 г. Автор настоящей статьи полагает, что Конвенция 1988 г. не столько противоречила духу и букве Мадридского Протокола, сколько способствовала его разработке. Чтобы сделать такой вывод, необходимо подробно изучить текст Конвенции 1988 г., после чего становится понятным, что она является одним из образцовых природоохранных актов международного права.

Конвенция 1988 г. касалась всех возможных областей охраны окружающей среды Антарктики — ограничения вредных воздействий, установления рационального режима эксплуатации минеральных ресурсов, осуществления охраны резерватов (особо охраняемых и особо управляемых районов), регулирования международного сотрудничества. По существу, в ней нашло отражение и было реализовано большинство основных международно-правовых принципов охраны окружающей среды. В статье 2 «Цели и общие принципы» указывается, что участники Конвенции будут обеспечивать оценку возможного воздействия освоения минеральных ресурсов Антарктики на окружающую среду. В статье 4 еще более определенно говорится о необходимости предварительной оценки и о невозможности освоения без нее минеральных ресурсов.

Вынесение предварительных оценок было предусмотрено и в других случаях применения Конвенции. Нашел в Конвенции отражение и принцип предварительного уведомления, обмена информацией и взаимных консультаций в связи с возможностью нежелательных последствий для окружающей среды. Нужно отметить, что Конвенция 1988 г. не обходила и такой принцип, как мирное и эффективное разрешение споров. Особо следует выделить значение Конвенции в плане материальной ответственности за ущерб, причиненный окружающей среде. Таким образом, Конвенция 1988 г. не декларативно провозглашала необходимость охраны окружающей среды, а предусматривала конкретные материальные меры для ее обеспечения. Как видно, все эти положения были приняты и в Мадридском Протоколе 1991 г. и последующих приложениях к нему. Таким образом, разработка Мадридского Протокола осуществлялась не с «чистого листа», а на основе большой подготовительной работы, которая была проделана международными экспертами в прошлые годы, как в Системе Договора об Антарктике, так и в различных организациях ООН, т.е. этот Протокол появился не вопреки, а благодаря многолетнему труду разработчиков подобных правовых документов.

РОЛЬ МАДРИДСКОГО ПРОТОКОЛА В СИСТЕМЕ ДОГОВОРА ОБ АНТАРКТИКЕ

Вопросы сохранения окружающей среды в Южном полярном регионе приобрели все более возрастающее влияние в антарктическом сообществе в конце XX — начале XXI в. Этому способствовали вступление в силу в 1998 г. Мадридского Протокола, большая активность КООС в работе очередных КСДА, наибольший объем рабочих и информационных документов, которые рассматриваются в рамках этого Комитета по отношению к общему числу подобных документов на КСДА, преобладающее число Мер, Решений и Резолюций очередных КСДА, посвященных природоохранным вопросам. Можно с уверенностью сказать, что за периодом попытки использования биологических и минеральных ресурсов Антарктики после принятия Мадридского Протокола в 1991 г. в антарктическом сообществе наступил период охраны окружающей среды и изучения влияния изменчивости климата Антарктики на этот регион и другие области земного шара. В деятельности большинства национальных антарктических программ обязательным стало выполнение требований Мадридского Протокола, а вопросы науки и международного сотрудничества стали уходить на второй план.

Некоторые Консультативные стороны предлагают официально перенести такие пункты повестки дня КСДА, как «научные вопросы» и «влияние глобальных климатических изменений на Антарктику», исключительно в повестку дня КООС. Тем самым акцент обсуждения повестки дня КСДА может устойчиво еще больше смещаться в сторону КООС. Большая дискуссия разгорелась на XXX КСДА в г. Нью-Дели (Индия) в 2007 г. по вопросу рассмотрения создания в Антарктике Морских охраняемых районов (МОР). Некоторые участники дискуссии полагали, что это новое направление деятельности необходимо поручить КООС в рамках положений Приложения 5 «Охрана и управление районами» Протокола по охране окружающей среды к Договору об Антарктике. Однако было принято решение о необходимости рассмотрения этих вопросов в структуре АНТКОМ. Таким образом, очевидным стало расширение полномочий КООС. В итоге все это может привести к ослаблению политической роли КСДА в современной Системе Договора об Антарктике.

Серьезным достижением Мадридского Протокола стало требование обязательной предварительной разработки Оценок воздействия на окружающую среду (ОВОС) на любую разрешенную Договором об Антарктике деятельность в этом регионе. Данная процедура обязывает заявителя деятельности в Антарктике не только подробно рассмотреть ее содержание и условия выполнения, но и предварительно оценить уровень воздействия такой деятельности на окружающую среду, а также предусмотреть меры по ликвидации чрезвычайных последствий осуществления деятельности. Статьями 2 и 3 Приложения 1 Мадридского Протокола предусматриваются Первоначальная и Всесторонняя ОВОС. Первая из них означает, что перед началом осуществления деятельности невозможно определить масштаб ее влияния на окружающую среду, т.е. будет ли она иметь менее чем незначительное или ограниченное во времени воздействие. Второй тип Оценки предусматривает, что подобное воздействие будет иметь более чем незначительное или проходящее во времени воздействие. Как правило, Всесторонняя ОВОС разрабатывается на абсолютно новый вид деятельности, строительство в Антарктике или другие масштабные мероприятия, связанные с широким воздействием на окружающую среду. Проект Всесторонней ОВОС в обязательном порядке распространяется всем Сторонам КООС для рассмотрения и получения возможных замечаний как минимум за 120 дней до начала проведения очередного заседания КООС, в то время как Первоначальная ОВОС

рассматривается по принятой национальной процедуре уполномоченными для этого органами государственной исполнительной власти.

Как известно, Мадридский Протокол был одобрен в Российской Федерации Федеральным законом «О ратификации Протокола по охране окружающей среды к Договору об Антарктике» от 24 мая 1997 г. № 79-ФЗ. Его практическое применение было определено Постановлениями Правительства Российской Федерации «Об обеспечении выполнения положений Протокола по охране окружающей среды к Договору об Антарктике» от 18 декабря 1997 г. № 1580 и «Об утверждении порядка рассмотрения и выдачи разрешений на деятельность российских физических и юридических лиц в районе действия Договора об Антарктике» от 11 декабря 1998 г. № 1476. Этими нормативными актами в нашей стране был утвержден достаточно строгий разрешительный порядок возможности осуществления практической деятельности в Антарктике российскими гражданами и российскими юридическими лицами. Разрешения на выполнение деятельности в Антарктике выдаются Росгидрометом по согласованию с Росприроднадзором, МПР России и МИД России. Максимальный срок действия Разрешения — 5 лет. Начиная с 1998 г. по 23 мая 2016 г. в России было выдано 84 Разрешения на осуществление деятельности в Антарктике.

