

ISSN 0555-2648 (Print)
ISSN 2618-6713 (Online)



Проблемы Арктики и Антарктики

Arctic and Antarctic Research

Том 64
№ 4
2018



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ
И МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ



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



ПРОБЛЕМЫ АРКТИКИ И АНТАРКТИКИ

Том 64, № 4, 2018

ARCTIC AND ANTARCTIC RESEARCH

Издается с июня 1937 г.

Санкт-Петербург
ААНИИ
2018

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

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

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

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

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

СОСТАВ РЕДКОЛЛЕГИИ:

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

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

Литературный редактор – Е.В. Миненко

Члены редколлегии:

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

EDITORIAL BOARD:

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

Ivan E. Frolov

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

Literary Editor – Elena V. Minenko

Members of the editorial board:

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

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

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

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

Выданы Федеральной службой по надзору в сфере связи и массовых коммуникаций

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

Адрес редакции журнала «Проблемы Арктики и Антарктики»:

199397 Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38.

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт.

e-mail: aaresearch@aaari.ru. Сайт журнала: <http://www.aaari.ru/misc/publicat/paa.php>

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

ОКЕАНОЛОГИЯ

- В.А. Бородкин, С.М. Ковалев, А.И. Шушлебин.* Пространственная неоднородность строения ровного припайного льда в районе научно-исследовательского стационара «Ледовая база “Мыс Баранова”» 351

ГИДРОЛОГИЯ СУШИ И ГИДРОХИМИЯ

- В.А. Брызгалов, М.В. Третьяков, Е.В. Румянцев, Е.Н. Шестакова, О.В. Муждаба.*
Реки опорных зон Российской Арктики и их современное состояние 365
- Е.С. Колпакова.* Хлорфенольные соединения в пресноводных озерах субарктических регионов 380

ГЕОМОРФОЛОГИЯ И ЭВОЛЮЦИОННАЯ ГЕОГРАФИЯ

- Т.В. Сапелко, Е.С. Носевич, М.А. Кулькова, А.И. Мурашкин, Е.М. Колпаков.*
Палеоэкологическая характеристика побережья Баренцева моря в позднем голоцене на примере полуострова Средний 391

ЛЕДОТЕХНИКА

- Н.В. Кубышкин, И.В. Бузин, Н.В. Головин, Ю.П. Гудошников, Г.А. Замарин, А.А. Скутин.* Ледотехнические аспекты создания объектов транспортной инфраструктуры и разведочного бурения в Арктике 407

ГЕОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА

- Л.В. Цибизов, Е.И. Есин, А.В. Григорьевская, К.А. Сосновцев.* Магнитометрия и георадиолокация в применении к картированию полигонально-жильных льдов едомного комплекса 427

ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ

- С.Н. Зацепя, А.А. Ивченко, В.В. Солбаков, В.В. Становой.* Метод моделирования последствий сверхпродолжительных аварий на объектах нефтедобычи в Арктическом регионе 439

СТРАНИЦЫ ИСТОРИИ

- В.В. Лукин.* Отечественной антарктической станции
Полос недоступности — 60 лет 455

CONTENTS

OCEANOLOGY

V.A. Borodkin, S.M. Kovalev, A.I. Shushlebin. Spatial heterogeneity in the structure of fast ice level in the area of the research station “Ice base Cape of Baranov” 351

HYDROLOGY OF LAND AND HYDROCHEMISTRY

V.A. Bryzgalo, M.V. Tretiakov, E.V. Rumiantseva, E.N. Shestakova, O.V. Muzhdaba. Rivers in the Russian Arctic support zones and their current status 365

E.S. Kolpakova. Chlorophenol compounds in freshwater lakes of subarctic regions... 380

GEOMORPHOLOGY AND EVOLUTIONARY GEOGRAPHY

T.V. Sapelko, E.S. Nosevich, M.A. Kulkova, A.I. Murashkin, E.M. Kolpakov. Paleoeological characteristics of the Barents sea coast during the late holocene by the example of Sredniy Peninsula 391

ICE ENGINEERING

N.V. Kubyshkin, I.V. Buzin, N.V. Golovin, Yu.P. Gudoshnikov, G.A. Zamarin, A.A. Skutin. Aspects of ice engineering for the aims of construction of the transport infrastructure and reconnaissance drilling in the Arctic 407

GEOLOGY AND GEOPHYSICS

L.V. Tsibizov, E.I. Esin, A.V. Grigorevskaya, K.A. Sosnovtsev. Magnetometry and ground penetrating radar in application to mapping of polygonal wedge ice of yedoma complex 427

APPLIED ISSUES

S.N. Zatsepa, A.A. Ivchenko, V.V. Solbakov, V.V. Stanovoy. A method for modeling of the consequences of super-continuous accidents on oil production objects in the Arctic region..... 439

PAGES OF HISTORY

V.V. Lukin. Russian Antarctic Station Pole of Inaccessibility — 60 years old 455

ОКЕАНОЛОГИЯ

УДК 532.322

DOI: 10.30758/0555-2648-2018-64-4-351-364

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ НЕОДНОРОДНОСТЬ СТРОЕНИЯ РОВНОГО ПРИПАЙНОГО ЛЬДА В РАЙОНЕ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО СТАЦИОНАРА «ЛЕДОВАЯ БАЗА “МЫС БАРАНОВА”»

В.А. БОРОДКИН, С.М. КОВАЛЕВ, А.И. ШУШЛЕБИН*

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

**skovalev@aari.ru*

SPATIAL HETEROGENEITY IN THE STRUCTURE FAST ICE OF LEVEL IN THE AREA OF THE RESEARCH STATION «ICE BASE CAPE OF BARANOV».

V.A. BORODKIN, S.M. KOVALEV, A.I. SHUSHLEBIN*

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

**skovalev@aari.ru*

Received September, 7, 2018

Accepted November, 30, 2018

Keywords: fast ice, salinity, temperature, texture, thermic metamorphism.

Summary

Two ice coring transects in the Shokalsky Strait were made in order to analyze a spatial heterogeneity in the structure of fast ice in the area of the research station “Ice base Cape of Baranov”. The first transect was 16 km long made off the shore of Bolshevik Island in a western direction across the Shokalsky Strait. The second transect was made along the eastern shore of the Shokalsky Strait. Structural analysis of the recovered sea ice cores shows that fast ice in the Shokalsky Strait features a complicated multilayer structure formed of congelation ice, congelation-frazil ice, frazil slush, and infiltration formations. Various conditions of ice formation form the ices of various genetic types. In terms of ice thickness, a sequence of layer occurrence and type, all level fast ice of the Shokalsky Strait in the area of the station can be divided into three main groups. The group I, being the most common one, is the ice group formed directly in the strait, approximately outside the 100 m isobath. Its structure comprises three to four layers. The average ice thickness measured in the end of May was 132 cm. A distinctive feature of the ice belonging to (or associated with) this group is the presence of a distinct lamination in the texture pattern for almost all recovered ice cores.

Citation: Borodkin V.A., Kovalev S.M., Shushlebin A.I. Spatial heterogeneity in the structure fast ice of level in the area of the research station “Ice base Cape of Baranov”. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2018, 64, 4: 351–364. [In Russian]. doi: 10.30758/0555-2648-2018-64-4-351-364

The ice of this group also has an increased salinity compared to the ice of other groups, especially in the upper layers.

The ice of the group II prevails, mainly in closed bays or gulfs. This group ice forms in dynamically stable conditions. Formation of fast ice in these regions of the study area began some earlier than in other locations, and the thickness of this ice reached 160 cm or more.

The ice of the group III is transitional from the group II to the group I. Its distinctive feature is the presence of a thick layer of rafting ice. The main place of its formation is the boundary of separation of fast ice with drifting ice or open water.

In the Shokalsky Strait, in the bays and in the coastal regions, there was observed the spatial ordering of the columnar ice crystals. This feature was especially pronounced in level fast ice from the open part of the strait.

Поступила 7 сентября 2018 г.

Принята к печати 30 ноября 2018 г.

Ключевые слова: припай, соленость, текстура, температура, термометаморфизм.

Для анализа пространственной неоднородности строения припайного льда в проливе Шокальского было сделано два ледовых разреза. Первый разрез был выполнен от берега в западном направлении поперек пролива Шокальского. Второй разрез был проложен вдоль восточного берега пролива Шокальского. Анализ показал, что весь ровный припайный лед пролива Шокальского в районе базы можно разделить на три основные группы. К первой, самой распространенной группе (группа I) относится лед, образовавшийся непосредственно в проливе, примерно за пределами 100-метровой изобаты. Льды второй группы (группа II) преобладают главным образом в закрытых бухтах или заливах, их нарастание проходило в динамически стабильных условиях. Лед группы III является переходным от группы II к группе I. В проливе Шокальского, в бухтах и в прибрежных районах наблюдалась пространственная упорядоченность волокнистых кристаллов. Описаны процессы образования и взлома припая.

ВВЕДЕНИЕ

В 2013 г. на о. Большевик арх. Северная Земля возобновил постоянную работу научно-исследовательский стационар (НИС) «Ледовая база “Мыс Баранова”». С этого времени появилась возможность проводить регулярные комплексные исследования состояния морского снежно-ледяного покрова и материкового льда западной части моря Лаптевых. Первые такие наблюдения были проведены в весенне-летний период 2014 г. Основными задачами изучения пространственной неоднородности строения ледяного покрова в районе НИС являлись: получение сведений о строении и физических свойствах припайного однолетнего льда, изучение процессов метаморфизма в однолетнем припайном льду в весенне-летний период.

Работы выполнялись на прилегающей к НИС акватории. В рамках поставленных задач было выполнено два ледовых разреза (один от НИС до середины пролива Шокальского и второй вдоль восточного берега бухты Амба) и проведены исследования в южной части залива Микояна.

Полученные результаты исследования припая пролива Шокальского в 2014 г. должны лечь в основу дальнейших работ, направленных на изучение процессов формирования ровного льда и его физических свойств при различных условиях ледообразования, в которых значимую роль станет играть строение льда.

МЕТОДИКА РАБОТ

Для исследования пространственной неоднородности строения припайного льда в проливе Шокальского в период с 17 мая по 11 июня 2014 г. было выполнено два ледовых разреза, на которых отобрано семь кернов для текстурно-структурного

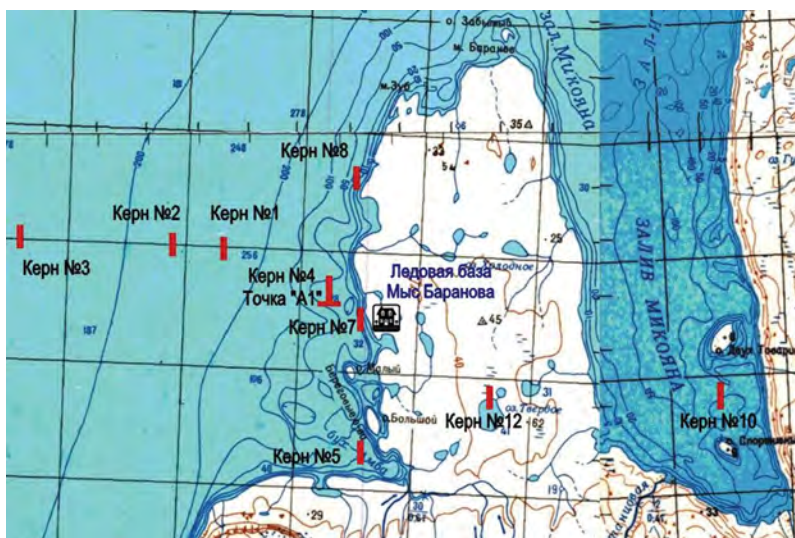


Рис. 1. Схема мест взятия образцов льда весной 2014 г. и преобладающие направления главной оптической оси волокнистых кристаллов.

1 — «Ледовая база «Мыс Баранова»»; 2 — места отбора кернов; 3 — преобладающее направление главной оптической оси волокнистых кристаллов; 4 — дополнительное направление главной оптической оси волокнистых кристаллов

Fig. 1. Map of the study area in the eastern Shokalsky Strait showing the locations of the coring sites in spring — summer 2014 and predominant orientation of main optical axes of ice crystals from core segments associated with columnar ice.

1 — «Ice base Cape of Baranov»; 2 — places for taking ice samples; 3 — predominant direction of the fibrous crystals main optical axis; 4 — additional direction of the fibrous crystals main optical axis

анализа и определения некоторых физических свойств льда (рис. 1). Еще один керн отобран 16 июня в заливе Микояна.

Первый разрез длиной 16 км был выполнен от берега в районе базы в западном направлении поперек пролива Шокальского. Он содержал 4 точки (керны № 1, № 2, № 3 и № 4). Второй разрез был проложен вдоль восточного берега пролива Шокальского. Целью разреза было выявление различия в строении льда на наиболее характерных участках ледяного покрова. В него вошли керны № 5 в бухте Амба, № 7 у берега в районе базы и № 8 у берега в 2 км к северу от базы. В этот же разрез вошел керн № 4, взятый на точке (рис. 1), где проводились наблюдения за временной изменчивостью строения ледяного покрова. Таким образом, эта точка объединяет оба ледовых разреза и наблюдения за временной изменчивостью строения ровного припайного льда.

Для отбора образцов выбиралось место с неповрежденным снежным покровом [1]. Температура льда определялась датчиком GTN 175/Pt. Для защиты льда от воздействий солнечной радиации использовался светоотражающий тубус. Соленость льда определялась по электропроводности талой воды кондуктометром Hunna.

Текстурно-структурный анализ проводился в холодной ледовой лаборатории [2]. Из ледяных кернов выпиливались вертикальные пластины высотой 20–22 см, шириной 15 см и толщиной 2 см. Стыковка полученных пластин между собой позволяла получить полный вертикальный срез керна на всю его толщину.

Для структурного анализа из выбранных слоев изготавливались пластины толщиной менее 1 мм, которые помещались между двумя поляризационными стеклами и освещались снизу электрическими лампами. Полученное изображение кристаллов льда описывалось и фотографировалось.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Становление припая в районе базы началось в первой декаде октября 2013 г. Первым в относительно спокойных условиях сформировался лед в юго-восточной части бухты Амба. Затем в условиях торошения и наслоения молодых льдов толщиной до 10 см припай установился вдоль берега и на большей части бухты Амба. Образовавшийся припай ограничивался со стороны пролива Шокальского айсбергами, севшими на грунт, границей местоположения которых можно считать 100-метровую изобату. Дальнейшее распространение границы неподвижного льда в сторону пролива проходило в условиях динамической неустойчивости, сопровождалось торошением и наслоением молодых льдов. Исследование выступающей части торосов показало, что наблюдалось не менее двух торошений с толщинами льда 15–20 см и 25–35 см, создавших гряды торосов вдоль берега. Становление припая в центральной части пролива Шокальского произошло в третьей декаде ноября.

Анализ отобранных кернов показал, что лед пролива Шокальского представляет собой сложную многослойную систему, в формировании которой принимали участие льды конжеляционного, конжеляционно-внутриводного, внутриводно-шугового и инфильтрационного образования. Они формируют льды различных генетических типов [3]. По толщине, последовательности залегания слоев и типу весь ровный

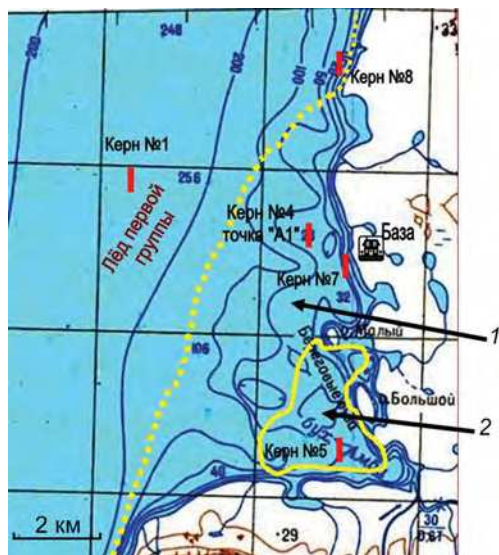


Рис. 2. Схема районирования морского ровного припайного льда по доминирующей группе в восточной части пролива Шокальского летом 2014 г.

1 — лед группы III, 2 — лед группы II

Fig. 2. Map of the study area in the eastern Shokalsky Strait showing the coring sites and three identified zones (groups) of level fast ice in spring-summer of 2014.

1 — ice of the group III, 2 — ice of the group II

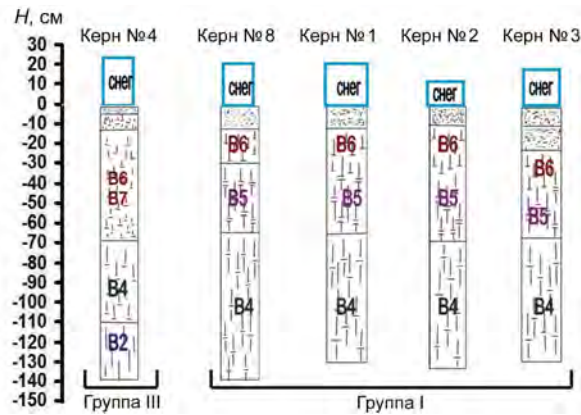


Рис. 3. Схема строения льда на ледовом разрезе через пролив Шокальского, лето 2014 г.

Fig. 3. Vertical structure of level fast ice as inferred from the analysis of sea ice cores recovered of ice structure from the transect across the Shokalsky Straitin, summer 2014

припайный лед пролива Шокальского в районе базы можно разделить на три основные группы. К первой, самой распространенной группе (группа I) относится лед, образовавшийся непосредственно в проливе, примерно за пределами 100-метровой изобаты (рис. 2). Его строение можно охарактеризовать как трех-четырёхслойную систему (керны № 1, № 2 и № 3) (рис. 3). Средняя толщина льда в конце мая составила 132 см. Верхние 5–20 см сформированы мелкозернистыми кристаллами снежно-водного, внутриводного или шугового льда (B8, B7). Нижележащие слои сложены льдом типа B6 с чередованием изометрических и шестоватых кристаллов, с последующим формированием льда волокнистых структур типа B5, имеющего большое количество включений кристаллов внутриводного льда. Такое строение льда указывает на наличие сильных течений и открытой воды в виде разводий или заприпайных полыней в период нарастания льда (рис. 4).

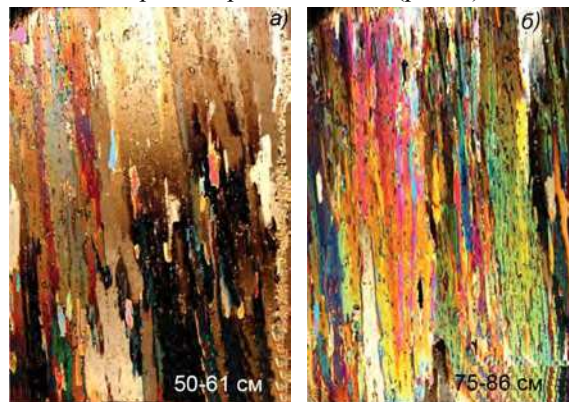


Рис. 4. Фотографии вертикальных срезов средних слоев льда пролива Шокальского, керн № 1. а — слой 50–61 см, лед типа B5; б — слой 75–86 см, лед типа B4. Глубины слоев отсчитываются от верхней поверхности льда

Fig. 4. Photographs of vertical ice core thin sections of the middle layers of sea ice Core № 1 from the Shokalsky Strait.

а — layer 50–61 cm, ice type B5; б — layer 75–86 cm, ice type B4. Depths indicate from the top of the ice core

Нижний слой сложен льдом типа В4, состоящим из волокнистых кристаллов с меньшим количеством включений внутриводного льда, чем у льда типа В5. Этот лед вырос уже после полного становления припая. В процентном отношении лед зернистой структуры верхних слоев на конец мая занимал не более 15 % от общей толщины льда. Последующие слои имеют волокнистую структуру (85 %), с обязательным присутствием большего или меньшего количества включений кристаллов внутриводного льда, что указывает на динамичность условий ледообразования. Одной из отличительных особенностей льда группы I является наличие мощной слоистости в текстурном рисунке практически для всего льда (рис. 5). Льды этой группы образованы в более поздние сроки, чем льды других групп, когда температура воздуха заметно понижается, а скорость роста кристаллов льда возрастает. С этим связана повышенная соленость льда по сравнению со льдами других групп, особенно в верхних (0–60 см) слоях (рис. 6). Средние и нижние слои льда имеют пространственную упорядоченность волокнистых кристаллов, что вызывает пространственную анизотропию некоторых физических свойств ледяного покрова в проливе. Структурные и текстурные особенности строения льда этой группы показывают, что на строение льда серьезное влияние оказывало присутствие постоянных течений, разводий или полыней.

По строению и физическим свойствам ко льдам группы I следует отнести и лед керна № 8, взятый в 2 км к северу от базы и в 200 м от берега. Несмотря на поздние сроки отбора керна (11 июня), средняя соленость льда продолжала оставаться высокой по сравнению со средней соленостью льда на контрольной точке «А1» (см. рис. 2 и таблицу). Эти факторы указывают на то, что становление припая в этом районе происходило позднее, чем в районе бухты Амба и точки «А1». Сроки становления припая в этой части побережья близки к срокам становления припая в центральной части пролива.

Льды группы II преобладают главным образом в закрытых бухтах или заливах, их нарастание проходило в динамически стабильных условиях. Становление припая на этих участках акватории начиналось несколько раньше, чем в других местах, и толщина этого льда достигает 160 и более сантиметров. Верхний слой до 30 см, как и у льдов группы I, сложен из зернистых кристаллов различных типов конгеляционного ледообразования (В8, В7, В6), ниже которого нарастает лед волокнистых

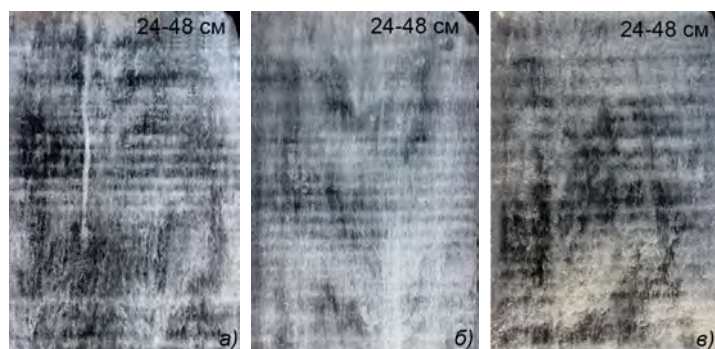


Рис. 5. Фотографии вертикальных срезов слоя 24–48 см льда пролива Шокальского.

a — керн № 1 (17.05.2014); *б* — керн № 2 (19.05.2014); *в* — керн № 3 (20.05.2014)

Fig. 5. Photographs of vertical ice core thick sections of the ice layer 24–48 cm from the Shokalsky Strait.

a — core № 1 (17.05.2014); *б* — core № 2 (19.05.2014); *в* — core № 3 (20.05.2014)

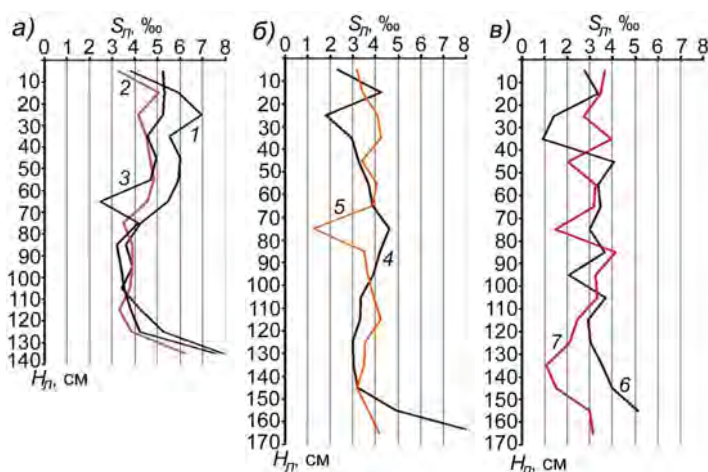


Рис. 6. Распределение солёности ($S_{\text{л}}$) по толщине льда ($H_{\text{л}}$) в группах I (а), II (б) и III (в).

1 — керн № 1; 2 — керн № 2; 3 — керн № 3; 4 — керн № 5; 5 — керн № 10; 6 — керн № 6; 7 — керн № 7

Fig. 6. Vertical salinity profiles in the analysed ice cores for group I (a), II (б) and III (в).

1 — core № 1; 2 — core № 2; 3 — core № 3; 4 — core № 5; 5 — core № 10; 6 — core № 6; 7 — core № 7

Таблица

Некоторые характеристики припайного льда на ледовых разрезах

Керн	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 7	№ 8	№ 10
Группа	I	I	I	III	II	III	I	II
Дата	17 V	19 V	20 V	23 V	27 V	8 VI	11 VI	16 VI
$H_{\text{сн}}$, см	20	9	15	27	11	50	20	28
$H_{\text{л}}$, см	130	136	130	142	160	168	140	168
ΔH , см	9	4	3	4	12	0	1	6
$T_{\text{л}}$, °C, средняя	-3,6	-3,6	-3,9	-2,8	-2,4	-2,3	-2,2	-2,2
$T_{\text{л}}$, °C, минимальная	-4,7	-4,9	-5,54	-4,2	-2,8	-2,5	-2,6	-2,6
$T_{\text{возд}}$, °C	-6,2	-3,8	-9,8	-2,6	2,0	-0,9	-2,7	-3,9
$T_{\text{снег/лед}}$, °C	-4,2	-2,4	-1,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
$S_{\text{л}}$, ‰, средняя	5,16	4,45	4,45	3,13	3,80	2,80	4,48	3,64
$S_{\text{л}}$, ‰, максимальная	7,89	7,23	7,56	3,73	8,61	4,12	7,85	4,53
$S_{\text{л}}$, ‰, поверхность	3,83	3,27	5,25	2,60	2,30	3,65	4,31	3,18

Примечание: $H_{\text{сн}}$ — толщина снега, $H_{\text{л}}$ — толщина льда, ΔH — превышение льда, $T_{\text{возд}}$ — температура воздуха, $T_{\text{л}}$ — температура льда, $T_{\text{снег/лед}}$ — температура границы снег/лед, $S_{\text{л}}$ — солёность льда.

структур (рис. 7). В отличие от льдов группы I рост волокнистых кристаллов происходит в более статических условиях, без поступления кристаллов внутриводного льда к фронту кристаллизации, в результате чего формируется лёд типа В2 (рис. 8).

Ко льдам группы II относится лёд юго-восточной части бухты Амба (керн № 5) и лёд южной части залива Микояна (керн № 10). Текстурированный рисунок этого льда (рис. 8) легко различается по капиллярным порам, состоящим из вертикально расположенных между волокнами кристаллов цепочек мельчайших пузырьков, иногда соединённых между собой в трубчатую систему. Распределение солёности по толщине у льдов этой группы более сглажено. Волокнистая текстура способствует

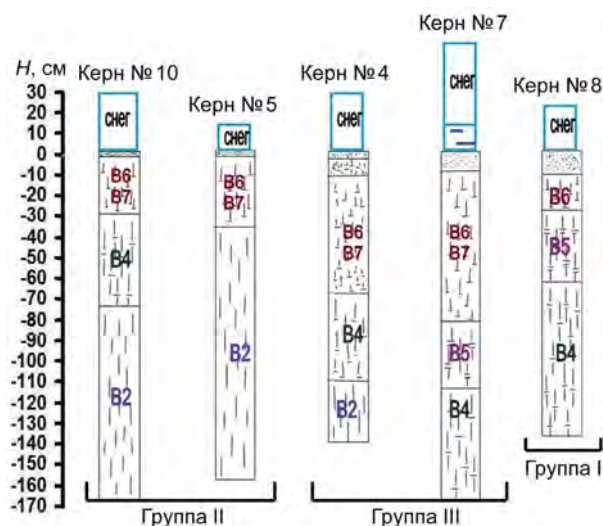


Рис. 7. Схема строения льда на ледовом разрезе вдоль восточного берега пролива Шокальского, лето 2014 г.

Fig. 7. Scheme of the ice structure on the ice cut along the eastern shore of the Shokalsky Strait, summer 2014

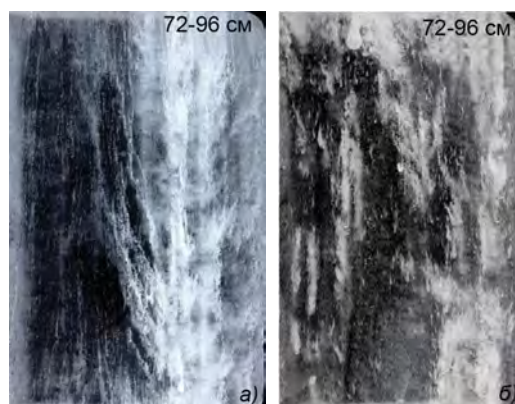


Рис. 8. Фотографии вертикальных срезов слоя 72–96 см льда: *a* — керн № 5 в бухте Амба; *б* — керн № 10 в заливе Микояна, июнь 2014 г.

Fig. 8. Photographs of vertical sections of the ice layer 72–96 cm: *a* — core № 5 in the Amba Bay; *b* — core № 10 in Mikoyan Bay, June 2014

более легкому образованию стоковых канальцев по системе трубчатых включений, и соленость льда быстро выравнивается по толщине. Меньшее количество участков выклинивания и фронтального прерывания роста волокнистых кристаллов приводит к быстрому объединению отдельных стоковых канальцев и формированию стоковых русел, пронизывающих толщу льда с верхних слоев до самого низа. Соотношение льда зернистой и волокнистой структуры примерно то же, что и у льдов группы I (20 % и 80 %), но средние и нижние слои льда представлены в основном льдами типа B2, в отличие от группы I, где преобладают льды типа B5 и B4.

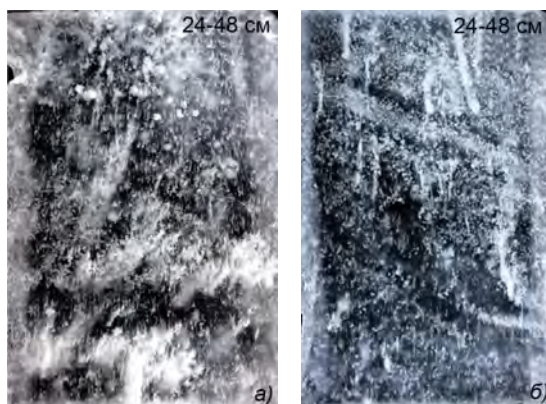


Рис. 9. Фотографии вертикальных срезов слоя 24–48 см льда у восточного берега пролива Шокальского: а — керн № 7, 8.06.2014; б — керн № 9 (рядом с керном № 4), 12.06.2014

Fig. 9. Photographs of vertical thick sections of the ice layer 24–48 cm near the eastern shore of the Shokalsky Strait: а — core № 7, 8.06.2014; б — core № 9 (close to the core № 4), 12.06.2014

Лед группы III является переходным от группы II к группе I. Его отличительной особенностью является наличие мощного слоя набивного льда. Основное место его образования — граница разделения припайного льда с дрейфующим льдом или с открытой водой. В условиях динамической нестабильности ледообразования под кромку припая набиваются продукты механического разрушения льда в виде отдельных обломков или ледяной крошки, а также кристаллы внутриводного и шугового льда. Могут происходить наслоение или торошение льда с изменением горизонтального расположения отдельных кусков. В результате под верхней кромкой припая образуется слой, состоящий из зернистых изометрических кристаллов различного размера и формы (рис. 9). Лед типа В7, В6.

Величина этого слоя может колебаться в широких пределах от нескольких сантиметров до метра и зависит от интенсивности динамических процессов, сопровождающих его образование. В той или иной мере такой слой может встречаться в группах I или II, но его толщина редко бывает значительной. Условно границей перехода от одной группы к другой принята толщина слоя набивного льда в 40 см. Лед группы III представлен керном № 7 и кернами, взятыми в точке «А1». После стабилизации условий ледообразования под слоем набивного льда образуется лед волокнистых структур В5, В4 или В2 в зависимости от интенсивности поступления кристаллов внутриводного льда к фронту кристаллизации. В точке «А1» и в керне № 7 величина слоя набивного льда составляет 40 % от общей толщины льда на момент отбора кернов, и 60 % составляют нижележащие слои волокнистой структуры. Распределение солености по толщине во льдах группы III отличается большей неоднородностью, чем во льдах других групп. В акватории станции лед этой группы охватывает большую часть бухты Амба и широкий (до 2–3 км) участок вдоль всего побережья.

В местах повышенного снегонакопления независимо от принадлежности к той или иной группе в результате проседания льда и выступания морской воды на поверхность образуется слой инфильтрационного льда (лед типа В9) (рис. 10).

Особенно интенсивно инфильтрационный лед образуется вдоль берегов, где наблюдаются надувы снега толщиной до нескольких метров. Ширина полосы вдоль

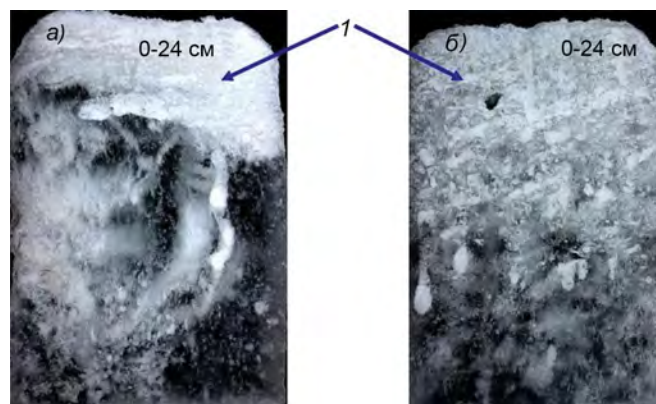


Рис. 10. Фотографии вертикальных срезов слоя 0–24 см льда со слоями инфильтрационного льда типа В9 (1) в проливе Шокальского, июнь 2014 г.: а — керн № 7, 8.06.2014; б — керн № 8, 11.06.2014

Fig. 10. Photographs of vertical thick sections of the ice layer 0–24 cm with layers of infiltration ice В9 (1) in the Shokalsky Strait, June 2014: а — core № 7, 8.06.2014; б — core № 8, 11.06.2014

берега, где было зафиксировано инфильтрационное ледообразование вблизи станции, достигает 200 м. Инфильтрационный лед образуется вблизи айсбергов и торосов, где создаются благоприятные условия для аккумуляции снега. Этот лед легко распознать по белому цвету и большому количеству пузыристых включений различной величины, зачастую создающих слоистую текстуру (лед типа В9). Во второй половине июня практически на всей акватории, где сохранялся снежный покров, происходило образование пресного или распресненного слоя инфильтрационного льда за счет режеляционной перекристаллизации нижних слоев снега (лед типа А9). Толщина этого слоя в районе точки «А1» не превышала 10 см.

С конца третьей декады июня в бухте Амба и вдоль берегов началось нарастание пресного или распресненного льда снизу в виде набора слоев различной толщины и плотности, состоящих из пластинчатых и шуговых кристаллов.

В проливе Шокальского, в бухтах и в прибрежных районах наблюдалась пространственная упорядоченность волокнистых кристаллов. Особенно четко она прослеживалась в открытой части пролива [4]. Анализ расположения кристаллов в горизонтальном шлифе керна № 1 с толщины 75 см показал высокую степень однородности положения главной оптической оси кристаллов (С-оси) ориентированной, с учетом магнитного склонения, по направлению ССВ–ЮЮЗ (рис. 11).

Поскольку пространственная упорядоченность кристаллов волокнистых структур обусловлена наличием постоянных течений [5, 6], то анализ преобладающего направления С-оси кристаллов позволяет установить наличие или отсутствие устойчивых подледных потоков и получить их направление (рис. 1).

Результаты структурного анализа горизонтальных шлифов льда, взятого в проливе Шокальского в шести километрах от станции (керн № 1), показывают, что подледные потоки в этом месте устойчивые, и имеют направленность ССВ–ЮЮЗ. В районе контрольной точки «А1» сохраняется направление ССВ–ЮЮЗ, которому соответствуют 51 % кристаллов в горизонтальном срезе, но появляются два новых направления: ЗСЗ–ВЮВ (33 %) и ССЗ–ЮЮВ (16 %). В районе взятия керна № 8 основные направления подледных течений ВСВ–ЗЮЗ и В–З. На направление

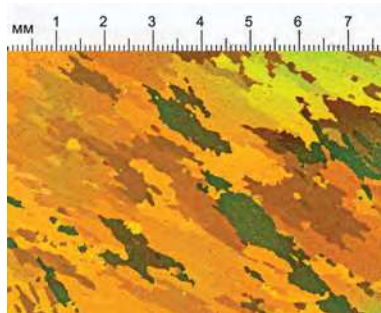


Рис. 11. Пространственная упорядоченность волокнистых кристаллов в керне № 1 на горизонте 75 см, 17.05.2014

Fig. 11. Spatial ordering of fibrous crystals in core № 1 at 75 cm depth, 17.05.2014

подледного потока в этом районе оказала влияние галечная коса, вытянутая в пролив южнее места отбора керна и отгораживающая небольшую бухту с севера.

В юго-восточной части бухты Амба, которая представляет собой сужающийся к устью реки Амба небольшой залив, основным оказалось направление С–Ю (50 %) и два дополнительных направления: СВ–ЮЗ (40 %) и З–В (10 %). В южной части залива Микояна преобладающим направлением стало ССЗ–ЮЮВ (50 %), совпадающее с вытянутостью залива, а дополнительное направление СЗ–ЮВ (20 %) имеет место из-за небольшого острова Спортивный, расположенного южнее точки отбора керна.

Торосообразование в районе «Ледовой базы «Мыс Баранова»» началось сразу же после начала становления припая. Лед в большей части бухты Амба и полоса льда вдоль восточного берега пролива Шокальского шириной от 0,5 до 1,5 км подверглись торошению при толщине льда 10–15 см. Позднее прошла вторая волна торошения, в виде отдельных полос различной ширины с генеральным направлением ССВ–ЮЮЗ с толщиной блоков льда в торосах 20–30 см, граница которой в сторону бухты Амба ограничивалась примерно 50-метровой изобатой. Несколько мористее этой полосы были обнаружены торосы с толщиной блоков льда 30–35 см. Граница их распространения немного выходила за внешнюю границу расположения айсбергов. Исключение составил мыс Визе, где расстояние между торосами, сложенными льдами разной толщины, оказалось минимальным и ограничивалось несколькими десятками метров. В глубине бухты Амба от устья в сторону пролива Шокальского на расстоянии 1–1,5 км признаков интенсивного торошения не обнаружено. Возможно, толща снега скрыла следы торошения на ранней стадии становления припая. Анализ строения керна льда, взятого на этом участке, показывает, что наслоение и торошение молодых льдов толщиной до 10 см могло иметь место.

Взлом припая в проливе Шокальского проходил поэтапно.

В последней декаде июня на льду появились первые снежицы. Заприпайная полынья проходила на 2–3 км севернее мыса Баранова. Было выявлено образование инфильтрационного пресного льда на границе снег–лед.

29 июня – 1 июля начался интенсивный сток пресных вод суши, зафиксировано начало нарастания льда летнего образования снизу.

В середине июля припай взломало в западной части пролива Шокальского. Граница взлома прошла севернее мыса Баранова на юго-запад до фьорда Марата.

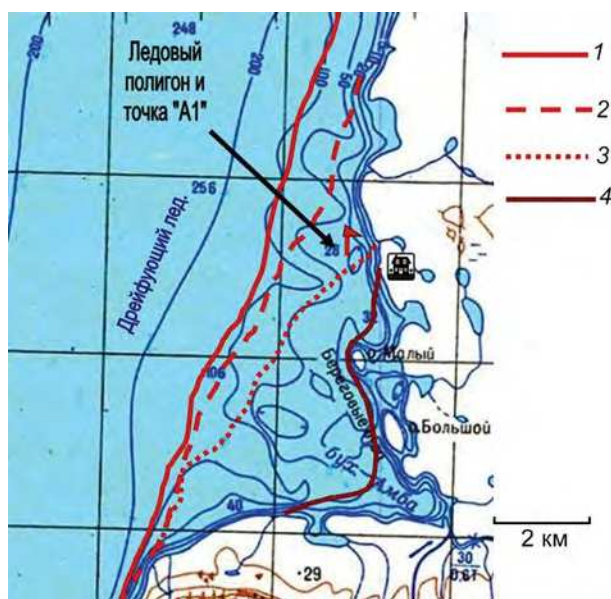


Рис. 12. Схема положения кромки припая перед его разрушением в районе «Ледовой базы «Мыс Баранова»»: 1 — 30.07.2014, 2 — 4.08.2014, 3 — 7.08.2014, 4 — 9.08.2014

Fig. 12. Changes in fast ice edge position during summer break up Scheme of the position of the fast ice edge before its destruction in the area of the “Ice Base Cape of Baranov”: 1 — 30.07.2014, 2 — 4.08.2014, 3 — 7.08.2014, 4 — 9.08.2014

В конце июля припай в большей части пролива Шокальского взломало. Граница взлома прошла от мыса Баранова вдоль берега на расстоянии 2–5 км (рис. 12). Положение кромки припая определялось на основе визуальных наблюдений с высокого берега.