Предварительная разработка ОВОС на деятельность в Антарктике в первую очередь обеспечивает меры по сохранению окружающей среды региона, в то же время наличие хорошо подготовленных оценок дает возможность государству на практике реализовывать свои проекты, которые по политическим мотивам нежелательны для некоторых Консультативных Сторон. Прекрасной иллюстрацией этому может служить проникновение в уникальное подледниковое озеро Восток через глубокую ледяную скважину, пробуренную на российской антарктической станции Восток. Когда в 1994 г. международным коллективом российских и британских ученых был открыт этот уникальный природный водоем, находящийся почти под 4-километровой толщей льда, наиболее доступным местом для проникновения в водную толщу этого озера для последующего его изучения контактными методами стала глубокая ледяная скважина, которая была заложена российскими специалистами на станции Восток в 1990 г. В феврале 1998 г. глубина забоя этой скважины составляла 3623 м, что означало нахождение границы «лед–вода» в 130 ± 20 м под забоем скважины. В качестве буровой заливочной жидкости в скважине рос-

сийскими специалистами применялась смесь керосина и фреона, что обеспечивало плотность этой жидкости равной плотности окружающего льда и препятствовало возникновению эффекта «горного давления», который приводит к сужению диаметра «сухой» скважины. Некоторая часть антарктического научного сообщества, представленного в Научном комитете по антарктическим исследованиям (СКАР), подогреваемая выступлениями АСОК, стала выражать серьезную озабоченность возможностью загрязнения реликтовых вод подледникового озера опасными для всего живого химическими соединениями российской буровой жидкости и потребовала от российской стороны приостановить буровые работы до разработки и одобрения экологически чистой технологии проникновения в озеро. В конце 1998 г. Министерство науки и технологий Российской Федерации объявило открытый конкурс на разработку такой технологии. Она была создана в конце 2000 г. совместным коллективом Санкт-Петербургского Горного института Минобрнауки России и Арктического и антарктического НИИ Росгидромета. В марте 2001 г. данная технология успешно прошла Государственную экологическую экспертизу России. В июле 2001 г. делегация России на IV заседании КООС и XXIV КСДА в Санкт-Петербурге представила рабочий документ РД029 «Экспертное заключение на проект “Обоснование и разработка экологически чистой технологии проникновения в подледниковое озеро Восток (Антарктида)”», который дал возможность ознакомить антарктическое сообщество с российскими предложениями по экологически чистому вскрытию водной толщи озера Восток. Это сообщение произвело эффект информационного взрыва, т.к. большая часть представителей антарктического сообщества полагала, что российская наука в 90-е гг. XX в. практически прекратила свое существование. В США были срочно организованы геофизические исследования по определению пространственных характеристик этого уникального природного водоема, при этом Россия, в соответствии с положениями Договора об Антарктике 1959 г., предоставила своим американским коллегам возможность базирования их исследовательского самолета на ледовом аэродроме российской станции Восток в летнем сезоне 2000/01 г. Одновременно Национальный научный фонд США, возглавляющий Антарктическую программу этой страны, объявил конкурс на разработку технологии быстрого бурения ледника, получившей название FASTDRILL.

В 2002 г. на V заседании KOOC и XXV КСДА в г. Варшаве делегация России представила проект Всесторонней ОВОС на экологически чистый отбор проб воды из поверхностного слоя озера Восток через глубокую ледяную скважину на станции Восток (РД019 «Непосредственное проникновение в подледниковое озеро Восток. Оценка воздействия на окружающую среду (предварительная стадия)»). По результатам обсуждения была создана межсессионная контактная группа (МКГ), которая сделала свои замечания к российскому документу. Вскоре после окончания XXV КСДА в американском городе Санта-Крус состоялась презентация технологии быстрого бурения ледников FASTDRILL. К разочарованию официальных представителей Национального научного фонда США, эта технология оказалась неприменима в условиях антарктической станции Восток. Дело в том, что постоянная температура снежно-фирновой толщи этого района Антарктиды составляет -55°C , в то время как предельно низкая температура окружающей среды, допускаемая для применения технологии FASTDRILL, равняется -35°C . В результате Антарктическая программа США сразу же потеряла всякий интерес к выполнению работ и исследований в районе подледникового озера Восток. В 2003 г. на VI заседании KOOC и XXVI заседании КСДА Россия представила рабочий документ РД001 «Отбор проб воды подледникового озера Восток. Оценка воздействия на окружающую среду (пересмотренный проект Всесторонней оценки окружающей среды)», в котором были даны ответы на замечания МКГ, созданной в 2002 г. В то же время Россия вновь получила дополнительные вопросы и замечания, подготовка ответа на которые была весьма затруднительной. Главным таким вопросом стала необходимость натурных испытаний российской технологии на каком-либо другом подледном объекте. С логистической и, главное, финансовой точек зрения проведение таких работ для России в то время не представлялось возможным. С 2003 по 2010 г. Россия регулярно информировала антарктическое сообщество на заседаниях KOOC и КСДА о ходе своих исследований озера Восток и подготовке ответов на вопросы и замечания, сделанные в 2003 г.: ИД018 «Российские исследования подледникового озера Восток» и ИД023 «Бурение дополнительных 50 м глубокой скважины 5Г-1 на станции Восток. Первоначальная оценка окружающей среды» (XXVI КСДА (Мадрид, 2003)); ИД068 «Российские исследования подледникового озера Восток в сезоне 2005/06 г. и планы работ на сезон

2006/07 г.», ИД069 «Бурение дополнительных 75 метров глубокой скважины 5Г-1 на станции Восток. Первоначальная оценка окружающей среды» (XXIX КСДА (Эдинбург, 2006)); ИД063 «Предварительные результаты российских экспедиционных исследований подледникового озера Восток в 2006–2007 гг.» (XXX КСДА (Нью-Дели, 2007)); ИД044 «Результаты российских исследований подледникового озера Восток в сезоне 2007/08 г.» (XXXI КСДА (Киев, 2008)); ИД043 «Результаты российских работ в глубокой ледовой скважине на станции Восток при осуществлении проекта проникновения в водный слой подледникового озера в сезоне 2008/09 г.» (XXXII КСДА (Балтимор, 2009)); ИД090 «Результаты российских исследований подледникового озера Восток в сезоне 2009/10 г.»; РД059 «Ответы на замечания по ВООС «Отбор проб воды подледникового озера Восток» (XXXIII КСДА (Пунта-дель-Эсте, 2010)).

Ключевыми стали заседания IX KOOC — XXIX КСДА и XIII KOOC — XXXIII КСДА. На первом из них в британском г. Эдинбурге в 2006 г. наша делегация сообщила в своем ИД069 на XXVI КСДА, что наши коллеги из Дании провели незапланированные независимые испытания российской технологии проникновения в водную толщу подледникового озера Восток при осуществлении своих буровых работ в северной части о. Гренландия, где неожиданно создались природные условия, моделирующие ситуацию с озером Восток. Таким образом, самый сложный вопрос, поставленный перед Россией антарктическим сообществом в 2003 г., был снят с повестки дня. В 2010 г. в уругвайском г. Пунта-дель-Эсте на XIII KOOC и XXXIII КСДА Россией были представлены ответы на все замечания международного сообщества к нашему проекту. Итоги этих заседаний легли в основу заключительной всесторонней ОВОС на экологически чистый отбор проб из поверхностного слоя вод подледникового озера Восток через глубокую ледяную скважину 5Г на станции Восток. В соответствии с принятой в России процедурой, Российская антарктическая экспедиция получила Разрешение Росгидромета от 23 ноября 2010 г. № 067 на выполнение этих работ, которые были успешно завершены 5 февраля 2012 г. на станции Восток. В этот день российские буровики на глубине ледника 3769 м успешно осуществили проникновение в водную толщу озера. Как и ожидалось, вода из поверхностного слоя озера поднялась вверх по стволу скважины, выталкивая над собой более легкую заливочную буровую жидкость из смеси

керосина и фреона. Тем самым была доказана справедливость теоретических выводов, сделанных в 2001 г. разработчиками упомянутой выше технологии экологически чистого проникновения в подледниковое озеро Восток. По своему научному эффекту и международному значению это событие сравнивалось с посадкой человека на Луну. Однако, в отличие от соперничества в «лунном проекте», на этот раз первенствовали российские, а не американские специалисты. В следующем летнем антарктическом сезоне 2012/13 г. российские буровики разбурили и подняли на поверхность ледяной керн, образованный из «свежезамороженной» воды из подледникового озера Восток. Таким образом, этот уникальный исследовательский результат стал не только одним из высочайших достижений отечественной инженерной мысли, но и триумфом природоохранного подхода в организации и проведении этих работ, который полностью соответствовал требованиям Мадридского Протокола. Напомним, что Россия в течение 12 лет упорно шла к этому историческому результату, сохраняя свою открытость перед международным антарктическим сообществом, информируя его обо всех подготовительных мероприятиях и необходимых промежуточных операциях, а также абсолютно соблюдая все требования Протокола по охране окружающей среды к Договору об Антарктике. Последнее обстоятельство было особо подчеркнуто АСОК, которая в своем информационном листке, распространяемом среди участников КСДА в 2012 г., отметила, что требования Мадридского Протокола не могут обеспечить запрет на виды деятельности в Антарктике, нежелательные для природоохранного сообщества. АСОК и некоторые стороны Договора, поддерживающие эту общественную организацию, до настоящего времени убеждены, что российская технология не обеспечивает реальную чистоту реликтовых вод озера от загрязнения, хотя эта позиция не подкреплена никакими научными результатами.

Требования Приложения 1 «Оценка воздействия на окружающую среду» Мадридского Протокола стали не только важнейшим инструментом сохранения окружающей среды Южного полярного региона, но и мощным аргументом осуществления уникальных научных экспериментов в Антарктике.

К сожалению, мы вынуждены констатировать, что вступление в силу Мадридского Протокола в 1998 г. на практике не означало выполнения всеми государствами, ратифицировавшими его, всех положений этого акта международного

права. Так, пункт 1 Статьи 1 Приложения 1 Протокола по охране окружающей среды к Договору об Антарктике гласит, что «воздействие на окружающую среду упомянутой в Статье 8 Протокола предлагаемой деятельности должно подвергаться рассмотрению до начала такой деятельности в соответствии с надлежащими национальными процедурами». На практике получилось так, что, несмотря на ратификацию Мадридского Протокола, в некоторых Консультативных сторонах Договора необходимые национальные процедуры до сих пор так и не были созданы. Поэтому Оценки воздействия на окружающую среду заявляемой деятельности в Антарктике либо не рассматриваются уполномоченным государственным органом власти, либо не подготавливаются вообще. Данная ситуация создает крайне негативные условия для возможности осуществления различных видов неправительственной деятельности в Антарктике с территориями таких стран и их контроля. Как известно, в Системе Договора существуют два вида рассмотрения заявок на выполнение деятельности в Антарктике: разрешительный и уведомительный. Первый из них означает выдачу специальных Разрешений уполномоченными органами государственной власти на деятельность в Антарктике после рассмотрения заявок на такую деятельность, Оценок воздействия на окружающую среду этой деятельности и других необходимых документов, подтверждающих квалификацию, техническую оснащенность и другие требования к заявителю. Второй ограничивается заявкой на вид деятельности и подготовкой Оценки воздействия на окружающую среду этой деятельности. Разрешительный порядок установлен правительствами Австралии, Аргентины, Бельгии, Великобритании, Германии, Новой Зеландии, России, Франции, Японии; уведомительный — Нидерландов, Норвегии, США, Чили. Официальных сведений о подобных порядках других Консультативных сторон не опубликовано. Обычно правительства этих стран делают заявление о том, что в Антарктике у них реализуются только национальные научные программы, но на практике реальная ситуация разительно отличается от официальных заявлений. В государствах, в которых отсутствует национальная процедура рассмотрения заявок на выполнение деятельности в Антарктике, создаются туристические агентства, различные неправительственные организации, спонсирующие и организующие различные акции спортивного, образовательного и культурного характера. В некоторых случаях предлагаемые акции, как, например, первое «Антарктическое биеннале» украин-

ского художника А.Е. Пономарева в 2017–2018 гг., противоречат основным положениям Договора об Антарктике, объявляя этот регион общим наследием всего человечества, несмотря на то, что проект двухлетней художественной выставки с одновременным проведением интеллектуальных форумов о будущем Антарктики в масштабе всего человечества имеет общегуманитарный характер. Однако его реальная постановка ассоциируется с позицией стран Третьего мира, которые в 70-е гг. XX в. обращались в ООН с предложениями о передаче прав международного управления Южным полярным регионом от ограниченного количества стран — Консультативных сторон Договора об Антарктике в структуру ООН, объявляя этот регион «общим наследием человечества». Как известно, решения, принятые в конце 1970-х гг. на Генеральных Ассамблеях ООН, подтвердили полномочия Договора об Антарктике и существующий статус управления этим регионом.