К 11 августа морской припайный лед в районе «Ледовой базы «Мыс Баранова»» оставался только в заливе Микояна (рис. 13).

Первый раз лед залива Микояна обследовался 16 июня 2014 г. Текстурно-структурный анализ льда, взятого на ровном припае между островом Спортивный и островом Двух Товарищей в южной части залива, показал, что становление льда в заливе Микояна протекало аналогично становлению припая в юго-восточной части бухты Амба (группа II). Нарастание верхних 30 см льда проходило в условиях динамической неустойчивости. По мере продвижения кромки припая на север создавались условия для появления кристаллов волокнистых структур. До достижения льдом толщины 74 см прослеживалось влияние заприпайной полыньи, выразившееся в поступлении кристаллов внутриводного льда к фронту кристаллизации и формированию льда типа В5, В4. Этому способствовали постоянные подледные потоки (приливо-отливные течения) с генеральным направлением вдоль оси залива, отразившиеся в пространственной упорядоченности волокнистых кристаллов. Ниже горизонта в 74 см лед нарастал в динамически стабильных условиях с образованием льда типа В2.

7 июля были обнаружены снежницы в районе устья реки Останцовая и в местах впадения мелких ручьев. 17 июля на этих участках была зафиксирована вода. Лед в центральной части залива потемнел. К началу августа у берегов, где впадают



Рис. 13. Ледовая обстановка северо-восточной части пролива Шокальского за 4 дня до взлома припая. ИСЗ Landsat 8, 11.08.2014, 17:58 UTC: 1 — НИС «Ледовая база «Мыс Баранова»», 2 — бухта Амба, 3 — припай залива Микояна

Fig. 13. Ice situation of the north-eastern part of the Shokalsky Strait, 4 days before the fast ice break. Landsat satellite 8, 11.08.2014, 17:58 UTC: 1 — Research station «Ice base Cape of Baranov», 2 — Amba Bay, 3 — the fast ice of Mikoyan Gulf

реки и ручьи, образовались закраины в несколько десятков метров. Повсеместно на льду наблюдались снежицы.

14 августа припай сохранился на небольшом участке южнее и восточнее острова Спортивный. 15 августа припай окончательно взломало, а большая часть льда была вынесена из залива.

ВЫВОДЫ

Припайный лед в районе научно-исследовательского стационара «Ледовая база «Мыс Баранова»», образовавшийся непосредственно в проливе, за пределами 100-метровой изобаты, представляет собой сложную трех-четырёхслойную систему. В закрытых бухтах или заливах нарастание льда проходит в динамически стабильных условиях. Становление припая на этих участках акватории начиналось несколько раньше, чем в других местах, и толщина этого льда больше толщины льда пролива Шокальского.

В местах повышенного снегонакопления в результате проседания льда и выступания морской воды на поверхность образуется слой инфильтрационного льда. Особенно интенсивно инфильтрационный лед образуется вдоль берегов, где наблюдаются наддувы снега толщиной до нескольких метров. Ширина полосы вдоль берега, где было зафиксировано инфильтрационное ледообразование вблизи станции, достигает 200 м. Инфильтрационный лед образуется вблизи айсбергов и торосов, где создаются благоприятные условия для аккумуляции снега.

В проливе Шокальского, в бухтах и в прибрежных районах наблюдалась пространственная упорядоченность волокнистых кристаллов. Особенно четко она прослеживалась в открытой части пролива. Анализ преобладающего направления С-оси кристаллов позволяет установить наличие или отсутствие устойчивых подледных потоков и получить их направление.

Торосообразование в районе «Ледовой базы “Мыс Баранова”» началось сразу же после начала становления припая. Лед в большей части бухты Амба и полоса льда вдоль восточного берега пролива Шокальского шириной от 0,5 до 1,5 км подверглись торошению при толщине льда 10–15 см. Позднее прошла вторая волна торошения, с толщиной блоков льда в торосах 20–30 см, граница которой в сторону бухты Амба ограничивалась примерно 50-метровой изобатой. Несколько мористее этой полосы были обнаружены торосы с толщиной блоков льда 30–35 см.

Благодарности. Авторы выражают благодарность сотрудникам научно-исследовательского стационара «Ледовая база “Мыс Баранова”», оказавшим помощь в получении экспериментальных данных. Работа выполнена в рамках плановой научной тематики ААНИИ 1.5.4.5 по проекту ЦНТП Росгидромета.

Acknowledgments. Authors express their gratitude to the employees of the research station “Ice base “Cape of Baranov”, assisted in receiving the experimental data. The work was carried out within the project 1.5.4.5 of the of Roshydromet’s CSTP.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Руководство по изучению физико-механических свойств льда / Под ред. Г.Н.Яковлева. Л.: ААНИИ, 1971. 46 с.
2. Смирнов В.Н., Ковалев С.М., Бородкин В.А., Нубом А.А., Шушлебин А.И. Инструментальный мониторинг и краткосрочный прогноз явлений сжатия и торошения в морских льдах. СПб.: ААНИИ, 2017. 174 с.
3. Черепанов Н.В. Классификация льдов природных водоемов // Труды ААНИИ. 1976. Т. 331. С. 77–99.
4. Черепанов Н.В. Пространственная упорядоченность структуры морского льда // Проблемы Арктики и Антарктики. 1971. Т. 38. С. 137–140.
5. Страхов М.В. Исследование пространственно-ориентированных кристаллических структур арктического морского льда. Электрофизические и физико-механические свойства льда / Под ред. В.В. Богородского, В.П. Гаврило. Л.: Гидрометеиздат, 1989. С. 134–143.
6. Черепанов Н.В., Страхов М.В. Лабораторные исследования ориентированного роста кристаллов в движущемся водном потоке. Электрофизические и физико-механические свойства льда / Под ред. В.В. Богородского, В.П. Гаврило. Л.: Гидрометеиздат, 1989. С. 144–153.

REFERENCES

1. *Rukovodstvo po izucheniyu fiziko-mekhanicheskikh svoystv l'da*. Manual for the studying of physico-mechanical properties of ice. Ed. G.N. Yakovlev. Leningrad: AARI, 1971: 46 p. [In Russian].
2. *Smirnov V.N., Kovalev S.M., Borodkin V.A., Nubom A.A., Shushlebin A.I. Instrumental'niy monitoring i kratkosrochniy prognoz yavleniy sjatiya i torosheniya v morskikh l'dah*. Instrumental monitoring and short-term forecast of compression and ridging in sea ices. St. Petersburg: AARI, 2017: 174 p. [In Russian].
3. *Cherepanov N.V. Classification of ice of natural reservoirs. Trudy Arkticheskogo i antarkticheskogo nauchnoy-issledovatel'skogo instituta*. Proc. AARI. 1976, 331: 77–99. [In Russian].
4. *Cherepanov N.V. Spatial orderliness of the sea ice structure. Problemy Arktiki i Antarktiki*. Problems of Arctic and Antarctic. 1971, 38: 137–140. [In Russian].
5. *Strakhov M. V. Electro-fizicheskie i fiziko-mekhanicheskie svoystva l'da*. Investigation of the spatial-oriented crystal structures of the arctic sea ice. Electro-physical and physico-mechanical properties of ice. Ed.: V.V.Bogorodsky, V.P. Gavrilov. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1989: 134–143. [In Russian].
6. *Cherepanov N.V., Strakhov M.V. Electro-fizicheskie i fiziko-mekhanicheskie svoystva l'da*. Laboratory investigations of the oriented growth of crystals in the moving flow of water. Electro-physical and physico-mechanical properties of ice. Ed.: V.V.Bogorodsky, V.P.Gavrilov. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1989: 144–153. [In Russian].

ГИДРОЛОГИЯ СУШИ И ГИДРОХИМИЯ

УДК (556.53+502.7):332(985)

DOI: 10.30758/0555-2648-2018-64-4-365-379

РЕКИ ОПОРНЫХ ЗОН РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ И ИХ СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ

В.А. БРЫЗГАЛО, М.В. ТРЕТЬЯКОВ, Е.В. РУМЯНЦЕВА*,
Е.Н. ШЕСТАКОВА, О.В. МУЖДАБА

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

*rev@aari.ru

RIVERS IN THE RUSSIAN ARCTIC SUPPORT ZONES AND THEIR CURRENT STATUS

V.A. BRYZGALO, M.V. TRETIKOV, E.V. RUMIANTSEVA*,
E.N. SHESTAKOVA, O.V. MUZHDAABA

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

*rev@aari.ru

Received July, 25, 2018

Accepted September, 27, 2018

Keywords: Arctic zone, development of the Arctic, ecosystem, hydrochemical indicators, pollution degree, rivers, Russia, water resources.

Summary

Implementation of projects to create support zones is closely linked to the optimization of the system of state control over the environmental situation in the Russian Arctic. Previous studies have shown that zones of ecological disadvantage, as well as impact areas, have formed on these territories. In this regard, the urgency of developing and adapting scientific methods for monitoring the status and methods of regulating the quality of freshwater ecosystems is growing. Recent studies show that the reasons for changing the quality of freshwater ecosystems are the introduction of the substances with anthropogenic origin into the water mass and the modification of chemical components of the natural water environment, changes in its physical characteristics and other properties of the freshwater ecosystem.

The aim of this work is to assess the hydrological and environmental state of the river ecosystems in the support zones of the Russian Arctic. The analysis of the long-term regime hydrochemical information (1990–2010) of the state observation network of the Roshydromet was carried out using methods of complex indicators calculating and risk of anthropogenic impact assessments.

Variability of the water pollution degree is analyzed. Priority and critical hydrochemical indicators are identified. It is shown that the role of the anthropogenic component is currently

Citation: Bryzgalo V.A., Tretiakov M.V., Rumiantseva E.V., Shestakova E.N., Muzhdaba O.V. Rivers in the Russian Arctic support zones and their current status. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2018, 64, 4: 365–379. [In Russian]. doi: 10.30758/0555-2648-2018-64-4-365-379.

determinative in the transformation of their hydrochemical regime for the river ecosystems of the support zones under study. Their hydrochemical regime is characterized by high spatial, interannual and intra-annual variability of the component composition of the aquatic environment; formation of a higher “anthropogenically-altered natural background”; periodic accumulation in the water environment of priority pollutants to concentrations of tens of hundreds of times the maximum permissible concentrations, an increase in the frequency of cases of high and extreme high pollution.

Поступила 25 июля 2018 г.

Принята к печати 27 сентября 2018 г.

Ключевые слова: Арктическая зона, водные ресурсы, гидрохимические показатели, развитие Арктики, реки, Россия, степень загрязненности, экосистема.

Реализация проектов по созданию опорных зон Российской Арктики тесно связана с оптимизацией системы государственного контроля за экологической ситуацией, в том числе за состоянием пресноводных экосистем. Целью работы является оценка гидролого-экологического состояния речных экосистем опорных зон Российской Арктики. Анализ многолетней (1990–2010 гг.) режимной гидрохимической информации Росгидромета проводился на основе методов расчета комплексных показателей и оценки риска антропогенного воздействия. Проанализирована изменчивость степени загрязненности вод, выявлены приоритетные и критические гидрохимические показатели. Показано, что для речных экосистем роль антропогенной составляющей является в настоящее время определяющей при трансформации их гидрохимического режима.

ВВЕДЕНИЕ

Комплексное развитие Российской Арктики является стратегически важной задачей страны. Ее достижение связано с формированием новых промышленных районов и развитием транспортной инфраструктуры, в том числе Северного морского пути. Современные вызовы освоения Арктики мотивируют отечественную науку и промышленность ускоренно двигать научно-технический прогресс. При этом развитие обширных арктических территорий должно происходить с учетом экологических требований и интересов защиты среды обитания и традиционного уклада жизни коренных малочисленных народов Севера.

Для повышения уровня социально-экономического развития Арктической зоны РФ (АЗРФ) была утверждена государственная программа РФ «Социально-экономическое развитие Арктической зоны Российской Федерации», в которую включена подпрограмма 1 «Формирование опорных зон развития и обеспечение их функционирования, создание условий для ускоренного социально-экономического развития Арктической зоны Российской Федерации» [1]. Современная административно-территориальная граница АЗРФ определена по границам северных субъектов и их частей [2].

Следует обратить внимание на то, что Арктическая зона — уникальная территория страны, которая в силу своего географического и геостратегического расположения не нуждается в развитии всей территории равномерно. Поэтому первоочередной задачей определена разработка комплексных проектов по созданию опорных зон АЗРФ. Опорная зона не просто некая территория с особым режимом льготного ведения хозяйственной деятельности, а территория каркаса пространственного развития региона в целом.

В настоящее время определены восемь опорных зон развития на территории Российской Арктики: Кольская, Архангельская, Ненецкая, Воркутинская, Ямало-



Рис. Карта Российской Арктики с выделением опорных зон и значимых рек.

1 — субъекты РФ, входящие в состав Арктической зоны; 2 — административно-территориальная граница АЗРФ; 3 — водноресурсная (водноэкологическая) граница АЗРФ; 4 — значимые реки опорных зон АЗРФ; 5 — населенные пункты; 6 — пункты гидрохимических наблюдений; 7 — опорные зоны

Fig. Map of the Russian Arctic with the identification of support zones and the significant rivers

1 — the federal subjects of Russia that are part of the Arctic zone; 2 — the administrative and territorial boundary of the Russian Arctic; 3 — the water resource (water and environmental) border of the Arctic zone of Russia; 4 — significant rivers of the support zones of the Russian Arctic; 5 — settlements; 6 — hydrochemical monitoring stations; 7 — support zones

Ненецкая, Таймыро-Туруханская, Северо-Якутская, Чукотская [1, 3]. На рисунке представлена карта Российской Арктики с выделением опорных зон и значимых рек.

Высокие темпы индустриализации северных регионов в XX в. породили целый ряд проблем, связанных с изменениями состояния окружающей среды. Сосредоточение на относительно небольших территориях населенных пунктов с высокой численностью населения, мощных горнодобывающих, горноперерабатывающих, металлургических, энергетических, транспортных и других предприятий при отсутствии научно обоснованных региональных допустимых уровней нагрузки и использовании неэффективных методов контроля привели к образованию вблизи индустриальных центров зон экологического неблагополучия [4–7].

На территории Российской Арктики ранее были выделены импактные районы — территории, на которых в результате антропогенного воздействия произошли негативные изменения природной среды, приведшие к появлению и развитию чрезвычайных экологических ситуаций. Было определено 11 импактных районов Севера и Арктики России: Кольский, Северо-Двинский, Тимано-Печорский, Ново-земельский, Воркутинский, Пур-Надымский, Средне-Обский, Норильский, Яно-Индигирский, Валькумейский, Билибинский [8].

Индустриализация регионов Российской Арктики уже создала ряд экологических проблем и нарушила устоявшиеся веками традиционные условия проживания малых народов Севера. Проблема загрязнения Арктики совсем недавно казалась бы надуманной, если не абсурдной. Арктический регион всегда рассматривался как один из последних регионов нетронутой природы, который лишь кое-где находился под влиянием местных источников загрязнения.

Учитывая сказанное выше, в число первоочередных ожидаемых результатов реализации подпрограммы 1 [1] включено обеспечение сбора и обработки информации о важнейших показателях обстановки в АЗРФ и оптимизация системы государственного контроля за экологической ситуацией в АЗРФ.

Становится очевидной необходимость разработки обоснованного подхода к решению проблемы освоения природных ресурсов Арктики, учитывающего не только экономические интересы государства, но и необходимость сохранения уникальной природной среды. Особую остроту приобретают экологические исследования, призванные оценить современное состояние уязвимой арктической среды, роль процессов, связанных с необратимыми изменениями, генезис опасных процессов, влияние хозяйственной деятельности на водосборе и в руслах рек, на экологическое состояние устьевых областей рек, пресноводных губ и заливов.

Значительную долю в экологических исследованиях занимают научно обоснованные методы контроля состояния и методы регулирования качества пресноводных экосистем, поскольку для большинства районов вопросы качества стоят более остро, чем вопросы количественной нехватки воды. Фундаментальные исследования последних лет показывают, что причины изменения качества пресноводных экосистем заключаются как в привносе в водную массу веществ антропогенного происхождения, так и в изменении неорганических и органических химических компонентов природной водной среды, изменении ее физических в частности температурных характеристик и других свойств пресноводной экосистемы [9, 10].

Объектами настоящего исследования стали значимые реки восьми опорных зон. Перечень рек и их основные характеристики приведены в табл. 1. Указанные реки

выделены на карте (см. рисунок), пункты наблюдений на реках находятся в пределах Арктической зоны РФ согласно административно-территориальной границе [2] или водноресурсной (водноэкологической) границе [11]. Упомянутые границы Арктической зоны РФ не совпадают. Водноресурсная граница Арктической зоны охватывает большую площадь и проведена на основе бассейнового принципа, а не по границам субъектов РФ.

Таблица 1

Основные характеристики значимых рек опорных зон Российской Арктики

№	Опорная зона	Река	Куда впадает	Длина, км	Площадь водосбора, км ²
1	Кольская	Печенга	Печенгская губа	101	1820
		Ура	Губа Ура	63	1030
		Кола	Кольский залив	83	3850
		Роста	Кольский залив	12,1	52
		Нива	Кандалакшский залив	36	12830
2	Архангельская	Онега	Онежский залив	416	56900
		Северная Двина	Двинский залив	744	357000
		Мезень	Мезенская губа	966	78000
3	Ненецкая	Печора	Печорская губа	1809	322000
		Сула	река Печора	353	10400
		Лая	река Печора	332	9530
		Адзъва	река Уса	334	10600
4	Воркутинская	Уса	река Печора	565	93600
		Воркута	река Уса	182	4550
5	Ямало-Ненецкая	Обь	Обская губа	3650	2450000
		Собь	река Обь	185	5890
		Надым	Обская губа	545	64000
		Таз	Тазовская губа	1401	150000
6	Таймыро-Туруханская	Енисей	Енисейский залив	3487	2580000
		Турухан	река Енисей	639	35800
		Норилка	озеро Пясино, река Пясины	57	20000
		Хатанга	Хатангский залив	1636	364000
7	Северо-Якутская	Анабар	Анабарская губа	939	100000
		Оленёк	Оленёкский залив	2270	219000
		Лена	море Лаптевых	4294	2460000
		Инди́гирка	Восточно-Сибирское море	1977	360000
		Колыма	Колымский залив	2129	647000
8	Чукотская	Малый Анюй	река Анюй	738	49800
		Анадырь	залив Онемен	1150	191000

Для Оби приведена действующая (эффективная) площадь водосбора без учета бессточных областей. По рекам Хатанга и Анадырь в данной работе анализ не представлен ввиду отсутствия информации.

Знание современного гидролого-экологического состояния речных экосистем опорных зон Российской Арктики, а также региональных особенностей его изменчивости в условиях антропогенного воздействия важно не только само по себе, но и как базовое основание для принятия решений, обеспечивающих устойчивое и экологически безопасное развитие в краткосрочной и долгосрочной перспективе.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование проведено на основе обработки многолетней (1990–2010 гг.) режимной гидрохимической информации Государственной системы наблюдений за состоянием окружающей среды (ГСН) Росгидромета, предоставленной Гидрохимическим институтом Росгидромета. Использованы данные пунктов наблюдений, находящихся в административно-территориальной и водноресурсной границе Арктической зоны России.

Применены методы, позволяющие оценить пространственно-временную изменчивость степени загрязненности водной среды и состояние речных экосистем в опорных зонах с выделением особенностей функционирования относительно чистых и испытывающих антропогенную нагрузку.

В число показателей комплексного состава водной среды выбранных речных экосистем включены: растворенный кислород, легкоокисляемые органические вещества (ЛООВ) по БПК₅, фенолы, нефтяные углеводороды, хлориды, сульфаты, азот аммонийный, азот нитратный, азот нитритный, соединения железа, меди, цинка, никеля, марганца.

Для оценки степени загрязненности водной среды и выбора из перечисленных выше ингредиентов приоритетных и критических показателей, отвечающих за ухудшение качества водной среды, использован метод расчета комплексных показателей [12]. Определяется вид загрязненности по величине условного коэффициента комплексности, равного отношению количества показателей с превышением предельно допустимых концентраций (ПДК) к общему числу измеряемых показателей качества воды. Класс качества воды от условно чистой до экстремально грязной устанавливается по величине комбинаторного индекса загрязненности, выделяются приоритетные загрязняющие компоненты по числу и составу лимитирующих показателей загрязненности.

Для оценки изменчивости современного состояния исследуемых речных экосистем применен метод оценки риска антропогенного воздействия воды суши [13]. На основе определения модального (наиболее часто встречаемого) интервала рядов абиотических параметров определяется состояние экосистемы от естественного до катастрофического.

Использование описанных методов позволяет выделить экологически благополучные и «антропогенно-трансформированные» речные экосистемы, выбрать информативные гидрохимические показатели экологического состояния.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты проведенного анализа многолетней гидрохимической режимной информации показали, что трансформация компонентного состава водной среды исследуемых речных экосистем Российской Арктики направлена как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения степени ее загрязненности (табл. 2).

По рекам Кольской опорной зоны отмечается тенденция к уменьшению степени загрязненности, в целом состояние рек оценивается как загрязненное. Реки Архангельской и Ненецкой опорных зон находятся к разнонаправленным переходным состояниям от очень загрязненного до грязного (Онега) и, наоборот, от грязного к очень загрязненному (Северная Двина, Лая, Адзва). Реки Воркутинской опорной зоны (Уса, Воркута) характеризуются переходным состоянием от очень загрязненного к загрязненному. Для рек Ямало-Ненецкой опорной зоны отмечается значительное увеличение загрязнения

Таблица 2

Изменчивость степени загрязненности водной среды рек опорных зон
Российской Арктики

Опорная зона	Река	Пункт наблюдений	Степень загрязненности	
			1990–1999 гг.	2000–2010 гг.
Кольская	Печенга	пос. Корзуново	От очень загрязненной к грязной	Грязная
	Ура	ст. Печенга	Очень загрязненная	Очень загрязненная
	Кола	с. Ура-Губа	От загрязненной к очень загрязненной	От очень загрязненной к загрязненной
	Роста	г. Кола	Грязная	Загрязненная
Архангельская	Нива	г. Мурманск	Грязная и экстремально грязная	Грязная и очень загрязненная
	Онега	г. Кандалакша	Загрязненная и очень загрязненная	Загрязненная и слабо загрязненная
	Северная Двина	г. Североонежск	От очень загрязненной к грязной	Грязная
		с. Усть-Пинега	От грязной к очень загрязненной	Очень загрязненная
		г. Новодвинск	То же	То же
Ненецкая	Мезень	д. Малонисогорская	От загрязненной к очень загрязненной	Загрязненная
	Печора	г. Нарьян-Мар	Очень загрязненная	Очень загрязненная
	Сула	с. Коткино	Грязная	Грязная
	Лая	ст. Мишвань	От грязной к очень загрязненной	Очень загрязненная
Воркутинская	Адзьва	д. Харута	Грязная	То же
	Уса	ст. Сейда	Очень загрязненная	Загрязненная
		д. Адзьва	То же	То же
		г. Воркута	От очень загрязненной к загрязненной	От очень загрязненной к загрязненной
Ямало-Ненецкая	Обь	г. Салехард	Очень грязная	Очень грязная
	Собь	с. Каправож	Грязная	От грязной к очень грязной
	Надым	г. Надым	То же	От очень грязной к экстремально грязной
	Таз	пос. Тазовский	От грязной к очень грязной	Очень грязная
Таймыр-Туруханская	Енисей	г. Дудинка	Грязная	Грязная
	Турухан	факт. Янов Стан	То же	То же
	Норилка	устье	“	“
	Анабар	с. Саскылах	От грязной к очень загрязненной	От очень загрязненной к грязной
Северо-Якутская	Оленёк	с. Оленёк	Очень загрязненная	Очень загрязненная
		ст. Тюмети	Грязная	То же
	Лена	с. Кюстюр	То же	То же
	Индигирка	пос. Индигирский	“	“
Чукотская	Кольма	г. Среднеколымск	Очень загрязненная	От очень загрязненной к грязной
	Малый Ангой	с. Островное	Грязная	—

водной среды, степень загрязненности определена как переходная от «грязной к очень грязной» (реки Обь, Таз, Собь), к «экстремально грязной» (река Надым). Состояние водной среды по гидрохимическим показателям исследуемых рек Таймыро-Туруханской опорной зоны с 1990 г. оценивается как «грязное». В Северо-Якутской и Чукотской опорных зонах реки Лена и Оленёк определены как «очень загрязненные», реки Анабар, Колыма и Малый Анюй как «очень загрязненные и грязные».

Характер такой изменчивости степени загрязненности водной среды исследуемых речных экосистем дает основание сделать два заключения. Во-первых, формирование компонентного состава водной среды предопределено региональными физико-географическими особенностями водосбора. Во-вторых, высокая пространственно-временная изменчивость компонентного состава в значительной степени обусловлена уровнем и спецификой имеющего место в опорных зонах антропогенного воздействия.

К числу особенностей антропогенной трансформации компонентного состава водной среды следует отнести накопление в ней и расширение диапазонов колебания тех ингредиентов, которые могут быть отнесены к числу загрязняющих веществ. В свою очередь, загрязняющее вещество — это любое химическое соединение, которое находится в исследуемом природном объекте в количествах, превышающих их фоновые значения.

Согласно Федеральному закону «Об охране окружающей среды» [14] к загрязняющим веществам отнесены вещество или смесь веществ, количества и концентрации которых превышают установленные для химических соединений, в том числе и радиоактивных, и иных веществ и микроорганизмов нормативы и могут оказывать негативное воздействие на природные объекты. В число таких соединений могут быть включены вещества как природного происхождения, попадающие в объект при усилении внутрисистемных естественных процессов, так и антропогенного происхождения, попадающие в объекты при усилении внешнего воздействия.

Большое значение при анализе обширной многолетней гидрохимической информации приобретает выбор информативных гидрохимических показателей, с помощью которых можно получить достаточно объективную оценку особенностей изменчивости состояния во взаимосвязи не только с региональными природными особенностями, но и со спецификой антропогенного воздействия. Такой выбор должен исходить из представления о гидрохимических показателях как о приоритетных, показывающих особенности изменчивости состояния речных экосистем в пространстве, и критических (лимитирующих), ответственных за повышение степени загрязненности водной среды.

Иными словами, анализ информации должен быть направлен на выделение перечня информативных гидрохимических показателей, с помощью которых можно получить достаточно объективную характеристику состояния речных экосистем, генетически связанную как с природными условиями их функционирования, так и со спецификой антропогенного воздействия.

Использование для оценки состояния речных экосистем метода комплексной оценки степени загрязненности водной среды позволило не только провести их пространственно-временную классификацию, но и выделить информативные гидрохимические показатели, ответственные за природную и антропогенную трансформацию компонентного состава водной среды.

Результаты анализа многолетней режимной гидрохимической информации по расчету комплексных показателей качества водной среды исследуемых арктических рек показали, что на территории всех опорных зон в число основных приоритетных показателей входят соединения железа, меди, цинка, марганца, фенолы, нефтяные

Таблица 3

Критические показатели компонентного состава с аномально высоким содержанием в водной среде рек опорных зон

Опорная зона	Река	Пункт наблюдений	Критические показатели загрязненности	Максимальная концентрация в ПДК
Кольская	Печенга	ст. Печенга	Соединения меди	66
			Соединения никеля	56
			Фенолы	27
	Роста	г. Мурманск	Соединения никеля	94
			Азот нитритный	73
			Фенолы	60
			Соединения железа	55
			Нефтяные углеводороды	53
			Азот аммонийный	46
			ЛООВ (по БПК ₅)	36
Архангельская	Северная Двина	с. Усть-Пинега	Нефтяные углеводороды	55
			Соединения меди	36
			Соединения никеля	24
			Фенолы	24
Ненецкая	Печора	г. Нарьян-Мар	Нефтяные углеводороды	68
			Фенолы	36
Воркутинская	Уса	д. Адзьва	То же	47
			Соединения меди	43
Ямало-Ненецкая	Обь	г. Салехард	Нефтяные углеводороды	197
			Соединения меди	60
	Таз	пос. Тазовский	Соединения железа	30
			Нефтяные углеводороды	27
			Фенолы	25
			Соединения меди	23
Таймыро-Туруханская	Енисей	г. Дудинка	Нефтяные углеводороды	34
			Соединения меди	21
			Фенолы	21
Северо-Якутская	Лена	с. Кюсюр	Соединения меди	21
			Нефтяные углеводороды	15
	Анабар	с. Саскылах	То же	67
			Соединения меди	40
	Колыма	г. Среднеколымск	Фенолы	44
			Соединения меди	22
			Соединения железа	17
Чукотская	Малый Анюй	с. Островное	Соединения меди	27
			Фенолы	27

углеводороды, ЛООВ, аммонийные и нитритные ионы. Кроме того, в реках Ненецкой и Ямало-Ненецкой опорных зон к приоритетным показателям относятся растворенный кислород и соединения никеля.

В перечень критических гидрохимических показателей следует включить:

– азот аммонийный и нитритный, соединения меди и никеля, фенолы и нефтяные углеводороды, ЛООВ для рек Кольской опорной зоны;

– соединения меди и никеля, фенолы и нефтяные углеводороды для Северной Двины в Архангельской опорной зоне;

– нефтяные углеводороды и фенолы для Печоры в Ненецкой опорной зоне;

– соединения меди и фенолы для рек Воркутинской опорной зоны;

– соединения железа, меди, фенолы и нефтяные углеводороды для рек Ямало-Ненецкой опорной зоны;

– соединения меди, фенолы и нефтяные углеводороды для Енисея в Таймыро-Туруханской опорной зоне;

– соединения железа и меди, фенолы и нефтяные углеводороды для рек в Северо-Якутской опорной зоне;

– соединения меди и фенолы для реки Малый Анюй в Чукотской опорной зоне.

Критические показатели компонентного состава с аномально высоким содержанием в поверхностном слое водной среды рек приведены в табл. 3. Максимальная кратность превышения ПДК выбрана за весь анализируемый период.

Учитывая периодичность таких глубоких изменений компонентного состава водной среды исследованных арктических рек, есть основание заключить, что на территории формирования этих рек существенное влияние оказывает их хозяйственное освоение.

Антропогенная трансформация компонентного состава водной среды вызывает увеличение нагрузки на трофические цепи и нарушение естественного равновесия между абиотической и биотической составляющими. Речные экосистемы становятся менее устойчивыми за счет нарушения их стабильности.

В зависимости от уровня антропогенной нагрузки и характера изменчивости абиотических и биотических параметров пресноводных экосистем современное состояние водных объектов принято условно делить на естественное (не нарушенное антропогенным воздействием), равновесное (скорость внутриводных биохимических процессов восстановления экосистемы превышает темпы антропогенных нарушений), кризисное (скорость внутриводных биохимических процессов восстановления экосистемы ниже темпов антропогенных нарушений), критическое (обратимая замена природных экологических систем на измененные по трофности, сапробности и биологической продуктивности пресноводные экосистемы), катастрофическое (необратимый процесс перехода пресноводных экосистем в новое состояние по трофности, сапробности и биологической продуктивности). Полный классификатор состояния пресноводных экосистем приведен в РД 52.24.661–2004 [13].

Сравнительная оценка результатов анализа характера многолетней изменчивости модальных интервалов значений концентрации ЛООВ и аммонийного азота позволяет обратить внимание на ослабление стабильности исследуемых речных экосистем (табл. 4).

По ЛООВ состояние экосистемы оценивается как переходное из равновесного в кризисное в реках Северная Двина, Печора, Сула, Лена, Оленёк, Анабар, Колыма, Индигирка. Состояние экосистемы реки Таз отмечено как кризисное. Для реки Роста наблюдалось переходное состояние из равновесного в катастрофическое.

Таблица 4

Изменчивость состояния речных экосистем в опорных зонах Российской Арктики

Опорная зона	Река	Пункт наблюдений	Легкоокисляемые органические вещества		Азот аммонийный	
			Модальный интервал концентрации, мг/л	Состояние экосистемы	Модальный интервал концентрации, мг/л	Состояние экосистемы
Кольская	Печенга	пос. Корзуново	0,18–1,56	Переходное из естественного	н.о. – 0,08	Естественное
	Ура	ст. Печенга	0,21–1,65	в равновесное	н.о. – 0,07	То же
	Кола	с. Ура-Губа	0,09–0,71	Естественное	н.о. – 0,07	Переходное из равновесного
Архангельская		г. Кола	0,16–0,99	То же	н.о. – 0,72	в кризисное
	Роста	г. Мурманск	1,05–8,70	Переходное из равновесного	н.о. – 2,20	Переходное из равновесного
	Нива	г. Кандалакша	0,21–1,61	в катастрофическое	н.о. – 0,08	в критическое
	Онега	г. Североонежск	0,31–2,17	Переходное из естественного	н.о. – 0,30	Естественное
	Северная Двина	с. Усть-Пинега	0,25–2,11	в равновесное	н.о. – 0,30	Равновесное
Ненецкая		г. Новодвинск	0,50–2,42	Переходное из естественного	н.о. – 0,08	Естественное
	Мезень	д. Малонисогорская	1,26–3,87	в кризисное	н.о. – 0,06	То же
	Печора	г. Нарьян-Мар	1,43–3,52	То же	н.о. – 0,35	Равновесное
	Сула	с. Коткино	0,16–3,52	–“–	н.о. – 0,10	Естественное
	Лая	ст. Мишвань	0,29–1,28	–“–	н.о. – 0,27	Равновесное
Воркутинская		д. Харута	0,33–1,87	Переходное из естественного	н.о. – 0,40	То же
	Уса	ст. Сейда	0,32–1,84	в равновесное	н.о. – 0,30	–“–
		д. Адзья	0,60–4,05	То же	н.о. – 0,34	–“–
	Воркута	г. Воркута	0,50–1,78	–“–	н.о. – 0,28	–“–
				Переходное из равновесного	н.о. – 0,11	–“–
				в кризисное		
				Равновесное		

Примечание. н.о. — ниже предела обнаружения

Опорная зона	Река	Пункт наблюдений	Легкоокисляемые органические вещества		Азот аммонийный	
			Модальный интервал концентрации, мг/л	Состояние экосистемы	Модальный интервал концентрации, мг/л	Состояние экосистемы
Ямало-Ненецкая Таймыр-Туруханская	Обь	г. Салехард	0,16–2,12	Равновесное	н.о. – 0,93	Переходное из равновесного в кризисное
	Надым	г. Надым	0,24–3,50	Переходное из естественного в кризисное	н.о. – 0,96	То же
	Таз	пос. Тазовский	2,50–3,30	Кризисное	н.о. – 1,06	–“–
	Енисей	г. Дудинка	0,20–1,90	Переходное из естественного в равновесное	н.о. – 0,21	Равновесное
	Турухан	факт. Янов Стан	0,40–2,30	Переходное из естественного в кризисное	н.о. – 0,61	Переходное из равновесного в кризисное
	Норилка	устье	0,30–2,10	Переходное из естественного в равновесное	н.о. – 0,13	Переходное из естественного в равновесное
Северо-Якутская	Анабар	с. Саскылах	0,51–2,37	Переходное из равновесного в кризисное	н.о. – 0,10	Естественное
	Оленёк	с. Оленёк	0,43–1,44	Переходное из естественного в равновесное	н.о. – 0,09	То же
		ст. Тюмети	1,26–3,40	Переходное из равновесного в кризисное	н.о. – 0,06	–“–
	Лена	с. Кюсюр	1,16–3,03	То же	н.о. – 0,08	–“–
	Индигирка	пос. Чокурдах	1,11–2,98	“	н.о. – 0,17	Переходное из естественного в равновесное
		пос. Индигирский	0,02–1,95	Переходное из естественного в равновесное	н.о. – 0,09	Естественное
Чукотская	Колыма	пос. Черский	0,50–3,20	Переходное из равновесного в кризисное	н.о. – 0,10	То же
		г. Среднеколымск	0,09–0,57	Переходное из естественного в равновесное	н.о. – 0,06	–“–
	Малый Ангой	с. Островное	0,33–3,95	Переходное из равновесного в кризисное	н.о. – 0,32	Равновесное

По азоту аммонийному состояние экосистемы определено как переходное из равновесного в кризисное в реках Кола, Обь, Таз, Надым, Турухан. Для реки Роста состояние экосистемы оценено как переходное из равновесного в критическое.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, представлена оценка состояния водной среды наиболее значимых рек опорных зон Российской Арктики. По степени загрязненности речные экосистемы опорных зон Российской Арктики в целом характеризуются как очень загрязненные и грязные.

Тенденции в загрязнении рек Кольского полуострова, сток которых формируется в пределах одной опорной зоны, имеют отрицательный характер. В Архангельской, Ненецкой и Воркутинской опорных зонах тренд изменений загрязненности речных экосистем также имеет отрицательный знак или равен нулю, то есть экосистемы стабильны. Исключение составляет река Онега (г. Североонежск), где наблюдается увеличение концентрации веществ в водной среде. В пределах рассматриваемых опорных зон как средние, так и крупные реки характеризуются схожими тенденциями. Реки Сула и Адзъва наиболее грязные среди них. Для рек с меньшими площадями водосборов (Воркута и Лая) — степень загрязнения меньше.

Для рек Ямало-Ненецкой опорной зоны в 2000 г. отмечается значительное увеличение загрязнения водной среды по сравнению с 1990 г. Качество воды р. Обь (г. Салехард) и р. Таз (пос. Тазовский) оценивается как «грязное и очень грязное», р. Надым (г. Надым) — «экстремально грязное». Подобная ситуация обусловлена увеличением антропогенной нагрузки на водосборы рек вследствие активизации нефтегазодобывающей промышленности в регионе.

Реки в границах Таймыро-Туруханской и Чукотской зон являются грязными. На р. Лене (с. Кюсюр) и р. Оленёк (ст. Тюмети) отмечено снижение степени загрязненности за анализируемый период.

Критические гидрохимические показатели для рассматриваемых рек частично похожи. В большинстве случаев это соединения меди, фенолы и нефтяные углеводороды. Наибольшее количество критических показателей отмечено для р. Роста Мурманской области.

Результаты анализа многолетнего режима гидрохимической информации показали, что для экосистем исследуемых опорных зон роль антропогенной составляющей является в настоящее время определяющей при трансформации их гидрохимического режима в сторону высокой пространственной, межгодовой и внутригодовой изменчивости компонентного состава водной среды. Наблюдается формирование более высокого «антропогенно-измененного природного фона», периодическое накопление в водной среде приоритетных загрязняющих веществ до концентраций, в десятки и сотни раз превышающих ПДК.

Речные экосистемы Арктики претерпевают значительные изменения. В большинстве случаев их состояние по легкоокисляемым органическим веществам оценивается как переходное из естественного и равновесного в кризисное.

Подобная перестройка компонентного состава водной среды способствует повышению потенциальной возможности возникновения чрезвычайных экологических ситуаций. Антропогенная трансформация состояния речных экосистем приводит к усугублению экологического регресса речных экосистем.

При стратегическом развитии Российской Арктики значимым остается вопрос состояния речных экосистем. Оценка степени загрязненности рек опорных зон Российской Арктики важна для корректировки схем комплексного использования и охраны водных объектов, нормативов допустимого воздействия и разработки стратегий развития опорных зон в части модернизации водохозяйственного комплекса, в том числе для обеспечения населения чистой питьевой водой.

Благодарности. Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-05-60192.