Большую логистическую опасность для деятельности национальных антарктических программ представляет экстремальный туризм в регионе. Дело в том, что Антарктика является единственным континентом на планете, где отсутствуют поисковые и аварийно-спасательные службы. Все подобные операции, в случае необходимости их проведения, осуществляются силами и средствами национальных антарктических программ, которые финансируются исключительно из средств государственных бюджетов своих стран. В результате поставленные перед этими программами задачи выполняются не в полном объеме, а в некоторых случаях проведение внеплановых поисковых и аварийно-спасательных работ может сказаться и на безопасности жизнедеятельности антарктических станций и их персонала. Причиной всех этих ситуаций продолжает оставаться отсутствие национальных процедур по рассмотрению возможностей осуществления деятельности в Антарктике гражданами и юридическими лицами Консультативных сторон Договора. Российская Федерация неоднократно указывала на необходимость принятия таких процедур во всех Консультативных сторонах в своих рабочих и информационных документах, представляемых на КСДА. К ним относятся:

– ИД65 «Концепция и структура Федерального Закона Российской Федерации “О регулировании деятельности российских граждан и юридических лиц в Антарктике”» (XXX КСДА, Нью-Дели, 2007);

– РД50 «Предложения по регулированию экстремального туризма и неправительствен-

ной деятельности в Антарктике» (XXXI КСДА, Киев, 2008);

– РД44 «Проблемы национального контроля туристической и неправительственной деятельности в Антарктике» (XXXII КСДА, Балтимор, 2009);

– РД32 «О возможностях мониторинга экстремального туризма и неправительственных экспедиций в Антарктике» (XXXVIII КСДА, София, 2015).

Однако, к сожалению, никаких практических шагов по ликвидации этого правового пробела со стороны других Консультативных сторон предпринято не было.

Ситуация еще больше осложнилась в связи с принятием в 2005 г. на XXVIII КСДА Приложения 6 «Материальная ответственность в случае наступления чрезвычайных экологических ситуаций» Мадридского Протокола. По данным на 23 мая 2016 г. только 13 Консультативных Сторон (Австралия — 15.05.2014 г., Великобритания — 18.04.2013 г., Испания — 17.12.2008 г., Италия — 12.10.2011 г., Нидерланды — 28.04.2014 г., Новая Зеландия — 31.05.2013 г., Норвегия — 24.05.2013 г., Перу — 10.07.2007 г., Польша — 15.01.2009 г., Россия — 27.03.2013 г., Финляндия — 14.12.2010 г., Швеция — 08.06.2006 г., Южная Африка — 12.11.2013 г.) из 29 официально одобрили это Приложение. Во многом данная ситуация обуславливается и отсутствием национальных процедур на деятельность в Антарктике, а также необходимостью изменения своих внутренних законодательных актов, т.к. положения Приложения 6 требуют обязательного страхования всех видов деятельности в Антарктике, включая поисковые и аварийно-спасательные операции. Кроме того, необходимо внести соответствующие изменения в национальные административные и уголовные кодексы за нарушения, связанные с осуществлением деятельности в Антарктике, как правительственных, так и неправительственных операторов. Российская Федерация выполнила все эти требования, приняв 5 июня 2012 г. Федеральные законы «О регулировании деятельности российских граждан и российских юридических лиц в Антарктике» №50-ФЗ и «О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в связи с принятием Федерального закона “О регулировании деятельности российских граждан и российских юридических лиц в Антарктике” № 50-ФЗ» № 51-ФЗ, а также 10 подзаконных актов (Постановления и Распоряжения Правительства Российской Федерации и ведомственные приказы МПР России

и Росгидромета), что позволило нашей стране официально присоединиться 7 марта 2013 г. к этому Приложению Мадридского Протокола, одоблив соответствующую Меру XXVIII КСДА.

Свою озабоченность крайне медленными темпами одобрения Приложения 6 Мадридского Протокола наша страна выразила в своем РД-33 «О проблемах одобрения Приложения 6 «Материальная ответственность в случае наступления чрезвычайных экологических происшествий» Протокола по охране окружающей среды к Договору об Антарктике» (XXXVIII КСДА, София, 2015).

Еще одним вызовом к внедрению Мадридского Протокола и шести его Приложений в практику деятельности Сторон Договора об Антарктике, на взгляд автора, является ситуация с Особо охраняемыми и Особо управляемыми районами Антарктики (ООРА и ОУРА). Организация подобных районов предусматривается требованиями Приложения 5 «Охрана и управление районами» Мадридского Протокола. В соответствии со Статьей 3 Приложения 5, ООРА — любой район, включая любой морской район, может быть определен как Антарктический особо охраняемый район в целях охраны исключительно важных экологических, научных, исторических, эстетических или первозданных природных ценностей, любого сочетания этих ценностей или ведущихся или планируемых научных исследований. ОУРА — любой район, включая любой морской район, где проводится или может проводиться в будущем какая-либо деятельность, может быть определен как Антарктический особо управляемый район в целях содействия планированию и координации деятельности, предотвращения возможных конфликтов, совершенствования сотрудничества между Сторонами и сведения к минимуму воздействия на окружающую среду (Статья 4 Приложения 5).

На 23 мая 2016 г. КСДА по представлению КООС было утверждено 72 ООРА и 6 ОУРА. Примечательно, что заявителями таких районов стали: ООРА США — 16, Великобритания — 13, Австралия — 12, Новая Зеландия — 10, Чили — 8, Аргентина — 4, Италия, Китай — по 3, Индия, Россия, Польша и Франция — по 2, Испания, Норвегия, Корея и Япония — по 1. ОУРА США — 5, Австралия, Аргентина, Бразилия, Великобритания, Индия, Испания, Китай, Новая Зеландия, Норвегия, Перу, Польша, Россия, Румыния, Чили, Эквадор — по 1. Превышение числа заявителей ООРА и ОУРА над общим количеством таких районов связано с тем, что некоторые ООРА и ОУРА находятся

под совместным режимом управления. Национальное представительство и соответствующее количество заявленных ООРА и ОУРА отражает практическую заинтересованность данных стран в использовании этого правового инструмента Мадридского Протокола в обеспечении своих государственных интересов в Антарктике. Если для США большое количество ООРА и ОУРА является следствием обеспечения их многообразных научных интересов в этом регионе с одновременным ограничением для проведения исследований другими Сторонами Договора, то для Великобритании, Новой Зеландии, Чили и Аргентины подобный подход обеспечивает укрепление своего национального суверенитета на ранее заявленные «территориальные сектора в Антарктике», которые были «заморожены» Статьей 4 Договора об Антарктике 1959 г.

Статьей 5 Приложения 5 Мадридского Протокола установлено, что каждый из ООРА и ОУРА должен иметь четко обозначенные границы и Планы управления такими районами. Согласно Статье 6 Приложения 5 Планы управления ООРА или ОУРА обсуждаются на КООС и далее рассматриваются на КСДА, на котором они принимаются в качестве соответствующей Меры КСДА. Если после принятия такой Меры КСДА в адрес Секретариата Договора об Антарктике не поступает каких-либо замечаний от Консультативных Сторон, то эта Мера автоматически вступает в силу через 90 дней после ее принятия на КСДА. Максимальный срок действия Плана управления составляет 5 лет.

Объектами охраны в ООРА и ОУРА становятся определенные виды живой или неживой природы, которые нуждаются в такой охране. Вполне естественно, что такие объекты находятся под воздействием не только антропогенной деятельности, но и крупномасштабных природно-климатических факторов, к которым относятся: изменения трофических связей биологических организмов, наступившие из-за климатической изменчивости или стихийных бедствий, крупномасштабные изменения ледяного покрова, катастрофические природные явления (цунами, землетрясения и др.), вирусные заболевания живых организмов, связанные с трансграничными переносами, и т.д. Данные обстоятельства, на наш взгляд, требуют проведения заявителями ООРА и ОУРА специального мониторинга состояния природных ценностей, определенных как объекты охраны в таких районах. Такой мониторинг необходимо выполнять при подготовке очередного пересмотренного плана управления ООРА и ОУРА. Делегация

России на XXXIV, XXXVI и XXXVII КСДА в 2011, 2013 и 2014 гг. представляла свои соображения по данному вопросу в следующих рабочих документах:

– РД57 «О необходимости постоянного мониторинга ценностей Особо охраняемых и Особо управляемых районов Антарктики»;

– РД21 «Анализ ценностей живой природы в ООРА и ОУРА»;

– РД59 «Неформальное межсессионное обсуждение необходимости проведения мониторинга охраняемых ценностей ООРА в связи с пересмотром Планов управления ООРА».

Однако российские предложения не нашли поддержки у участников их обсуждения. Дело в том, что организация такого вида мониторинга природных объектов автоматически влечет за собой резкое удорожание стоимости операционных расходов на проведение очередных национальных антарктических экспедиций. Причем заявители наибольшего количества ООРА и ОУРА будут связаны с наибольшим объемом таких расходов. Примечательно, что ни одна из сторон, которая возражала против российских предложений, никогда не упоминала о финансовой составляющей проблемы. В качестве аргументов приводились мнения о существенном влиянии проведения мониторинга природных ценностей на уязвимые экосистемы Антарктики. С другой стороны, весьма очевидными являются соображения о необходимости регулярной проверки состояния природных объектов охраны. Может быть, их численность уже резко сократилась или они исчезли вовсе? Может быть, следует изменить пространственные границы таких районов? Таким образом, российский подход к этой проблеме продиктован исключительно целями и задачами Мадридского Протокола и желанием сделать меры по поддержке и сохранению уникальной окружающей среды Антарктики наиболее эффективными. Вполне возможно, что подобный российский подход временно ограничил желание Сторон Договора создавать новые ООРА и ОУРА.

С этой точки зрения весьма примечательным стал факт предложения КНР о создании ОУРА в районе Купола А, где расположена китайская сезонная полевая база Куньлунь, сделанного на XXXVI КСДА в 2013 г. (РД008 «Предложение по новому Особо управляемому району Антарктики “Китайская антарктическая станция Куньлунь (Купол А)”»). Предлагаемый КНР район занимает площадь 19764 км² на высоте более 4 тыс. метров над уровнем моря и является одним из наиболее труднодоступных в центральной части Восточной Антарктиды. Он чрезвычайно редко посещается какими-либо национальными антарктическими экспедициями и тем более туристическим группами. В связи с этим прослеживается очевидное желание китайской стороны создать подобный район с политическими, а не природоохранными целями. Вероятно, именно этот факт и является причиной отсутствия консенсуса при рассмотрении соответствующего предложения делегации КНР на заседаниях КООС.

Приведенные в настоящей статье факты убедительно показывают, что Протокол по охране окружающей среды к Договору об Антарктике стал важнейшим событием в общем развитии Системы Договора об Антарктике. При всем общегуманитарном значении этого акта международного права, отдельные его Стороны стремятся использовать его положения для обеспечения своих политических интересов в Антарктике. К сожалению, очевидным убедительным фактом является нежелание отдельных Консультативных Сторон создать в своих странах реально действующие правовые основы внедрения положений Мадридского Протокола в свою практическую деятельность в Антарктике. Российская Федерация на своем примере показывает, что, несмотря на наличие весьма серьезных экономических проблем, наша страна обеспечивает выполнение всех основных положений Мадридского Протокола и создала эффективно действующий правовой механизм по его имплементации.

ПАМЯТИ Н.А. КОРНИЛОВА
(1925 – 2017)



Умер Николай Александрович Корнилов. С его уходом завершилась эпоха освоения и изучения Арктики и Антарктики, в которой велика была роль личностей, от чьих человеческих качеств зависел общий успех трудного, часто героического дела покорения полярных регионов. И роль Николая Александровича, отдавшего более 60 лет своей жизни исследованиям труднодоступных областей планеты, трудно переоценить.

Он родился в г. Владимире, детство и юность провел в г. Шуе, который всегда вспоминал с большой теплотой и любовью. Свою жизнь с Арктикой связал в 1954 г., когда после окончания Высшего арктического морского училища имени С.О. Макарова он, инженер-океанолог, был направлен в Арктическую научно-исследовательскую обсерваторию АНИИ в поселке Тикси, где проработал около семи лет.

Опыт и авторитет, заработанные в этот период, позволили в 1961 г. назначить Николая Александровича начальником первой смены дрейфующей станции «Северный полюс-10», впервые организованной поздней осенью с помощью а/л «Ленин». Успешно отзимовав 370 суток, смена завершила работу на льдине в октябре 1963 г. В дальнейшем Н.А. Корнилов не раз возвращался в Арктику в качестве начальника сезонных Высокоширотных экспедиций Север в 1965–1966 гг.