Acknowledgments. The reported study was partially funded by RFBR according to the research project № 18-05-60192.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Социально-экономическое развитие Арктической зоны Российской Федерации». Постановление Правительства Российской Федерации от 21.04.2014 № 366 (в ред. Постановления Правительства РФ от 31.08.2017 № 1064). URL: <http://static.government.ru/media/files/GGu3GTtv8bvV8gZxSEAS1R7XmzloK6ar.pdf> (дата обращения 05.04.2018).
2. О сухопутных территориях Арктической зоны Российской Федерации. Указ Президента РФ от 02.05.2014 № 296. (в ред. Указа Президента РФ от 27.06.2017 № 287). URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/38377> (дата обращения 04.09.2017).
3. Смирнова О.О., Липина С.А., Кудряшова Е.В., Крейденко Т.Ф., Богданова Ю.Н. Формирование опорных зон в Арктике: методология и практика // Арктика и Север. 2016. № 25. С.148–157.
4. Израэль Ю.А. Арктика и экологически устойчивое развитие // Антропогенное воздействие на природу Севера и его экологические последствия: Сб. материалов Всерос. совещ. и выезд. науч. сессии Отд-я океанологии, физики атмосферы и географии (ООФАГ) РАН / Под ред. акад. РАН Ю.А. Израэля и др. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 1999. С. 7–16.
5. Арктика на пороге третьего тысячелетия (ресурсный потенциал и проблемы экологии) / Гл. ред. И.С. Грамберг, Н.П. Лаверов; Отв. ред. Д.А. Додин. СПб.: Наука, 2000. 247 с.
6. Водные ресурсы России и их использование / Под ред. проф. И.А. Шикломанова. СПб.: Государственный гидрологический институт, 2008. 600 с.
7. Геоэкологическое состояние арктического побережья России и безопасность природопользования / Под ред. Н.И. Алексеевского. М.: ГЕОС, 2007. 585 с.
1. *Ob utverzhdenii gosudarstvennoi programmy Rossiiskoi Federatsii «Sotsial'no-ekonomicheskoe razvitie Arkticheskoi zony Rossiiskoi Federatsii».* *Postanovlenie Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii ot 21.04.2014 № 366 (v red. Postanovleniia Pravitel'stva RF ot 31.08.2017 № 1064).* On the approval of the state program of the Russian Federation “Socio-economic development of the Arctic zone of the Russian Federation”. Decree of Russian Federation Government of April 21, 2014 № 366 (as amended on Russian Federation Government Decree № 1064 of August 31, 2017). Available at: <http://static.government.ru/media/files/GGu3GTtv8bvV8gZxSEAS1R7XmzloK6ar.pdf>. (accessed 05.04.2018).
2. *O sukhoputnykh territoriakh Arkticheskoi zony Rossiiskoi Federatsii. Ukaz Prezidenta RF ot 02.05.2014 № 296. (v red. Ukaza Prezidenta RF ot 27.06.2017 № 287).* About land territories of the Arctic zone of the Russian Federation. The decree of the President of the Russian Federation from 02.05.2014 № 296. (as amended on Decree of the President of the Russian Federation from 27.06.2017 № 287). Available at: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/38377> (accessed 04.09.2017).
3. *Smirnova O.O., Lipina S.A., Kudriashova E.V., Kreidenko T.F., Bogdanova Ju.N.* Creation of development zones in the Arctic: methodology and practice. *Arktika i Sever*. Arctic and North. 2016, 25: 148–157. [In Russian].
4. *Izrael' Yu.A.* *Arktika i ekologicheski ustoichivoe razvitie.* Arctic and ecologically sustainable development. *Sb. materialov Vseros. soveshch. ivyezd. nauch. sessii Otd-iaokeanologii, fiziki atmosfery i geografii (OOFAG) RAN.* Anthropogenic impact on the nature of the North and its ecological consequences. Collected materials of the All-Russian Conference and the visiting scientific session of the Division of Oceanology, Atmosphere Physics and Geography of the Russian Academy of Sciences. Apatity: Publishing House of KSC RAS, 1999: 7–16. [In Russian].

8. Брызгалo В.А., Иванов В.В., Замятин В.Ю., Макеев В.М. Чрезвычайные экологические ситуации в районах Российского Севера. СПб.: ГПА, 2004. 82 с.
9. Никаноров А.М., Брызгалo В.А. Реки России. Ч. I. Реки Кольского Севера (гидрохимия и гидроэкология). Ростов-на-Дону: Изд-во «НОК», 2009. 200 с.
10. Никаноров А.М., Брызгалo В.А., Косменко Л.С., Даниленко А.О. Реки материковой части Российской Арктики. Ростов-на-Дону: Изд-во Южного федерального университета, 2016. 276 с.
11. Иванов В.В., Янкина В.А. Водные ресурсы Арктики, их изученность и очередные задачи исследований // Проблемы Арктики и Антарктики. 1991. Вып. 66. С. 118–128.
12. РД 52.24.643–2002. Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод суши по гидрохимическим показателям. СПб.: Гидрометеoиздат, 2003. 52 с.
13. РД 52.24.661–2004. Оценка риска антропогенного воздействия приоритетных загрязняющих веществ на поверхностные воды суши. М.: Метеoагентство Росгидромета, 2006. 26 с.
14. Об охране окружающей среды. Федеральный закон от 10.01.2002 № 7–ФЗ (в ред. от 31.12.2017 № 503–ФЗ). URL: <http://base.garant.ru/12125350/> (дата обращения 05.04.2018).
5. *Arktika na poroge tret'ego tysiacheletia (resursnyi potentsial i problemy ekologii)*. The Arctic on the threshold of the third millennium (resource potential and environmental problems). St. Petersburg: Science, 2000: 247 p. [In Russian].
6. *Vodnye resursy Rossii i ikh ispol'zovanie*. Water resources of Russia and their use. St. Petersburg: State Hydrological Institute, 2008: 600 p. [In Russian].
7. *Geoekologicheskoe sostoianie arkticheskogo poberezh'ia Rossii i bezopasnost' prirodoopol'zovaniia*. Geoecological condition of the Arctic coast of Russia and safety of nature management. Moscow: GEOS, 2007: 585 p. [In Russian].
8. Bryzgalo V.A., Ivanov V.V., Zamiatin V.Iu., Makeev V.M. *Chrezvychainye ekologicheskie situatsii v raionakh Rossiiskogo Severa*. Emergency environmental situations in the regions of the Russian North. St. Petersburg: SPA, 2004: 82 p. [In Russian].
9. Nikanorov A.M., Bryzgalo V.A. *Reki Rossii. Chast' I. Reki Kol'skogo Severa (gidrokhimiia i gidroekologiya)*. The rivers of Russia. Part I. The rivers of the Kola North (hydrochemistry and hydroecology). Rostov-on-Don: "NOK", 2009: 200 p. [In Russian].
10. Nikanorov A.M., Bryzgalo V.A., Kosmenko L.S., Danilenko A.O. *Reki materikovoi chasti Rossiiskoi Arktiki*. The rivers of the mainland part of the Russian Arctic. Rostov-on-Don: Publishing House of the Southern Federal University, 2016: 276 p. [In Russian].
11. Ivanov V. V., Iankina V.A. Water resources of the Arctic, their study and regular research tasks. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Problems of Arctic and Antarctic. 1991, 66: 118–128. [In Russian].
12. RD 52.24.643–2002. *Metod kompleksnoi otsenki stepeni zagriaznennosti poverkhnostnykh vod sushi po gidrokhimicheskim pokazateliam*. (Guidance document 52.24.643–2002. Method for the integrated assessment of the pollution degree of surface waters by hydrochemical indicators). St. Petersburg: Hydrometeoizdat, 2003: 52 p. [In Russian].
13. RD 52.24.661–2004. *Otsenka riska antropogennogo vozdeistviia prioritetnykh zagriazniaiushchikh veshchestv na poverkhnostnye vody sushi*. (Guidance document 52.24.661–2004. Assessment of the risk of anthropogenic impact of priority pollutants on the surface waters). Moscow: Meteoaagency of Roshydromet, 2006: 26 p. [In Russian].
14. *Ob okhrane okruzhaiushchei sredy. Federal'nyi zakon ot 10.01.2002 № 7–FZ (v red. ot 31.12.2017 № 503–FZ)*. Federal Law on Environmental Protection №7-FZ of January 10, 2002 (as amended on December 31, 2017 № 503-FZ). Available at: <http://base.garant.ru/12125350/>. (accessed 05.04.2018).

УДК 504.054

DOI: 10.30758/0555-2648-2018-64-4-380-390

ХЛОРФЕНОЛЬНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ В ПРЕСНОВОДНЫХ ОЗЕРАХ СУБАРКТИЧЕСКИХ РЕГИОНОВ

Е.С. КОЛПАКОВА

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаверова Российской академии наук, г. Архангельск, Россия

kolpelen@yandex.ru

CHLOROPHENOL COMPOUNDS IN FRESHWATER LAKES OF SUBARCTIC REGIONS

E.S. KOLPAKOVA

N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research, Arkhangelsk, Russia

kolpelen@yandex.ru

Received July, 12, 2018

Accepted October, 12, 2018

Keyword: bottom sediments, chlorinated phenols, gas chromatography, pentachlorophenol, subarctic lake.

Summary

Chlorophenol compounds, representing a group of chlorinated phenols and their derivatives, are ionic compounds with different degree of hydrophobicity, lipophilicity and acidity. As potential anthropogenic sources of pollution of ecosystems by chlorophenol compounds is the regional atmospheric transport of these compounds from the territories of border regions. At the same time, the sources of the diversity of chlorophenol compounds are the natural processes of enzymatic biosynthesis in the components of the environment. These compounds are especially dangerous for the Arctic and subarctic ecosystems, since the conditions of the cold climate contribute to their long-term preservation, which increases their negative impact on living organisms.

The research area includes subarctic small thermokarst lakes located in the central part of Vaigach Island and in Bolshezemelskaya tundra.

The isolation of chlorophenol compounds from bottom sediment samples was carried out by accelerated liquid flow-through extraction with a hot mixture of organic solvents with extraction of easily and hardly extractable chlorophenol compounds and subsequent analysis on a gas chromatograph with an electron-capture detector. The total content of chlorophenol compounds was determined by summing their concentrations in the easily and hardly extractable fractions.

Citation: Kolpakova E.S. Chlorophenol compounds in freshwater lakes of subarctic regions. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2018, 64, 4: 380–390. [In Russian]. doi: 10.30758/0555-2648-2018-64-4-380-390.

The bottom sediments of the investigated lakes were characterized by a relatively high content of chlorophenol compounds. Toxic pentachlorophenol was found only in the sediments of lake Tundra Bolshezemelskaya. The revealed presence of chlorophenol compounds in the bottom sediments of the investigated lakes suggests their spread in the environment by atmospheric transport from abiogenic sources, as well as natural enzymatic and biochemical processes in these Arctic waters.

Поступила 12 июля 2018 г.

Принята к печати 12 октября 2018 г.

Ключевые слова: газовая хроматография, донные осадки, пентахлорфенол, субарктические озера, хлорированные фенолы.

В работе представлены результаты исследования по изучению уровней содержания и компонентного состава хлорированных фенолов и их производных в донных осадках пресноводных озер на территории Большеземельской тундры и острова Вайгач. Приведены профили хлорфенольных соединений, а также предполагаемые источники и пути поступления этих соединений в тундровые озерные экосистемы субарктических территорий Европейского Севера России.

ВВЕДЕНИЕ

Важным фактором, определяющим экологическое состояние природных экосистем, является присутствие токсичных хлорорганических соединений, склонных к накоплению и переносу на большие расстояния. Особую опасность эти соединения представляют для арктических и субарктических экосистем, поскольку условия холодного климата способствуют их длительному сохранению. Среди хлорорганических соединений можно выделить группу хлорфенольных соединений (ХФС), а именно высоко- и низкохлорированные фенолы и их производные (хлорированные метокси- и гидроксифенолы), отличающиеся по токсичности и липофильности. Эти ионогенные соединения в разной степени способны сорбироваться на твердых частицах органического вещества, что влияет на их биодоступность и подвижность в природных средах [1]. Способность к переносу и затрудненная деградация в условиях холодного климата способствуют накоплению этих соединений в компонентах экосистем, что усиливает негативное влияние токсичных хлорфенольных соединений на живые организмы.

К наиболее значимым с точки зрения экологической опасности для окружающей среды отнесены высокозамещенные хлорированные фенолы, гваяколы (метоксихлорфенолы) и катехолы (гидроксихлорфенолы) с высокой липофильностью ($\lg K_{ow} = 3,7-5,1$), острой и подострой токсичностью [1, 2]. Самым токсичным среди них является пентахлорфенол.

Ранее в осадках малых озер, находящихся на юго-западе Архангельской области в условиях отсутствия прямой антропогенной и техногенной нагрузки, нами был выявлен широкий спектр хлорфенольных соединений [3, 4]. Уровни содержания и пространственное распределение этих соединений в осадках формировались под влиянием атмосферного переноса путем сухих высадений и влажных выпадений на почву и в водную среду в результате смыва с водосборных площадей, покрытых растительностью, и перемещения в адсорбированном виде с частицами пыли и почвы ветровыми потоками. Пентахлорфенол (ПХФ) был обнаружен в низких концентрациях в биодоступном состоянии. Состав хлорфенольных соединений, основная часть которых приходилась на долю низкохлорированных фенолов, представлен как природными метаболитами, так и конечными продуктами биodeградации ПХФ

в условиях, благоприятных для протекания этих процессов [5]. Таким образом, в продолжение проведенных исследований представляло несомненный интерес изучение процессов формирования в донных осадках субарктических озер концентрационных профилей хлорфенольных соединений, входящих в биогеохимический цикл хлора, а также выявление источников и путей их поступления в озерные экосистемы.

Целью настоящих исследований являлось изучение распространения на Европейском Севере России хлорфенольных соединений. Для достижения поставленной цели выполнены исследования донных осадков субарктических озер по получению данных об уровнях содержания и компонентном составе хлорфенольных соединений, включая токсичный ПХФ.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Областью исследования являются субарктические малые термокарстовые озера (рис. 1), расположенные в арктическом поясе России, в центральной части острова Вайгач (Тундровое-1 и Талатинское), и озеро, расположенное в Большеземельской тундре (Тундровое-2). В исследованных озерах в период летней экспедиции (август – сентябрь 2010 года) по изучению тундровых ландшафтов на Европейском Севере сотрудниками Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаверова были отобраны образцы донных осадков [6].

Пробы донных осадков (горизонт от 0 до 10 см) отбирали с помощью ударной прямоточной грунтовой трубки (Aquatic Research Instruments: <http://www.>

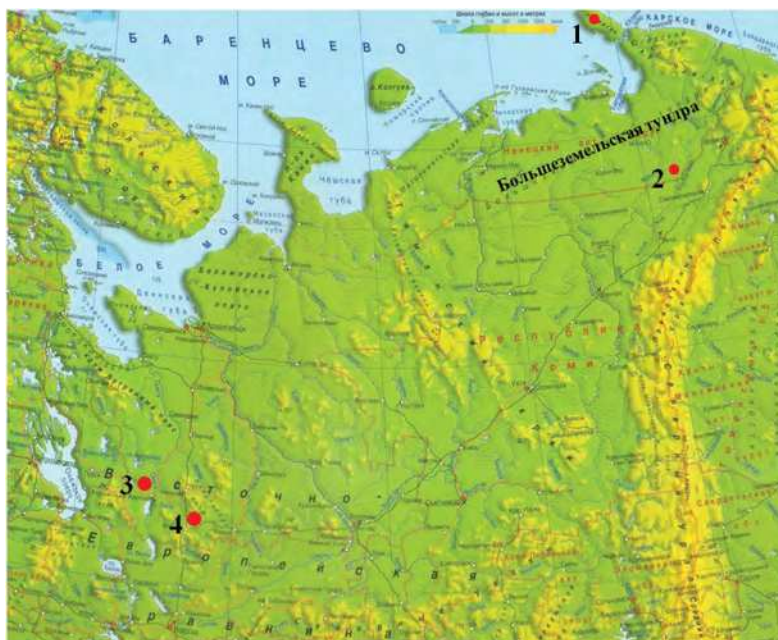


Рис. 1. Карта-схема расположения объектов исследований.

1 — остров Вайгач — озера Тундровое-1 и Талатинское; 2 — озеро Тундровое-2; 3 — Кенозерский национальный парк; 4 — Геобiosферный стационар

Fig. 1. Map-location of research objects.

1 — Vaygach Island — Tundrovoye-1 Lake and Talatinskoye Lake; 2 — Tundrovoye-2 Lake; 3 — Kenozersky National Park; 4 — Geobiospheric Hospital

aquaticresearch.com) с внутренним диаметром 110 мм и длиной 1 м. Отобранные пробы помещали в полиэтиленовые пакеты, из которых для предотвращения окисления проб максимально отжимался воздух. Географическое место отбора проб фиксировалось с помощью спутникового определителя координат GPS-навигатора [7].

Определение концентраций ХФС проводили в соответствии со стандартом ISO 14154:2005 [8]. Для получения полной информации о количестве и поведении (способности к перемещению и биодоступности в органической матрице) хлорфенольных соединений в окружающей среде необходимо проводить извлечение двух фракций — легко- и трудноэкстрагируемых соединений [1].

Пробоподготовку общего содержания хлорфенольных соединений проводили методом последовательного извлечения легко- и трудноэкстрагируемых соединений. Для извлечения фракции легкоэкстрагируемых хлорфенольных соединений использовали метод прямой экстракции смесью органических растворителей гексан-ацетон (3:1) с последующей обработкой 0,2 н раствором гидроксида натрия. Щелочной раствор подкисляли, обрабатывали гексаном и реэкстрагировали раствором карбоната калия.

Остаток анализируемой твердой матрицы после экстракции обрабатывали более концентрированным 10 М раствором NaOH и подкисляли, дополнительно извлекая фракцию трудноэкстрагируемых хлорфенольных соединений. Такая обработка способна разрушить сильные связи ассоциатов и окружающее органическое вещество, защищающее соединения [1].

Хлорфенольные соединения, выделенные из каждой фракции, дериватизировали уксусным ангидридом в слабощелочной среде для получения производных. Полученные ацетильные производные хлорфенольных соединений анализировали на газовом хроматографе «Цвет 800» (производитель ОАО «Цвет», г. Дзержинск) с детектором постоянной скорости рекомбинации и капиллярной колонкой с неполярной неподвижной фазой VS-1 (25 м × 0,25 мм). Для идентификации и количественного определения индивидуальных хлорированных фенолов, метоксифенолов (гваяколов) и гидроксифенолов (катехолов) использовали стандартные образцы двадцати трех соединений производства «Sigma Aldrich», «Supelco Analytical» и ЗАО «НПО Экрос». Условия хроматографирования: температура испарителя — 240 °С, температура детектора — 300 °С, газ-носитель — азот; температура термостата колонки увеличивалась от 100 °С до 230 °С со скоростью 5 °С/мин. Для обработки хроматографических данных применяли программный пакет «Цвет-Хром». Пределы обнаружения индивидуальных соединений — от 0,001 до 0,005 мкг/г воздушно-сухого образца.

Общее содержание хлорфенольных соединений определяли суммированием их концентраций в легко- и трудноэкстрагируемой фракциях.

Определение концентраций органического углерода выполняли на анализаторе общего органического углерода методом высокотемпературного (800 °С) каталитического сжигания в токе кислорода с последующим определением общего и неорганического углерода с использованием детектора инфракрасного излучения [9]. Диапазон измерений от 0,05 до 3000 мг/л.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты определения физико-химических характеристик и хлорфенольных соединений, в том числе ПХФ, в донных отложениях исследуемых малых термокарстовых озер приведены в таблице 1.

Результаты определений физико-химических характеристик и хлорфенольных соединений в озерных осадках

Показатели	Тундровое-1	Талатинское	Тундровое-2
pH	7,25	7,47	5,79
C _{орг} , %	1,75	2,83	38,44
ХФС, мкг/г	0,015	0,001	0,185
ХФС/C _{орг} , мкг/гC _{орг}	0,86	0,04	0,48
ПХФ, мкг/г	Не обнаружено	Не обнаружено	0,008

Величина pH среды является одним из главных физико-химических факторов, влияющих на поведение хлорфенольных соединений, поскольку с повышением pH увеличивается степень ионизации хлорфенольных соединений, характеризующаяся величиной pK_a.

Известно, что при естественных значениях pH хлорфенольные соединения могут быть полностью или частично ионизированными [10]. При этом в зависимости от формы хлорфенольные соединения имеют разные тенденции к сорбции в природной матрице: чем более неионизированной формы соединение, тем легче оно сорбируется.

В то же время степень сорбции хлорфенольных соединений сильно зависит от содержания органического углерода в осадках, возрастая с увеличением органического углерода (C_{орг}) [10]. Исходя из этого, по результатам определения физико-химических характеристик донных осадков исследуемых озер можно предположить, что торфянистые обогащенные органическим веществом осадки озера Тундровое-2, в отличие от глинистых отложений озер о. Вайгач, обладали лучшей сорбционной способностью в отношении ионогенных хлорфенольных соединений.

Донные осадки озера Тундровое-2 характеризовались сравнительно высоким содержанием хлорфенольных соединений (0,185 мкг/г), что на 1–2 порядка превышает концентрации хлорфенольных соединений, найденных в донных осадках озер о. Вайгач. Однако, после нормализации полученных данных на органическое вещество, результаты были не столь однозначны — как минимальные, так и максимальные значения отношения ХФС/C_{орг} отмечены в осадках озер о. Вайгач, хотя и для торфянистых отложений озера Тундровое-2 эта величина довольно значительна.

ПХФ в исследованных осадках был обнаружен лишь в осадках озера Тундровое-2, в количестве 0,008 мкг/г. Исследуемые районы отдалены от основных промышленных центров. Поскольку ПХФ и тетрахлорфенолы не образуются в природе, ввиду своей токсичности [11], присутствие в данных озерах антропогенных хлорфенольных загрязнителей обусловлено поступлением атмосферным переносом газовых выбросов предприятий Воркутинского района, где идет активная добыча каменного угля и его сжигание [6]. В то же время загрязнения в атмосферу могут вносить объекты нефтегазовой промышленности, в частности открытое сжигание нефтепродуктов в амбарах и котловинах Тимано-Печорской провинции [12]. ПХФ является основным соединением (наряду с 2,4,6-трихлорфенолом и 2,3,4,6-тетрахлорфенолом), образующимся при термических процессах (сжигание топлива органического происхождения, древесины) [13]. Накоплению ПХФ в озерных осадках способствовало высокое содержание C_{орг} (38,4 %), поскольку, обладая высоким ко-

**Содержание органического углерода и хлорфенольных соединений
в донных осадках малых озер на территории Архангельской области**

Показатели	Озера на юго-западе Архангельской области	
	Кенозерский национальный парк	Геобиосферный стационар
C _{орг} , %	1,13–20,71	6,95–15,44
ПХФ, мкг/г	0,001–0,005	0,001–0,008
ХФС, мкг/г	0,004–0,129	0,003–0,089

эффицентом липофильности, это соединение активно сорбируется на органическом веществе [5]. В то же время сорбция ПХФ зависит и от pH осадков, снижаясь в нейтральных и увеличиваясь в кислых отложениях [11]. Возможно, слабокислая среда в осадках озера Тундровое-2 (pH 5,79) способствует большему удержанию ПХФ.

Как показано в таблице 2, найденные для исследованных тундровых озер концентрации пентахлорфенола сопоставимы с данными для донных осадков озер, не испытывающих антропогенного воздействия, расположенных на юго-западе Архангельской области [3], в Кенозерском национальном парке и Геобиосферном стационаре (рис. 1). Присутствие ПХФ в этих озерных осадках обусловлено влиянием атмосферного переноса от источников загрязнения, поскольку, являясь полуплетучим, это соединение способно к перемещению в окружающей среде на большие расстояния [11]. Следует отметить, что в осадках некоторых озер на юго-западе Архангельской области с таким же низким, как для осадков озер о. Вайгач, содержанием органического углерода ПХФ зафиксирован в количестве ниже аналитического предела определения [3, 4].

Характер распределения хлорфенольных соединений на хроматограммах исследованных субарктических озер был различен. Так, хроматограммы экстрактов донных осадков озера Тундровое-2, приведенные на рис. 2, характеризовались большим числом зарегистрированных пиков (22), особенно в легкоэкстрагируемой фракции. Более узкий спектр, состоящий преимущественно из высококипящих соединений, был зарегистрирован на хроматограммах экстрактов осадков, отобранных на о. Вайгач.

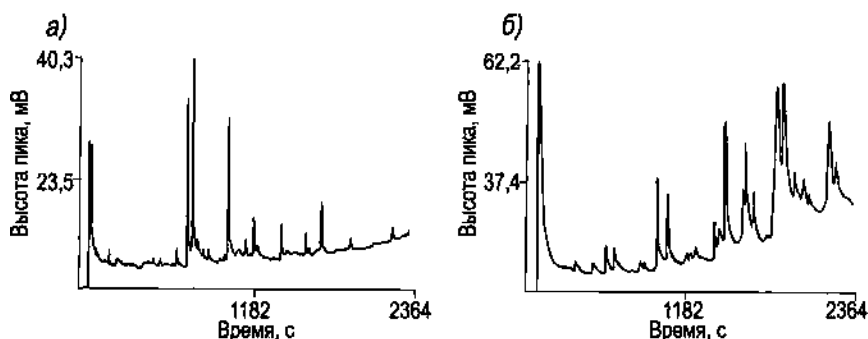


Рис. 2. Хроматограммы экстрактов ХФС донных осадков озера Тундровое-2 (а) и Саргозеро, Кенозерский национальный парк (б) в легкоэкстрагируемой фракции

Fig. 2. Chromatograms of CPC extracts of bottom sediments of Tundrovoye-2 Lake (a) and Sargozero Lake, Kenozerky National Park (b) in easily extractable fraction

При количественной интерпретации хроматограмм экстрактов донных осадков озер, расположенных на юго-западе Архангельской области, был выявлен более широкий спектр соединений, с наибольшим количеством пиков (44), зарегистрированных в легкоэкстрагируемой фракции. На хроматограммах трудноэкстрагируемой фракции экстрактов донных осадков хлорфенольные соединения также присутствовали, но в меньшем количестве (до 13 пиков).

По данным таблицы 3 по числу идентифицированных соединений исследованные осадки субарктических озер практически не отличались и характеризовались преимущественным присутствием трихлорфенолов (ТХФ) и тетрахлорфенолов (ТеХФ).

Немаловажным было и отсутствие в донных осадках хлорированных гидрокси- и метоксифенолов, образующихся в результате окислительного дехлорирования высокозамещенных фенолов под действием акклиматизированных микробных сообществ [14]. Отсутствие этих соединений предполагало недостаточное количество в данной среде аэробных бактерий, способствующих окислительному дехлорированию хлорфенолов [15].

Как видно из результатов табл. 3, в осадках озера Тундровое-2 в количественном отношении основными соединениями были 2,4,5-ТХФ и 2,3,4,6-ТеХФ. В меньших концентрациях были найдены 2,3,4-, 2,4,6-, 3,4,5-ТХФ и 2,3,4,5-ТеХФ. Можно предположить, что присутствие этих соединений обусловлено процессами микробной деградации в донных осадках собственно ПХФ, а также атмосферным переносом этих соединений, образовавшихся в процессах сжигания/горения органического сырья. В то же время источником 2,4,5- и 2,4,6-трихлорфенолов могли быть процессы ферментативного биосинтеза в компонентах озерных экосистем [16], однако

Таблица 3

Состав хлорфенольных соединений в донных осадках исследованных озер

Озера	Хлорфенольные соединения	
	идентифицированные	концентрация, мкг/г
Тундровое-1	2,3,4-ТХФ	<0,001
	2,4,5-ТХФ	0,008
	2,4,6-ТХФ	<0,001
	3,4,5-ТХФ	<0,001
	2,3,4,5-ТеХФ	<0,001
	2,3,4,6-ТеХФ	0,007
Талатинское	2,4,5-ТХФ	<0,001
	2,4,6-ТХФ	<0,001
	3,4,5-ТХФ	0,001
	2,3,4,6-ТеХФ	<0,001
Тундровое-2	2,3,4-ТХФ	0,005
	2,4,5-ТХФ	0,111
	2,4,6-ТХФ	0,003
	3,4,5-ТХФ	0,002
	2,3,4,5-ТеХФ	0,006
	2,3,4,6-ТеХФ	0,050
	ПХФ	0,008

Примечание: < 0,001 мкг/г — ниже предела определения; ТХФ — трихлорфенол; ТеХФ — тетрахлорфенол; ПХФ — пентахлорфенол.

отсутствие низкохлорированных фенолов предполагает преобладание в озерных осадках биохимических процессов над энзиматическими.

Накоплению хлорированных фенолов в осадках данного озера благоприятствовали высокое содержание $C_{\text{орг}}$ (38,4 %) и низкие значения pH (5,79), при которых увеличивалась тенденция к образованию неионизированных форм хлорфенолов и их сорбционная способность.

Концентрации хлорфенольных соединений, обнаруженные в озере Тундровое-2, были того же порядка, что и найденные в донных осадках озер, находящихся в условиях отсутствия прямой антропогенной нагрузки [3], что показано в табл. 3. Но в общем содержании в осадках озер юга Архангельской области доминировали (60 %) низкохлорированные соединения, среди которых идентифицировались хлорированные фенолы — моно- и дихлорфенолы, представляющие собой конечные продукты микробальной трансформации и ферментативного биосинтеза [3, 4]. Вклад антропогенного ПХФ в общее содержание хлорфенольных соединений был незначительным, составляя 7–10 %. Профиль высокозамещенных ХФС в осадках этих озер был идентичным профилю соединений, найденных в осадках озера Тундровое-2. Такой профиль включал в себя как самые распространенные в окружающей среде соединения, эмиссия которых в окружающую среду связана с процессами сжигания/горения и применением биоцидов для обработки древесины, так и продукты восстановительного дехлорирования пента- и тетрахлорфенолов. Присутствие этих высокохлорированных фенолов обусловлено влиянием атмосферного переноса путем сухих высждений и влажных выпадений на почву и в водную среду. Хлорированные метокси- и гидроксифенолы в осадках озер на юго-западе Архангельской области также не были идентифицированы.

Донные осадки исследованных озер на острове Вайгач (Тундровое-1 и Талатинское) по компонентному составу обнаруженных соединений характеризовались единичными идентифицированными хлорфенолами. Низкие содержания органического углерода (1,75 и 2,83 %) и слабощелочные pH осадков не способствовали удержанию ионогенных хлорфенолов в этих осадках. Как видно из данных табл. 3, в осадках озера Тундровое-1 из семи идентифицированных соединений количественно определены только 2,4,5-ТХФ и 2,3,4,6-ТсХФ. В осадках озера Талатинское был обнаружен только 3,4,5-ТХФ — продукт анаэробного дехлорирования тетрахлорфенолов. Присутствие этих соединений в озерных осадках, скорее всего, обусловлено атмосферным переносом и биохимическими процессами анаэробной микробной деградации.

Во всех осадках исследованных озер практически все соединения были биодоступными, найденными в легкоэкстрагируемой фракции. Будучи биодоступными для микрофлоры, обнаруженные соединения подвержены абиотической и биотической деградации, что могло способствовать их разрушению. Однако, при отсутствии низкохлорированных фенолов, трихлорфенолы — промежуточные компоненты в процессе дехлорирования ПХФ [17, 18] — оставались нетрансформированными (тупиковыми), что предполагало неполную деградацию ПХФ. Возможно, это связано с отсутствием в донных осадках оптимальных условий для полной деградации полихлорфенолов (pH среды, температуры, достаточного количества микробной биомассы) [11, 15]. Исключением был 2,4,5-ТХФ, обнаруженный как легко-, так и труднобиodeградируемым в осадках озера Тундровое-2, причем в наибольших

количествах. Поскольку 2,4,5-ГХФ являлся труднобиоразлагаемым в анаэробных условиях, т.е. тупиковым в цепи превращения микробного дехлорирования, это способствовало его накоплению в озерных осадках.

Аналогичное распределение хлорфенольных соединений по фракциям характерно для озер юго-запада Архангельской области, где эти соединения были найдены преимущественно (71 %) в легкоэкстрагируемой фракции, что способствует их активной биodeградации. Выявленный широкий спектр хлорфенольных соединений свидетельствовал о том, что в данных озерах имелись оптимальные условия для протекания биохимических процессов трансформации.

ВЫВОДЫ

В ходе проведенных исследований выявлено присутствие хлорфенольных соединений в малых субарктических озерах Европейского Севера. Уровень концентраций хлорфенольных соединений в осадках озера Тундровое-2 превышал содержание хлорфенольных соединений в озерах юга Архангельской области, не подверженных прямому антропогенному влиянию. Компонентный состав ХФС представлен преимущественно трихлорфенолами. Токсичный ПХФ был обнаружен в количестве 0,008 мкг/г, что сопоставимо с его содержанием в озерах, не испытывающих антропогенного воздействия.

В донных осадках исследованных озер не были обнаружены низкохлорированные фенолы, что предполагало неполное микробное дехлорирование легкоэкстрагируемых (биодоступных) высокозамещенных хлорфенолов, а также неблагоприятные в холодном климате субарктических территорий условия для протекания естественных энзиматических процессов.

Формирование хлорфенольных соединений в донных осадках озерных экосистем в Большеземельской тундре, удаленных от антропогенного воздействия, происходило за счет природных энзиматических и биохимических процессов, а также атмосферным переносом этих соединений, образующихся в процессах сжигания/горения.

Выявленное присутствие в донных осадках исследованных озер хлорфенольных соединений предполагает их распространение в окружающей среде путем атмосферного переноса от абиогенных источников, а также протекание в этих арктических водоемах естественных энзиматических и биохимических процессов.

Благодарности. Автор выражает благодарность Н.М. Кокрятской и А.Ф. Троянской за помощь в подготовке статьи.

Работа выполнена за счет средств Минобрнауки РФ проект № АААА-А18-118012390167-1 «Изучение закономерностей биогеохимических процессов циклов хлора и серы в экосистемах Арктики и Субарктики под влиянием природных и техногенных факторов».

Acknowledgments. The author is grateful to N. Kokryatskaya and A. Troyanskaya for their assistance in the preparation of the article.

The work was carried out at the expense of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation project АААА-А18-118012390167-1 “Study of the patterns of biogeochemical processes of chlorine and sulfur cycles in the ecosystems of the Arctic and Subarctic under the influence of natural and man-made factors.”

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lyytikainen M. Environmental fate and bioavailability of wood preservatives in freshwater sediments near an old sawmill site // *Chemosphere*. 2001. V. 44. P. 341–350.
2. Suntio L., Shiu W., Mackay D. A review of the nature and properties of chemicals present in pulp mill effluents // *Chemosphere*. 1988. V. 17. P. 1249–1290.
3. Троянская А.Ф., Колпакова Е.С., Никитина И.А., Королева Т.А. Хлорфенольные соединения в донных осадках озер Кенозерского национального парка // Тезисы докладов VIII Всероссийской конференции по анализу объектов окружающей среды «Экоаналитика – 2011». Архангельск, 2011. С. 270.
4. Колпакова Е.С., Вахрамеева Е.А., Швецова Н.В. Хлорорганические соединения в экосистемах Кенозерского национального парка // Тезисы докладов научной конференции «Вклад особо охраняемых природных территорий Архангельской области в сохранении природного и культурного наследия». Архангельск, 2017. С. 56–58.
5. McAllister A., Hung L., Trevors T. Microbial degradation of pentachlorophenol // *Biodegradation*. 1996. V. 7. № 1. P. 1–40.
6. Шевченко В.П., Любас А.А., Стародымова Д.П., Болотов И.Н., Аксенова О.В., Алиев Р.А., Гофаров М.Ю., Игловский С.А., Кокрятская Н.М. Особенности геохимии тяжелых металлов в донных осадках малых озер урочища Пымвашор (Большеземельская тундра) // Успехи современного естествознания. 2017. № 1. С. 105–110.
7. Троянская А.Ф., Вельямидова А.В. Стойкие органические загрязнители в субарктических озерах на Европейском Крайнем Севере России // Водные ресурсы. 2017. № 4. С. 465–474.
8. ISO 14154:2005(E). Soil quality – Determination of some selected chlorophenols – Gas-chromatographic method with electron-capture detection. International standard. 2005. 15 p.
9. ISO 8245:1999. Water quality – Guidelines for the determination of total organic carbon (TOC) and dissolved organic carbon (DOC). International Organization of Standardization. 1999. P. 1–11.
10. Shellenberg K., Leuenberger C., Schwarzenbach R. Sorption of chlorinated phenols by natural sediments

REFERENCES

1. Lyytikainen M. Environmental fate and bioavailability of wood preservatives in freshwater sediments near an old sawmill site. *Chemosphere*. 2001, 44: 341–350.
2. Suntio L., Shiu W., Mackay D. A review of the nature and properties of chemicals present in pulp mill effluents. *Chemosphere*. 1988, 17: 1249–1290.
3. Troyanskaya A.F., Kolpakova E.S., Nikitina I.A., Koroleva T.A. Khlorfenoł'nye soedineniia v donnykh osadkakh ozer Kenozerskogo natsional'nogo parka. Chlorophenol compounds in the bottom sediments of the lakes of the Kenozersky National Park. *Tezisy dokladov VIII Vserossiiskoi konferentsii po analizu ob'ektov okruzhaiushchei sredy "Ekoanalitika – 2011"* Abstracts of the scientific VIII All-Russian Conf. on the analysis of environmental objects "Ecoanalytics - 2011". Arkhangelsk, 2011: 270. [In Russian].
4. Kolpakova E., Vakhrameyeva E., Shvetsova N. Khlororganicheskie soedineniia v ekosistemakh Kenozerskogo natsional'nogo parka. Organochlorine compounds in the ecosystems of the Kenozersky National Park. *Tezisy dokladov nauchnoi konferentsii "Vklad osobo okhraniayemykh prirodnnykh territorii Arkhangel'skoi oblasti v sokhraneni prirodnogo i kul'turnogo nasledia"*. Abstracts of the scientific conference Contribution of the specially protected natural areas of the Arkhangelsk region to the preservation of the natural and cultural heritage. Arkhangelsk, 2017: 56–58. [In Russian].
5. McAllister A., Hung L., Trevors T. Microbial degradation of pentachlorophenol. *Biodegradation*. 1996, 7, 1: 1–40.
6. Shevchenko V.P., Lyubas A.A., Starodymova D.P., Bolotov I.N., Aksenova O.V., Aliev R.A., Gofarov M.Yu., Iglovskiy S.A., Kokrjatskaya N.M. Geochemistry of heavy metals in bottom sediments of small lakes in Pymvashor trough (Bolshezemelskaya tundra). *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniia*. The successes of modern natural science. 2017, 1: 105–110. [In Russian].
7. Troyanskaya A.F., Veliamidova A.V. Persistent organic pollutants in subarctic lakes in the European Far North of Russia. *Vodnye resursy*. Water resources. 2017, 4: 465–474. [In Russian].
8. ISO 14154:2005(E). Soil quality – Determination of some selected chlorophenols – Gas-

- and aquifer materials // Environ. Sci. Technology. 1984. V. 18. P. 652–657.
11. Toxicological profile for pentachlorophenol. U.S. Department of health and human services // Public Health Service Agency for Toxic Substances and Disease Registry. 2001. 316 p.
12. Гетман А.В. От разведки — к добыче // Заполярный регион. 2008. № 2 (9). С.10–14.
13. Briois C., Gullett B., Ryan S., Tabor D., Touati A. Temperature and concentration effects on the dioxin and furan formation from a mixture of chlorophenols over fly ash // Organohalogen Compounds. 2006. V. 68. P. 850–856.
14. Haggblom M., Apajalanti H., Salkinoja-Salonen M. O-Methylation of Chlorinated para-Hydroquinones by *Rhodococcus chlorophenolicus* // Applied and Environmental Microbiology. 1988. V. 54. № 7. P. 1818–1824.
15. Field J., Sierra-Alvarez R. Biodegradability of chlorinated aromatic compounds // Science dossier. Euro Chlor. July 2007. P. 15–33.
16. Gribble G. Natural Organohalogens // Science Dossier. Euro Chlor. October 2004. 60 p.
17. Knuutinen J., Palm H., Hakala H. Polychlorinated phenols and their metabolites in soil and earthworms of sawmill environment // Chemosphere. 1990. V. 20. № 6. P. 609–623.
18. Gaofeng W., Hong X., Mei J. Biodegradation of chlorophenols: a review // Chemical journal on Internet. 2004. V. 6. № 10. 67 p.
- chromatographic method with electron-capture detection. International standard. ISO, 2005: 15 p.
9. ISO 8245:1999. Water quality – Guidelines for the determination of total organic carbon (TOC) and dissolved organic carbon (DOC). International Organization of Standardization. ISO, 1999: 1–11.
10. Shellenberg K., Leuenberger C., Schwarzenbach R. Sorption of chlorinated phenols by natural sediments and aquifer materials. Environ. Sci. Technology. 1984, 18: 652–657.
11. Toxicological profile for pentachlorophenol. U.S. Department of health and human services. Public Health Service Agency for Toxic Substances and Disease Registry. 2001: 316 p.
12. Getman A.V. From exploration to extraction. *Zapoliarnyi region*. Polar region. 2008, 2 (9): 10–14. [In Russian].
13. Briois C., Gullett B., Ryan S., Tabor D., Touati A. Temperature and concentration effects on the dioxin and furan formation from a mixture of chlorophenols over fly ash. Organohalogen Compounds. 2006, 68: 850–856.
14. Haggblom M., Apajalanti H., Salkinoja-Salonen M. O-Methylation of Chlorinated para-Hydroquinones by *Rhodococcus chlorophenolicus*. Applied and Environmental Microbiology. 1988, 54, 7: 1818–1824.
15. Field J., Sierra-Alvarez R. Biodegradability of chlorinated aromatic compounds. Science dossier. Euro Chlor, July 2007: 15–33.
16. Gribble G. Natural Organohalogens. Science Dossier. Euro Chlor. October 2004: 60 p.
17. Knuutinen J., Palm H., Hakala H. Polychlorinated phenols and their metabolites in soil and earthworms of sawmill environment. Chemosphere. 1990, 20, 6: 609–623.
18. Gaofeng W., Hong X., Mei J. Biodegradation of chlorophenols: a review. Chemical journal on Internet. 2004, 6, 10: 67 p.