В 1963 г. Н.А. Корнилов впервые отправился к берегам Антарктиды, где в период 9-й САЭ возглавил коллектив станции Молодежная. Под его руководством было продолжено строительство станции, расширен комплекс научных наблюдений. Свой вклад в дальнейшее развитие станции Молодежная Николай Александрович внес и в период 13-й САЭ, когда в 1967 г. прибыл сюда вновь в качестве начальника. Было продолжено строительство жилых домов, вступила в строй новая автоматическая дизельная электростанция, построен астрогеодезический павильон, начаты работы по строительству станции ракетного зондирования. В третий раз станцию Молодежная (тогда уже АМЦ) он возглавил в 1974 г., когда после защиты диссертации на соискание ученой степени кандидата географических наук вновь прибыл в Антарктиду уже в качестве начальника зимовочного состава 20-й САЭ.

Став в 1977 г. заместителем директора ААНИИ по научно-экспедиционной работе, Н.А. Корнилов успешно совмещал эту ответственную работу с непосредственным руководством морскими экспедициями САЭ. Он возглавлял сезонные экспедиции 25-й САЭ (1979–1980 гг.), 28-й САЭ (1982–1983 гг.), 33-й САЭ (1987–1988 гг.), 37-й САЭ (1991–1992), с которыми были связаны наиболее заметные события в исследовании Антарктики этого периода. В сезон 25-й САЭ под его руководством была открыта седьмая советская антарктическая станция — Русская. В 33-й САЭ он, как начальник сезонных работ, руководил первым, весьма драматическим, антарктическим рейсом НЭС «Академик Федоров». В 1989–1992 гг. был вдохновителем и лидером советско-американского проекта по исследованию труднодоступной западной части моря Уэдделла и в сезон 37-й САЭ руководил экспедицией на НЭС «Академик Федоров», в ходе которой в феврале 1992 г. была организована первая в мире антарктическая дрейфующая станция «Уэдделл-1».

Н.А. Корнилов внес большой вклад в развитие авиационного обеспечения антарктических исследований. Как председатель Государственной комиссии принимал в эксплуатацию взлетно-посадочную полосу на станции Молодежная, на которую 13 февраля 1980 г. совершил посадку самолет на колесном шасси Ил-18Д. В 1986 г. руководил воздушной экспедицией на самолете Ил-76ТД, который 25 февраля совершил посадку на ту же полосу. Впоследствии эти два типа самолетов надежно связали антарктическую станцию Молодежная с Москвой и Ленинградом воздушным мостом.

За выдающийся вклад в исследования Арктики и Антарктики Н.А. Корнилов в 1970 г. награжден орденом Ленина и золотой медалью «Серп и Молот», в 1980 г. — орденом Октябрьской Революции, многими ведомственными наградами.

С 1994 по 2002 г. Н.А. Корнилов работал в ООО «ИНТААРИ», где стал вдохновителем и непосредственным участником уникальных международных проектов в Арктике («Экология тундры-94» на НЭС «Академик Федоров») и Антарктике (Международная авиационная сеть «DROMLAN»).

Николай Александрович Корнилов долгие годы был вице-президентом Ассоциации российских полярников с момента ее организации, работал в Совете ветеранов Санкт-Петербурга и Ленинградской области в качестве заместителя председателя Комитета Героев Социалистического Труда.

Он был опорой полярного товарищества и нашего общего дела, преданность которому пронес через всю жизнь. Требовательный и простой, решительный и разумный руководитель, очень теплый человек. Его щедрую любовь и доверие испытali все работавшие с ним и любившие своего дядю Колю... Счастьем было знать его, в радость работать с ним. Душевная щедрость, талант дружественного общения проявлялись в экспедициях, на заседаниях, в застольях. Они объединяли людей сильнее всяких приказов. Это был яркий русский характер, достойный сын владимирской земли и своих предков, стойко защищавших и прославлявших нашу землю во все времена.

Светлая память о Николае Александровиче, известном полярном исследователе и замечательном человеке, навсегда сохранится в наших сердцах.

ПАМЯТИ Н.И. БАРКОВА
(1925 – 2017)



27 апреля 2017 г. ушел из жизни ведущий научный сотрудник отдела географии полярных стран ААНИИ, кандидат географических наук, замечательный человек, наш старший товарищ Нарцисс Иринархович Барков.

Нарцисс Иринархович был одним из старейших сотрудников института. В годы войны юношей он работал на судоремонтном заводе в блокадном Ленинграде. В ААНИИ пришел в 1959 г. Участвовал в работах 5, 15 и 20-й Советских антарктических экспедиций. Нарцисс Иринархович являлся инициатором ставшего теперь легендарным проекта бурения сверхглубокой скважины на внутриконтинентальной станции Восток. В 15-й САЭ (1969–1971 гг.) он был начальником того гляцио-бурового отряда, который пробурил на Востоке первую скважину глубиной 500 м.

В 1973 г. Н.И. Барков был командирован на два месяца в Чили для участия в работе Чилийской антарктической экспедиции, в январе–феврале принимал участие в гляциологических работах на Антарктическом полуострове. Во время 20-й САЭ (1974–1976 гг.) работал в качестве обменного специалиста на американской станции Мак-Мердо.

Н.И. Барковым разработана конструкция мачты подъемно-флюгерного устройства метелемерной установки «Циклон» (1961 г.), им получено авторское свидетельство № 127629 «Электробур для бурения скважин во льду» (1969 г.). Н.И. Барков является также одним из соавторов открытия явления сверхдлительного анабиоза живых организмов.

Последние годы своей работы в ААНИИ Н.И. Барков являлся руководителем проектов, связанных с изучением антарктического ледяного керна, палеоклимата Земли и подледникового озера Восток и был главным специалистом по бурению, обработке и анализу данных ледяных кернов со станции Восток.

Имя Н.И. Баркова хорошо известно у нас в стране и за рубежом главным образом благодаря его пионерным работам, посвященным результатам исследования ледяного керна со станции Восток. Н.И. Барковым опубликовано свыше 130 научных работ, в том числе монография «Шельфовые ледники Антарктиды», написанная по материалам его кандидатской диссертации. Он принимал активное участие в создании атласов Арктики и Антарктики.

За заслуги перед отечеством Нарцисс Иринархович награжден орденом Октябрьской Революции и шестью медалями, в том числе медалью «За оборону Ленинграда», имеет Почетные грамоты Минморфлота, Росгидромета, ЦК ВЛКСМ, не раз награждался медалями ВДНХ.

За большой вклад в развитие российско-французского научного сотрудничества в Антарктике в 2016 г. Указом Президента Французской Республики Нарцисс Иринархович Барков был удостоен звания Офицера Национального ордена Почетного легиона.

Нарцисс Иринархович прожил долгую и славную жизнь. В нашей памяти он навсегда останется верным другом, настоящим ученым, влюбленным в жизнь, полным энергии и оптимизма человеком, до конца дней живо интересовавшимся делами и достижениями сотрудников института.

Коллеги и друзья

Сборник научных статей
ПРОБЛЕМЫ АРКТИКИ И АНТАРКТИКИ
№ 2 (112)

Подписано в печать 19.06.2017
Формат 70×100 1/16
Тираж 200

Печать цифровая
Печ. л. 7,5
Заказ № 0492833

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

К статье Е.А. Гусева, А.Б. Кузнецова, Н.В. Куприяновой, З.В. Пушиной,
Г.В. Степановой, Л.Г. Деревянко, Н.Ю. Аникиной, В.А. Четверовой,
Я.Д. Яржембовского, А.В. Крылова

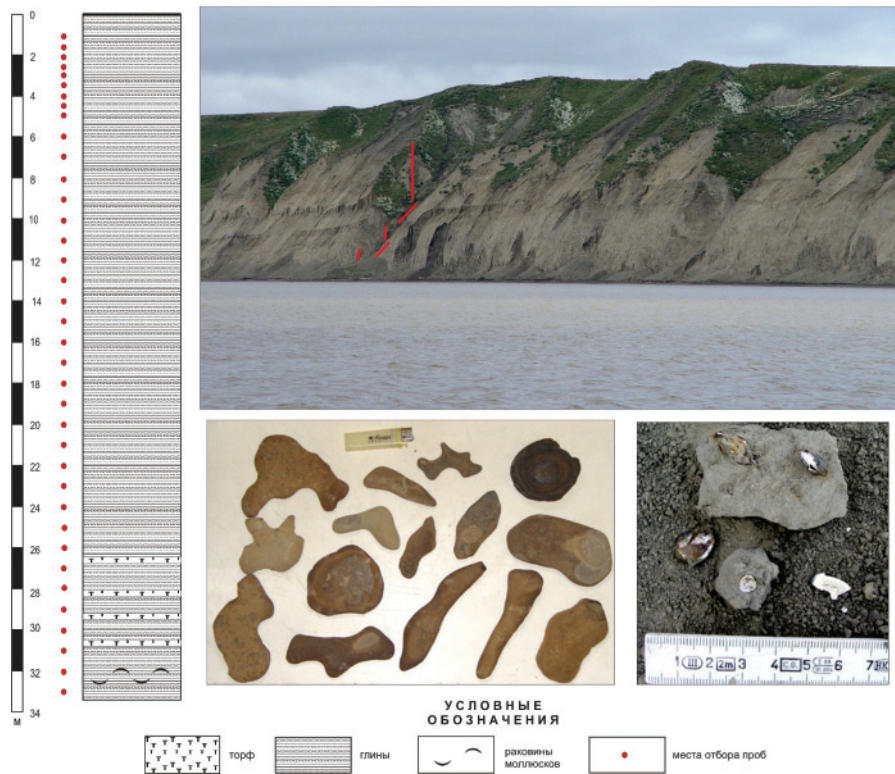


Рис. 2. Разрез 0825 в районе мыса Дорوفеевский. На фотографиях представлены фигурные конкреции из ленточных алевроитов и раковины *Portlandia arctica* из нижней части разреза.



Рис. 3. Ленточные алевроиты из разреза 0825 у мыса Доровеевский.

К статье Е.А. Гусева, А.Б. Кузнецова, Н.В. Куприяновой, З.В. Пушиной,
Г.В. Степановой, Л.Г. Деревянко, Н.Ю. Аникиной, В.А. Четверовой,
Я.Д. Яржембовского, А.В. Крылова

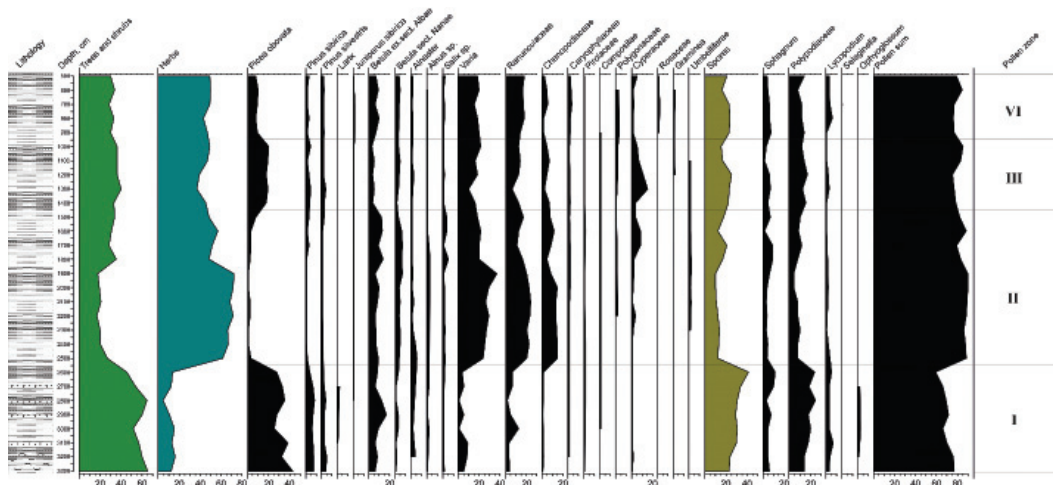


Рис. 4. Спорово-пыльцевая диаграмма по разрезу 0825.



Рис. 6. Разрез 0813 у мыса Лескино.

К статье Е.А. Гусева, А.Б. Кузнецова, Н.В. Куприяновой, З.В. Пушиной,
Г.В. Степановой, Л.Г. Деревянко, Н.Ю. Аникиной, В.А. Четверовой,
Я.Д. Яржембовского, А.В. Крылова

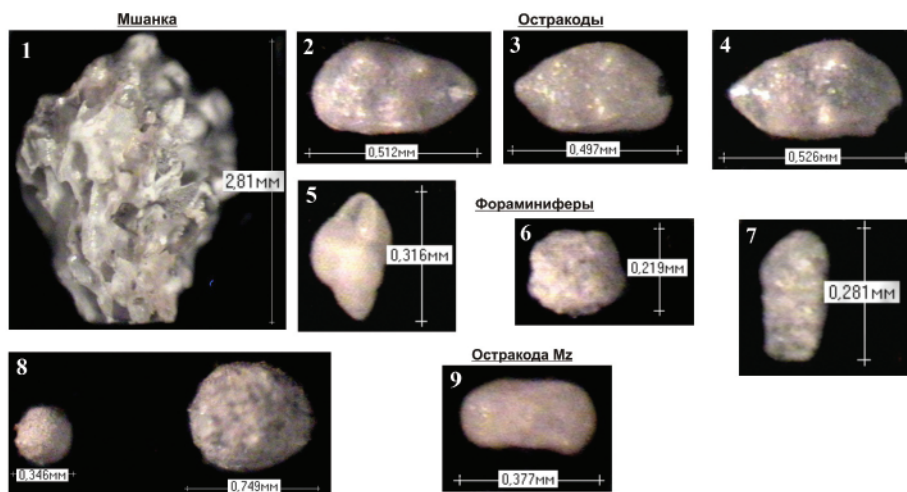


Рис. 7. Органические остатки из лескинских алевроитов расчистки 328.