ГЕОМОРФОЛОГИЯ И ЭВОЛЮЦИОННАЯ ГЕОГРАФИЯ

УДК 551.8

DOI: 10.30758/0555-2648-2018-64-4-391-406

ПАЛЕОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПОБЕРЕЖЬЯ БАРЕНЦЕВА МОРЯ В ПОЗДНЕМ ГОЛОЦЕНЕ НА ПРИМЕРЕ ПОЛУОСТРОВА СРЕДНИЙ

Т.В. САПЕЛКО¹*, Е.С. НОСЕВИЧ², М.А. КУЛЬКОВА³,
А.И. МУРАШКИН⁴, Е.М. КОЛПАКОВ⁵

¹ — Институт озераведения РАН, Санкт-Петербург, Россия

² — ФГБУ «ВСЕГЕИ» им. А. П. Карпинского, Санкт-Петербург, Россия

³ — Государственный педагогический университет им. А.И. Герцена, Санкт-Петербург, Россия

⁴ — Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

⁵ — Институт истории материальной культуры РАН, Санкт-Петербург, Россия

*tsapelko@mail.ru

PALEOECOLOGICAL CHARACTERISTICS OF THE BARENTS SEA COAST DURING THE LATE HOLOCENE BY THE EXAMPLE OF SREDNIY PENINSULA

T.V. SAPELKO¹*, E.S. NOSEVICH², M.A. KULKOVA³,
A.I. MURASHKIN⁴, E.M. KOLPAKOV⁵

¹ — Institute of Limnology, Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia

² — A.P. Karpinsky Russian geological research institute, Saint Petersburg, Russia

³ — Herzen State Pedagogical University of Russia, Saint Petersburg, Russia

⁴ — Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

⁵ — Institute for the History of Material Culture, Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia

*tsapelko@mail.ru

Received September, 28, 2018

Accepted November, 26, 2018

Keywords: archeology, Barents Sea, geochemistry, Kola Peninsula, Late Holocene, palaeoecology, palynology.

Summary

We received results of complex palaeoecological research at south-west Barents Sea coast. In Periyarvi 1 settlement (Sredniy Peninsula) discovered by V. Ya. Shumkin in 1994, archeological

Citation: Sapelko T.V., Nosevich E.S., Kulikova M.A., Murashkin A.I., Kolpakov E.M. Palaeoecological characteristics of the Barents sea coast during the late holocene by the example of Sredniy peninsula. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2018, 64, 4: 391–406. [In Russian]. doi: 10.30758/0555-2648-2018-64-4-391-406.

excavations of two house-structures were performed. We sampled the sequence in the house-structure 16 date to the Early Metal Age and we studied it with archaeological, palynological, geochemical and radiocarbon methods. The sequence in the house-structure 16 settlement include sand layers in the bottom, the upper part consists of slightly decomposed peat. The radiocarbon data obtained from the charcoal sample from the fireplace in the middle of the house-structure is 2920 ± 70 C14 BP, which correlates with result of pollen analysis. According to pollen data, the sequence formation started at the first half of the Subboreal period during the spread of tundra vegetation and then vegetation changed to forest tundra while the climate was getting more comfortable for humans. At the Subatlantic period tundra recovers because of temperature drop. The landscape is getting similar to the modern one. According to geochemical indications main functional zones of house-structure were distinguished, and that provides necessary information about main characteristics of living conditions. The complex of methods allows to date Periyarvi 1 settlement to the Early Metal Age. In the results we made reconstruction of palaeoenvironmental conditions in the Late Holocene at the Barents Sea coast.

Поступила 28 сентября 2018 г.

Принята к печати 26 ноября 2018 г.

Ключевые слова: археология, Баренцево море, геохимия, Кольский полуостров, палеоэкология, палинология, поздний голоцен.

Получены результаты комплексных палеоэкологических исследований на юго-западном побережье Баренцева моря. На поселении Перьярви 1 (полуостров Средний), открытом В.Я. Шумкиным в 1994 г., проведены археологические раскопки двух жилищ. Разрез одного из жилищ эпохи раннего металла изучен с помощью археологического, палинологического, геохимического и радиоуглеродного методов, на основании чего проведена реконструкция природных условий в позднем голоцене на побережье Баренцева моря.

ВВЕДЕНИЕ

Изменения природной среды на морских побережьях с древних времен и по сегодняшний день существенно влияют на динамику и качество жизни населения. На юго-западном побережье Баренцева моря с момента установления более устойчивого уровня моря в позднем голоцене основную роль начинает играть климат. Влияние климата на изменение природной среды и динамику поселений древнего человека становится основным фактором [1, 2, 3]. Растительный покров тундровой зоны очень чувствителен к человеческому присутствию, поэтому, помимо изучения озер, торфяников и других естественных разрезов, весьма актуальным на рассматриваемой территории является и изучение разрезов археологических памятников. Благодаря комплексному изучению поселений древнего человека можно проследить влияние человека на растительный покров на границе Арктики и Субарктики.

Полуострова Средний и Рыбачий являются археологически хорошо изученным районом. Первые исследования в западных частях полуостровов, принадлежавших в то время Финляндии, в 1920–1930-е гг. выполнены финскими и норвежскими археологами и геологами. В результате были выявлены памятники разных археологических периодов от раннего мезолита до средневековья; на двух жилищах позднего неолита / эпохи раннего металла на поселении Гроттунг проводились раскопки [4, 5, 6, 7]. В 1935 и 1937 гг. восточные части полуостровов обследованы экспедицией ГАИМК СССР под руководством Б.Ф. Землякова [8]. В 1965 и 1972 гг. Кольской археологической экспедицией ЛОИА АН СССР под руководством Н.Н. Гуриной полуострова были обследованы заново, на нескольких стоянках мезолитического времени в заливе Большая Мотка проведены раскопки [9, 10]. В 1985–1986 гг. в Зубовском заливе Североморским отрядом Заполярной экспедиции ЛОИА АН СССР

под руководством В.Я. Шумкина открыты наскальные изображения на реках Пяйве и Майка, а также обнаружены мезолитические стоянки: четыре на реке Пяйве и две на ручье Восточном [11, 12]. Важные исследования выполнены в 1994 и 1996 гг., когда в результате разведок на полуостровах Рыбачий и Средний было обнаружено 17 поселений с жилищами разных типов [13]. Исследование жилищ в настоящий момент является одной из наиболее актуальных проблем региона. Как закрытые комплексы, эти объекты являются опорными точками для разработки проблем хронологии, периодизации и культурогенеза. Благодаря исследованиям П. Симонсена разнообразных жилищ на норвежском побережье в Варангер-фьорде разработана периодизация каменного века и эпохи раннего металла, применимая для всей Северной Фенноскандии [14, 15].

РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЯ

Поселение эпохи раннего металла Перьярви 1 лежит на северном берегу губы Малой Волоковой полуострова Средний (Баренцево море), к северу от хребта Муста-Тунтури, являющего последней грядой Балтийского кристаллического щита (рис. 1). Полуостров Средний относится к древней геологической структуре, являющейся продолжением Тиманского кряжа: на полуострове на поверхность выходят плитчатые песчаники и алевриты. Климат субарктический морской, основные черты которого обусловлены близостью теплых Северо-Атлантического и Нордкапского течений [16]. По данным метеостанции Вайда-Губа на полуострове Рыбачий, средние зимние температуры на полуостровах Средний и Рыбачий $-5,5^{\circ}\text{C}$, летние — $+9,7^{\circ}\text{C}$. Среднегодовое количество осадков составляет около 690 мм/год, большая их часть выпадает в виде снега, максимум приходится на март [17]. Растительность полуострова Средний относится к южной подзоне тундры, богатой кустарниковой растительностью. Проведенное на полуостровах Средний и Рыбачий исследование растительного покрова показало, что растительные сообщества имеют достаточно выраженную привязку к элементам рельефа. Березовые криволесья, достигающие

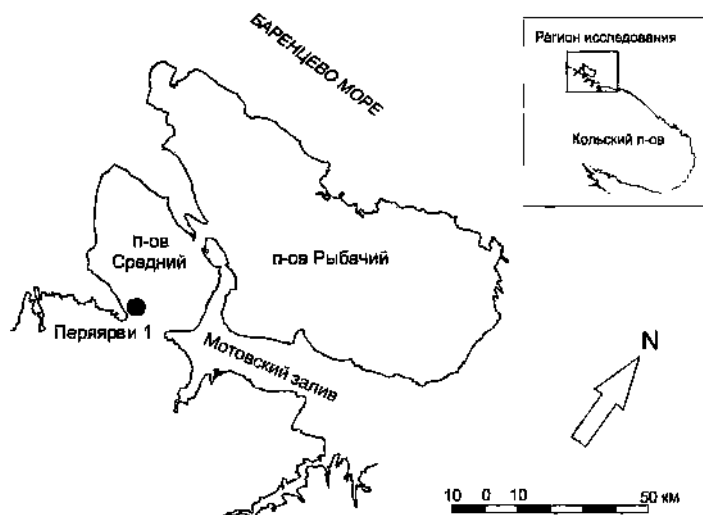


Рис. 1. Карта-схема региона исследования

Fig. 1. Location map

5 м в высоту, приурочены к межскальным понижениям, долинам ручьев и тыловым швам террас. В таких защищенных от ветра местоположениях формируются сообщества с *Betula fruticosa*, *Alnaster* и многочисленными видами *Salix*. В их травяно-кустарничковом ярусе широко представлены элементы неморальной флоры, включая угнетенные формы *Chamaenerion angustifolium*. Типично тундровые ассоциации с обилием водяники, лишайников и карликовой березы занимают открытые пространства седловин и вершин увалов. На этих же позициях в понижениях, аккумулирующих обильную влагу, формируются висячие болота со сфагнами и осоками. К озерным террасам приурочены эвтрофные болота со *Sphagnum*, *Carex* и *Eriophorum*. К ним же были отнесены обширные заболачивающиеся участки понижений на морских террасах. Активное торфонакопление обусловлено обильным питанием от поверхностного стока. Мезоэвтрофные и олиготрофные болота развиваются либо на широких озерных террасах, либо в хорошо выположенных крупных седловинах или межскальных понижениях. В период Великой Отечественной войны регион подвергся очень серьезной антропогенной трансформации. На полуостровах Средний и Рыбачий базировались советские войска, защищавшие пути полярных конвоев. В ходе ожесточенных боев некоторые ландшафты полуостровов были разрушены. На возвышенностях невозможно обнаружить естественные фации: рельеф «срезан», вместо террас, увалов и седловин наблюдаются выположенные участки битого плитчатого песчаника, разобранного на пластины (такие плиты использовались для строительства блиндажей и других оборонительных укреплений). Растительность на таких пустошах практически отсутствует за исключением накипных лишайников, мхов и небольших колоний овсяницы. Проложенные на полуострове дороги срезают бровки морских террас, насыпи нивелируют их тыловые швы. Часто встречаются блиндажи и окопы, нарушающие естественную структуру растительного покрова.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В 2012 г. Кольской археологической экспедицией Института истории материальной культуры Российской академии наук (КолАЭ ИИМК РАН) было проведено исследование двух жилищ эпохи раннего металла на поселении Перьярви 1. Памятник открыт в 1994 г. В.Я. Шумкиным [13] в 0,35 км к северо-западу от озера Перьярви, в 0,35 км к востоку от берега губы Малая Волоковая, в 60 м к северо-востоку от фундамента финской казармы, на второй морской террасе высотой 13–14 м над уровнем моря. На поселении зафиксированы остатки 17 углубленных прямоугольных жилищ (камеры размером от 4×5 до 9×6 м и глубиной до 1 м, в основном имеющие валики разной конфигурации шириной до 2,5 м и высотой до 0,3 м). Жилища расположены в одну линию вдоль края террасы на площади примерно 200×30 м. В 2012 г. в восточной части памятника были исследованы жилища 15 и 16.

До раскопок объекты представляли собой четырехугольные впадины глубиной 0,5 и 0,3 м, размерами 6,5×5 и 4,5×3,5 м, вытянутые по линии ССВ-ЮЮЗ и С-Ю. Северные края западин более крутые, с южной стороны находились слабо выраженные валики шириной 1,3–1,5 м и высотой 0,1–0,15 м. Объекты были полностью задернованы, мощность дерново-торфяного слоя увеличивалась в западинах. Культурный слой в обоих жилищах литологически не выражен, находки залегали под торфом в слое белесого крупнозернистого песка с галькой; около остатков очагов в этом слое зафиксированы углистые примазки и мелкие древесные угли. Жилища имели прямоугольные камеры размером 3,5×3 и 3,2×3,0 м; в западной части жилища 15 была зафиксирована

возвышенная на 0,15–0,2 м прямоугольная площадка размером 1,5×1,5 м. В жилище 15 очаг не обнаружен, но в центральной части камеры найдено большое число рас-трескавшихся под действием огня галек и валунов. В центре камеры жилища 16 сразу после снятия дерна выявлены камни обкладки очага. Очаг овальной формы, вытянут по линии запад-восток, возможно, разомкнут с запада и востока, размер — 1,15×0,6 м. В обкладке использованы окатанные гранитные булыжники и крупные песчаниковые плиты размером до 0,4×0,18 м, некоторые разрушены от воздействия огня. Заполнение очага составляет крупнозернистый серый песок мощностью до 7–10 см с тонкими черными углистыми линзами.

В результате раскопок жилища 15 обнаружено 62 артефакта. Из них 60 экземпляров представляют продукты расщепления кварца. Сырье представлено небольшими гальками, которые, возможно, собирали на южном берегу бухты Малая Волоковая. Из 11 нуклеусов два — желваки на самой ранней стадии обработки, с негативами 1–2 снятий. В коллекции также представлены три первичных и полупервичных скола. Для расщепления характерно использование биполярной техники раскалывания на наковальне — 9 нуклеусов относятся к биполярным, два из них полностью сработаны. Также в коллекции представлены чешуйки (9 экземпляров), осколки (4 экземпляра), отщепы (36 экземпляров, из них 6 — биполярных). Помимо них имеется один отбойник из гранита и обломок шлифовальной плиты из песчаника. Для отбойника характерна незначительная забитость поверхности.

В жилище 16 обнаружено 16 артефактов, из них: один фрагмент слюды, 12 чешуек и отщепов кварца, два отбойника с незначительной забитостью поверхности и грузило из гранита. Нужно отметить, что в этой части полуострова Средний гранитные валуны и гальки встречаются в отложениях довольно редко. Гранитное грузило выделяется большими размерами и тщательностью обработки — ложбинка для привязывания, пробитая в центральной части валуна, имеет ширину около 2 см. По размерам (21,5×13 см) грузило выделяется из известных на Кольском полуострове экземпляров и могло служить якорем.

Образцы на спорово-пыльцевой анализ отобраны последовательно из разреза запад-восток в центре жилища 16 (рис. 2). Для технической обработки образцов применялась усовершенствованная стандартная методика [18] с применением тяжелой жидкости (CdI₂ + KI). Для определения зерен пыльцы и спор использовались определители [19, 20]. Спорово-пыльцевые диаграммы построены с помощью программ Tilia, Tilia Graph и TGView (<http://www.museum.state.il.us/pub/grimm>). Проценты рассчитаны от общей суммы пыльцы и спор.

Образцы для геохимических исследований отобраны из того же разреза в центре жилища 16 и из тех же горизонтов, что и на спорово-пыльцевой анализ. Одним из методов, который используется для оценки ландшафтно-палеоклиматических условий плейстоцена-голоцена является метод геохимической индикации [21]. Метод основан на определении индикаторных соотношений химических элементов в озерных, почвенных и лессовых отложениях, изменчивость которых зависит от ландшафтно-климатических факторов, таких как температура и влажность, антропогенное влияние на окружающую среду, динамика глубины водоема и условия диагенеза отложений. Химический состав отложений определен с помощью рентгено-спектрального флуоресцентного метода. Условия осадконакопления (относительная влажность, относительная температура, антропогенное влияние) оценены с помощью определенных

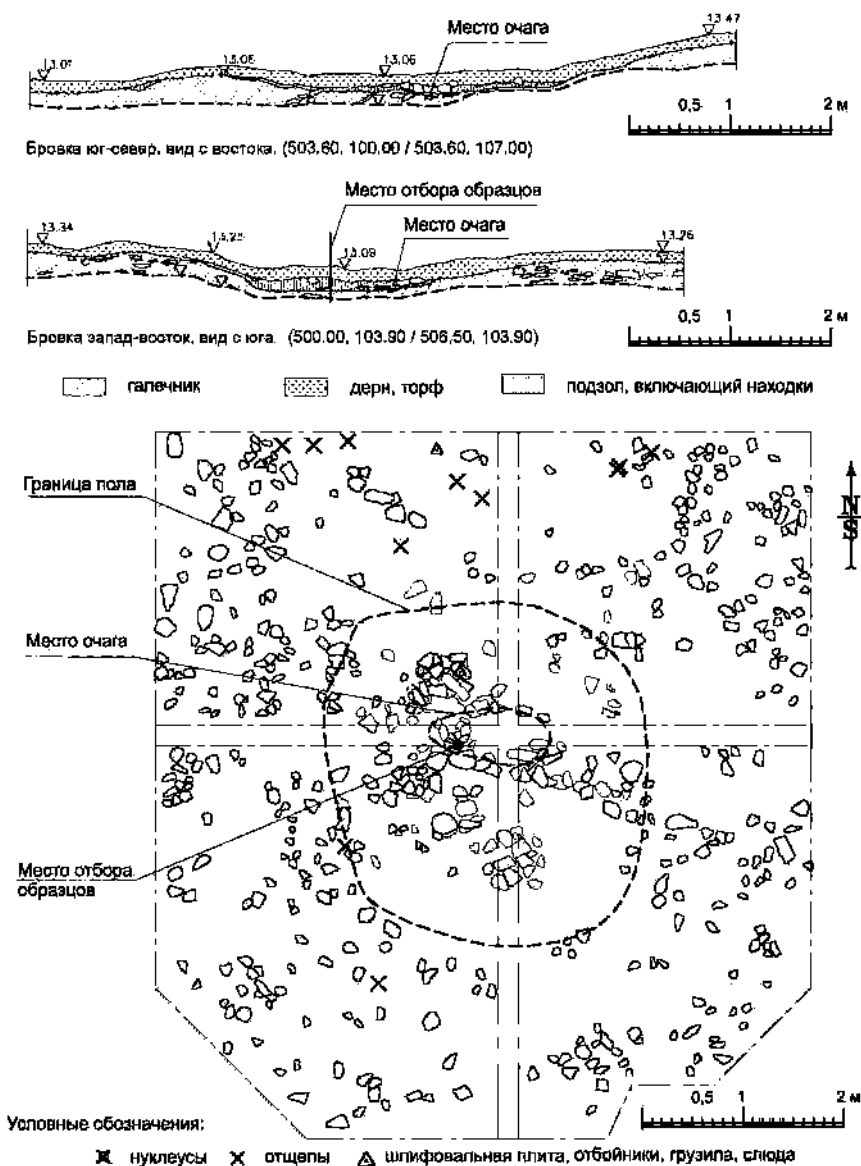


Рис. 2. Перьярви 1, жилище 16. План с местоположением изученного разреза (место отбора колонки)

Fig. 2. Periyarvi 1 settlement. Plan of the house-structure 16. Location of the studied section

геохимических индикаторов. Для установления степени выветривания, связанного с увеличением температуры в гумидных зонах, применялся индекс химического выветривания, предложенный в [22]: $CIA = Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O)$. По данным [23], соотношения Rb/Sr и Na_2O/K_2O изменяются в зависимости от степени выветривания плагиоклаза и калиевого полевого шпата. Эти показатели используются рядом исследователей как индикаторы оценки относительного изменения температуры.

Соотношение $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{CaO}$ использовалось как индикатор относительной влажности [21]. Для характеристик антропогенной активности также использовалось изменение фосфора P_2O_5 по разрезу.

Из очага в северо-западном секторе жилища 16 из слоя крупнозернистого песка на радиоуглеродное датирование был отобран древесный уголь. Радиоуглеродное датирование выполнено традиционным методом с помощью низкофонового сцинтилляционного счетчика Quantulus 1220 в Лаборатории геохимии окружающей среды РГПУ им. А.И. Герцена. Для калибровки использовалась программа OxCal 4.2 [24].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Литологический анализ и хронология

Мощность изученного разреза составила 31 см. Выполненное в поле литологическое описание было уточнено в ходе дальнейших аналитических исследований:

0–4 см — дерн;

4–10 см — торф слабой степени разложения;

10–18 см — крупнозернистые белесые пески с галькой и углистыми частицами;

18–31 см — галечник с рыжими супесями. Гальки и глыбы — от 5 до 15 см в поперечнике.

Возраст реконструированных событий определен на основании археологической типологии, с помощью палинологического и радиоуглеродного методов. Археологические находки не дают возможности датировать поселение. Однако характер исследованных построек и их высотное расположение позволяют определить время существования жилищ концом эпохи раннего металла. Палинологические данные позволяют отнести изученный разрез к суббореальному и субатлантическому периодам, что подтверждает и полученная радиоуглеродная датировка. Радиоуглеродное датирование угля из очага из жилища 16 подтвердило реконструированный возраст (табл. 1).

Таблица 1

Результаты радиоуглеродного датирования

Код образца	Радиоуглеродный возраст C^{14} , лет назад	Калиброванный возраст, календ. лет до нашей эры	Материал	Место отбора образца
SPb_744	2920±70	1320–920	Уголь	Слой 2, СЗ, сектор у очага

Палинология

По результатам спорово-пыльцевого анализа была построена диаграмма, где выделены три палинозоны (рис. 3).

Палинозона 1 (25–20 см) характеризуется преобладанием пыльцы травянистой растительности при общей низкой концентрации пыльцы. Доминирует пыльца семейства *Рoaceae*, составляющая в среднем 20 % от общего количества пыльцы и спор. Отмечена пыльца *Superaceae* и *Asteraceae* (12,6 % и 11,3 % соответственно). Встречены пыльцевые зерна *Scabiosa* и семейства *Rubiaceae*. Пыльца древесных пород играет подчиненную роль. Древесные породы представлены единичными зернами *Pinus* плохой сохранности, немногочисленными *Betula* и преобладающими *Betula nana* (19,6 %). Отмечены зерна *Alnaster*, в верхней части палинозо-

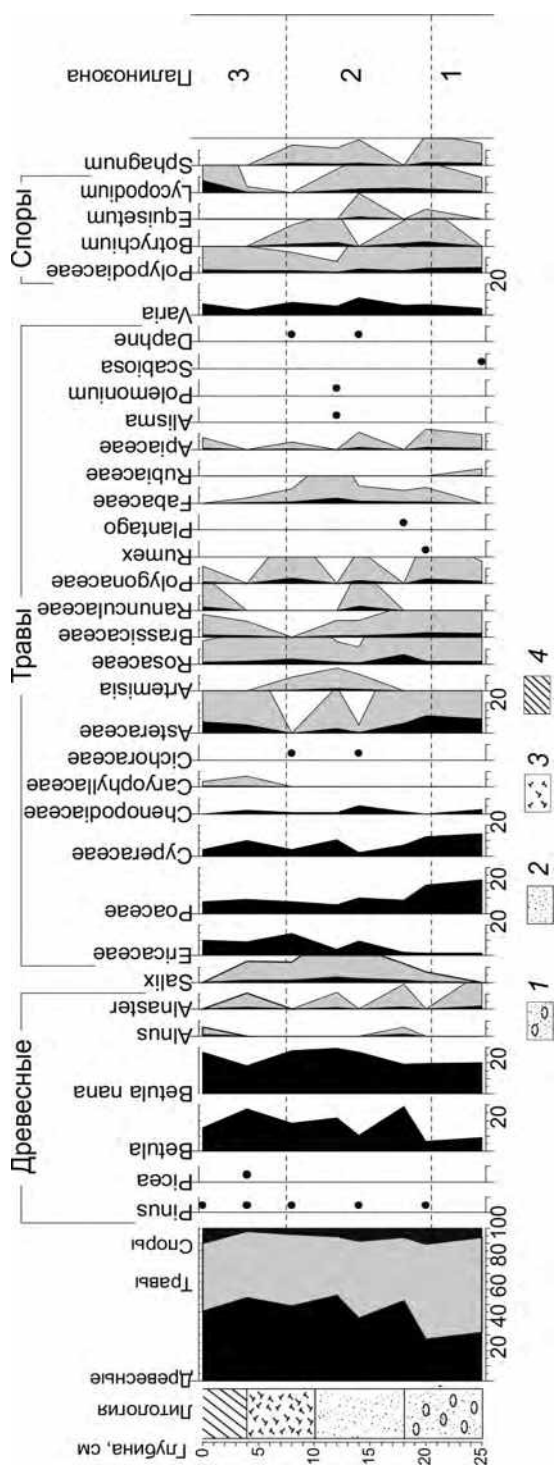


Рис. 3. Спорно-пыльцевая диаграмма разреза из жилища 16 поселения Перьярви 1.

1 — галечник с супесью; 2 — крупнозернистые пески; 3 — торф; 4 — дерн

Fig. 3. Pollen diagram house-structure 16 from Periyarvi 1 settlement.

1 — boulders with loamy sand; 2 — coarse-grained sand; 3 — peat; 4 — soil

ны отмечена пыльца *Salix*. Споры немногочисленны, преобладают Polypodiaceae и *Lycopodium*.

В палинозоне 2 (20–7 см) увеличивается общая концентрация пыльцы и спор. Возрастает содержание древесных пород (до 52,5 %). Доминируют *Betula nana* (до 29,8 %) и *Betula* (до 21,6 %), присутствуют *Alnaster*, *Alnus* и *Pinus*. Увеличивается разнообразие пыльцы трав, среди которых доминирует пыльца Poaceae, Cyperaceae и Ericaceae (до 10 %, 10,4 % и 14,4 % соответственно). Злаки и осоки преобладают в нижней части палинозоны, где содержание пыльцы сложноцветных достигает своего максимума (6,5 %). Увеличивается содержание пыльцы Ericaceae. Появляется пыльца *Plantago*, *Rumex* и Cichoriaceae. В средней части палинозоны выделяются пики Chenopodiaceae и Ranunculaceae. В верхней части палинозоны исчезает пыльца Asteraceae, а пыльца Ericaceae достигает максимума. Отмечены *Alisma* и *Polemonium*. Споры составляют максимально 8,3 % от общего количества пыльцы и спор. Преобладают Polypodiaceae, *Botrychium* и *Lycopodium*.

В палинозоне 3 (7–0 см) преобладает пыльца кустарников, среди которых доминирует *Betula nana* (27,3 %). Снижается содержание пыльцы *Betula* (15,2 %). Единично отмечена пыльца *Picea* и *Pinus*. Отмечено присутствие пыльцы *Alnus*, *Alnaster* и *Salix*. Среди трав преобладают Ericaceae (10,2 %), Cyperaceae (10,0 %) и Poaceae (9,0 %). Пыльца Asteraceae и Ranunculaceae появляются вновь, причем содержание пыльцы Asteraceae доходит до 7,6 %. Споры достигают максимума содержания в разрезе (9,8 %) за счет увеличения количества спор *Lycopodium* (7,6 %).

Геохимия

Распределение геохимических индикаторов в отложениях разреза позволило реконструировать палеоклиматические события. Распределение фосфора по разрезу отражает древнюю антропогенную активность, повышенные его содержания совпадают с уровнем культурного слоя на глубине около 20 см (рис. 4).

По данным CIA (Индекса химического выветривания отложений исследуемого разреза), в период существования здесь поселения происходит изменение климата

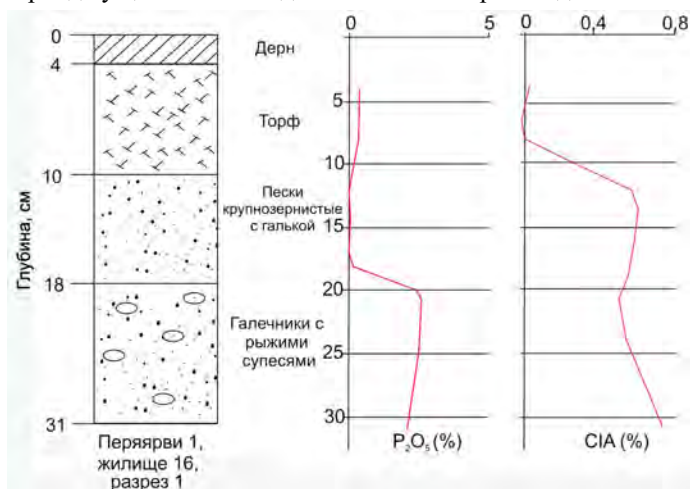


Рис. 4. Графики изменения значений фосфора и CIA в отложениях разреза из жилища 16 поселения Периярви 1

Fig. 4. Phosphorus and CIA changes diagrams of house-structure 16 from Periyarvi 1 settlement

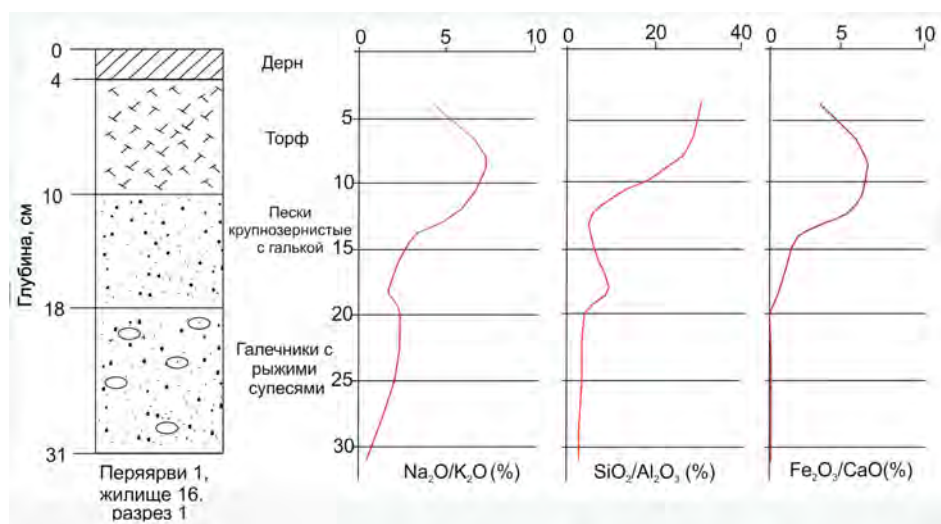


Рис. 5. Графики геохимических индикаторов для отложений разреза Перьярви 16

Fig. 5. Geochemical indicators diagrams for Periyarvi 16

в сторону увлажнения и потепления (рис. 5). В отложениях на глубине 15–20 см регистрируется уменьшение соотношения $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$, что может свидетельствовать о переходе к более теплему периоду. Индекс $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{CaO}$ характеризует увеличение увлажнения в период формирования отложений культурного слоя. Также отмечается некоторое повышение значений соотношения $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ в отложениях культурного слоя, что связано с интенсивностью преобразования вещества в зависимости от изменения температуры и влажности.

Определение функциональных зон на памятнике также проведено с помощью геохимических индикаторов, показывающих антропогенную активность. Фосфор, кальций и стронций являются основными компонентами, входящими в состав минеральной части костной ткани, зубов, роговых образований. В процессе захоронения карбонат-апатит, из которого состоит минеральная часть костной ткани, практически не растворяется и не выносится водными потоками. Поэтому в местах поселений и особенно захоронений людей и животных содержания фосфора, кальция и стронция имеют сильные аномальные значения, кроме того, аномальные концентрации калия и рубидия в зонах обитания древнего человека могут являться индикаторами очажных структур [21]. Аномалии по фосфору, кальцию и стронцию были выявлены в северо-западной части раскопа — за пределами и с южной стороны жилища, где предположительно был вход. Повышенные концентрации кальция, калия, рубидия были отмечены в зоне очага. На границе жилища также были отмечены повышенные концентрации калия, рубидия и фосфора, что, вероятно, связано с выбросами мусора за пределы жилища.

ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам спорово-пыльцевого анализа можно сделать вывод о смене растительных сообществ. От типично тундровых (палинозона 1) сообществ произошел переход к лесотундрам (палинозона 2). Данный переход, возможно, может означать смягчение климатических условий от более суровых, холодных к более мягким

температурным показателям при сохранении влажности. Встречаются рудеральные виды, такие как *Plantago*, *Rumex*, *Polemonium* и виды семейства *Cichoriaceae*, что говорит об активной деятельности человека на рассматриваемой территории. В следующий период (палинозона 3) содержание рудеральных видов уменьшается, снижается также разнообразие травянистого покрова.

По всей видимости, тундровые условия начала формирования разреза можно отнести к первой половине суббореального периода. Дальнейшее потепление и увлажнение климата второй половины суббореала способствовало продвижению на Средний п-ов лесотундровой растительности. Условия для обитания человека становятся более благоприятными. Затем в субатлантический период наступает похолодание и возвращение тундровой растительности. В это время поселение было оставлено, об этом может свидетельствовать сокращение пыльцы рудеральных видов.

В результате изучения поверхностных проб побережья Баренцева моря [25, 26] установлено, что процент пыльцы древесных пород в изученных палиноспектрах полуостровов Средний и Рыбачий составляет от 32 до 53 % от общего состава пыльцы и спор, а на Мурманском берегу Баренцева моря — от 30 до 55 %, процент трав достигает 54 % и 59 % соответственно. Указанные проценты примерно соответствует палинозонам 1 и 3 разреза Перьярви 1. Содержание пыльцы древесных пород палинозоны 2 превышает их количество в поверхностных пробах побережья Баренцева моря в основном за счет пыльцы березы.

По имеющимся палинологическим данным из естественных разрезов (озер и торфяников) на побережье Баренцева моря от полуостровов Средний и Рыбачий [17, 27] до Териберки [3] в суббореальный период распространялась лесотундровая растительность с преобладанием березы. Отмечено потепление и увлажнение климата, после чего с наступлением субатлантического периода приходит похолодание и лесотундровая растительность сменяется тундровой. Особенности новых полученных данных разреза археологического памятника свидетельствуют о распространении локальных антропогенных ландшафтов на изучаемой территории.

Геохимические данные также показывают антропогенную активность в период потепления и увлажнения климата. Оценка функциональных зон жилища методом геохимической индикации свидетельствует, что это было долговременное жилище. Отмечены аномальные концентрации кальция, калия и рубидия как индикаторы очажных структур. Аномалии значений по фосфору, кальцию и стронцию являются индикаторами зон разделки животных. Изменение климата в сторону похолодания, вероятно, приводит к покиданию стоянки древним человеком — в отложениях следующего периода регистрируется низкая антропогенная активность.

По археологическим данным, поскольку среди артефактов отсутствуют диагностичные типы, время существования поселения может быть определено по характеру построек, их высотному расположению и сравнению с другими археологическими памятниками региона. Так, в 1,5 км к северо-западу от поселения Перьярви 1 находится поселение Гроттуг, где были зафиксированы восемь и раскопаны два жилища типа гресбакен [6]. Существование этого типа относится к переходу от позднего неолита к эпохе раннего металла и определяется в пределах 2300–1600 л. до н.э. [15, 28, 29]. Высота поселения Гроттуг — от 14 до 17 м над уровнем моря. Можно предположить, что расположение поселения Перьярви на высоте 13–14 м над уровнем моря можно рассматривать как указание на более поздний

возраст (вторая половина 2 тыс. до н.э.). Еще одним косвенным свидетельством в пользу датирования жилищ 15 и 16 поселения Перьярви второй половиной 2 тыс. до н.э. или моложе является ряд типологических признаков, таких как прямоугольная форма, слабая углубленность, наличие одного очага, небольшие размеры. Перечисленные признаки позволяют отнести их к жилищам типа мортенсенес. Этот тип, по мнению многих норвежских авторов, распространяется в Финнмарке после исчезновения типа гресбакен [15, 30].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненных комплексных междисциплинарных исследований установлено, что 1320–920 лет до нашей эры в бухте Малая Волоковая полуострова Средний на побережье Баренцева моря установились благоприятные условия с относительно теплым и влажным климатом. В это время на побережье Баренцева моря распространилась лесотундровая растительность. Уровень моря в конце суббореального периода был достаточно низким. Для северного побережья полуострова Рыбачий (губа Зубовская) по створкам раковин *Cyprina islandica* изотложений террасы высотой 20,7 м над уровнем моря в долине р. Пяйве получена дата 5650 ± 80 C¹⁴ лет назад [31]. В Кольском заливе 4130 ± 55 C¹⁴ лет назад (4815–4545 кал. л.н.) до 3430 ± 70 C¹⁴ лет назад (3735–3590 кал. л.н.) произошла изоляция от моря озера, расположенного на отметке 12 м над уровнем моря [32], после чего трансгрессивных фаз в разрезах не зафиксировано. На побережье Баренцева моря от Никеля до Киркинеса начало регрессивной стадии немного отличается от установленной для Кольского залива, однако разница не превышает 500 лет [33]. По некоторым расчетам, после максимума позднеголоценовой трансгрессии моря средняя скорость относительного падения уровня моря составила примерно 0,4 м за 100 лет [34]. Продолжительность этой регрессии оценивается [35] в 1400 лет (3500–2100 C¹⁴ лет назад). Поселение Перьярви, расположенное на морской террасе высотой 13–14 м над уровнем моря, в суббореальном периоде не затоплялось водой, и окружающие ландшафты формировались в основном под влиянием климата и антропогенного воздействия.

Во второй половине 2 тыс. до нашей эры отрицательное перемещение береговой линии зафиксировано и на острове Кильдин. По данным анализа разреза донных отложений оз. Могильное на острове Кильдин отмечается двукратное переслаивание горизонтов морских и озерных отложений, которые формировались в период существования морского залива (периоды положительного перемещения береговой линии моря и связи с ним) и озера (периоды регрессии моря и изоляции водоема) соответственно. Результаты спорово-пыльцевого анализа колонки донных осадков свидетельствуют о формировании обоих горизонтов осадков и разделяющего их горизонта морских осадков в течение субатлантики. Подстилающий горизонт морских осадков связывают с высоким положением береговой линии позднее 3500 лет, а вышележащий горизонт озерных осадков — с последующим периодом отрицательного перемещения береговой линии. Радиоуглеродная датировка начала накопления озерных осадков относится ко времени 3490 ± 200 лет назад (Ta-551), верхний горизонт датируется 1950 ± 150 лет назад (Ta-550) [36].

Учитывая все выше изложенное, результаты комплексного исследования на полуострове Средний позволили получить новые палеоэкологические данные юго-западного побережья Баренцева моря для позднего голоцена.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания ИНОЗ РАН по теме № 0154-2018-0004 (государственная регистрация 01201363380).

Acknowledgments. The research were performed at a base of state order to institute of Limnology, RAS № 0154-2018-0004 (registration number 01201363380).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gervais B.R., MacDonald G.M. Tree-ring and summer-temperature response to volcanic aerosol forcing at the northern tree-line, Kola Peninsula, Russia // *The Holocene*. 2001, V. 11. Issue 4. P. 499–505.
2. Янковска В. Результаты палинологического анализа изучения пальсы (Швеция, Россия) // *Проблемы современной палинологии: Материалы XIII Российской палинологической конференции*. Т. 1. Сыктывкар, 2011. С. 108–110.
3. Сапелко Т.В., Анисимов М.А., Носевич Е.С. Палинологические реконструкции разрезов среднего и позднего голоцена побережья Баренцева моря // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2016. № 1 (107). С. 96–110.
4. Tanner V. Om Petsamonkustlapparnassag neromforntida under jordiskaboningar, s. k. jennam'vuolas'kuatt // *Finskt museum*. 1928. Helsingfors: K.F. Puromies Boktryckeri A.-B., 1929. V. 35. P. 1–24.
5. Tanner V. Note sur la position chronologiques des trouvailles prehistoriques par rapport aux etages geologiques dans la region cotiere de la Fenno-Scandie aux confins de l'océan Arctique // *Finska Forminnesforeningens Tidskrift*, XXXIX. Helsinki: K. F. Puomiehen Kirjapaino OY, 1935. P. 1–24.
6. Seitsonen O. Petsamo Maattivuono Rotojoki: two Late Stone Age dwellings excavated by Sakari Palsi in 1929 // *People, Material culture and Environment in the North. Proceedings of the 22nd Nordic Archaeological Conference*. University of Oulu. 18–23 August 2004. Gummerus Kirjapaino OY. 2006. P. 226–237.
7. Carpelan C., Torvinen M., Schultz E.-L. Arkeologinentutkimus Pohjois-Pohjanmaallaja Lapissa // *Varhainpohjoisessa: johdanto. Varhainpohjoisessa – hankkeenartikkeleita*. Helsinki. *Papers in Archaeology*. 11. University of Helsinki, Department of Archaeology. 1998. P. 13–20.