1 — мшанка, предположительно отряд Cheilostomata ?; 2, 3, 4 — остракоды *Cytheropteron suzdalskyi* Lev.; 5–7 — фораминиферы: 5 — *Bulimina exilis* Brady, 6 — *Recurvoides* sp., 7 — *Spiroplectammina* sp.; 8 — шарообразные образования (*Radiolaria* ?); 9 — переотложенная мезозойская остракода *Dolocythere* sp.

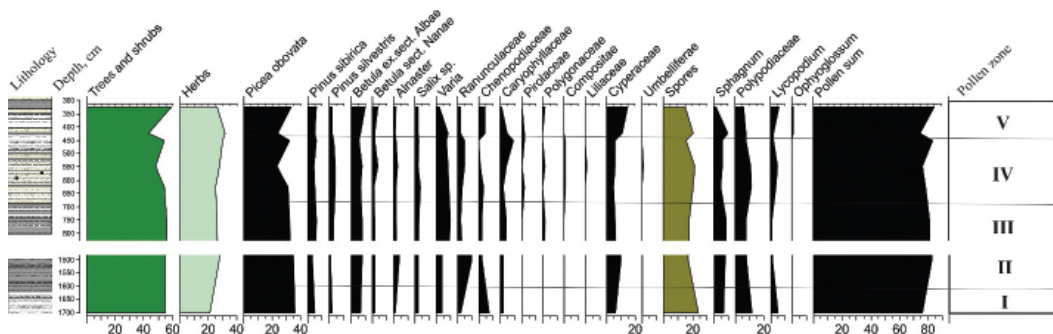


Рис. 8. Спорово-пыльцевой комплекс разреза 0813.

К статье Е.У. Миронова, В.Г. Смирнова, И.А. Бычковой, С.В. Клячкина,
Л.Н. Дымент, Н.Ю. Захваткиной, Р.И. Мая, Р.Б. Гузенко, Е.Б. Саперштейн,
С.В. Михальцева, Е.В. Платоновой, Л.А. Старцева

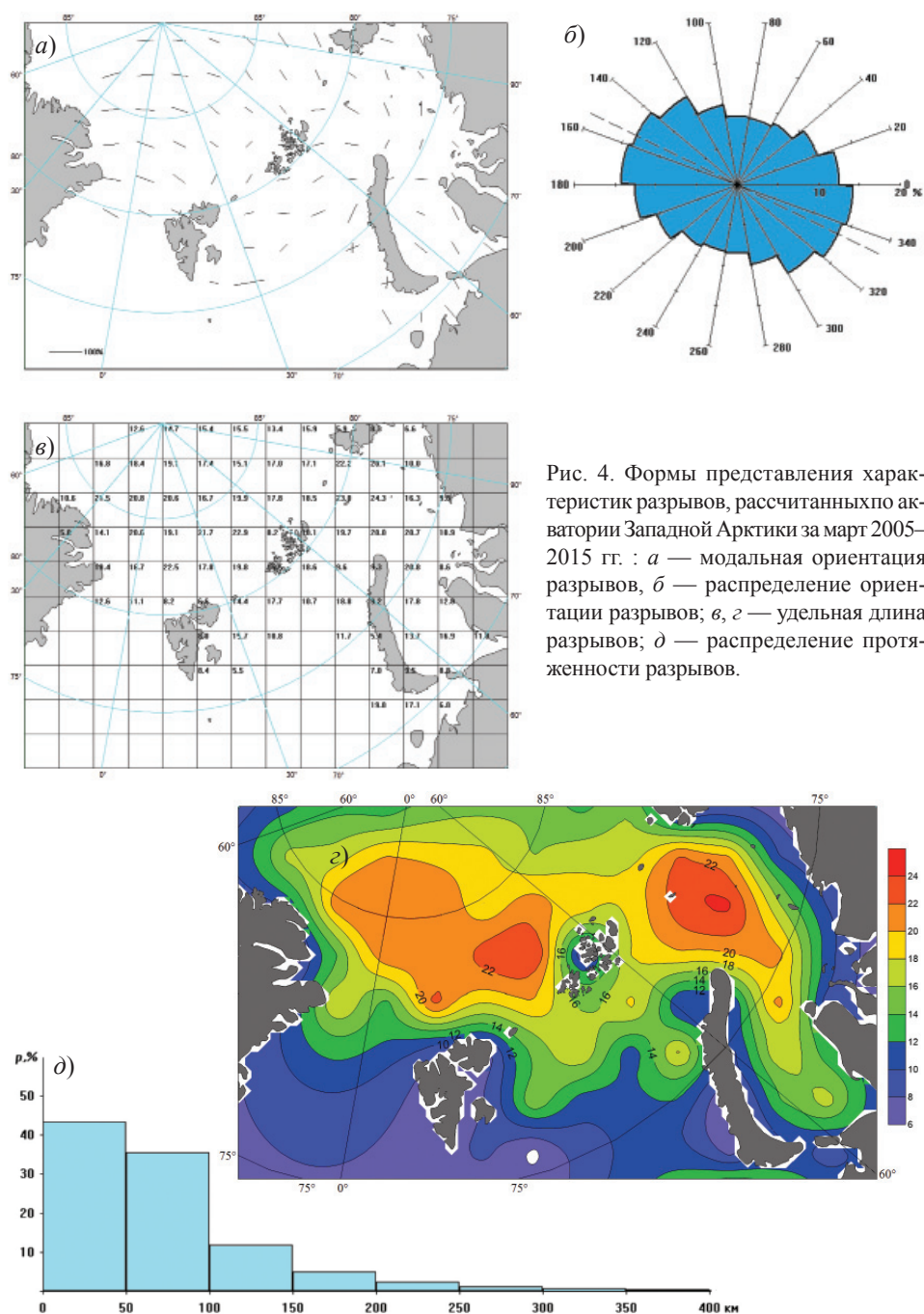


Рис. 4. Формы представления характеристик разрывов, рассчитанных по акватории Западной Арктики за март 2005–2015 гг. : *а* — модальная ориентация разрывов, *б* — распределение ориентации разрывов; *в*, *з* — удельная длина разрывов; *д* — распределение протяженности разрывов.