REFERENCES

1. Gervais B.R., MacDonald G.M. Tree-ring and summer-temperature response to volcanic aerosol forcing at the northern tree-line, Kola Peninsula, Russia. *The Holocene*. 2001, 11, 4: 499–505.
2. Jankovska V. *Problemy sovremennoy palynologii: Materialy XIII Rossiyskoy palynologicheskoy konferencii*. T. 1. Syktivkar: Results of palynological investigations of palsa (Sweden, Russia). Problems of modern palynology: materials of XII palynological conference. V. 1. Syktivkar, 2011: 108–110. [In Russian].
3. Sapelko T. V., Anisimov M. A., Nosevich E.S. Palynological reconstructions of Barents sea coast cores in Middle and Late Holocene. *Problemy Arctiki i Antarktiki*. Problems of Arctic and Antarctic. 2016, 1: 96–110. [In Russian].
4. Tanner V. Om Petsamonkustlapparnassag neromforntida under jordiskaboningar, s. k. jennam'vuolas'kuatt. *Finskt museum*. 1928, 35: 1–24. Helsingfors: K.F. Puomies Boktryckeri A.-B., 1929.
5. Tanner V. Note sur la position chronologiques des trouvailles prehistoriques par rapport aux etages geologiques dans la region cotiere de la Fenno-Scandie aux confins confins de l'océan Arctique. *Finska Forminnesforeningens Tidskrift*, XXXIX. Helsinki: K.F. Puomiehen Kirjapaino OY, 1935: 1–24.
6. Seitsonen O. Petsamo Maattivuono Rotojoki: two Late Stone Age dwellings excavated by Sakari Palsi in 1929. *People, Material culture and Environment in the North. Proceedings of the 22nd Nordic Archaeological Conference*. University of Oulu. 18–23 August 2004. Gummerus Kirjapaino OY, 2006: 226–237.
7. Carpelan C., Torvinen M., Schultz E.-L. Arkeologinentutkimus Pohjois-Pohjanmaallaja Lapissa. *Varhainpohjoisessa: johdanto. Varhainpohjoisessa – hankkeenartikkeleita*. Helsinki. *Papers in Archaeology*. 11. University of Helsinki, Department of Archaeology. 1998: 13–20.

8. Земляков Б.Ф. Арктический палеолит на севере СССР // Советская Археология. 1940. Т. 5. С. 107–143.
9. Гурина Н.Н. Новые исследования в северо-западной части Кольского полуострова // КСИА. М.: Наука, 1971. Вып. 126. С. 94–99.
10. Гурина Н.Н. Отчет о работе Кольской археологической экспедиции за 1972 год // Научный архив ИИМК РАН. Ф. 35. Оп. 1, Д. 52. 22 л.
11. Шумкин В.Я. Отчет о работе Североморского отряда Заполярной экспедиции ЛОИА АН СССР за 1986 г. // Научный архив ИИМКРАН. Ф. 35. Оп. 1, Д. 52. 22 л.
12. Shumkin V.Ya. The rock art, labyrinths, seids and beliefs of Eastern Lapland's ancient population // Myanndash – Rock art in the Ancient Arctic. Rovaniemi: Arctic Centre Foundation, 1999. P. 202–241.
13. Шумкин В.Я., Колпаков Е.М. Отчет Кольской археологической экспедиции ИИМК РАН о работах в Оленегорском и Печенгском районах Мурманской области в 2012 г. // Научный архив ИИМК РАН. Ф. 35. Оп. 1. 108 л.
14. Simonsen P. Varanger-Funnene II. Fund og udgravninger på fjordens sydkyst // Tromsø Museum Skrifter. 1961. V. 7. Hefte 2. 524 p.
15. Olsen B. Bosetning ogsamfunni Finnmarks forhistorie. Stockholm: Universitets forlaget, 1994. 198 p.
16. Атлас Мурманской области. М.: Главное управление геодезии и картографии при совете министров СССР. 1971. 33 с.
17. Kremenetski C., Vashchalova T., Goriachkin S., Cherkinsky A., Sulerzhitsky L. Holocene pollen stratigraphy and bog development in the western part of the Kola Peninsula, Russia // Boreas. 1997. V. 26. P. 91–102.
18. Гричук В.П. Методика обработки осадочных пород, бедных органическими остатками, для целей пылецевого анализа // Проблемы физической географии. 1940. Вып. 8. С. 53–58.
19. Куприянова Л.А., Алешина Л.А. Пыльца и споры растений флоры Европейской части СССР. Л.: Наука, 1972. 171 с.
20. Moore P.D., Webb J.A., Collinson M.E. Pollen analysis. 2nd edition. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1991. 216 p.
8. Zemlyakov B.F. Arctic palaeolit at the North of USSR. *Sovetskaya Arkheologiya*. Soviet Archeology. 1940, 5: 107–143. [In Russian].
9. Gurina N.N. New research in North-West part of Kola Peninsula. KSIА. Moscow: Nauka. 1971, 126: 94–99. [In Russian].
10. Gurina N.N. The report of Kola archaeological expedition in 1972. Scientific archive IIMKRAN. *Nauchnyi arkhiv IIMK RAN. F. 35. Op. 1. D. 52: 22.* [In Russian].
11. Shumkin V.Ya. The report of Severomorskiy department of Zapolyarnaya expedition LOIA AN USSR in 1986. Scientific archive IIMKRAN. *Nauchnyi arkhiv IIMK RAN. F. 35. Op. 1. D. 52: 22..* [In Russian].
12. Shumkin V.Ya. The rock art, labyrinths, seids and beliefs of Eastern Lapland's ancient population. Myanndash – Rock art in the Ancient Arctic. Rovaniemi: Arctic Centre Foundation, 1999: 202–241.
13. Shumkin V.Ya., Kolpakov E.M. The report of Kola archaeological expedition of IIMK RAN for works in Olenegorsk and Pechenga regions in 2012. Scientific archive IIMKRAN. *Nauchnyi arkhiv IIMK RAN. F. 35. Op. 1: 108.* [In Russian]
14. Simonsen P. Varanger-Funnene II. Fund og udgravninger på fjordens sydkyst. Tromsø Museum Skrifter. 1961, 7, 2: 524 p.
15. Olsen B. Bosetning ogsamfunni Finnmarks forhistorie. Stockholm: Universitets forlaget, 1994: 198 p.
16. Atlas Murmanskoi oblasti. Atlas of Murman Region. Moscow: Central department of Geodesy and Cartography in minister council of USSR, 1971: 33 p. [In Russian].
17. Kremenetski C., Vashchalova T., Goriachkin S., Cherkinsky A., Sulerzhitsky L. Holocene pollen stratigraphy and bog development in the western part of the Kola Peninsula, Russia. Boreas. 1997, 26: 91–102.
18. Grichuk V. Work out methods of sedimentary rocks, poor with organic, for pollen analysis. *Problemy fizicheskoy geografii*. Problems of physical geography. 1940, 8: 53–58. [In Russian].
19. Kupriyanova L. A., Aleshina L. A. Spores and pollen of European USSR flora. Leningrad: Nauka, 1972: 171 p. [In Russian].
20. Moore P.D., Webb J.A., Collinson M.E. Pollen analysis. 2nd edition. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1991: 216 p.

21. Кулькова М.А. Методы прикладных палеоландшафтных геохимических исследований: Учебное пособие для геоэкологических, геохимических специальностей вузов. СПб.: Изд-во РГПУ им. А.И. Герцена, 2012. 120 с.
22. Nesbitt H.W., Young G.M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major elements chemistry of lutites // *Nature*. 2012. V. 299. P. 715–717.
23. Chen J., An Zh., Head J. Variation of Rb/Sr Ratios in the Loess-Paleosol Sequences of Central China during the Last 130,000 Years and Their Implications for Monsoon Paleoclimatology // *Quaternary Research*. 1999. V. 51. P. 215–219.
24. Bronk Ramsey C., Lee S. Recent and Planned Developments of the Program OxCal // *Radiocarbon*. 2013. V. 55. № 2–3. P. 720–730.
25. Sapelko T., Nosevich E. Holocene palaeoenvironmental changes on the North Kola Peninsula: formation of modern landscapes // *Abstracts of Past Gateways. First International conference and workshop*. St. Petersburg. May 13–17. 2013. St. Petersburg, 2013. P. 66. URL: <http://www.geol.lu.se/pastgateways/docs/PastGateways2013-abstracts.pdf> (дата обращения 02.02.2016).
26. Носевич Е., Сапелко Т. Формирование субрецентных палиноспектров поверхностных проб на полуостровах Среднем и Рыбачьем, Мурманская область // *Материалы к Международной палинологической школе конференции*. М.: ИГРАН, 2014. С. 55.
27. Евзеров В.Я., Мёллер Я.Й., Колька В.В., Корнер Д.Д. История дегляциации полуостровов Рыбачьего и Среднего (Кольский полуостров) в позднем плейстоцене // *Известия РАН. Серия географическая*. 2007. № 5. С. 58–63.
28. Hølskog K. The chronology of the Younger Stone Age in Varanger, North Norway // *Norwegian Archaeological Review*. 1980. № 13. P. 47–60.
29. Hood B.C., Helama S. Karlebotnbakken reloaded: shifting the chronological significance of an iconic late Stone age site in Varangerfjord, North Norway // *Fennoscandia archaeologica*. 2010. V. 27. P. 35–43.
30. Kleppe E. J. Archaeological material and ethnic identification. A study of lappish material from Varanger, Norway // *Norwegian archaeological review*. 1977. V. 10. № 1–2. P. 32–46.
21. Kulkova M.A. *Metody prikladnykh paleo-landshaftnykh geokhimicheskikh issledovaniy: Uchebnoe posobie dlia geoekologicheskikh, geokhimicheskikh spetsial'nostei vuzov*. Methods of palaeolandscapes geochemical research: workbook for geoecological, geochemical specialisations. SPb, Izdatelstvo RGPU im. A. I. Gerzena. St. Petersburg: Gerzen University print, 2012: 120 p. [In Russian].
22. Nesbitt H.W., Young G.M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major elements chemistry of lutites. *Nature*. 2012, 299: 715–717.
23. Chen J., An Zh., Head J. Variation of Rb/Sr Ratios in the Loess-Paleosol Sequences of Central China during the Last 130,000 Years and Their Implications for Monsoon Paleoclimatology. *Quaternary Research*. 1999, 51: 215–219.
24. Bronk Ramsey C., Lee S. Recent and Planned Developments of the Program OxCal. *Radiocarbon*. 2013, 55, 2–3: 720–730.
25. Sapelko T., Nosevich E. Holocene palaeoenvironmental changes on the North Kola Peninsula: formation of modern landscapes. *Abstracts of Past Gateways. First International conference and workshop*. St. Petersburg. May 13–17. 2013. St. Petersburg, 2013: 66. Available at: <http://www.geol.lu.se/pastgateways/docs/PastGateways2013-abstracts.pdf> (accessed 02.02.2016).
26. Nosevich E., Sapelko T. *Formirovanie subrecentnykh palinospektrov poverkhnostnykh prob na poluostrovakh Srednem i Rybach'em, Murmanskaya oblast'*. *Materialy k mezhdunarodnoy palinologicheskoy shkole-konferencii*. Surface pollen spectra formation at Sredniy and Rybachiyy peninsulas, Murman region. Materials for international palynological summer school and conference. Moscow: IG RAS, 2014: 55. [In Russian].
27. Yevzerov V. Ya., Moller J.J., Kolka V.V., Corner D.D. Deglaciation history of Rybachiyy and Sredniy peninsulas (Kola peninsula) in Late Pleistocene. *Izvestiya RAN. Seriya geographicheskaya*. RAS news. Geography. 2007. 5: 58–63 [In Russian].
28. Hølskog K. The chronology of the Younger Stone Age in Varanger, North Norway. *Norwegian Archaeological Review*, 1980, 13: 47–60.
29. Hood B.C., Helama S. Karlebotnbakken reloaded: shifting the chronological significance of an iconic late Stone Age site in Varangerfjord, North Norway. *Fennoscandia archaeologica*. 2010, 27: 35–43.

31. Andersen B.G. Glacial geology of western troms, north Norway // Norges geologiske Undersökelse. 1968. V. 256. P. 1–160.
32. Corner G.D., Kolka V.V., Yevzerov V.A., Møller J.J. Postglacial relative sea-level change and stratigraphy of raised coastal basins on Kola Peninsula, northwest Russia // Global and Planetary Change. 2001. V. 31. № 1–4. P. 155–177.
33. Corner G.D., Yevzerov V.Y., Kolka V.V., Møller J.J. Isolation basin stratigraphy and Holocene relative sea-level change at the Norwegian–Russian border north of Nikel, northwest Russia // Boreas. 1999. V. 28. P. 146–166.
34. Møller J.J., Yevzerov V.Ya., Kolka V.V., Corner G.D. Holocene raised-beach ridges and sea-ice-pushed boulders on the Kola Peninsula, northwest Russia: indicators of climatic change // The Holocene. 2002. V. 12 (2). P. 169–176.
35. Арсланов Х.А., Кошечкин Б.И., Чернов Б.С. Абсолютная хронология осадков поздне- и послеледниковых морских бассейнов на Кольском п-ове // Вестник Ленинградского ун-та. 1974. № 12. С. 132–138.
36. Кошечкин Б.И. Перемещение береговой линии Баренцова и Белого морей в поздне-послеледниковое время // Известия Академии наук СССР. Серия географическая. 1975. № 4. С. 91–100.
30. Kleppe E. J. Archaeological material and ethnic identification. A study of lappish material from Varanger, Norway. Norwegian archaeological review. 1977, 10, 1–2: 32–46.
31. Andersen B.G. Glacial geology of western troms, north Norway. Norges geologiske Undersökelse. 1968, 256: 1–160.
32. Corner G.D., Kolka V.V., Yevzerov V.A., Møller J.J. Postglacial relative sea-level change and stratigraphy of raised coastal basins on Kola Peninsula, northwest Russia. Global and Planetary Change. 2001, 31, 1–4: 155–177.
33. Corner G.D., Yevzerov V.Y., Kolka V.V., Møller J.J. Isolation basin stratigraphy and Holocene relative sea-level change at the Norwegian–Russian border north of Nikel, northwest Russia. Boreas. 1999, 28: 146–166.
34. Møller J.J., Yevzerov V.Ya., Kolka V.V. and Corner G.D. Holocene raised-beach ridges and sea-ice-pushed boulders on the Kola Peninsula, northwest Russia: indicators of climatic change. The Holocene. 2002, 12, 2: 169–176.
35. Arslanov Kh. A., Koshechkin B.I., Chernox B.S. Absolut chronology of Late and Post Glacial marine basins deposits at Kola peninsula. Vestnik leningradskogo universiteta. Saint Petersburg state university news. 1974, 2: 132–138. [In Russian].
36. Koshechkin B.I. Barents Sea and White sea coastlines movements in Late and Postglacial time. Izvestiya RAN. Seriya geographicheskaya. RAS news, Geography. 1975, 4: 91–100. [In Russian].

ЛЕДОТЕХНИКА

УДК [629.7.07+624.14+621.585+551.467] (98) DOI: 10.30758/0555-2648-2018-64-4-407-426

ЛЕДОТЕХНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СОЗДАНИЯ ОБЪЕКТОВ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ И РАЗВЕДОЧНОГО БУРЕНИЯ В АРКТИКЕ

Н.В. КУБЫШКИН¹*, И.В. БУЗИН², Н.В. ГОЛОВИН², Ю.П. ГУДОШНИКОВ²,
Г.А. ЗАМАРИН², А.А. СКУТИН²

¹ — ООО «Арктик Шельф Консалтинг», Санкт-Петербург, Россия

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

*kuba@arctic-shelf.com

ASPECTS OF ICE ENGINEERING FOR THE AIMS OF CONSTRUCTION OF THE TRANSPORT INFRASTRUCTURE AND RECONNAISSANCE DRILLING IN THE ARCTIC

N.V. KUBYSHKIN¹*, I.V. BUZIN², N.V. GOLOVIN², YU.P. GUDOSHNIKOV²,
G.A. ZAMARIN², A.A. SKUTIN²

¹ — Arctic Shelf Consulting LLC, St. Petersburg, Russia

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

*kuba@arctic-shelf.com

Received November, 2, 2018

Accepted December, 3, 2018

Keywords: artificial ice islands, drifting ice, fast ice, ice berths, ice landing strips, ice roads, ice technology.

Summary

Starting from the mid 2000-s the increase of sustained development of the Russian Arctic is observed, in many cases the technologies using the ice cover as an infrastructure element and the ice as the construction materials are used. In the present time the different approaches of use of natural and artificial ice for applied tasks on the Arctic offshore exist. For example, the clearance of the upper surface of ice from snow and ridges is used for the purposes of the vessel unloading on the fast ice or constructing the airstrips on the drifting ice cover. In case of insufficient thickness of the level ice

Citation: Kubyshkin N.V., Buzin I.V., Golovin N.V., Gudoshnikov Yu.P., Zamarin G.A., Skutin A.A. Aspects of ice engineering for the aims of construction of the transport infrastructure and reconnaissance drilling in the Arctic. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2018, 64, 4: 407–426. [In Russian]. doi: 10.30758/0555-2648-2018-64-4-407-426

the latter is increased by the means of preliminary freezing (natural on the bottom side of ice and artificial by pouring the fresh or saline water on the upper surface). By constructing the artificial ice islands the ice body is made by spraying the sea water with the partial freezing of the water drops in the air and further freezing of the 2-phase elements (i.e. ice crystals in the liquid film) on the surface of the ice cover. The problem of cracks in the ice cover is solved by different means according to the proper task. When it is possible, the cracks are “healed”— i.e. are filled with the snow and ice gravel and then freeze. In case of impossibility of use of such method (for example — presence of tidal cracks or relatively high air temperature) the cracks are overlapped with the help of different covers made of different materials and of different sizes. The promising trend of ice technology is involving the reinforced or composite ice, having the increased strength, into the ice engineering practice. By unloading the cargo ships on the fast ice the ice strength is decreased locally for the purpose of easy berthing of the vessel with safekeeping the original strength of the surrounding ice for the aims of the vessel unloading. This problem is solved by creating the system of notches in the ice cover according to the vessel dimensions. The specialized hydrometeorological support on every stage of the ice engineering operation is an essential element of the ice engineering activities on the ice cover of lakes, rivers and seas.

Поступила 2 ноября 2018 г.

Принята к печати 3 декабря 2018 г.

Ключевые слова: дрейфующий лед, искусственные ледяные острова, ледовые аэродромы, ледовые дороги, ледовые причалы, ледотехника, припай.

Рассматриваются направления ледотехники, связанные с использованием ледяного покрова природных водоемов как несущей площадки для создания транспортной инфраструктуры (ледовые причалы, аэродромы, искусственные ледяные острова и т.п.). Обсуждаются общие вопросы организации и проведения инженерно-технических работ на льду и некоторые частные проблемы, связанные с решением отдельных конкретных задач. Особое внимание уделено специальному гидрометеорологическому обеспечению операций как неотъемлемой части ледотехнических работ.

ВВЕДЕНИЕ

Использование ледяного покрова водоемов в практических целях имеет многовековую историю. На Севере и в Сибири по льду форсируют водные преграды, прокладывая в холодный период автозимники. Самые яркие исторические примеры ледовых переправ — железнодорожная переправа по байкальскому льду в начале прошлого века и легендарная «Дорога жизни» по льду Ладожского озера в период ленинградской блокады. В Арктике в XX в. морской лед начали использовать для разгрузки судов на необорудованный берег, а также для создания взлетно-посадочных полос для авиации. Ледяной покров, традиционно рассматривавшийся как препятствие для морского транспорта, в суровых арктических условиях оказался хорошим подспорьем для приема грузов в труднодоступных прибрежных районах.

Разгрузка морских судов через припай оказалась значительно эффективнее рейдовых грузовых операций безледного периода, а при хорошем уровне предварительной подготовки припайного льда сроки обработки грузов соответствуют нормам оборудованных портов. Выгрузка на припайный лед представляет собой по сути зимний вариант рейдовой выгрузки на необорудованный берег, если она не связана со строительством ледового причала как гидротехнического сооружения. Единичные морские перевозки грузов с разгрузкой на припай начали осуществляться с 1962 г. (Новая Земля). После этого география подобных операций в Арктике постоянно расширялась (Новая Земля, Земля Франца-Иосифа, архипелаг Седова,

Печорская губа, о. Белый, Амдерминское побережье и др.). Наиболее широко практика выгрузок на припай применялась при проведении так называемых «Ямальных операций» (с 1976 г. до середины 90-х гг.). Зимне-весенний завоз грузов в район мыса Харасавэй (западный берег полуострова Ямал) принял в этот период регулярный характер [1]. Харасавэй как место регулярных выгрузок на припай отмечен в Лоции западной части Карского моря [2]. Советский опыт проведения операций с разгрузкой судов через припайный лед обобщен в Методических рекомендациях [3].

С 30-х гг. прошлого века существует практика использования морского льда в качестве площадок для временного базирования (вынужденный лагерь «челюскинцев», отечественные и зарубежные научные дрейфующие станции, современные туристические базы). Функционирование таких баз сопровождается обустройством полос и площадок для посадки самолетов и вертолетов.

Использование льда в качестве строительного материала позволяет находить интересные технические решения ряда проблем в хозяйственном направлении. Искусственное намораживание льда поверх естественного ледяного покрова позволяет увеличить его несущую способность до требуемых значений при перемещении тяжелых грузов. Известны примеры строительства ледовых гидротехнических сооружений. В частности, обозначение ледового причала на Мысе Шмидта можно и сейчас найти на навигационной карте. Ежегодно возводится знаменитая ледовая дамба в Хатанге для защиты судов от весеннего ледохода. Искусственные ледяные острова оказались хорошей альтернативой буровым платформам при разведочном бурении шельфовых месторождений углеводородов.

Независимо от решаемой общей задачи (создание ледовой базы, обустройство переправы, сооружение ледяного гидротехнического объекта и т.п.), организаторы ледотехнических работ осуществляют примерно сходный по общему составу комплекс мероприятий, а именно:

- сбор и анализ предварительной информации по метеорологическому, гидрологическому, ледовому режиму района, гидрографическим особенностям; сюда же можно отнести выбор конкретного участка планируемых работ (или ледяного поля в случае работ на дрейфующем льду) по данным ИСЗ, ледовых разведок или наземной рекогносцировки;
- инженерно-технические работы на льду;
- специальное гидрометеорологическое обеспечение операции.

Перечисленные мероприятия различаются наполнением и подходами в зависимости от общей задачи.

РАЗГРУЗКА СУДОВ НА НЕОБОРУДОВАННЫЙ ПРИПАЙ

Под разгрузкой судов на необорудованный припай подразумевается комплекс грузовых и транспортных операций, выполняемый в ходе рейдовой выгрузки морских судов в ледовый сезон с перевалкой грузов через лед берегового припая [4]. При этом обходятся без строительства каких-либо гидротехнических сооружений (в том числе временных), а инженерно-технические мероприятия (расчистка снега и торосов по маршрутам транспортировки грузов по льду, намораживание искусственного льда и пр.) являются частью транспортной операции.

При разгрузке морских судов через береговой припай должны быть обеспечены следующие условия [3, 5]:

1) толщина льда должна обеспечивать возможность транспортировки завозимых грузов;

2) сроки грузовой операции должны укладываться во временной период, начинающийся с достижением льда требуемой толщины и заканчивающийся развитием разрушенности льда до значения 2 балла;

3) ширина припая требуемой толщины должна достигать навигационных глубин (при этом следует учитывать, что ледокол, как правило, имеет осадку большую, чем грузовые суда, а для атомных ледоколов должен быть выдержан дополнительный запас глубины, необходимый для обеспечения работы атомной энергетической установки);

4) в соответствии с Методическими рекомендациями [3] определяется тип припая; рассмотрены 5 типов, каждый из которых характеризуется своей степенью устойчивости в зависимости от физико-географических условий (течения, волнение моря, глубина, открытость или защищенность акватории, наличие островов и т.д.).

При небольших объемах грузов, малой протяженности плеча их транспортировки от борта судна до береговой линии и незначительной торосистости возможно проведение грузовой операции без предварительной подготовки: судно подводится ледоколом максимально близко к берегу, прибывшие с судном гидрологи оперативно выполняют промеры и обследование льда, после чего грузы опускаются на лед и с помощью гусеничной техники (транспортеров, тракторов с саними) доставляются на берег. Обычно такие операции проводятся в период наибольшей толщины и грузоподъемности льда.

Если объемы грузов, перевозимых в ходе ледовой навигации, достигают десятков и даже сотен тысяч фрахтовых единиц, необходимо обеспечить одновременную или последовательную разгрузку нескольких судов. Это требует увеличения общей продолжительности грузовой операции. Поскольку вслед за периодом максимальной толщины льда начинается его ослабление и таяние, увеличение продолжительности происходит за счет более раннего начала работ,



Рис. 1. Разгрузка т/х «Виктор Ткачев» на припай о. Земля Александры в 2015 г.

Fig. 1. Deployment of the vessel “Viktor Tkachev” on the fast ice near Alexandra Land isle, 2015



Рис. 2. География морских грузовых операций с использованием припая в Российской Арктике в XXI в.

Fig. 2. Location of marine operations with deployment on the fast ice in Russian Arctic in XXI century

когда ледяной покров не достиг своего максимального развития. Недостаток толщины льда компенсируется большей прочностью зимнего льда по сравнению с весенним, но лишь частично, поскольку именно толщина является основным определяющим параметром несущей способности ледяного покрова. В этом случае становится актуальным вопрос искусственного усиления природного льда, которое может достигаться разными способами (подробнее этот вопрос будет рассмотрен ниже). Ледовая навигация с большим объемом грузоперевозок и большим количеством судов требует тщательного предварительного планирования и подготовки снежно-ледяной поверхности. Еще в 70-х гг. прошлого века объем ежегодных грузоперевозок к западному побережью п-ова Ямал, выполняемых в течение ледовой навигации, превышал 100 тыс. т. Максимальное количество судов, разгруженных в одном пункте в ходе одной ледовой навигации, составило 13 единиц (март–июнь 2015 г., о. Земля Александры архипелага Земля Франца-Иосифа, рис. 1). Современный охват арктического побережья России морскими операциями с разгрузкой судов на припай показан на рис. 2. На рисунке цифрами обозначены: 1 — Варандей (2002); 2 — о. Земля Александры (2006, 2007, 2015–2018); 3 — о. Грэм-Белл (2014, 2017); 4 — Харасавэй (2007–2009); 5 — Сабетта (2011–2015); 6 — Мыс Каменный (2015–2018); 7 — Салмановское (Утреннее) месторождение (2017, 2018); 8 — Таналау (2018); 9 — о. Голомянный (2015, 2016); 10 — о. Большевик (2011–2014); 11 — о. Котельный (2014–2016); 12 — о. Врангеля (2015); 13 — Мыс Шмидта (2015). В скобках приведены года проведения морских операций.

ЛЕДОВЫЕ АЭРОДРОМЫ

Использование ледяного покрова для посадок воздушных судов позволяет обеспечивать долговременное функционирование баз в Центральном бассейне Северного Ледовитого океана (СЛО). Большинство таких баз работало по научным или военным программам. В последние годы с сокращением площади ледяного покрова СЛО и общим уменьшением толщин льда в Арктике базирование научных групп на дрейфующих льдах практически прекращено. Накопленный опыт применяется в организации и обеспечении единственной в настоящее время сезонной туристической дрейфующей станции Барнео, ежегодно разворачиваемой в приполюсном районе. Ледовый аэродром станции обеспечивает прием самолетов с туристическими группами и снабжением, а также вертолетные экскурсии к географической точке Северного полюса. Однако не исключено, что в будущем, с наступлением очередной фазы похолодания или по другим причинам, роль

аэродромов на ледяном покрове вновь возрастет, что требует сохранения практических навыков обустройства посадочных полос на льду и развития новых технологий в данном направлении.

При организации взлетно-посадочных полос (ВПП) на морском льду установлены следующие требования:

- 1) толщина льда должна обеспечивать возможность посадки и стоянки воздушного судна (с учетом снижения прочности льда в летний период);
- 2) размеры ледяного поля и состояние его поверхности должны обеспечивать возможность подготовки полосы длиной, достаточной для данного типа самолета;
- 3) необходимо учитывать фактор живучести ВПП, который различается в разных арктических районах для различных форм дрейфующего льда.

Существующие инструкции позволяют выбирать места и осуществлять посадку некоторых типов самолетов на ледяные поля без их предварительной подготовки. В частности, таким образом работали авиационные «прыгающие» экспедиции, собравшие большие объемы данных по характеристикам дрейфующего льда и гидрологии арктических морей. В отличие от посадок небольших научных групп, транспортные и пассажирские рейсы самолетов на дрейфующие базы требуют тщательной подготовки, обработки и содержания ледовых ВПП.

ЛЕДЯНЫЕ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ

Строительство ледяных гидротехнических сооружений (ледовых причалов, искусственных ледяных островов) требует разработки проектной документации и проведения инженерных изысканий. Состав изысканий определяется соответствующими нормативными документами [6–8]. Для ледяных гидротехнических сооружений должны быть рассчитаны все виды нагрузок, а для сооружений гравитационного типа также важна информация по донным грунтам для определения сцепления с грунтом. За редким исключением, ледяные гидротехнические сооружения устраиваются в зоне припайных льдов. Для искусственных ледяных сооружений можно определить следующий состав критериев:

- 1) продолжительность ледового сезона должна быть не менее 7 месяцев [6], либо сумма градусодней мороза должна быть более 2000 градусо^в×суток;
- 2) сооружения гравитационного типа лимитируются глубинами; СП 58.13330.2012 [6] ограничивает зону строительства сооружений глубиной 7 м, руководство [8] — глубиной 12 м; плавучие искусственные ледяные острова глубинами не лимитированы.

Наиболее перспективным направлением ледяного гидротехнического строительства в наше время является строительство искусственных ледяных островов на арктическом шельфе. Ледяные острова являются дешевой альтернативой плавучим буровым платформам при выполнении разведочного бурения в районах с продолжительным существованием ледяного покрова. Начиная с 70-х гг. XX в., на арктическом побережье Аляски и в Канадской Арктике было реализовано и реализуется в настоящее время большое количество проектов по созданию искусственных ледяных островов, совершенствуются технологии намораживания больших объемов льда за относительно короткое время [9]. Аналогичные наработки существуют и в нашей стране, однако их практическое воплощение пока ожидает своего часа. Ниже будут рассмотрены основные подходы, применяемые при создании искусственных ледяных объектов в Арктике.

ПОДГОТОВКА И ПЛАНИРОВАНИЕ ЛЕДОТЕХНИЧЕСКИХ РАБОТ

Предварительная информация по природным условиям района проведения операции, связанной с ледотехническими работами, должна обеспечить необходимыми данными все этапы подготовительного планирования работ. В общем виде для всех типов операций по предварительным данным определяются либо уточняются:

- предельные и оптимальные сроки проведения операции;
- природно-климатические условия выполнения работ;
- места базирования и их обустройство;
- тип и особенности конструкции временных объектов, состав ледотехнических работ, необходимость искусственного усиления природного льда и его защиты от таяния;
- перечень материальных и технических ресурсов, количество и квалификация задействуемых работников;
- логистические вопросы;
- природоохранные вопросы;
- необходимость получения разрешений, согласований на проведение работ.

Предварительная информация по районам планируемых работ, связанных с использованием природных льдов, собирается из всех доступных источников. Для прибрежных работ используются архивы наблюдений ближайших полярных гидрометеорологических станций и гидрологических постов (толщины льда в течение ледового сезона, сроки основных ледовых фаз, гидрологический режим, метеосостояния). Сведения по глубинам и береговой линии берутся с навигационных и топографических карт, лоций. Для удаленных от берега открытых акваторий необходимая информация может быть почерпнута из архивов данных морских экспедиций, ледовых авиаразведок, ледовых карт и спутниковых снимков, а также литературных источников (атласов, монографий, статей).

К этапу сбора предварительной информации можно отнести и мониторинг метеорологических и ледовых условий по району планируемой операции, который начинается заблаговременно с наступлением ледового сезона. В течение десятилетий основным способом получения оперативной информации по ледовой обстановке обширных пространственных акваторий служили авиационные ледовые разведки. В настоящее время регулярные ледовые авиаразведки сменил спутниковый мониторинг земной поверхности. Спутниковые снимки различного пространственного разрешения и волновых диапазонов позволяют отслеживать развитие ледовых процессов и с их учетом корректировать планы по мобилизации и началу полевых работ. Спутниковые снимки среднего и низкого разрешения дают информацию по развитию ледовых условий в районе планируемых работ. Снимки высокого разрешения позволяют с высокой степенью детализации оценить ледовую обстановку непосредственно в месте проведения работ, выделить зоны ровного и торосистого льда, определить положение торосистых гряд и барьеров, что дает возможность предварительно наметить участки, площадки и маршруты непосредственно для проведения ледотехнических работ. Снимки радиолокационного диапазона, не зависящие от облачности, позволяют получить необходимую информацию в любой требуемый момент времени.

Составление долгосрочного прогноза развития ледовых процессов в районе планируемой операции производится на основе существующей информации по ледовому режиму района, данным ближайших гидрометеорологических

станций и спутниковых наблюдений. Долгосрочный прогноз используется при предварительном планировании навигации, определении ее оптимальных сроков. Как правило, предварительный прогноз составляется в декабре–январе. В последующие месяцы по необходимости выпускаются уточненные прогнозы.

СПЕЦИАЛЬНОЕ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЛЕДОТЕХНИЧЕСКИХ РАБОТ

Ледотехнические операции на ледяном покрове природных водоемов должны сопровождаться специальными гидрометеорологическими наблюдениями, предваряющими любые технические работы на льду и продолжающимися до их полного завершения. Успешность и безопасность любого проекта на ледяном покрове природных водоемов во многом зависит от качества и уровня гидрометеорологического обеспечения. Специальное гидрометеорологическое обеспечение осуществляется ледовыми специалистами (гидрологами) и прогнозистами оперативных штабов или прогнозистических центров.

Часть мероприятий, составляющих гидрометобеспечение, уже описана выше: мониторинг метеорологических и ледовых условий, анализ спутниковых снимков, составление долгосрочных прогнозов. Ниже приводятся основные задачи специального гидрометобеспечения, выполняемые в составе ледотехнических работ, в том числе непосредственно на месте проведения операции.

Ледовая разведка выполняется силами научно-оперативной группы сразу после прибытия ее в район операции. В зависимости от сложности ледовой обстановки разведка выполняется с использованием вертолета либо в ходе рекогносцировочного объезда на снегоходах. В ходе разведки картируется ледовая обстановка, выбираются участки льда, пригодные для организации рабочих ледовых площадок, предварительно намечаются маршруты ледовых дорог. По результатам ледовой разведки дается заключение о принципиальной возможности проведения операции, местах расположения объектов ледовой инфраструктуры и т.п.

Промеры толщины льда на площадках и по маршрутам дорог с необходимой дискретностью позволяют получить исходную информацию для расчета грузоподъемности льда. По результатам промеров научно-оперативная группа готовит рекомендации и инструкции для береговой механизации по инженерной подготовке и оборудованию ледовых дорог и грузовых площадок.

Для определения грузоподъемности ледяного покрова существует большое количество расчетных методик. В наиболее общем виде грузоподъемность льда определяется через его толщину:

$$P = Ah^2, \quad (1)$$

где P — грузоподъемность льда; h — толщина льда; A — коэффициент, зависящий от физико-механических характеристик льда, условий нагружения и др.

В РД 31.31.52-89 [8], РД 31.41.21-90 [10], а также других инструкциях, посвященных разгрузкам судов через припай [3, 11], для расчета грузоподъемности льда предлагается известная формула Казанского–Шульмана:

$$P = (B/N)h^2KS, \quad (2)$$

где P выражается в т, h — в м; B — коэффициент, равный 100 для колесных грузов, 125 — для гусеничных грузов массой до 18 т, 115 — для гусеничных грузов массой больше 18 т;

N — коэффициент запаса прочности и учета трещин (при $N = 1$ получаем предельную грузоподъемность ровного ненарушенного льда без запаса прочности; при наличии сквозных трещин принимается $N = 2$);

K — температурный коэффициент $K = (100 + T)/100$, где T — средняя температура воздуха за прошедшие 3 суток, взятая со знаком плюс (при продолжительной положительной температуре воздуха $K = 1 - 0,05n$, где n — число суток с момента появления воды на льду);

S — коэффициент учета солёности ($S = 1$ соответствует пресному льду; $S = 0,7$ для устьевых участков рек в Арктике; $S = 0,3$ для свежееобразовавшегося морского льда).

Для ледовых аэродромов в наставлениях НАС ГА-86 [12] приводятся формулы для расчетной толщины льда h_p (см) для заданной массы воздушного судна G (т):

а) для пресноводного льда:

при средней температуре воздуха ниже -10°C : для воздушных судов на колесном шасси $h_p = 16G^{1/2}$, для воздушных судов на лыжном шасси $h_p = 12G^{1/2}$;

при средней температуре воздуха от -10°C до 0°C : для воздушных судов на колесном шасси $h_p = 22G^{1/2}$, для воздушных судов на лыжном шасси $h_p = 17G^{1/2}$;

б) для морского льда:

$$h_p = K(20G^{1/2} - 0,25G),$$

где K — коэффициент, учитывающий период года и возраст льда (для зимы $K = 1$, для лета и многолетнего льда $K = 1$, для лета и однолетнего льда $K = 2$).

Легко заметить, что все приведенные выше расчетные формулы являются различными модификациями выражения (1), преобразованного в соответствии со спецификой каждого вида работ. Для ледовых переправ через пресноводные водоемы в дорожных нормах ОДН 218.010-98 [13] предлагается следующий вариант зависимости (1):

$$h_p = 11n_u P^{1/2}, \quad (3)$$

где n_u — коэффициент интенсивности движения ($n_u = 1$ при интенсивности менее 500 автомобилей/сут., $n_u = 1,1$ от 500 до 2000 авт./сут., $n_u = 1,25$ при интенсивности движения более 2000 автомобилей/сут.).

Расчет грузоподъемности льда заданной толщины (или обратная задача — определение требуемой толщины льда для заданной грузоподъемности) имеет первостепенное значение для принятия решения о выходе техники и людей на лед. Попутно рассчитываются время безопасной стоянки грузов на льду, безопасные скорость и интервал движения по льду, увеличение грузоподъемности льда за счет распределения грузов по большей площади. Расчетные формулы для этих параметров приведены во многих источниках [3, 8, 10, 11].

Постоянная работа людей и техники на льду требует постоянного обеспечения краткосрочными метеопрогнозами. Отличие специальных метеопрогнозов от обычных прогнозов для населения заключается в строго оговоренных наборе прогнозируемых элементов и детализации по времени. Для повышения качества и оправдываемости прогнозов силами научно-оперативной группы выполняется комплекс стандартных метеонаблюдений, результаты которых оперативно передаются в прогностический центр.

В период эксплуатации ледовых площадок и дорог гидрологи научно-оперативной группы осуществляют повторные промеры толщины льда, отбирают

керы для определения строения льда, выполняют мониторинг состояния ледяного покрова, обследуют и контролируют трещины.

Рекомендуется в ходе полевых работ периодически определять комплекс физико-механических свойств льда (температура, соленость, плотность льда, предел прочности при изгибе). В приливных морях следует рассчитывать величину приливов, в первую очередь для установления периодов сизигийных (максимальных по амплитуде) приливов, во время которых «оживляются» и расширяются приливные трещины. Для контроля непериодических колебаний уровня (сгонно-нагонные колебания, сейши) проводятся инструментальные наблюдения.

Обеспечение безопасности работ на льду основывается на данных мониторинга состояния ледяного покрова, который является частью специального гидрометобеспечения. В современной ледотехнической практике мониторинг состояния ледяного покрова реализуется преимущественно по общим характеристикам льда в контрольных точках (толщина льда, строение льда, температура льда, прочность льда при изгибе). В отдельных случаях осуществляются наблюдения за деформациями льда: геодезическими методами измеряется прогиб льда в точке, выбранной на нагружаемой площадке. Недостатком такого подхода является отсутствие контроля за развитием пластических деформаций льда за пределами выбранных контрольных участков. Хорошо известно, что именно пластичность льда является основной причиной неконтролируемого снижения его несущей способности. В практике ледотехнических работ этот недостаток частично устраняется соблюдением большого запаса прочности при расчете рабочих значений грузоподъемности льда. Однако в последнее время перед гидрологами все чаще ставится задача транспортировки по льду тяжелых грузов на пределе грузоподъемности ледовых дорог. Качественный промер толщины льда и расчет предельной грузоподъемности позволяют выполнять такие операции без эксцессов, но определение состояния ледовых дорог после предельного нагружения в целях их дальнейшей эксплуатации возможно только визуальным осмотром состояния ледяной поверхности опытным гидрологом, т.е. на уровне экспертной оценки.

Объективный мониторинг ледовых деформаций требует разработки и внедрения систем инструментальных наблюдений на всем протяжении ледовых дорог. Такие наблюдения могут быть выполнены с помощью сейсмодатчиков или преобразователей на основе оптоволокну. В 2019 г. планируется проведение серии экспериментов с оптоволоконными измерителями деформации льда с контрольной регистрацией прогиба льда геодезическим методом и попутными определениями физико-механических характеристик льда в условиях реальной грузовой операции в одном из пунктов арктического побережья.

ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ РАБОТЫ НА ЛЬДУ

Опыт работ коллектива авторов по обеспечению выгрузки судов на лед показывает, что в течение последнего десятилетия с расширением этого направления имеет место тенденция снижения компетенции подразделений береговой механизации грузополучателей в части выполнения инженерно-технических работ на льду (особенно на морском). Все чаще к таким работам приходится подключаться гидрологам, которые по роду своей деятельности обладают наиболее полным представлением о возможностях нагружения льда в процессе работ и ограничениях, связанных с безопасностью на льду. Береговая механизация при этом ограничивается

предоставлением техники в распоряжение гидрологов. Объективно эта тенденция обусловлена разрушением структуры заказа, организации и распределения работ по морским припайным операциям между ведомствами, существовавшей в СССР (ее описание можно найти в Методических рекомендациях [3]) и естественным уходом руководителей механизации, имевших опыт работ того времени. В текущих условиях гидрологам необходимо иметь представление об особенностях выполнения инженерно-технических мероприятий в составе ледотехнических работ.

Не вдаваясь в детали предварительного планирования или проектирования для различных задач, обозначим общие подходы к выполнению инженерно-технических работ и методы их реализации. Общая схема организации и проведения инженерно-технических работ на ледяном покрове природных водоемов предусматривает следующие мероприятия:

- подготовка снежно-ледяной поверхности;
- укрепление или наращивание льда;
- поддержание и обслуживание ледяных объектов и инфраструктуры.

Подготовка снежно-ледяной поверхности осуществляется путем полной расчистки льда от снега и торосов либо уплотнением снежного покрова. Выбор способа обработки снежно-ледяной поверхности определяется мероприятиями последующего усиления льда и условиями эксплуатации ледяного объекта.

Полная расчистка льда от снега и торосов необходима в тех случаях, когда по льду предполагается движение колесного транспорта. Также полная расчистка требуется при искусственном намораживании льда сверху. Опыт эксплуатации ледовых дорог показывает, что пренебрежение требованием полной расчистки льда может привести к застреванию техники и сбою всей операции, что является критичным в условиях ограниченной несущей способности ледяного покрова.

Размеры расчищаемых участков зависят от решаемой задачи. Площадная расчистка применяется для постановки судов под разгрузку, а также для организации строительных площадок. Строительные площадки расчищаются под размер будущего сооружения плюс 5–10 м с каждой стороны [8]. Размеры площадок под постановку судов для разгрузки на лед должны обеспечивать возможность разгрузки каждого трюма, ширина площадки от борта судна до края площадки должна обеспечивать возможность свободного маневрирования транспорта в процессе подъезда под загрузку и отъезда груженой техники от борта. Длина расчищаемой площадки определяется на основании размеров судна, планируемого для постановки в припай. При разгрузке судна с обоих бортов необходимо предусмотреть расчищенный участок впереди по носу судна для подъезда-отъезда техники к каждому борту. Если планируется принимать на площадку более одного судна в течение ледовой навигации, следует предусмотреть возможность продвижения места стоянки каждого последующего судна вперед по площадке с учетом всех вышеперечисленных требований.

Размеры расчищаемых линейных объектов — ВПП и ледовых дорог — определяются на основании следующих положений. Ширина и длина ВПП должны быть не меньше значений, установленных для каждого типа воздушного судна, осуществляющего посадки на дрейфующие льды. Размеры полос определялись руководствами по эксплуатации аэродромов гражданской авиации. В разные годы это были Наставления по аэродромной службе в гражданской авиации СССР (последняя редакция — НАС ГА-86 [12]), затем сменившее их Руководство по эксплуатации

гражданских аэродромов РЭГА РФ-94 [14]. В настоящее время действующим документом являются Федеральные авиационные правила «Требования, предъявляемые к аэродромам, предназначенным для взлета, посадки, руления и стоянки гражданских воздушных судов» [15]. Примечательно, что с переходом от НАС ГА-86 к РЭГА РФ-94 и далее к Федеральным авиационным правилам подробность проработки требований и указаний к обустройству ледовых аэродромов снижается, а в современных правилах ледовые аэродромы не упоминаются вовсе. Если обратиться к инструкциям прошлых лет, можно встретить четкие указания по размерам ВПП, обустраиваемых на дрейфующих льдах для разных типов воздушных судов, включая вертолеты, а также с учетом использования колесного или лыжного шасси.

Размеры ледовых дорог определяются расстоянием между точками, которые эти дороги соединяют. Для ледовых переправ через реки такими точками являются выезды со льда на противоположные берега. Для ледовых дорог, обустраиваемых при разгрузке судов через припай, длина должна стремиться к значению кратчайшего расстояния между грузовой ледовой площадкой и берегом. При этом длина может увеличиваться при необходимости обходов сложных ледовых участков. Ширина ледовых дорог должна обеспечивать возможность проезда транспорта и разнесения полос встречного движения на расстояние не менее 100 м [10, 13]. Вопрос о том, следует ли расчищать одну широкую ледовую дорогу, на которой можно организовать разнесенное встречное движение, или обустраивать неширокие дороги с односторонним движением, решается ледотехниками в зависимости от имеющихся технических мощностей и сроков, в которые должна быть подготовлена дорога. Узкие дороги требуют меньшего количества техники и сроков расчистки, но сильнее заносятся снегом, что требует постоянных усилий по поддержанию их в расчищенном состоянии.

Первичная расчистка снежно-ледяной поверхности осуществляется гусеничными бульдозерами. На припайном льду эффективно работают средние бульдозеры массой 16–20 т. Они справляются с глубоким снегом и торосами, способны работать на морском льду толщиной от 70 см. На дрейфующих льдах используются легкие бульдозеры (ДТ-75 и аналогичные). При первичной расчистке важно, чтобы снимаемая с поверхности льда снежно-ледяная масса не накапливалась по краям расчищаемого участка, а распределялась как можно более равномерно в стороны от краев (колесная дорожно-строительная техника не способна обеспечивать такую расчистку). Перераспределение снега на ледяном покрове неизбежно вызывает его деформацию из-за нарушения гидростатического равновесия. На расчищенных участках уменьшается сила тяжести при прежней силе плавучести, в то время как пригруженные дополнительным снегом края участка притапливаются под его тяжестью. Это приводит к образованию трещин вдоль границ расчищенного льда. При равномерном распределении снятой снежно-ледяной массы эти трещины быстро «залечиваются» и не доставляют проблем при дальнейшей эксплуатации ледяного объекта. При нагромождении больших снежных отвалов лед под ними проседает настолько, что сквозь образовавшиеся трещины и проломы на поверхность выступает вода. Образуется снежно-водная каша, которая не вымерзает под большими навалами снега даже при сильных морозах. Приближение к таким притопленным границам расчищенного участка может привести к застреванию или даже провалу техники, а дальнейшая их бульдозерная обработка с целью исправления ситуации невозможна. Поэтому крайне важно грамотно спланировать и выполнить первичную расчистку, если ледовый объект предполагается эксплуатировать продолжительное время.

После бульдозерной обработки торосистых участков поверхность льда часто имеет мелкие неровности и осколки льда, каждый из которых может оказаться очагом образования снежного заструга или сугроба даже при слабой поземке. Для окончательной очистки и выравнивания поверхности по дороге прогоняют грейдер или любую другую машину с поворотным отвалом.

Для поддержания дорог и площадок в расчищенном состоянии наиболее эффективны шнекороторные агрегаты с регулируемым направлением выброса снега. Шнекороторная техника быстро очищает лед от снежных заносов, не формируя при этом снежных валов, а распределяя снег равномерно за пределами расчищенных участков. Обычно шнекоротор (при стандартной настройке оборудования) оставляет на льду тонкий слой снега (до 5 см). Такой снег рекомендуется укатывать буксируемой гладилкой (иначе — волокушей) для создания плотной поверхности, защищающей лед от механических воздействий и повышающей его отражательную способность. Чаще всего укатывание тонкого слоя снега используют при подготовке ВПП на дрейфующих льдах и при дорожных работах.

Важной составляющей ледотехнических работ является обработка трещин во льду. Трещины различного происхождения практически всегда присутствуют в ледяном покрове природных водоемов. На припае постоянно присутствуют вдольбереговые приливные трещины, разделяющие примерзшую к берегу часть припая и ту его часть, которая находится на плаву и совершает вертикальные перемещения при изменениях уровня водоема. При сильных перепадах температур образуются термические трещины. Трещины образуются при подвижках льда, под воздействием волн зыби. Разломы полей дрейфующего льда возможны при изменениях направления дрейфа из-за неравномерности скорости дрейфа. Трещины образуются при техногенном воздействии: от работы ледокола, при заколке судна, при частом и сильном нагружении льда и т.п.

Большие трещины шириной несколько метров могут привести к прекращению работ или существенному изменению схемы и графика всей операции. Сравнительно неширокие трещины заделываются или перекрываются настилами. Залечивание трещин в основном применяется на ледовых ВПП и на ледовых переправах общего пользования с высокой интенсивностью движения по причине строгих требований к ровности поверхности. На припайных ледовых дорогах, обустраиваемых для разгрузки судов, чаще используется перекрытие трещин настилами и переездами, особенно в весенний период, когда морозы уже не такие сильные и продолжительные. Большая часть трещин, образующихся в припайных льдах, имеет приливное происхождение. Залечивание таких трещин не имеет смысла, поскольку приливные трещины, являющиеся естественными элементами припая, тут же образуются вновь.

На припайных ледовых дорогах настилами перекрываются все трещины шириной, превышающей 5 см [16]. Необходимость перекрытия более узких трещин определяется специалистами-гидрологами. При перекрытии небольших по ширине трещин необходимо, чтобы перекрытие опиралось на лед по обоим краям трещины не менее, чем на 1 м. Для трещин шириной от 20 см до 1 м настил-перекрытие должен опираться на края трещины не менее, чем на 4 м в каждую из сторон. В качестве основы таких перекрытий используются бревна, толстый брус или стальные трубы. Важно, чтобы элементы основы были цельными по всей длине. Поверх основы сооружается деревянный или металлический настил, по которому будет двигаться

техника. Трещины шириной более метра требуют создания специальных мостовых или понтонных конструкций.

Инструкция по залечиванию трещин на ВПП ледовых аэродромов приведена в НАС ГА-86 [12]. Сухие несквозные трещины с шириной раскрытия по верху заливают подледной водой, выпущенной наверх через пробуренные в трещине отверстия. Сквозные трещины шириной до 30 см заделывают с помощью досок или бревен, которые крепятся проволокой или веревками за вмороженные по краям трещины анкеры. Затем трещина засыпается ледяным щебнем, трамбуется и заливается водой. Трещины шириной до 3 м заделывают ледяными блоками («кабанами»), выпиленными из льда в стороне от летного поля. Размер блока соответствует ширине трещины. Под трещину, поперек ее направления, заводятся длинные бревна. Затем в трещину опускают ледяные блоки. Поверх трещины и блоков устанавливают еще бревна, также поперек трещины, располагая их над подледными бревнами. Верхние и нижние бревна стягиваются тросом. Оставшиеся зазоры забивают ледяным щебнем и снегом и заливают водой. После смерзания всей конструкции верхние бревна снимаются.

ИСКУССТВЕННОЕ УСИЛЕНИЕ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА

Для повышения несущей способности ледяного покрова используют намораживание и армирование льда. Простейший способ намораживания — ускорение естественного нарастания льда снизу за счет расчистки ледяного покрова от снега. Наросший снизу лед достаточно прочен. Такой метод чаще всего используется при морских грузовых операциях на припае, когда площадки и ледовые дороги готовятся заблаговременно, до прихода судов. Метод требует продолжительного времени: за месяц расчищенный лед прирастает на 10–20 см, в зависимости от температуры воздуха и притока тепла из воды (на приглубых побережьях).

Для более интенсивного наращивания льда используется послойное намораживание сверху. Данный метод также требует предварительной полной очистки ледяной поверхности от снега. Намораживание осуществляется участками — картами намораживания. По краям карты намораживания устраивается опалубка из досок или в виде снежных валиков, предварительно подмороженных водой. Намораживание осуществляется наливом слоев воды толщиной от нескольких миллиметров до 10 см с продолжительными перерывами, необходимыми для замерзания воды и охлаждения образовавшегося слоя льда. При использовании соленой морской воды рекомендуется применять тонкослойное намораживание (толщина слоя около 1,5 мм) с созданием небольшого наклона намораживаемой поверхности, который обеспечивает сток рассола в процессе замерзания воды. Более подробные инструкции по послойному намораживанию приведены в РД 31.31.52-89 [8]. При температуре воздуха ниже -15°C метод послойного намораживания позволяет получить прирост льда до 10 см/сут. Следует учитывать, что прочность намороженного сверху льда существенно ниже прочности льда естественного нарастания (до двух раз).

Свои особенности имеет процесс намораживания льда для строительства ледяных островов. В РД 31.31.52-89 для строительства ледяных объектов рассмотрены несколько методов: послойное намораживание, блочное строительство, дождевание, объемное намораживание. Зарубежный опыт создания искусственных ледяных островов показывает, что наилучший эффект дает намораживание льда методом дождевания — распыление воды факелом на большую высоту, в процессе которого

отдельные капли воды частично замерзают в воздухе. Капли в ледяной оболочке, падая на твердую поверхность, разрушаются, освобождая находящуюся внутри жидкую фазу. В результате формируется фирновый массив из осколков ледяных оболочек и прослоек жидкой фазы. Дальнейшее смерзание массива определяется температурой и степенью минерализации образовавшегося брызгового льда. Данный метод имеет большое преимущество перед остальными в скорости создания больших масс намороженного льда и принят в качестве основного метода создания искусственных ледяных островов в международном стандарте ISO 19906 (в России пока не принят и находится в стадии первой редакции проекта документа). Факельное распыление эффективно при низких температурах воздуха и слабом ветре [17].

АРМИРОВАНИЕ ЛЬДА И СОЗДАНИЕ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ЛЕДЯНОЙ МАТРИЦЕЙ

Армирование льда применяется вместе с намораживанием сверху для повышения грузоподъемности ледяного покрова. Простейшее армирование производится ледяным щебнем, распределенным по поверхности льда и заливаемым водой. Это дает двойной эффект — ускорения замерзания нового слоя и повышения прочности намороженного льда.

Наставление [12] предлагает армировать тонкий ледяной покров хворостом, стальной проволокой или тросом. Арматура выкладывается на поверхности льда в виде сетки и заливается водой.

Для организации переправы тяжелой техники через р. Ангару использовалась арматура из двух слоев досок, замороженных в пористый фирновый лед, с последующим послойным намораживанием более плотного и прочного льда [18].

Большие перспективы имеет направление создания ледяных композитных материалов (ЛКМ) и их применения для усиления прочности ледяного покрова. Эксперименты с ЛКМ проводятся достаточно давно как у нас в стране, так и за рубежом [19]. Еще в середине XX в. при строительстве в холодных регионах начали применять различные виды льдобетона — льда с добавлением песка или гравия. В ледовой лаборатории ААНИИ проводились эксперименты с определением механических характеристик ледопласта — льда с добавлением различного количества древесных волокон. Было определено оптимальное количество добавляемых к замораживаемой воде волокон (5–7 %) для повышения прочности композита в несколько раз по сравнению с чистым льдом. Также отмечено уменьшении деформации и ползучести ледопласта по сравнению с чистым льдом.

Изучение свойств ЛКМ с различными добавками (стекловолокно, песок, глина, монтмориillonит, воднорастворимые полимеры и др.) было достаточно популярным направлением ледотехники в прошлом веке, продолжается и в наши дни. Хорошие результаты показывают лабораторные эксперименты с образцами пресноводного льда, армированными полимерными волокнами [20]. Сравнительные испытания на изгиб армированных и обычных образцов показали, что хотя повышения прочности ледяной матрицы не происходит — образец растрескивается при тех же нагрузках, как и обычный ледяной образец, — тем не менее армированные образцы не разрушались полностью даже при двукратном повышении нагрузки благодаря полимерным волокнам. Внедрение полимерных ЛКМ в практику строительства ледовых дорог позволит более безопасно и уверенно перемещать по льду грузы на пределе прочности ледяного покрова.

Следует учитывать, что льдокомпози́ты повышенной прочности на ледяном покрове природных водоемов применяются не сами по себе, но должны намораживаться на подложку природного льда. Для успешного их применения необходимо решить по меньшей мере три проблемы. Первая проблема заключается в часто наблюдаемом расслоении базового и намороженного слоев льда, обнаруженная при создании моделируемого льда с заданными свойствами в ледовых бассейнах [21]. Вторая проблема также проявилась при искусственном намораживании льда поверх льда естественного намерзания: в весенний период в природном льде под слоем искусственной наморозки быстрее развиваются деструктивные процессы внутреннего таяния по сравнению с окружающим льдом, не затронутым намораживанием, что значительно ослабляет ледяной объект (Сабетта, 2013 г., о. Земля Александры, 2016 г.). Третья проблема возникает при использовании ЛКМ с органическими добавками: необходимо разрабатывать методы быстрой и эффективной уборки намороженного композита с поверхности естественного ледяного покрова после завершения операции до начала таяния, поскольку скопления органического материала на поверхности или в толще воды после таяния ледяного покрова могут оказывать негативное воздействие на окружающую среду. Вышеуказанные проблемы нуждаются в проработке параллельно с развитием технологий искусственного упрочнения льда.

ИСКУССТВЕННОЕ ОСЛАБЛЕНИЕ ЛЬДА

При подготовке ледяного покрова к транспортным операциям приходится решать задачи не только наращивания и укрепления льда, но и его ослабления. Хорошо известен и распространен метод ускорения таяния льда путем снижения альбедо снежно-ледяной поверхности искусственным зачернением участков ледяного покрова. Приведем пример более сложного выборочного ослабления льда в зимний период ради сохранения прочности ледовых грузовых площадок при заколке судов в припай, разработанный и внедренный в практику совсем недавно. При разгрузке судов на припайный лед возникает дилемма: толстый и прочный лед необходим для безопасной выгрузки тяжелых грузов на лед, но, в то же время такой лед затрудняет заколку судна на грузовую ледовую площадку. При толщине льда более 1 м большинство грузовых судов не может самостоятельно заколоться на всю длину корпуса с одной попытки. Обычно в таких случаях приходилось выполнять повторные заделки (потери времени и большая вероятность разрушения льда у борта) или разгружаться в более широком канале ледокола (невозможно разгружаться одновременно с обоих бортов). В последние годы при обустройстве грузовых ледовых площадок начали практиковать пропиливание льда под корпус судна. Первый такой эксперимент был успешно проведен в Обской губе в 2013 г. (Сабетта), затем пропиливание выполнялось и в других пунктах Арктического побережья. Для заделки судна на месте его будущей стоянки заранее готовится система из 3 или 5 пропилов. Центральный пропил делается по оси судна, крайние пропилы — по бортам с учетом ширины судна плюс толщина льда. Для лучшей заделки иногда делаются дополнительные пропилы между центральным и бортовыми. Пропилы делаются баровой пилой на 2/3 толщины льда, чтобы избежать выхода подледной воды и смерзания пропила. Использование пропилов требует высокой точности от работы ледокола по прокладке канала к площадке. Для этого на льду устанавливаются хорошо заметные ориентиры в створе центрального пропила (ночью используются огни). Канал должен быть прямым, чтобы судно при разгоне не сбрасывало на края

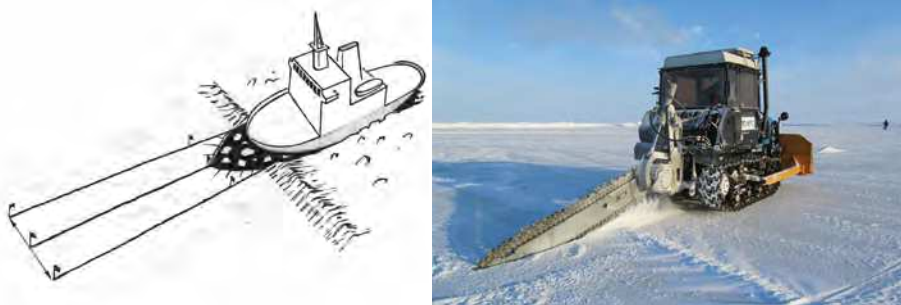


Рис. 3. Подготовка пропилов для заковки судна на грузовую площадку: общая схема расположения пропилов и подхода ледокола (слева); пропиливание льда (справа)

Fig. 3. Preparation of notches for berthing the vessel at the deployment site: the general scheme of notches and approaching of an icebreaker (left); preparation of the notches in the ice cover (right)

канала. При хорошей видимости и грамотно установленных ориентирах ледокол подходит штевнем к мористой оконечности центрального пропила с точностью до 1 м (рис. 3).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной статье выполнен обзор текущего состояния различных мероприятий и операций с использованием ледяного покрова водоемов в качестве несущих, рабочих и строительных площадок. В обзоре использованы литературные источники, в том числе нормативные документы, регламентирующие работы на льду, а также обобщен практический опыт работ авторского коллектива в различных районах Арктики и Антарктиды (Баренцево, Печорское, Карское моря, Обско-Тазовский и Енисейский районы, море Росса, архипелаг Земля Франца-Иосифа, о. Котельный Новосибирских островов, о. Врангеля и др.).

В настоящее время развитие ледовых технологий в Российской Арктике находится на подъеме, что обусловлено сочетанием государственных и бизнес-запросов на освоение Арктического региона и большей его доступностью в условиях наблюдающихся климатических изменений. Особенно показателен рост количества операций по разгрузке морских судов на припайный лед: если до 2013 г. в ледовую навигацию выгрузка на припай осуществлялась в 1–2 пунктах, то начиная с 2014 г. грузы ежегодно доставляются таким способом в 3–7 пунктов арктического побережья. Активное развитие данного направления делает его наиболее перспективным для разработки и внедрения новых технологий практической ледотехники. Несколько снизилась актуальность организации взлетно-посадочных полос на дрейфующих льдах, но это скорее связано не с уменьшением интенсивности полетов, а с восстановлением и строительством аэродромов на арктических островах и планированием изменения формата организации научных дрейфующих станций (переход от базирования на ледяных полях к использованию специального судна-платформы, дрейфующего во льдах [22]). Освоение морских месторождений углеводородов на арктическом шельфе неизбежно продвинет практику строительства искусственных ледяных островов для разведочного бурения в отечественной ледотехнике.

В условиях наблюдаемого расширения хозяйственной деятельности в Арктической зоне приходится констатировать, что техническое оснащение

ледотехнических работ мало изменилось со второй половины прошлого века. В отличие от ледовых спортивных объектов, где широко применяются специальные машины для подготовки и обслуживания льда, в Арктике все работы выполняются при помощи обычной дорожно-строительной техники. Практически отсутствуют разработки спецтехники для обработки ледяного покрова природных водоемов, безопасной и уверенной расчистки торосов, заделки трещин, намораживания льда.

Необходимо развитие и внедрение в практику технологий создания прочных и экологичных ЛКМ для повышения прочности льда. В частности, в рамках проекта РНФ № 18-13-00392 (2018–2020 гг.) планируется расширение экспериментов с ЛКМ, выполняемых в лабораториях, на натурные условия припайного льда при обеспечении разгрузки судов и транспортировки грузов по льду.

Благодарности. Работа выполнена в рамках темы ЦНТП 1.5.4.4. Разработка методов прогнозирования и обеспечения эффективности морских транспортных операций в арктических морях России и Антарктике и при финансовой поддержке РНФ (проект № 18-13-00392).

Acknowledgments. The study was performed in the framework of the Roshydromet Targeted Scientific and Technical Program, (TSTP, project 1.5.4.4.) and with the financial support of RSF (project № 18-13-00392).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чилингаров А.Н. Научно-оперативное гидрометеорологическое обеспечение зимне-весенних плаваний к п-ву Ямал. ВДНХ СССР. Павильон «Гидрометслужба СССР». Гидрометеиздат, 1979. 12 с.
2. Лоция западной части Карского моря (от островов Новая Земля и острова Вайгач до меридиана мыса Северо-Восточный, за исключением Обь-Енисейского района). МО СССР. Главное управление навигации и океанографии, 1992. 224 с.
3. Рекомендации по проведению грузовых операций в припайных льдах Арктики: Методические рекомендации. М.: В/О «Мортехинформреклама», 1986. 40 с.
4. Кубышкин Н.В., Гудошников Ю.П. Актуализация технологий перевалки грузов через припай // Проблемы Арктики и Антарктики. 2015. № 3 (105). С. 90–98.
5. Чилингаров А.Н. Методика определения эффективности зимних плаваний судов // Тр. ААНИИ. 1981. Т. 376. С. 129–133.
6. СП 58.13330.2012. Гидротехнические сооружения. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 33-01-2003. М., 2012. 34 с.
7. СП 47.13330.2012. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 11-02-96. М., 2012. 112 с.

REFERENCES

1. Chilingarov A.N. Nauchno-operativnoe gidrometeorologicheskoe obespechenie zimne-vesennikh plavaniy k p-vu Yamal. VDNKh SSSR. Pavil'on "Gidrometsluzhba SSSR". Scientific and operative hydrometeorological support of winter-spring navigation to Yamal peninsula. The Exhibition of Achievements of National Economy of USSR. Exhibition hall "Hydrometeorological Service of USSR". Gidrometeoizdat, 1979: 12 p. [In Russian].
2. Lotsiya zapadnoi chasti Karskogo moria (ot ostrovov Novaia Zemlia i ostrova Vaigach do meridiany mysa Severo-Vostochnyi, za isklucheniem Ob'-Eniseiskogo raiona). Sailing directions for the Western part of the Kara Sea (from Novaya Zemlya isles and Vaigatch isle to the meridian of North-Eastern Cape, with the exception of Ob-Enisey region). USSR Ministry of Defense, Main Administration of Navigation and Cartography, 1992: 224 p. [In Russian].
3. Rekomendatsii po provedeniiu gruzovykh operatsii v pripainykh l'dakh Arktiki: Metodicheskie rekomendatsii. Recommendations for executing the cargo operations on the fast ice of the Arctic: methodological recommendations. Moscow: "Mortechinformreklama", 1986: 40 p. [In Russian].
4. Kubyshkin N.V., Gudoshnikov Yu.P. Actualization of the technologies of cargo transshipment across fast ice. Problemy Arktiki i Antarkтики. Problems of Arctic and Antarctic. 2015, 3 (105): 90–98 [In Russian].

8. РД 31.31.52-89. Рекомендации по проектированию, строительству и эксплуатации ледяных причальных сооружений. Л., 1989. 52 с.
9. Ice Island Study. Final Report. Prepared by C-CORE. Report No. R-05-014-241 v1.0, August 2005. 158 p.
10. РД 31.41.21-90. Сборник рабочих технологических документов на производство погрузо-разгрузочных работ, выполняемых при разгрузке судов в пунктах беспричалной обработки через лед берегового припая. М., 1990. 188 с.
11. Правила по технике безопасности при производстве наблюдений и работ на сети Госкомгидромета. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 220 с.
12. НАС ГА-86. Наставление по аэродромной службе в гражданской авиации СССР. М.: Воздушный транспорт, 1987. 290 с.
13. ОДН 218.010-98. Инструкция по проектированию, строительству и эксплуатации ледовых переправ. Отраслевые дорожные нормы. М., 1998. 50 с.
14. РЕГА РФ-94. Руководство по эксплуатации гражданских аэродромов Российской Федерации. М.: Воздушный транспорт, 1996. 292 с.
15. Федеральные авиационные правила «Требования, предъявляемые к аэродромам, предназначенным для взлета, посадки, руления и стоянки гражданских воздушных судов». М., 2015. 84 с.
16. Песчанский И.С. Ледоведение и ледотехника. Л.: Гидрометеорологическое издательство, 1967. 462 с.
17. Сосновский А.В. Закономерности формирования и использования искусственных фирново-ледяных массивов. Автореф. дис. ... д-ра геогр. наук. М., 2010. 41 с.
18. Корчиц К.В., Новикова Л.Г., Кочеров В.Н. Армированная ледовая переправа для сверхтяжелых автосамосвалов БЕЛАЗ-540 через р. Ангара в районе строительства Богучанской ГЭС // Ледотермические проблемы в северном гидротехническом строительстве и вопросы продления навигации «ЛЕД 87»: Материалы XI Всесоюзного научно-технического совещания (Архангельск, 25–27 июня 1987 г.). Л., 1989. С. 168–170.
19. Песчанский И.С., Швайштейн З.И., Каган Г.Л., Назинцев Ю.Л. Механические свойства упрочненного льда // Проблемы Арктики и Антарктики. 1964. № 16. С. 45–53.
20. Черепанин Р.Н., Нужный Г.А., Разомасов Н.А., Гончарова Г.Ю., Бузник В.М. Физико-механические свойства ледяных композиционных материалов, армированных волокнами Русар-С // Материаловедение. 2017. № 7. С. 38–44.
5. Chilingarov A.N. Methodology for determination of winter navigation in the ice cover. *Trudy AANII. Proc. AARI.* 1981, 376: 129–133. [In Russian].
6. SP 58.13330.2012. *Gidrotekhnicheskie sooruzheniia. Osnovnye polozheniia. Aktualizirovannaia redaktsiia SNiP 33-01-2003.* SP 58.13330.2012. Hydrotechnical structures. Main provisions. Updated release of SNiP 33-01-2003. Moscow, 2012: 34 p. [In Russian].
7. SP 47.13330.2012. *Inzhenernye izyskaniia dlia stroitel'stva. Osnovnye polozheniia. Aktualizirovannaia redaktsiia SNiP 11-02-96.* SP 47.13330.2012. Engineering surveys for the purposes of building. Main provisions. Updated release of SNiP 11-02-96. Moscow, 2012: 112 p. [In Russian].
8. RD 31.31.52-89. *Rekomendatsii po proektirovaniu, stroitel'stvu i ekspluatatsii ledianykh prichal'nykh sooruzhenii.* RD 31.31.52-89. Recommendations for design, construction and maintenance of berthing facilities made of ice. Leningrad: 1989: 52 p. [In Russian].
9. Ice Island Study. Final Report. Prepared by C-CORE. Report No. R-05-014-241 v1.0, August 2005: 158 p.
10. RD 31.41.21-90. *Sbornik rabochikh tekhnologicheskikh dokumentov na proizvodstvo pogrupo-razgruzochnykh rabot, vypolniaemykh pri razgruzke sudov v punktakh besprichal'noi obrabotki cherez led beregovogo priipaia.* RD 31.41.21-90. Digest of technological documentation for providing loading and unloading operations on the fast ice executed in areas without berthing facilities. Moscow, 1990: 188 p. [In Russian].
11. *Pravila po tekhnike bezopasnosti pri proizvodstve nabludenii i rabot na seti Goskomgidrometa.* Safety rules for performing the observations and work on the hydrometeorological stations of the network of GOSKOMGYDROMET. Leningrad: Gydrometeizdat, 1983: 220 p. [In Russian].
12. NAS GA-86. *Nastavlenie po aerodromnoi sluzhbe v grazhdanskoi aviatsii SSSR.* NAS GA-86. Instructions for the airfield service in the civil aviation of USSR. Moscow: Air Transport, 1987: 290 p. [In Russian].
13. ODN 218.010-98. *Instruktsiia po proektirovaniu, stroitel'stvu i ekspluatatsii ledovykh pereprav. Otrasleyve dorozhnye normy.* ODN 218.010-98. Instruction for design, construction and maintenance of the crossings on the ice cover. Industrial specifications for construction of the roads. Moscow, 1998: 50 p. [In Russian].
14. REGA RF-94. *Rukovodstvo po ekspluatatsii grazhdanskikh aerodromov Rossiiskoi Federatsii.* REGA RF-94. Instructions for maintenance of civil airfields of Russian Federation. Moscow: Air Transport, 1996: 292 p. [In Russian].

21. Черепанов Н.В. Расслоение полей лабораторного льда при его искусственном намораживании в бассейне // Тр. ААНИИ. 1983. Т. 379. С. 111–115.
22. Корнилов Н.А., Кессель С.А., Лукин В.В., Меркулов А.А., Соколов В.Т. История организации и проведения исследований с дрейфующих льдов. СПб.: ААНИИ, 2017. 754 с.
15. *Federal'nye aviatsionnye pravila "Trebovaniia, pred"iavljaemye k aerodromam, prednaznachennym dlia vzleta, posadki, rulenii i stoianki grazhdanskikh vozdukhnykh sudov"*. Federal aviation rules "Requirements for airfields intended for plane takeoff, landing, taxiing and parking of the civil airplanes". Moscow, 2015: 84 p. [In Russian].
16. *Peschansky I.S. Ledovedenie i ledotekhnika*. Ice technology and ice engineering. Leningrad, Hydrometeorological Publishing House, 1967: 462 p. [In Russian].
17. *Sosnovsky A.V. Zakonomernosti formirovaniia i ispol'zovaniia iskusstvennykh firново-ledianyykh massivov*. Regularities of formation and use of artificial firm-ice massifs. Synopsis of thesis for the Doctor's degree in Geography, Moscow, 2010: 41 p. [In Russian].
18. *Korchitz K.V., Novikova L.G., Kotcherov V.N.* Reinforced ice crossing for the ultra-heavy tip tracks BELAZ-540 across the Angara river in the area of construction of Boguchanskaya water-power plant. *Ledotermicheskie problem v severnom gidrotekhnicheskom stroitel'stve I voprosy prodleniya navigazii "LED 87"*. The problems of ice thermic in hydrotechnical construction in the North and question of navigation prolongation "ICE 87": Materials of XI All-Union scientific-technical conference (Arkhangel'sk, 25–27 July 1987). Leningrad, 1989: 168–170. [In Russian].
19. *Peschansky I.S., Shvanshtein Z.I., Kagan G.L., Nazinzev Yu.L.* Mechanical properties of the reinforced ice. *Problemy Arktiki i Antarktiki*, Problems of Arctic and Antarctic, 1964, 16: 45–53. [In Russian].
20. *Cherepanin R.N., Nuzhnyi G.A., Razomasov N.A., Goncharova G.Yu., Buznik V.M.* Physical and mechanical properties of the ice compositional materials reinforced with the fibers RUSAR-C. *Materialovedenie*. Inorganic Materials: Applied Research. 2017, 7: 38–44. [In Russian].
21. *Cherepanov N.V.* Stratification of floes of artificial ice during the process of it's freezing in the tank. *Trudy AANII*. Proc. AARI, 1983, 379: 111–115. [In Russian].
22. *Kornilov N.A., Kessel S.A., Lukin V.V., Merkulov A.A., Sokolov V.T.* *Istoriia organizatsii i provedeniia issledovaniy s dreifuishchikh l'dov*. History of organization and performing of the scientific studies on the drifting ice cover. St. Petersburg: AARI, 2017: 754 p. [In Russian].

ГЕОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА

УДК 550.389.1

DOI: 10.30758/0555-2648-2018-64-4-427-438

МАГНИТОМЕТРИЯ И ГЕОРАДИОЛОКАЦИЯ В ПРИМЕНЕНИИ К КАРТИРОВАНИЮ ПОЛИГОНАЛЬНО-ЖИЛЬНЫХ ЛЬДОВ ЕДОМНОГО КОМПЛЕКСА

Л.В. ЦИБИЗОВ^{1,2*}, Е.И. ЕСИН^{1,2}, А.В. ГРИГОРЕВСКАЯ¹, К.А. СОСНОВЦЕВ²

¹ — Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука
Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, Россия

² — Новосибирский национальный исследовательский государственный университет,
г. Новосибирск, Россия

*TsibizovLV@ipgg.sbras.ru

MAGNETOMETRY AND GROUND PENETRATING RADAR IN APPLICATION TO MAPPING OF POLYGONAL WEDGE ICE OF YEDOMA COMPLEX

L.V. TSIBIZOV^{1,2*}, E.I. ESIN^{1,2}, A.V. GRIGOREVSKAYA¹, K.A. SOSNOVTSEV²

¹ — Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian
Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

² — Novosibirsk national research state university, Novosibirsk, Russia

*TsibizovLV@ipgg.sbras.ru

Received November, 16, 2018

Accepted December, 12, 2018

Keywords: ground penetrating radar, magnetometry, polygonal wedge ice.

Summary

Paper is dedicated to geophysical mapping of polygonal wedge ice. Magnetometric and ground penetrating radar surveys were implemented on a small area of Yedoma ice complex on Kurungnakh island in Lena river delta. Such deposits are widely spread on a huge areas of Siberia and Alaska. The study was conducted near the thermoerosional gully, which propagates along the most thick ice wedges. Polygonal pattern is observable on high-resolution aerial imagery and digital elevation model - this data was used during the interpreting of obtained results. Study area (40×50 m) was covered with high-resolution magnetic survey at the elevation of 2 m with 2×2 m step and with ground penetrating radar survey along profiles with 1 m distance between the profiles. Map of total magnetic field anomalies allow to determine the ice wedges of Yedoma ice complex distinctly. Difference between maximum

Citation: Tsibizov L.V., Esin E.I., Grigorevskaya A.V., Sosnovtsev K.A. Magnetometry and ground penetrating radar in application to mapping of polygonal wedge ice of yedoma complex. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2018, 64, 4: 427–438. [In Russian]. doi: 10.30758/0555-2648-2018-64-4-427-438

positive (polygons centers) and negative (ice wedges) anomalies reaches 6 nT (error of the survey is 0,3 nT). Beyond that smaller ice wedges which penetrate the ice wedges of Yedom complex are also observable in magnetic field. Basing on ground penetrating radar data an amplitude slice of at 3,5 m depth was built. Yedom ice wedges are observable at depth of 3–4 m. Ground penetrating radar data is quite noisy due to surface inhomogeneity (puddles, knolls, etc.). Results of the surveys were compared in the light of practical application of the methods for above mentioned goal. Magnetometric method appears as more efficient than ground penetrating radar survey: it does not require a contact with the surface and more rapid, it is more sensitive as the case stands. Ground penetrating radar method may have advantages in the case of natural (magnetic storm, high-magnetized overlaying deposits) and anthropogenic (metal constructions — pipelines, ETL) noise.

Поступила 16 ноября 2018 г.

Принята к печати 12 декабря 2018 г.

Ключевые слова: георадиолокация, магнитометрия, полигонально-жильные льды.

На примере небольшого участка многолетнемерзлых отложений на острове Курунгах в дельте р. Лены проведено сравнение эффективности методов магнитометрии и георадиолокации для картирования полигонально-жильных льдов едомного комплекса. Установлено, что оба метода сравнимы по эффективности и позволяют успешно решить задачу картирования при минимальной дополнительной обработке данных съемки. Показано, что метод магнитометрии является более оперативным в сравнении с методом георадиолокации. Отмечен ряд практических аспектов применимости методов в зависимости от наличия природных и техногенных факторов.

ВВЕДЕНИЕ

Картирование полигонально-жильных льдов является актуальной задачей при проведении научных и инженерных работ в криолитозоне. Точная информация о распределении льда в верхней части разреза позволяет оценить интенсивность возможной деградации многолетнемерзлых пород в силу природных и техногенных факторов, выявить участки с высоким потенциалом к образованию термоэрозии, обеспечить представительность данных при отборе проб с разных участков полигонально-жильной структуры [1–4].

Геофизические методы могут существенно облегчить задачу картирования полигонально-жильных структур криолитозоны, особенно если речь идет о сравнительно небольших участках (размером десятки и сотни метров) [5–9]. В некоторых случаях, если полигонально-жильные льды скрыты под слоем песка, снега или более молодых отложений, так что они не наблюдаются визуально даже при пристальном осмотре и анализе рельефа, геофизические методы становятся незаменимыми.

В настоящей работе приведены результаты применения двух методов — прецизионной магнитометрии и георадиолокации на участке едомного комплекса о. Курунгах в дельте р. Лены. Едомные отложения на о. Курунгах содержат крупные (до нескольких метров шириной) жилы льда, образующие полигональную структуру [10]. Подобные отложения широко распространены на обширных территориях Сибири, Чукотки и Аляски [11–16]. Магнитометрия и георадиолокация являются наиболее оперативными геофизическими методами исследования верхней части разреза многолетнемерзлых пород. Оба метода позволяют выполнять картирование жильных льдов, в том числе скрытых [5, 17–21]. В течение последнего года в двух диссертационных работах рассматривался вопрос применения для локализации жильных льдов метода георадиолокации [22] и прецизионной магнитной съемки [23]. В настоящей работе рассмотрены практические аспекты применения этих методов для картирования жильных льдов на примере небольшого участка едомных отложений.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Участок исследования расположен на поверхности едомного комплекса (также называемого «ледовый комплекс») вблизи термоэрозионного оврага на о. Курунгнах в дельте р. Лены (рис. 1).

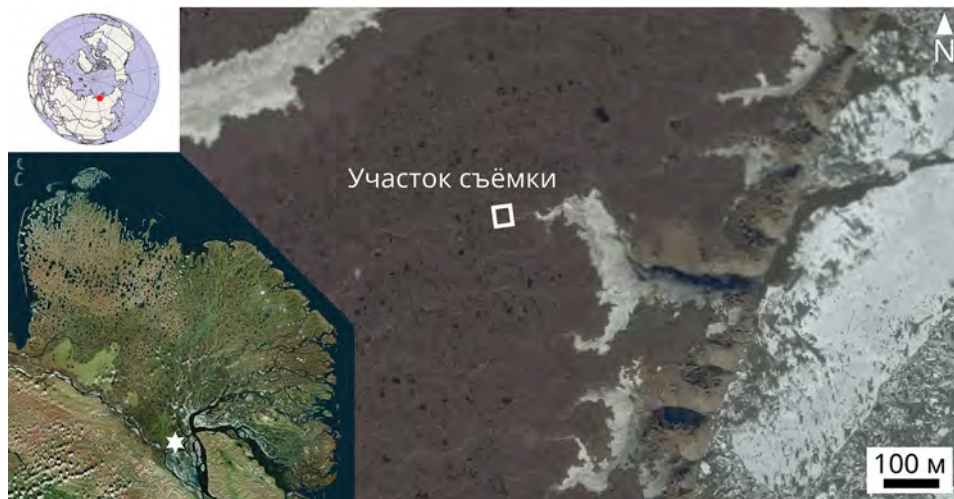


Рис. 1. Спутниковый снимок участка исследований: слева — общий вид дельты р. Лены (<https://www.bing.com/maps>), справа — побережье о. Курунгнах (<https://wego.here.com>)

Fig. 1. Satellite image of the study area: left — general view of Lena river delta (<https://www.bing.com/maps>), right — coast of Kurungnakh island (<https://wego.here.com>)

Термоэрозионный овраг, активно развивающийся в глубь комплекса от берега, обнажает мощные ледовые жилы, которые, вероятно, определяют направление развития термоэрозии (рис. 2).



Рис. 2. Обнажение ледовой жилы в верхней части термоэрозионного оврага

Fig. 2. Outcrop of an ice wedge in the upper part of thermoerosional gully

Территория, включающая участок исследований, была покрыта аэрофотосъемкой с разрешением 3–5 см/пиксель в июле 2016 г. [24]. По материалам аэрофотосъемки методом фотограмметрии была построена цифровая модель рельефа с относительной погрешностью около 10 см. Этот материал был использован в настоящей работе в качестве основы, на которую были впоследствии наложены результаты геофизической съемки.

Георадиолокационная и магнитная съемки были выполнены в пределах участка, обозначенного на рис. 1. Пространственная привязка в пределах участка осуществлялась при помощи измерительной рулетки.

Магнитная съемка проводилась пешеходным магнитометром MMPOS-1, запись вариаций магнитного поля осуществлялась при помощи второго MMPOS-1 в режиме магнитовариационной станции. Магнитовариационная станция была установлена в 50 м к западу от участка съемки. Магнитные вариации были вычтены при обработке. Измерения проводились на высоте 2 м по равномерной сети с расстоянием 2 м между точками. Датчик был установлен на штангу высотой 2 м. Съемка выполнялась оператором и помощником, который удерживал штангу в вертикальном положении на расстоянии длины кабеля датчика (около 2 м) от оператора (это было сделано для минимизации помех, вносимых деталями преобразователя и регистратора, закрепленных на операторе). В процессе съемки измерялся модуль вектора магнитной индукции.

Георадиолокационная съемка была выполнена аппаратурой ОКО-2 по профилям с расстоянием 1 м между профилями и около 2 см между точками измерения вдоль профиля (это было реализовано при помощи колесного датчика перемещения). Измерения проводились с антенной 150 МГц.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Фрагменты аэрофотоснимка и цифровой модели рельефа приведены на рисунках 3 а и 3 б соответственно.

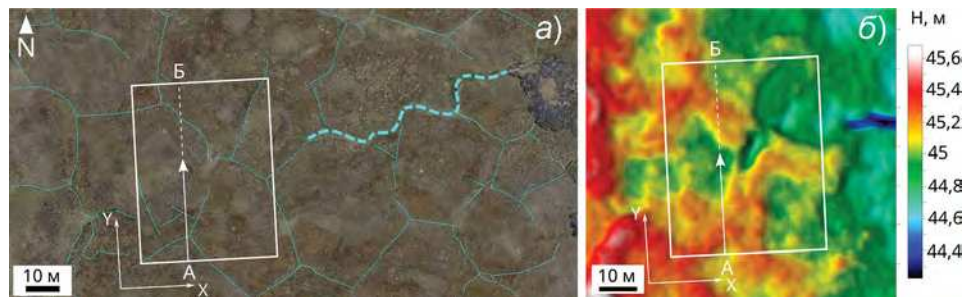


Рис. 3. Аэрофотоснимок 2016 года (а) и цифровая модель рельефа (б).

Белый прямоугольник оконтуривает участок съемки (40×50 м), профиль АБ (рассмотрен на рис. 4) расположен на 14 м по оси Х (начало отсчета в левом нижнем углу прямоугольника), стрелкой указано направление движения георадара по профилю; голубой пунктир (а) маркирует морозобойные трещины, жирным пунктиром отмечена трещина, вдоль которой наиболее активно развивается термоэрозионный овраг (рис. 2)

Fig. 3. Aerial photo made in 2016 (a) and digital elevation model (b).

White rectangle marks the contour of study area (40×50 m), АБ profile (considered in fig. 4) is situated on 14 m of X axis (zero is in left lower corner of the rectangle), the arrow shows direction of ground-penetrating radar along the profile; blue dotted line (a) marks frost cracks, thick dotted line — the trench along which the thermoerosional gully develops in most intensive manner (fig. 2)

Морфология поверхности тундры на участке съемки (рис. 3 б) характеризуется небольшим (менее 1 м) перепадом высот (не считая оголовья термоэрозионного оврага в правой части рисунка). Наблюдается общий уклон поверхности в восточном направлении, вызванный, вероятно, вытаиванием ледового комплекса вдоль береговой линии. Локальные перепады высот в пределах участка составляют не более полуметра. Морозобойные трещины (рис. 3 а) образуют полигональную сеть, выраженную в рельефе (рис. 3 б) в виде «валиков», разделяющих полигоны. По своим размерам эта полигональная сеть соответствует размеру полигонов плейстоценовых сингенетических жильных льдов [10]. Плейстоценовые отложения на о. Курунгах, представленные алевropесками и торфосодержащими алевритами [10] (мощностью около 20 м), перекрыты голоценовыми торфосодержащими алевритами [10] (мощностью около 0,7 м), которые в свою очередь содержат систему более мелких эпигенетических жил, внедряющихся в плейстоценовый ледовый комплекс. Голоценовые жилы повторяют сеть плейстоценовых жил, при этом разбивают ее дополнительно на ячейки меньшего размера. Наиболее заметны на поверхности те из трещин, под

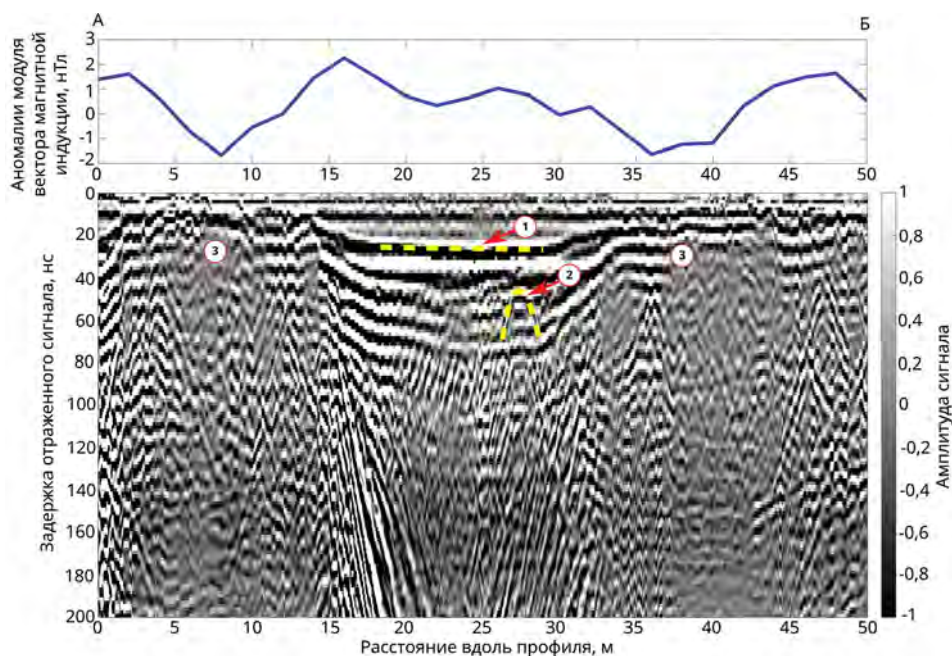


Рис. 4. Аномалии модуля вектора магнитной индукции (результат магнитной съемки) и волновая картина (результат георадиолокационной съемки) по профилю АБ (рис. 3).

Объекты, отмеченные цифрами в кружках: 1 — отражение от дна лужи; 2 — небольшой локальный объект, возможно, ледовая линза; 3 — места пересечения профиля с плейстоценовыми ледовыми жилами (рис. 3), здесь наблюдаются отрицательные магнитные аномалии (верхняя часть рисунка). На временах более 100 нс видны в основном кратные отраженные волны

Fig. 4. Anomalous total magnetic field (result of magnetic survey) and wave pattern (result of ground-penetrating radar survey) on AB profile (fig. 3).

Objects marked by numbers in circles: 1 — reflection from the bottom of puddle; 2 — small local object, probably ice lense; 3 — sites where the profile crosses Pleistocene ice wedges (fig. 3), the negative magnetic anomalies are observable here (upper part of the figure). On the traveltimes of more than 100 ns mostly multiple waves are visible

которыми расположены плейстоценовые жилы. Мы предполагаем, что это происходит вследствие повышенной интенсивности морозного растрескивания над плейстоценовыми жилами, что в свою очередь может быть связано с создаваемой ими температурной неоднородностью в верхнем слое за счет отличий теплофизических свойств льда и мерзлых пород.

На рис. 4 приведены результаты магнитной и георадиолокационной съемок по профилю АБ (рис. 3), пересекающему две крупные плейстоценовые жилы.

Обработка данных магнитной съемки включала следующие шаги:

- учет вариаций магнитного поля (вычитание из данных съемки соответствующих значений, полученных при помощи магнитовариационной станции);
- приведение значений аномалий модуля вектора магнитной индукции к условному среднему уровню (в данном случае в качестве среднего было выбрано медианное значение по всему массиву данных).

Погрешность полученных значений аномалий F оценивалась на основании повторных контрольных измерений [18] и составила 0,3 нТл.

Исходная волновая картина, полученная при георадиолокационной съемке, малопредставительна в неизменном виде — амплитуда сигнала весьма быстро затухает с глубиной (соответственно с увеличением времени прихода отраженной волны). Поэтому для каждого времени прихода амплитуда сигналов была разделена на стандартное отклонение всех амплитуд, наблюдаемых в это время в разных точках вдоль профиля. Такая нормировка позволила отобразить отчетливую волновую картину для всех времен прихода в единой цветовой шкале.

Как видно из рис. 4, ледовым жилам соответствуют отрицательные магнитные аномалии, однако на волновой картине отчетливых аномалий на этих участках не проявляется. Можно отметить лишь вертикальные полосы с меньшей амплитудой (отметки с цифрой 3 на рис. 4), верхняя граница этих зон соответствует времени 20 нс, что соответствует глубине около 1 м (при диэлектрической проницаемости многолетнемерзлых пород равной 6 — среднее значение, полученное иностранными авторами для аналогичных пород в работах на Аляске [25]). Такая глубина верхних окончаний плейстоценовых жил соответствует геологическим представлениям о строении ледового комплекса [10]. Поскольку искомые объекты (жилы) имеют вертикальную протяженность, для их обнаружения целесообразным выглядит построение горизонтальных срезов массива данных георадиолокации. Схемы, приведенные на рис. 5, были получены в результате пересчета времен прихода в псевдоглубины, было принято среднее значение диэлектрической проницаемости мерзлых пород, равным 6. Значение амплитуды сигнала в каждой точке было преобразовано согласно выражению $A = \log_{10}(|Amp| + 1)$, где Amp — исходная амплитуда сигнала, — таким образом было получено значение интенсивности сигнала независимо от его знака.

Как видно из рисунка 5, ледовые жилы начинают уверенно просматриваться с глубины 3 м (рис. 5 б). Поверхность тундры на участке измерений сильно увлажнена, встречаются крупные лужи, создающие многократное отражение сигнала, что приводит к сильным помехам, особенно на ранних временах прихода волн (рис. 5 а). Этот эффект от луж просматривается даже на глубине 4 м в виде зон с наиболее высокой амплитудой сигнала (рис. 5 в). Помимо этого, источником помех служат, вероятно, неоднородности в приповерхностной части разреза — кочки,

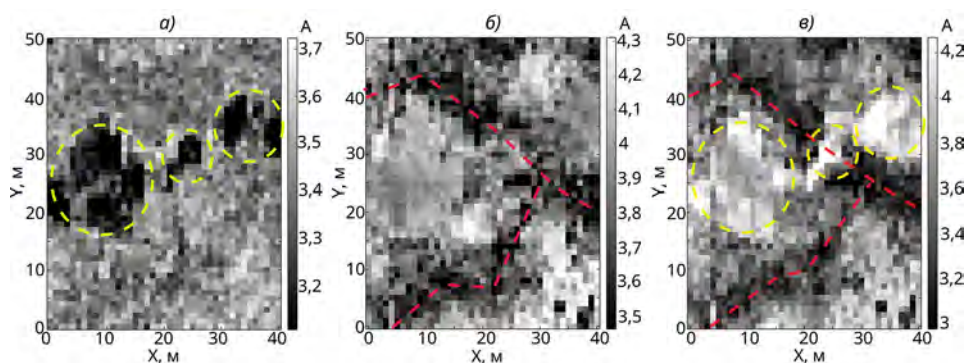


Рис. 5. Горизонтальные амплитудные срезы ($A = \log_{10}(|Amp| + 1)$, где Amp — исходная амплитуда сигнала) массива данных георадиолокационной съемки на псевдоглубинах 2 (а), 3 (б) и 4 (в) метра.

Желтым пунктиром (а, в) обведены зоны, в которых наблюдается отражение сигнала от воды в лужах; красным пунктиром (б, в) отмечены участки затухания сигнала, соответствующие ледовым жилам

Fig. 5. Horizontal amplitude slices ($A = \log_{10}(|Amp| + 1)$) of ground penetrating radar survey data array at the pseudodepths of 2 (a), 3 (b) and 4 (e) meters.

Yellow dotted line (a, e) encircle zones where a reflection from the water in puddles is observed; red dotted line (b, e) marks the areas of the signal decay which correspond to ice wedges

лужицы, следы криотурбации в окрестности морозобойных трещин. В работе [22] упоминаются аналогичные проблемы при применении георадиолокации для поиска скрытых ледовых жил.

Полученные данные были подвергнуты дополнительному сглаживанию — в каждой точке равномерной сети с шагом 1 м на псевдоглубине 3,5 м было рассчитано среднее арифметическое значение всех значений в окрестности этой точки с учетом расстояния при помощи весовой функции вида:

$$p = e^{-\left(\frac{r-r_0}{R/2}\right)^2},$$

где r — координаты точки массива данных, r_0 — точка сети; R — радиус окрестности (в данном случае — 1 м), в которой производится усреднение.

Для сравнения результаты магнитной и георадиолокационной съемок приведены на рис. 6.

Как видно из рисунка 6, в магнитном поле отчетливо просматривается полигональный рисунок, соответствующий ледовым жилам. Разница значений аномалий модуля вектора магнитной индукции над жилой и над центром полигона достигает 6 нТл.

Стоит отметить, что в магнитном поле не только выделяются крупные жилы, которые наблюдаются визуально на аэрофотоснимке (рис. 3) и в рельефе (рис. 4), но в пределах каждого полигона видны зоны отрицательных аномалий меньшего размера, связанные, по-видимому, с голоценовыми жилами.

В работе [21] в том же районе была показана эффективность прецизионной магнитной съемки для картирования ледовых жил, при этом съемка проводилась на высоте 1 м и по более детальной сети — 1 м между профилями и 10 см между точками измерений вдоль профиля. Как видно из приведенных в настоящей работе

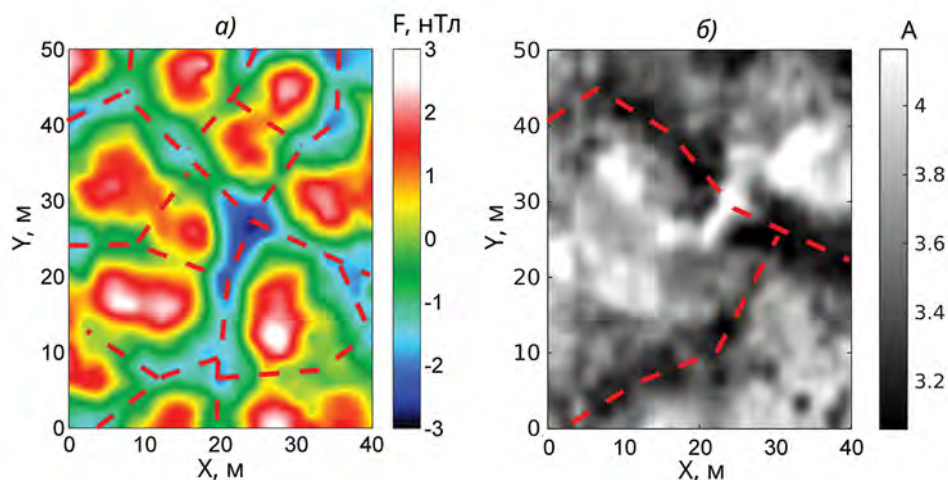


Рис. 6. Магнитные аномалии на высоте 2 м над поверхностью (а) и горизонтальный амплитудный срез на глубине 3,5 м по результатам георадиолокационной съемки (б), наложенные на аэрофотоснимок 2016 года.

ΔF — значение аномалии модуля вектора магнитной индукции; A — логарифм модуля амплитуды ($A = \log_{10}(|Amp| + 1)$, где Amp — амплитуда исходного сигнала) в безразмерных единицах; красным пунктиром отмечены участки, соответствующие ледовым жилам

Fig. 6. Magnetic anomalies on the elevation of 2 m above the surface (a) and horizontal amplitude slice at the depth of 3,5 m based on ground penetrating radar survey results (b) overlaying the aerial image made in 2016.

ΔF — value of total magnetic field anomaly; A — logarithm of amplitude module ($A = \log_{10}(|Amp| + 1)$, where Amp — amplitude of original signal) in dimensionless units; red dotted linemarks the areas which correspond to ice wedges

результатов — существенно более низкая детальность съемки тем не менее позволяет так же уверенно картировать ледовые жилы едомного комплекса, а также выявить сеть более мелких голоценовых жил. К практическим недостаткам метода можно отнести чувствительность метода к геомагнитной обстановке (в магнитоактивные дни съемка затруднена), сложность применения метода в условиях техногенных (при наличии в непосредственной близости трубопровода, ЛЭП и т.д.) и естественных (перекрывающие жилы отложения с высоким и неоднородным содержанием сильномагнитных песка или гальки) помех.

Метод георадиолокации позволяет весьма уверенно картировать относительно мощные (более 2 м шириной согласно оценкам [10]) плейстоценовые жилы ледового комплекса даже после минимальной обработки данных. Помимо этого, метод позволяет провести первичную оценку глубины верхних окончаний жил — на глубине 2 м жилы прослеживаются слабо (рис. 6 а), на 3 м — уверенно (рис. 6 б). К практическим недостаткам метода в данных условиях можно отнести необходимость контакта с поверхностью: для качественной съемки даже при благоприятных условиях (отсутствие кочек, кустов, крупных луж) приходится обеспечивать хорошее сцепление с поверхностью и выдерживать невысокую скорость перемещения, что снижает общую эффективность метода в сравнении с бесконтактными методами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные результаты демонстрируют применимость двух геофизических методов — магнитометрии и георадиолокации — при картировании полигонально-жильных льдов едомного комплекса. Оба метода позволили локализовать мощные (более 2 м шириной) плейстоценовые жилы ледового комплекса в пределах пробного участка. При этом магнитная съемка позволяет выявить также структуры меньшего размера — сеть голоценовых полигонально-жильных льдов, мощность которых варьируется от 0,5 до 1,5 м [10]. Георадиолокация позволила провести первичную оценку глубины верхних оконечностей плейстоценовых жил, которая составила около 1 м, что согласуется с геологическими данными [10]. Можно отметить, что в данных условиях метод магнитометрии существенно превышает метод георадиолокации по оперативности: например, при использовании квантового магнитометра с возможностью непрерывной регистрации с частотой 10 Гц участок, аналогичный приведенному в работе (размера 40×50 м), потребует от 30 до 60 минут для съемки, в то время как георадиолокационная съемка займет от одного до двух часов. Метод магнитометрии существенно менее требователен к рельефу поверхности, наличию кустов, луж и в ближайшем будущем может применяться на беспилотном аппарате-носителе, что существенно повысит его оперативность, *однако картирование столь слабых по амплитуде и мелких аномалий требует весьма высокой точности позиционирования датчика (в пределах 10 см [26])*. Метод георадиолокации в свою очередь позволяет проводить съемку в зонах с развитой инфраструктурой, обилием техногенных объектов, где магнитная съемка может быть сильно затруднена.

Благодарности. Исследования поддержаны: Проектом IX.128.3.3 Программы ФНИ СО РАН IX.128.3; Проектом II.61 Комплексной программы СО РАН «Междисциплинарные интеграционные исследования».

Acknowledgements. Research is funded by: Project IX.128.3.3 of FSR SB RAS program IX.128.3; Project II.61 of Complex SB RAS program “Interdisciplinary integrative researches”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Liljedahl A.K., Boike J., Daanen R.P., Fedorov A.N., Frost G.V., Grosse G., Hinzman L.D., Iijma Y., Jorgenson J.C., Matveyeva N., Necsoiu M., Raynolds M.K., Romanovsky V.E., Schulla J., Tape K.D., Walker D.A., Wilson C.J., Yabuki H., Zonaet D. Pan-Arctic ice-wedge degradation in warming permafrost and its influence on tundra hydrology // *Nature Geoscience*. 2016. V. 9. № 4. P. 312.
2. Andersland O.B., Ladanyi B. An Introduction to Frozen Ground Engineering, 2nd edn. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2004. 363 c.
3. Станюковская 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.
1. Liljedahl A.K., Boike J., Daanen R.P., Fedorov A.N., Frost G.V., Grosse G., Hinzman L.D., Iijma Y., Jorgenson J.C., Matveyeva N., Necsoiu M., Raynolds M.K., Romanovsky V.E., Schulla J., Tape K.D., Walker D.A., Wilson C.J., Yabuki H., Zonaet D. Pan-Arctic ice-wedge degradation in warming permafrost and its influence on tundra hydrology. *Nature Geoscience*. 2016, 9, 4: 312.
2. Andersland O.B., Ladanyi B. An Introduction to Frozen Ground Engineering, 2nd edn. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 2004: 363 p.
3. Stanilovskaia Iu.V., Merzliakov V.P. Probabilistic assessment of the danger of polygonal ice wedges for pipelines. *Nauka i tekhnologii truboprovodnogo transporta nefi i nefteproduktov*. Science and technology of

4. 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.
5. Боголюбов А.Н., Боголюбова Н.П., Мозганова Е.Я. ПНИИИС. Рекомендации по комплексированию геофизических методов при мерзлотной съемке. М.: Стройиздат, 1987. 88 с.
6. Scott W., Sellmann P., Hunter J. Geophysics in the study of permafrost // Geotechnical and Environmental Geophysics. Ward S. (Ed.) Society of Exploration Geophysics Tulsa. 1990. P. 355–384.
7. Зыков Ю.Д. Геофизические методы исследования криолитозоны. М.: Изд-во МГУ, 2007. 272 с.
8. Kneisel C., Hauck C., Fortier R., Moorman B. Advances in geophysical methods of permafrost investigations // Permafrost and Periglacial Processes. 2008. № 19. P. 157–178.
9. Hauck C., Kneisel C. Applied geophysics in periglacial environments. New York: Cambridge University Press. 2008. V. 240. 256 p.
10. Wetterich S., Kuzmina S., Andreev A.A., Kienast F., Meyer H., Schirrmeister L., Kuznetsova T., Sierralta M. Palaeoenvironmental dynamics inferred from late Quaternary permafrost deposits on Kurungnakh Island, Lena Delta, northeast Siberia, Russia // Quaternary Science Reviews. 2008. V. 27. № 15–16. P. 1523–1540.
11. Попов А.И. Подземный лед // Подземный лед. Вып. 1. М.: Изд-во МГУ, 1965. С. 7–39.
12. Каплина Т.Н. Зональные закономерности распространения полигонально-жильных образований в Восточной Сибири // Палеокриология в четвертичной стратиграфии и палеогеографии. М.: Наука, 1973. С. 38–50.
13. Соломатин В.И. Строение и генезис полигонально-жильного льда в плейстоценовых отложениях северной Якутии // Проблемы криолитологии. 1974. № 4. С. 7–99.
14. Washburn A.L. Geocryology – A Survey of Periglacial Processes and Environments. London, UK: Edward Arnold Ltd., 1979. 406 p.
- pipeline transportation of oil and petroleum products. 2013, 3: 48–54. [In Russian].
4. Vasil'chuk Yu.K. Povtorno-zhil'nye l'dy. Kriosfera neftegazokondensatnykh mestorozhdenii poluostrova Yamal. Kriosfera Bovanenkovskogo neftegazokondensatnogo mestorozhdeniia. Massive wedge ice. The cryosphere of oil and gas condensate fields on the Yamal Peninsula. The cryosphere of the Bovanenkovo oil and gas condensate field. V. 2. Moscow: ООО «Gazprom экспо», 2013: 318–325. [In Russian].
5. Bogoliubov A.N., Bogoliubova N.P., Mozganova E.Ia. Rekomendatsii po kompleksirovaniu geofizicheskikh metodov pri merzlotnoi s'emke. PNIIS Recommendations on the integration of geophysical methods in cryogenic surveys. PNIIS. Moscow: Stroizdat, 1987: 88 p. [In Russian].
6. Scott W., Sellmann P., Hunter J. Geophysics in the study of permafrost. Geotechnical and Environmental Geophysics. Ward S. (Ed.) Society of Exploration Geophysics Tulsa. 1990: 355–384.
7. Zykov Yu.D. Geofizicheskie metody issledovaniia kriolitozony. Geophysical methods for cryolithozone study. Moscow: MSU publishing house, 2007: 272 p. [In Russian].
8. Kneisel C., Hauck C., Fortier R., Moorman B. Advances in geophysical methods of permafrost investigations. Permafrost and Periglacial Processes. 2008, 19: 157–178.
9. Hauck C., Kneisel C. Applied geophysics in periglacial environments. New York: Cambridge University Press. 2008, 240: 256 p.
10. Wetterich S., Kuzmina S., Andreev A.A., Kienast F., Meyer H., Schirrmeister L., Kuznetsova T., Sierralta M. Palaeoenvironmental dynamics inferred from late Quaternary permafrost deposits on Kurungnakh Island, Lena Delta, northeast Siberia, Russia. Quaternary Science Reviews. 2008, 27, 15–16: 1523–1540.
11. Popov A.I. Podzemnyi led. Subsurface ice. Moscow: MSU publishing house, 1965: 7–39. [In Russian].
12. Kaplina T.N. Zonal'nye zakonomernosti rasprostraneniia polygonal'no-zhil'nykh obrazovaniy v Vostochnoi Sibiri. Paleokriologiya v chetvertichnoi stratigrafii i paleogeografii. Zonal patterns of distribution of polygonal cavern-load formations in Eastern Siberia. Paleocryology in

15. *Tomirdiario S.B.* Лессово-ледовая формация Восточной Сибири в позднем плейстоцене и голоцене. М.: Наука, 1980. 185 с.
16. *Gilbert G.L., Kanevskiy M., Murton J.B.* Recent advances (2008–2015) in the study of ground ice and cryostratigraphy // *Permafrost and Periglacial Processes*. 2016. V. 27. № 4. P. 377–389.
17. *Мельников В.П., Гладкий К.В., Лобанов А.М.* Влияние поверхностных геологических неоднородностей на изменения гравитационного и магнитного полей // Обзорная информация. Разведочная геофизика. 1974. № 64. С. 139–144.
18. Инструкция по магниторазведке: Наземная магнитная съемка. Аэромагнитная съемка. Гидромагнитная съемка / Под ред. Ю.С. Глебовского. Л.: Недра, 1981. 263 с.
19. *Arcone S.A.* Radar detection of ice wedges in Alaska. CRREL Report 82-43. U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, 1982. 17 p.
20. *Munroe J.S., Doolittle J.A., Kanevskiy M.Z., Hinkel K.M., Nelson F.E., Jones B.M., Shur Y., Kimbleet J.M.* Application of ground penetrating radar imagery for three dimensional visualisation of near surface structures in ice rich permafrost, Barrow, Alaska // *Permafrost and Periglacial Processes*. 2007. V. 18. № 4. P. 309–321.
21. *Tsibizov L., Rusalimova O.* Magnetic imaging of the Kurungnakh Island ice complex upper layer structure, Lena Delta, Russia // *Near Surface Geophysics*. 2017. V. 15. № 5. P. 527–532.
22. *Бричева С.С.* Разработка методики изучения криогенных объектов при помощи георадиолокации: Автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. М.: МГУ, 2018. 25 с.
23. *Цибизов Л.В.* Аномалии магнитного поля над полигонально-жильными льдами (на примере ледового комплекса в дельте р. Лены): Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А.Трофимюка СО РАН. Новосибирск, 2018. 24 с.
24. *Tsibizov L., Fage A., Rusalimova O., Fadeev D., Olenchenko V., Yeltsov I., Kashirtsev V.* Integrated non-invasive geophysical-soil studies of permafrost upper layer and aerial high-resolution photography // *Russian-German Cooperation: Expeditions to Siberia in 2016, Quaternary stratigraphy and paleogeography*. Moscow: Nauka, 1973: 38–50. [In Russian].
13. *Solomatina V.I.* Stroenie i genezis polygonal'no-zhil'nogo l'da v pleistotsenovykh otlozheniyakh severnoi Yakutii. Structure and genesis of polygonal cavern-load ice in the Pleistocene sediments of northern Yakutia. *Problemy kriolitologii*. Problems of cryolithology 1974, 4: 7–99. [In Russian].
14. *Washburn A.L.* Geocryology – A Survey of Periglacial Processes and Environments. London, UK: Edward Arnold Ltd., 1979: 406 p.
15. *Tomirdiario S.V.* Lessovo-ledovaia formatsiia Vostochnoi Sibiri v pozdнем pleistotsene i golotsene. Loess-Ice formation of Eastern Siberia in the Late Pleistocene and Holocene. Moscow: Nauka, 1980: 185 p. [In Russian].
16. *Gilbert G.L., Kanevskiy M., Murton J.B.* Recent advances (2008–2015) in the study of ground ice and cryostratigraphy. *Permafrost and Periglacial Processes*. 2016, 27, 4: 377–389.
17. *Mel'nikov V.P., Gladkii K.V., Lobanov A.M.* Vlianie poverkhnostnykh geologicheskikh neodnorodnostei na izmeneniia gravitatsionnogo i magnitnogo polei. *Obzornaya informatsiia. Razvedochnaia geofizika*. Influence of surface geological inhomogeneities on changes in the gravitational and magnetic fields. Survey information. *Exploration Geophysics*. 1974, 64: 139–144. [In Russian].
18. *Instruktsiia po magnitorazvedke: Nazemnaia magnitnaia s"emka. Aeromagnitnaia s"emka. Gidromagnitnaia s"emka. Magnetic Instruction: Ground Magnetic Survey. Aero magnetic shooting. Hydromagnetic shooting*. Ed. Yu.S. Glebovsky Leningrad: Nedra, 1981: 263 p. [In Russian].
19. *Arcone S.A.* Radar detection of ice wedges in Alaska. CRREL Report 82-43. U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, 1982: 17 p.
20. *Munroe J.S., Doolittle J.A., Kanevskiy M.Z., Hinkel K.M., Nelson F.E., Jones B.M., Shur Y., Kimbleet J.M.* Application of ground penetrating radar imagery for three dimensional visualisation of near surface structures in ice rich permafrost, Barrow, Alaska. *Permafrost and Periglacial Processes*. 2007, 18, 4: 309–321.
21. *Tsibizov L., Rusalimova O.* Magnetic imaging of the Kurungnakh Island ice complex upper

Berichte zur Polar- und Meeresforschung = Reports on polar and marine research, Bremerhaven, Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research. 2017. V. 709. P. 56–69.

25. Arcone S.A., Lawson D.E., Delaney, A.J., Strasser J. C., Strasser J.D. Ground-penetrating radar reflection profiling of groundwater and bedrock in an area of discontinuous permafrost // Geophysics. 1998. V. 63 (5). P. 1573–1584.

26. Цибизов Л.В. Повторно-жильные льды в аномальном магнитном поле: численное моделирование // Проблемы Арктики и Антарктики. 2017. № 2 (112). С. 75–84.

layer structure, Lena Delta, Russia. Near Surface Geophysics. 2017, 15, 5: 527–532.

22. Bricheva S.S. *Razrabotka metodiki izucheniya kriogennykh ob"ektov pri pomoshhi georadiolokatsii*. Development of cryogenic objects study method using ground penetrating radar. PhD thesis. Moscow state university, 2018: 25 p. [In Russian].

23. Tsibizov L.V. *Anomalii magnitnogo polya nad polygonal'no-zhil'nyimi l'dami (na primere ledovogo kompleksa v del'te r. Leny)*. Magnetic field anomalies above polygonal-wedge ice (the case of ice complex in Lena delta). PhD thesis. Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences. Novosibirsk, 2018: 24 p. [In Russian].

24. Tsibizov L., Fage A., Rusalimova O., Fadeev D., Olenchenko V., Yeltsov I., Kashirtsev V. Integrated non-invasive geophysical-soil studies of permafrost upper layer and aerial high-resolution photography. Russian-German Cooperation: Expeditions to Siberia in 2016, Berichte zur Polar- und Meeresforschung = Reports on polar and marine research, Bremerhaven, Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research. 2017, 709: 56–69.

25. Arcone, S.A., Lawson, D.E., Delaney, A.J., Strasser, J.C., Strasser, J.D. Ground-penetrating radar reflection profiling of groundwater and bedrock in an area of discontinuous permafrost. Geophysics. 1998. 63 (5): 1573–1584.

26. Tsibizov L.V. Ice wedges in anomalous magnetic field: numerical modeling. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Problems of Arctic and Antarctic. 2017, 2 (112): 75–84.

ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ

УДК 551.648

DOI: 10.30758/0555-2648-2018-64-4-439-454

МЕТОД МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОСЛЕДСТВИЙ СВЕРХПРОДОЛЖИТЕЛЬНЫХ АВАРИЙ НА ОБЪЕКТАХ НЕФТЕДОБЫЧИ В АРКТИЧЕСКОМ РЕГИОНЕ

С.Н. ЗАЦЕПА^{1*}, А.А. ИВЧЕНКО¹, В.В. СОЛБАКОВ², В.В. СТАНОВОЙ³

¹ — Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова, Москва, Россия

² — ФИЦ «Информатика и управление» РАН, Москва, Россия

³ — ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

*zatsepa@gmail.com

A METHOD FOR MODELING OF THE CONSEQUENCES OF SUPER-CONTINUOUS ACCIDENTS ON OIL PRODUCTION OBJECTS IN THE ARCTIC REGION

S.N. ZATSEPA^{1*}, A.A. IVCHENKO¹, V.V. SOLBAKOV², V.V. STANOVY³

¹ — Zubov State Oceanographic Institute, Moscow, Russia.

² — Federal Research Center «Information and Management» RAS, Moscow, Russia.

³ — State Scientific Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia

*zatsepa@gmail.com

Received August, 14, 2018

Accepted December, 5, 2018

Keywords: mathematical modelling, oil spills, long-lasting oil spill accidents.

Summary

The elimination of the oil spill at the DWH (Deep-Water Horizon) well in the Gulf of Mexico took place in almost ideal hydrometeorological conditions, which did not create serious difficulties for the operation of the response forces and means. There is a problem of assessing the possible consequences of an accident of this scale in the Arctic conditions. The simulation method of a long-lasting oil spill in the ice infested region is considered. A new model for the spreading of an elementary spill (ES) is described. A total oil spill is constructed as superposition of a number of an elementary spill. Taking into account the transport of oil by drifting ice, the potential impact of spills on vulnerable areas in the sea and coasts can reach distance of hundreds and thousands of kilometers. The distribution of ES on the surface of ice-free water is limited by the lifetime, depending on the

Citation: Zatssepa S.N., Ivchenko A.A., Solbakov V.V., Stanovoy V.V. A method for modeling of the consequences of super-continuous accidents on oil production objects in the Arctic region. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2018, 64, 4: 439–454. [In Russian]. doi: 10.30758/0555-2648-2018-64-4-439-454

properties of oil and regional hydro-meteorological conditions and elongated by the duration of the ice capture. The paper presents examples of estimating the lifetime of an ongoing oil spill in open water conditions based on the analysis of wind conditions in the area of interest by long-term series of meteorological reanalysis. On the basis of the analysis, an efficient computational algorithm to estimate the probability of a long-lasting oil spills impact on specially protected natural areas is constructed.

Поступила 14 августа 2018 г.

Принята к печати 5 декабря 2018 г.

Ключевые слова: математическое моделирование, разливы нефти, сверхпродолжительные аварии.

В работе предложен метод моделирования сверхпродолжительных выбросов нефти из аварийных скважин на морском шельфе. С учетом транспорта нефти ледяными полями область потенциального воздействия разливов на уязвимые объекты на акватории и побережьях может составлять сотни и тысячи километров. Для реализации концепции риск-анализа распространения нефти в этом случае в работе предложен метод моделирования с помощью совокупности последовательных элементарных разливов (ЭР), распространение которых на открытой воде ограничено временем жизни, зависящим от свойств нефти и региональных гидрометеорологических условий. На основании проведенного анализа построен эффективный вычислительный алгоритм для оценки вероятности воздействия продолжительного разлива нефти на уязвимые объекты природной среды.

ВВЕДЕНИЕ

Ликвидация разлива¹ нефти на скважине DWH (Deep Water Horizon) в Мексиканском заливе проходила практически в идеальных гидрометеорологических условиях, не создававших серьезных трудностей для работы сил и средств реагирования. Иная ситуация может сложиться в Арктической зоне, где проводятся активные исследования, разведка, добыча и транспортировка углеводородов на континентальном шельфе. Метеорологические и ледовые условия могут осложнять восстановление контроля над аварийной скважиной и препятствовать ликвидации разлива, приводя к тяжелым экологическим последствиям.

Возникает вопрос об оценке возможных последствий аварии подобного масштаба в арктических условиях. Чтобы учесть сезонные и межсезонные особенности такой аварии (фонтанирование скважины), необходимо рассмотреть эволюцию достаточно длительного разлива. Учитывая технические сложности при ремонте объектов нефтегазового комплекса в Арктике, продолжительность неконтролируемого истечения нефти может составлять год и более. Обозначим такую аварию как сверхпродолжительную, или «запроектную», оставляя в стороне вопросы о возможности и вероятности ее возникновения на конкретных месторождениях и о принимаемых мерах реагирования.

Разработка комплекса мероприятий по минимизации последствий «запроектных» аварий должна основываться на анализе различных вариантов распространения разливов нефти. В первую очередь следует ответить на вопрос: что будет, если в течение продолжительного промежутка времени локализация разлива по ряду причин будет невозможна. Нет сомнений, что подобный результат не следует получать экспериментальным путем, и логичным методом исследования остается математическое моделирование [1–3].

¹ Слово сочетание «разлив нефти» употребляется в статье по отношению и к процессу, и к объекту. Нефть на поверхности моря называется «разлив нефти на поверхности моря», имея в виду происхождение этого вида загрязнения, продолжающийся *разлив* нефти — здесь имеется в виду процесс истечения нефти из источника.

В целом моделирование должно дать ответы на вопросы:

- что может увидеть наблюдатель, например, с помощью средств дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в любой момент времени после начала разлива;
- что можно обнаружить в конкретном районе побережья после окончания разлива;
- в каких районах моря наиболее вероятны высокие уровни загрязнения;
- как воздействие на окружающую среду зависит от продолжительности действия аварийной скважины.

Расчеты распространения нефтяного пятна на длительные сроки (неделя, месяц, год) осуществляются на основе реконструированных гидрометеорологических условий для региона интереса с использованием данных реанализа метеорологических полей и гидродинамического моделирования гидрологических характеристик, включая характеристики ледовых условий.

МЕТОДОЛОГИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Принимая во внимание невозможность предсказания времени гипотетической аварии, необходимо рассмотреть разнообразные гидрометеорологические сценарии распространения нефти от источника сброса, который может активизироваться в любой день года, как зимой, так и летом. Учитывая продолжительность рассматриваемого разлива и ледовые условия в арктической зоне, оценки возможных последствий следует проводить для области, простирающейся на сотни и тысячи километров от источника. Продолжительный разлив нефти в море от локализованного источника не может быть описан в терминах траектории распространения, так как лишь его отдельные части могут быть описаны индивидуальными траекториями. Продолжительный разлив описывается как совокупность последовательных конфигураций нефтяного загрязнения на поверхности моря в конкретный момент времени. На открытой воде конфигурация нефтяного пятна на поверхности моря формируется совокупным действием ветра и течений, а в ледовых условиях с учетом дрейфа и нарастания/таяния ледового покрова. Когда разлив нефти происходит на открытой воде, то в результате выветривания поверхностная нефтяная пленка со временем разрушается. Для залповых выбросов нефти или выбросов, имеющих ограниченную продолжительность, можно определить время существования разлива на поверхности моря. Назовем временем жизни для разлива ограниченной продолжительности промежуток времени между моментом появления нефти и моментом ее исчезновения с поверхности моря в результате процессов выветривания. Впервые понятие «времени жизни» по отношению к залповому сбросу на поверхность моря было введено в работе [4], где оказалось удобным для описания распространения нефтяного загрязнения как пассивной неконсервативной примеси. Для продолжительных или продолжающихся разливов нефти в море всегда наступает момент, когда поступление нефти на поверхность в районе источника сброса уравнивается его удалением с постоянно растущей площади поверхностного загрязнения за счет процессов испарения, растворения, диспергирования в водную толщу и других процессов деградации. Вышеуказанный баланс между притоком и оттоком нефти наступает через разное время, зависящее от интенсивности истечения нефти, ее свойств и ветровых условий. Таким образом, и залповые, и продолжающиеся разливы нефти на морскую поверхность можно характеризовать временной характеристикой, для удобства изложения называемой «временем жизни разлива», которая может быть определена методами, рассмотренными ниже.

При разливе подо льдом происходит захват всплывшей нефти ледовым полем за счет вмораживания в ледяной покров и транспорт вместе с дрейфующим льдом до момента таяния. В этих условиях возможно частичное испарение легких фракций в результате попадания нефти в разводья между льдинами. Диспергирование нефти уменьшается по причине ограниченного развития ветровых волн в пространствах между льдинами. Таким образом, процессы, отвечающие за удаление нефти с морской поверхности, в значительной степени замедляются, а после таяния льда действуют в полной мере, поскольку нефть оказывается в условиях открытой воды.

В результате «время жизни» разлива увеличивается на промежуток времени «ледового плена», который может составлять несколько месяцев, а область распространения нефтяного загрязнения от источника сброса возрастает за счет дрейфа во льду.

Когда речь идет о реконструкции уже произошедшей аварии, связанной с утечкой в море нефти, то задача слежения за разливом решается стандартным расчетом распространения нефти, даже в условиях продолжительного сброса. Иная ситуация при рассмотрении гипотетической аварии, последствия от которой могут быть существенно различными в зависимости от момента времени гипотетической аварии на объекте нефтедобычи. Вместо одной последовательности состояний² разлива в различные моменты времени после начала разлива необходимо рассмотреть десятки тысяч подобных вариантов. Но, с другой стороны, представим себе два гипотетических разлива, отличающихся только временем старта на 1 день, положим, 1 и 2 мая. Резонно предположить, в любой момент времени после начала сброса нефти на поверхность моря эти два разлива будут полностью идентичны, как показано на схематизированном рис. 1 а, кроме части Е (А, В, С, D, Е — дневные порции), которая отсутствует у более позднего разлива, стартовавшего «по сценарию» 2 мая. Часть разлива Е (рис. 1 а, в) будем называть периферийной, хотя, вообще говоря, под периферией пятна нефти можно понимать любую часть разлива вблизи линии тройного контакта — нефть–вода–воздух. В данной статье периферийная часть разлива соответствует наиболее удаленной от источника части.

Таким образом, есть некоторые основания, чтобы представлять любой продолжительный разлив как состоящий из отдельных фрагментов или порций нефти, попавших на поверхность моря в течение заданного промежутка времени τ , как показано на рис. 1 б. Каким может быть этот промежуток времени? С одной стороны, чтобы описать длительный разлив нефти, каждая порция нефти с объемом ΔV , его составляющая, должна быть много меньше, чем общий объем сброса V , а промежуток времени τ много меньше общей продолжительности сброса T . С другой стороны, расчет и последующее хранение результатов при распространении большого количества порций или элементарных разливов (ЭР) имеет следствием большие вычислительные затраты.

Распространенным приемом при моделировании продолжительных разливов нефти является представление в виде последовательности залповых выбросов (рис. 1 в), выходящих из источника через некоторые, как правило, равные промежутки времени. Часто эти выбросы называют спиллетами (*spillet* — маленький разлив нефти) и применяют для расчета площади каждого спиллета соотношения Фэя [5, 6]. Насколько корректно в этом случае оценивается площадь нефтяного пятна?

² Под состоянием разлива здесь и далее будем понимать его конфигурацию на поверхности моря, количество нефти, попавшей в морскую среду, испарившейся в атмосферу.

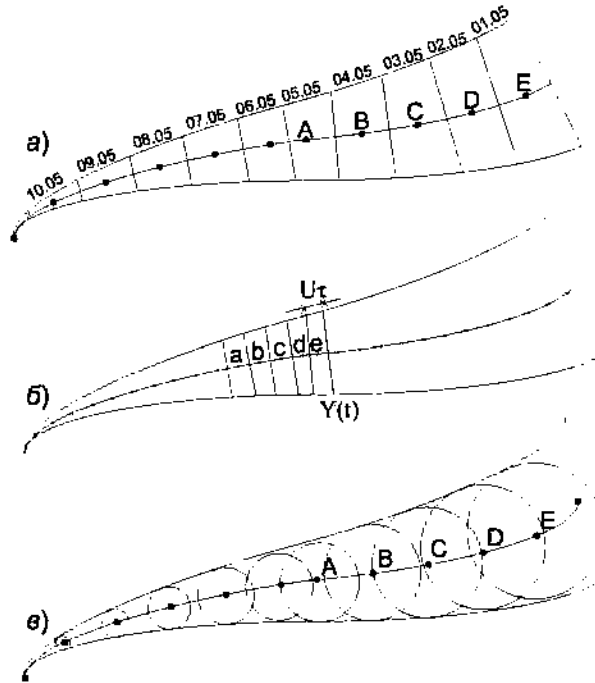


Рис. 1. Схематизации продолжительного разлива серией последовательных порций
Fig. 1. Schemes of super-continuous spillby means of a set of consecutive elementary spills

Представим объем нефти V , поступающей на поверхность от источника сброса за время t , как сумму последовательных порций объемом V_n

$$V = Qt = \sum_{n=1}^N V_n, \quad (1)$$

где Q — интенсивность выброса.

Каждая порция нефти эволюционирует независимо, и изменение ее площади $A_n(t)$ в соответствии с [5] рассчитывается как

$$A_n(t) = 6,6 \cdot \underbrace{\left(\frac{\gamma g}{v_w^{0,5}}\right)^{\frac{1}{3}}}_{k} V_n^{\frac{2}{3}} t^{\frac{1}{2}} = k V_n^{\frac{2}{3}} t^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

где $\gamma = (\rho_w - \rho_{oil})/\rho_w$, ρ_w — плотность воды, ρ_{oil} — плотность нефти, V_n — объем порции нефти; g — ускорение свободного падения, v_w — кинематическая вязкость воды, t — время от начала сброса.

Учитывая, что в продолжающемся разливе в море отдельные порции нефти появляются на поверхности не одновременно, а со сдвигом во времени, зависящим от количества «порций» N , то в каждый момент времени t площадь нефтяного пятна $A(t)$, определенную по сумме площадей отдельных порций $A_n(t)$ или элементарных разливов, можно оценить как

$$A(t) = \sum_{n=1}^N A_n(t) = \sum_{n=1}^N A_n(n\tau) = \sum_{n=1}^N A_n\left(t \frac{n}{N}\right) = k V_n^{\frac{2}{3}} t^{\frac{1}{2}} \sum_{n=1}^N \left(\frac{n}{N}\right)^{\frac{1}{2}} = k \left(\frac{V}{N}\right)^{\frac{2}{3}} t^{\frac{1}{2}} \sum_{n=1}^N \left(\frac{n}{N}\right)^{\frac{1}{2}}. \quad (3)$$

Учитывая, что приближенное значение суммы ряда в (3) (см. [7])

$$\sum_{n=1}^N \left(\frac{n}{N} \right)^{\frac{1}{2}} \approx \frac{2}{3} N \quad (\text{численная оценка}), \quad (4)$$

получим, что сумма площадей элементарных разливов зависит в любой момент времени t от разбиения на N отдельных порций:

$$A(t) \approx k \frac{2}{3} N (V^{\frac{2}{3}}) N^{-\frac{2}{3}} t^{\frac{1}{2}} \approx \frac{2}{3} k (V^{\frac{2}{3}}) t^{\frac{1}{2}} N^{\frac{1}{3}}. \quad (5)$$

Полученный результат означает, что применение соотношений Фэя [5], полученных для залпового сброса нефти на поверхность, для расчетов площади пятна может привести к существенным ошибкам.

В работе [8] была получена оценка для площади продолжающегося разлива нефти на течении

$$A(t) \approx 2 \frac{2p+3}{p+3} \underbrace{\left[\frac{p+3}{p} \right]^{\frac{p}{3p+3}} \left[\frac{1}{8s^2(p+1)} \right]^{\frac{1}{p+3}}}_{\delta} \left[\rho_{oil} g' Q^2 / (\beta) \right]^{\frac{1}{p+3}} U^{\frac{p+1}{p+3}} t^{\frac{2p+3}{p+3}}, \quad (6)$$

где $g' = g(\rho_w - \rho_{oil})/\rho_w$ — редуцированное ускорение силы тяжести, ρ_{oil} и ρ_w — плотность нефти и воды соответственно, Q — интенсивность истечения (расход), U — скорость течения, β — эмпирический коэффициент, p — показатель степени, зависящий от выбранной модели трения нефти о воду при растекании, s — коэффициент формы [8].

Увеличение полуширины нефтяного шлейфа $Y(t)$ описывается соотношением

$$Y(t) = \underbrace{\left[\frac{p+3}{p} \right]^{\frac{p}{3p+3}} \left[\frac{1}{8s^2(p+1)} \right]^{\frac{1}{p+3}}}_{\delta} \left[\frac{\rho_{oil} g' Q^2}{\beta U^2} \right]^{\frac{1}{p+3}} t^{\frac{p}{p+3}}. \quad (7)$$

Если деление на фрагменты (или порции, или элементарные разливы) провести с использованием результатов [8], предполагая, что каждая часть разлива не обязательно имеет круглую форму, а может ассоциироваться с фрагментами (рис. 1 б), условно — прямоугольниками со сторонами $2Y(t)$ в поперечном к направлению течения и Ut в продольном, то оценка площади всего разлива по площадям отдельных фрагментов будет инвариантна относительно числа порций, по крайней мере для постоянного течения в точке выброса нефти:

$$A(t) = \sum_1^N A_n(t) = \sum_1^N \underbrace{U \tau}_{dx} \cdot 2Y_n(U\tau, n\tau) \approx 2 \int_0^{X(t)} Y(x, t) dx, \quad (8)$$

где $X(t) = Ut$ в случае постоянного течения.

Определив возможность описания продолжительного разлива как совокупности отдельных частей, можно попытаться оценить «время жизни» для каждой порции как, например, время, необходимое для уменьшения средней толщины отдельной порции нефти до субмикронных толщин.

ОЦЕНКА «ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ» ДЛЯ ЭЛЕМЕНТАРНОГО РАЗЛИВА

Уменьшение толщины по оси нефтяного шлейфа без учета выветривания при выборе модели трения нефти о воду, пропорциональной квадрату разности локальных скоростей воды и нефти ($p = 2$), определится как

$$\bar{H}(x) \approx \frac{(Q/U)^{\frac{3}{5}}}{1.68[\rho_{oil}g'/\beta]^{\frac{1}{5}}t^{\frac{2}{5}}}, \quad (9)$$

где $x = Ut$.

Расчет по соотношению (9) при интенсивности истечения в $5 \text{ м}^3/\text{ч}$ и скорости течения 20 см/с дает оценку для толщины периферийной части разлива порядка 30 мкм через 72 ч и 20 мкм примерно через 200 ч после начала сброса. Дальнейшее изменение толщины слоя нефти на поверхности будет обусловлено, кроме непрекращающегося растекания, несколькими процессами — испарением легких фракций в атмосферу и диспергированием капель нефти в водную толщу за счет обрушения ветровых волн. Роль испарения можно учесть, полагая, что все легколетучие компоненты сырой нефти с температурами кипения фракций до 200°C (как правило, $30\text{--}40\%$) испаряются в течение первых суток после аварии. Грубую оценку выветривания можно сделать, воспользовавшись результатами работы [9], в которой изменение толщины пленки нефти за счет диспергирования оценено как

$$\frac{\partial h_{oil}}{\partial t} = \begin{cases} -h_{oil} \cdot TOR \cdot F_{up}(d_{50}^N), & h_{oil} \geq h_T \\ -h_T \cdot TOR, & h_{oil} < h_T \end{cases}, \quad (10)$$

где h_{oil} — толщина пленки нефти, h_T — пороговая толщина нефти на поверхности моря, d_{50}^N — параметр распределения капель диспергированной нефти по размерам, зависящий от плотности и вязкости нефтяного остатка на поверхности моря и межфазного натяжения на границе нефть–вода, TOR — скорость оборачивания поверхности моря (*turnover rate*, впервые определенная в [10]), $F_{up}(d_{50}^N)$ — множитель, необходимый для учета доли капель нефти, уходящих в слой волнового перемешивания и далее, в более глубокие слои моря.

$$TOR = \int c\Lambda(c)dc \approx K_{TOR}u_*^3gc_T^{-4} \approx 1,1 \cdot 10^{-7}W_{10}^3, \quad (11)$$

где $\Lambda(c)dc$ — длина обрушивающихся фронтов волн на единице поверхности моря, движущихся с фазовой скоростью от c до $c + dc$, c_T — пороговая фазовая скорость волн, при которой начинается обрушение ($c_T = 2,5 \text{ м/с}$), u_* — динамическая скорость в приводном слое атмосферы, коэффициент $K_{TOR} \approx 1,4 \cdot 10^{-2}$, W_{10} — скорость ветра над нефтяным пятном.

Для тонких пленок нефти корректирующий множитель в (10) стремится к единице, и из (10) следует, что тонкая нефтяная пленка за счет диспергирования ветровыми волнами может уменьшаться почти в три раза ($\sim 2,7$) за время порядка $1/TOR$. А пленки нефти с толщиной $h_{oil} < h_T$ в соответствии с соотношением (10) удаляются с поверхности моря за время порядка $1/TOR$. Для скорости ветра в 6 м/с , 7 м/с и 10 м/с промежутки времени $1/TOR$ приближенно равны 12 , 8 и 3 ч соответственно. Рассмотрим некоторые статистические характеристики ветровых условий для залива Чихачева в Японском море (нефтяной терминал Де Кастри) на примере 10-летнего ряда метеорологического реанализа. По многолетнему ряду значений скоростей ветра для одной или нескольких точек на акватории, рассчитанных в метеорологическом реанализе, можно определить вероятность того, что на различных интервалах наблюдений (от суток до двух месяцев) скорость

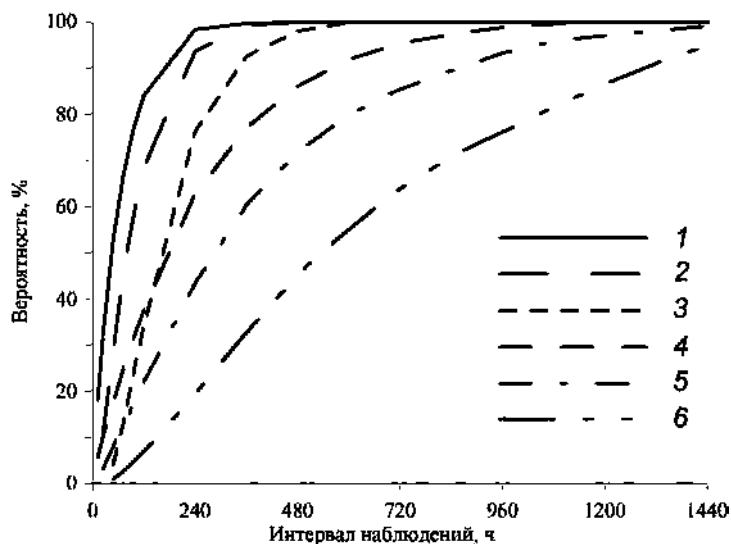


Рис. 2. Вероятность превышения скорости ветра 7 и 10 м/с в течение 12, 24 и 48 ч в зависимости от интервала наблюдений.

1 — скорость ветра равна 7 м/с, промежуток времени превышения — 12 часов; 2 — 7 м/с и 24 ч; 3 — 7 м/с и 48 ч; 4 — 10 м/с и 12 ч; 5 — 10 м/с и 24 ч; 6 — 10 м/с и 48 ч

Fig. 2. The probability of exceeding the wind speed 7 and 10 m/s during 12, 24 and 48 hours depending on the observation interval.

1 — wind speed 7 m/s, time interval of exceeding — 12 hours; 2 — 7 m/s and 24 hours; 3 — 7 m/s and 48 hours; 4 — 10 m/s and 12 hours; 5 — 10 m/s and 24 hours; 6 — 10 m/s and 48 hours

ветра будет превышать определенные значения (7 м/с, 10 м/с) в течение заданного промежутка времени (12, 24 или 48 ч), необходимого для удаления пленки нефти с поверхности за счет диспергирования ветровыми волнами.

На рис. 2 показаны результаты обработки 10-летнего ряда ежечасных значений скорости ветра над морем, цифрами обозначены различные варианты расчетов вероятности. Из рис. 2 можно сделать вывод, что в течение любого непрерывного интервала наблюдений длительностью, например, 10 суток (240 ч) скорость ветра более 7 м/с суммарной продолжительностью 12 ч и более будет реализовываться с вероятностью практически 100 %, продолжительностью 24 ч и более — порядка 95 %, продолжительностью более 48 часов — 76 %.

Выберем значение пороговой вероятности, равное 0,99, и определим длительность интервала наблюдений, обеспечивающего превышение этого значения при выбранных скоростях ветра и интервалах суммарного времени превышения. Полученные результаты приведены в таблице. Из результатов, приведенных в таблице, например, следует, что при скорости ветра, превышающей 6 м/с, толщина пленки нефти на поверхности моря уменьшится в $10(T_{10})$ раз за 27 ч, а в 20 раз за 35 ч. Такие условия (см. таблицу) для Татарского пролива Охотского моря в летний период реализуются с вероятностью 99 % за периоды наблюдений порядка 264 и 324 ч.

Приведенные данные позволяют оценить «время существования» элементарного разлива нефти. Если считать, что элементарный разлив прекращает существование при толщине пленки в 1 мкм, то, например, периферийная часть разлива

**Длительность интервалов наблюдений (ч), обеспечивающих с вероятностью 0,99
длительность суммарного превышения для выделенных значений скорости ветра**

Скорость ветра, м/с	1/TOR, ч	Длительность промежутка превышения, ч									Время для уменьшения толщины нефти, ч		
		3	6	8	11	15	18	24	27	36	T_2	T_{10}	T_{20}
6	12	168	180	192	216	228	240	264	276	324	8	27	35
7	7	216	228	252	264	276	312	348	372	444	5	17	22
8	5	252	276	300	336	372	444	516	552	636	3	11	15
9	3	372	480	504	624	660	660	744	816	912	2	8	10
10	3	660	816	924	960	1032	1140	1428	–	–	2	6	8

Примечание: T_2 , T_{10} , T_{20} — оценки времени уменьшения толщины пятна нефти на поверхности моря за счет процессов диспергирования.

с интенсивностью истечения $1 \text{ м}^3/\text{ч}$ растекается до 14 мкм за 45 ч , а испарение за сутки уменьшает толщину на 30% до 10 мкм . Если принять $h_T = 10 \text{ мкм}$ в соотношении (10), то для диспергирования оставшейся нефти потребуется еще 12 ч . Это соответствует длительности интервала наблюдений приблизительно 216 ч , суммарно — около 260 ч или $10\text{--}11$ суток, рассчитанная длительность — оценка сверху.

Вышеприведенные рассуждения следует рассматривать как оценки, поскольку часть капель возвращается к поверхности моря за счет положительной плавучести. В любом случае, есть основания полагать, что объем быстро растекающейся в первые часы после сброса на морскую поверхность нефти будет постоянно уменьшаться, причем скорость испарения будет падать вследствие потери компонентов с низкими температурами кипения, а скорость диспергирования может увеличиваться из-за уменьшения толщины пленки нефти и увеличения плотности ее остатка на поверхности моря³.

Для рассматриваемого района были проведены расчеты распространения и выветривания элементарного разлива (ЭР) нефти, оценка площади которого была получена с учетом соотношения (7) для интенсивности истечения $Q = 1 \text{ м}^3/\text{ч}$. В расчетах учитывались процессы растекания, диспергирования и испарения нефти для того же набора ветровых условий, который исследовался выше. Была оценена статистика «времени жизни» ЭР — промежутка времени от начала разлива до момента уменьшения толщины менее 1 мкм . Эмпирическая функция распределения времени жизни ЭР для представительного ансамбля сценариев распространения нефти по 10-летнему ряду полей ветра, полученных в результате метеорологического реанализа для района залива Чихачева Японского моря, приведена на рис. 3. Виден рост почти линейного характера в пределах семи суток, далее имеется «хвост» с малым количеством случаев в области 79 сут . Максимальное значение «времени жизни» для разливов с интенсивностью истечения нефти $1 \text{ м}^3/\text{ч}$ оказалось равным $9,3 \text{ сут}$, а с вероятностью 99% толщина нефти на поверхности моря у периферийных частей разлива уменьшается до 1 мкм за 8 сут .

Концепция «времени жизни» для разлива нефти фиксированного объема меняет представление об оценках максимальной площади пятна, так как эти оценки, с одной стороны, зависят от ветровых условий и, с другой стороны, имеют ограниченную длительность.

³ Подобные рассуждения справедливы для нефти и нефтепродуктов, не склонных к образованию стабильных эмульсий типа вода-в-нефти на поверхности моря.

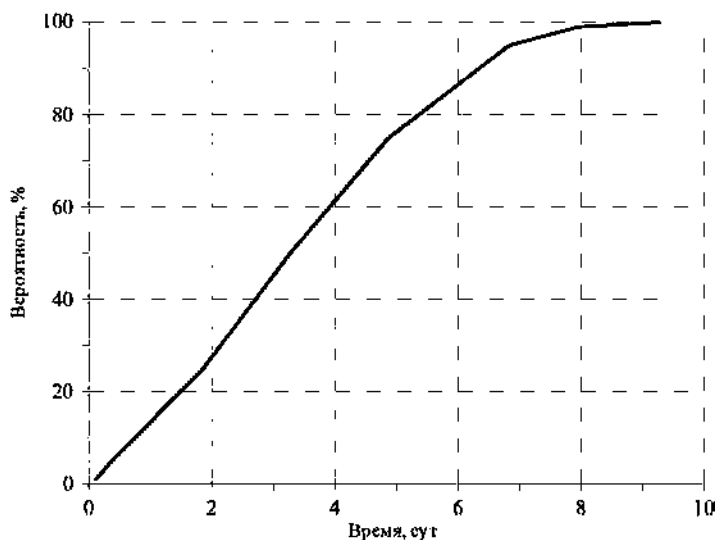


Рис. 3. Эмпирическая функция распределения «времени жизни» ЭР для условий в заливе Чихачева Японского моря

Fig. 3. The empirical distribution function of the “lifetime” of the ES for conditions in the Chikhachev Bay of the Japan Sea

В качестве другого примера ограниченности пространственно-временной эволюции продолжительного разлива нефти приведем результаты расчетов с использованием модели SPILLMOD. На рис. 4 представлены расчеты распространения нефти по поверхности моря (на открытой воде) для постоянно действующего источника выброса нефти на шельфе Охотского моря, примыкающего к северо-восточной оконечности о. Сахалин. Результаты были получены с использованием модели SPILLMOD, в которой распределение толщины и конфигурация нефтяного пятна рассчитываются по уравнениям типа «мелкой воды» с применением оригинальной эйлерово-лагранжевой вычислительной технологии [11]. Важным для данного исследования является тот факт, что в модели SPILLMOD не используется представление разлива в виде совокупности спиллетов или лагранжевых элементов. Конфигурации пятна нефтяного загрязнения через 5, 10, 20 и 30 сут. (см. рис. 4) после начала сброса дают основания для утверждения, что для рассматриваемой интенсивности⁴ поступления нефти на поверхность моря спустя 20 сут. распространения от источника протяженность и площадь нефтяного пятна стабилизируются и меняются/колеблются вокруг некоторого среднего значения, зависящего от свойств нефти и гидрометеорологических условий в регионе интереса. Спустя месяц и более после начала аварии аэрокосмический мониторинг поверхности моря будет фиксировать шлейф нефтяного загрязнения, «привязанный» одним концом к точке сброса и простирающийся на открытой воде в пределах нескольких десятков и сотен километров от источника выброса. В некоторые моменты времени нефтяное пятно

⁴ В контексте данной методической работы конкретная интенсивность истечения нефти не столь важна. Для каждого участка шельфовой зоны морей РФ возможные дебиты неконтролируемого истечения из скважины должны определяться специалистами по разведке и добыче нефти.

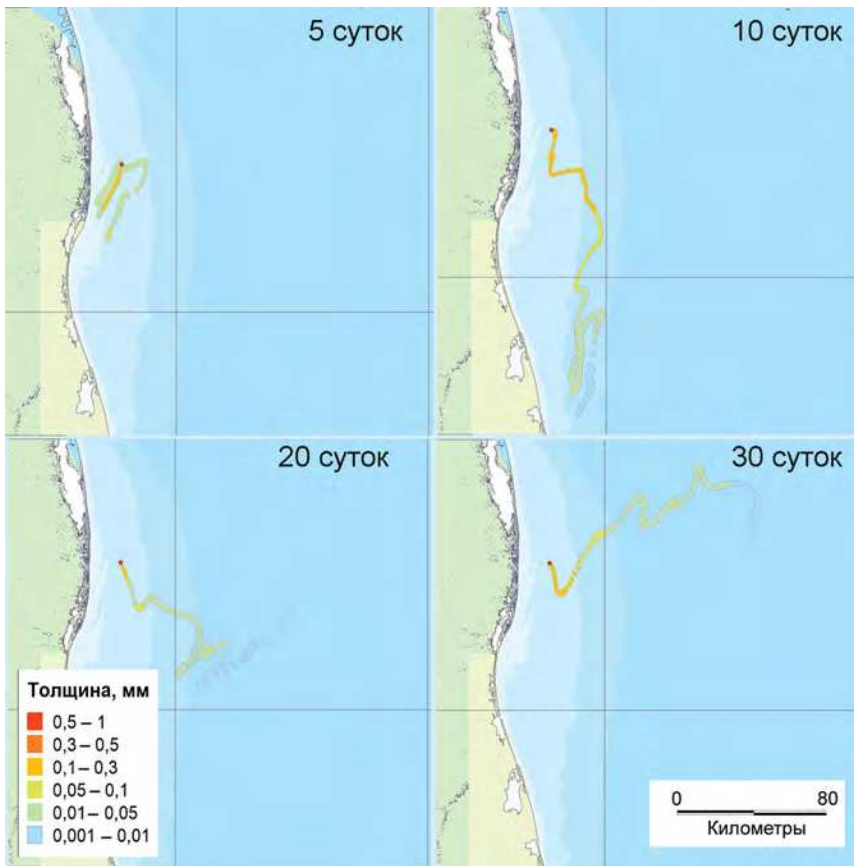


Рис. 4. Примеры расчета распространения нефти от постоянно действующего источника

Fig. 4. Simulation examples of the distribution of oil slick from the continuous source

(шлейф) будет приближаться к берегу и приводить к интенсивному осаждению нефти в береговой зоне, где нефтяное загрязнение может накапливаться. Средняя площадь шлейфа нефтяного загрязнения поверхности моря остается относительно стабильной характеристикой разлива заданной интенсивности, так же, как и соотношения площадей с различной степенью загрязнения. Более интенсивные загрязнения (области с наибольшей толщиной пленки нефти) занимают относительно небольшие доли площади разлива в целом и относятся к участкам акватории, непосредственно примыкающей к источнику.

Результаты, представленные на рис. 4, могут быть получены с использованием технологии моделирования элементарных разливов (ЭР). С этой целью необходимо провести расчеты состояния ЭР на срок порядка «времени жизни», зависящий от интенсивности истечения нефти или нефтепродукта. Пусть, для примера и определенности, время жизни элементарного разлива составляет 30 суток. Для целей нашего исследования достаточно сделать оценку сверху, выбрав для определения «времени жизни» разлива максимально благоприятные метеорологические условия, к которым относятся слабые и умеренные ветра, которые, в свою очередь, не могут быть бесконечной продолжительности и временами сменяются на достаточно сильные

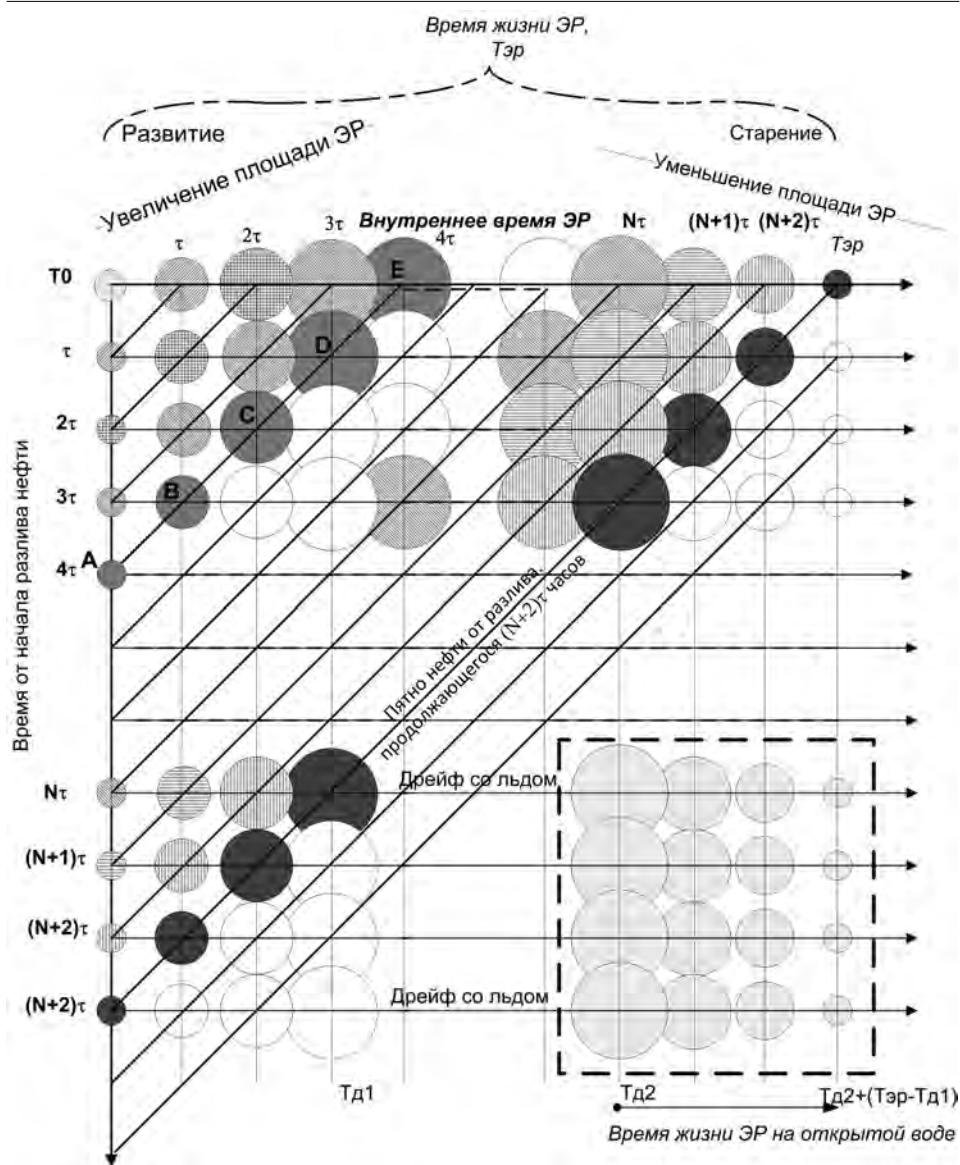


Рис. 5. Схема принципа составления продолжительного разлива из набора элементарных сбросов нефти

Fig. 5. Scheme of the principle of a continuous spill presentation with a set of elementary oil spills ветра, приводящие к диспергированию разлива в водную толщу. Тогда, используя подход, описанный выше, и определяя площадь каждого из ЭР по соотношениям (7), можно выбрать временной шаг τ между последовательными ЭР, например, равным 1 ч. Тогда состояние/конфигурация на поверхности моря продолжающегося выброса нефти может быть представлена совокупностью из 720 (30 сут. $\times$ 24 ч) элементарных разливов. При этом «последний» элементарный разлив из всей совокупности будет находиться вблизи источника выброса, а другие, возможно, долго «путешествующие»

по поверхности моря, разрушатся до безопасных концентраций или окажутся на берегу, прожив много меньше 30 суток. Важным в данном методе моделирования является факт конечного времени жизни ЭР, который может быть много меньше продолжительности T_B выброса нефти. Дополнительным основанием для разбиения продолжительного разлива на элементарные разливы (лагранжевы элементы) является то, что в источнике и на периферии разлива нефть имеет совершенно разные свойства вследствие процессов выветривания.

На рис. 5 показан «конструктор» разливов или принцип составления разлива нефти любой продолжительности по базовым расчетам эволюции элементарных разливов — фрагментов нефтяного пятна на поверхности моря, формирующегося при непрерывном истечении от источника сброса. На рисунке кружками с одинаковой закраской показаны элементарные разливы, из которых, как в конструкторе, можно составить конфигурацию продолжительного выброса нефти на любой момент времени. Диагональные линии соединяют элементарные разливы, относящиеся к одному моменту времени. Так, состояние разлива, начавшегося в момент времени T_0 через промежуток времени $4t$, можно представить в виде совокупности ЭР-ов, условно обозначенных на рисунке буквами А, В, С, D, Е. В начальные моменты времени площадь каждого ЭР увеличивается, а впоследствии за счет, главным образом, процессов испарения, диспергирования и осаждения на берег масса нефти, сопоставленная рассматриваемому ЭР, уменьшается, вплоть до исчезновения с поверхности моря. При продолжительном истечении нефти из аварийного источника возможны ситуации, когда поднимающаяся к поверхности нефть будет переноситься с ледяным покровом на большие расстояния в течение всего ледового периода вплоть до момента таяния льда. Эти ситуации отмечены на рис. 5 текстовыми вставками «Дрейф со льдом», который, вообще говоря, может продолжаться разное время, а места вытравивания нефти из ледяного покрова будут распределены на значительной площади рассматриваемого водного бассейна.

Расчет движения нефти, вмороженной в ледяной покров, производится на основании данных о движении дрейфующих льдов. Если порция нефти из продолжительного разлива попадает на поверхность моря, покрытую льдом, то на первом шаге рассчитывается перенос льда с вмороженной нефтью до момента таяния, а затем, на втором шаге, трансформация нефтяного пятна на открытой воде за счет выветривания, переноса и растекания. Возможны ситуации, когда часть нефтяного разлива в течение некоторого времени распространяется по открытой воде (1-й шаг) и затем попадает в ледовый « плен ». После этого проводится расчет переноса ледового образования вместе с нефтью до момента таяния (2-й шаг) и затем расчет ее « обычной » трансформации на поверхности моря (3-й шаг). Несмотря на возможную продолжительность моделирования отдельных траекторий перемещения элементарных разливов, достигающую с учетом дрейфа со льдом нескольких месяцев, консервативная оценка воздействия на особо охраняемую природную территорию (ООПТ) предполагает, что, распространяясь вместе с ледовыми полями, нефть сохраняет свойства, сформировавшиеся за счет выветривания к моменту ледового плена.

После вытравивания из ледового покрова, продолжая распространяться на открытой воде, элементарные разливы или части длительного сброса нефти на поверхность моря будут продолжать подвергаться выветриванию под действием гидрометеорологических факторов. В любом случае, эволюция разлива нефти на открытой воде будет складываться из промежутка времени дрейфа по поверхности

моря Тд1 до «вмораживания» в ледяной покров и промежутка времени дрейфа после вытравливания из льда Тд2, в сумме $T_{д1} + T_{д2} \approx T_{эр}$ равных «времени жизни» элементарного разлива, характерного для заданной интенсивности истечения нефти.

Запись результатов моделирования в виде матрицы состояний ЭР-ов размерностью $M \times N$, где $M = T_{в}/\tau$ — количество ЭР-ов, $N = T_{эр}/\tau$, позволяет провести оценки вероятности потенциального воздействия продолжительного разлива на различные уязвимые объекты в регионе интереса в период открытой воды. Воздействие продолжительного разлива нефти в море на ООПТ можно представить как последовательность воздействий его отдельных частей или элементарных разливов. Состояние элементарного разлива описывается набором параметров, среди которых: положение (координаты), внутреннее время в пределах «времени жизни», формально совпадающее с индексом J двумерного массива ($J = 1, N$), количество нефти на поверхности и время, прошедшее с момента выброса на поверхность моря, учитывающее продолжительность ледового дрейфа. Поскольку перенос элементарного разлива дрейфующим льдом рассчитывается для точечного объекта, то предполагается, что геометрические размеры элементарного разлива в процессе дрейфа не меняются, а после вытравливания продолжают эволюционировать в соответствии с «правилами» трансформации на открытой воде. Поскольку момент возможной аварии на объектах нефтегазового сектора морской деятельности неизвестен, то оценку воздействия следует рассчитывать в виде вероятности наступления негативных последствий для конкретного района или объекта на акватории с указанием возможного масштаба воздействия. Если i, j -й элементарный разлив ($i = 1, M; j = 1, N$) попадает в «санитарную» зону ООПТ, то это событие считается неблагоприятным, а количество таких событий, отнесенное к общему количеству рассматриваемых сценариев распространения нефти, представляет оценку вероятности воздействия в случае реализации «запроектной» аварии. Масштаб воздействия «запроектной» аварии, связанной с продолжительным выбросом в море нефти, можно определить как статистику количества нефти, потенциально попадающей в области ООПТ. По отношению к воздействию на побережья, являющиеся частью морских ООПТ, эта количественная оценка воздействия, скорее всего, будет относиться к так называемым консервативным оценкам, так как в рамках массовых расчетов распространения нефти по реконструированным гидрометеорологическим условиям за 10–20–30 лет трудно/невозможно детально рассчитать взаимодействие нефтяного разлива или его части (ЭР) с береговым контуром. Принято считать, что воздействие на береговую зону нефтяной разлив может оказывать только в период открытой воды, а лед выполняет роль искусственных барьеров, аналогично боновым заграждениям [12].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе описана возможность представления продолжительного разлива нефти как совокупности лагранжевых элементов или элементарных разливов с инвариантной, относительно разбиения по времени, оценкой площади разлива в целом.

В работе представлены примеры оценки «времени жизни» продолжающегося нефтяного разлива в условиях открытой воды на основании анализа ветровых условий в районе интереса по многолетним рядам метеорологического реанализа.

В работе описан метод оценки вероятности воздействия на морские ООПТ в результате «запроектных» аварий на объектах нефтегазового комплекса в Арктической зоне. Принимая во внимание, что продолжительность разливов нефти

при авариях в труднодоступных регионах Арктики может быть достаточно большой, превышающей год и более, целесообразно до возникновения чрезвычайной ситуации провести оценки вероятности воздействия на уязвимые объекты на акватории и побережьях с учетом переноса нефти ледовыми полями на большие расстояния, вплоть до момента таяния льда. Область воздействия разливов нефти от конкретного источника сброса в результате переноса льдами увеличивается многократно и может достигать сотен и тысяч километров линейного масштаба.

Предложенный в работе алгоритм проведения расчетов и хранения результатов для их последующей обработки представляется весьма экономичным, с очевидной возможностью использования технологий высокопроизводительных параллельных вычислений, так как эволюция каждого из M элементарных разливов считается независимо. Тем самым при реализации концепции риск-анализа разливов нефти в море [3] сокращаются вычислительные затраты и объемы данных для хранения. Несмотря на кажущуюся катастрофичность сценария масштабного выброса нефти на поверхность моря в арктических регионах, его экологические последствия представляются поддающимися оценке, и, значит, к ним можно заблаговременно подготовиться и эффективно их минимизировать.

Описанный подход к оценке вероятности воздействия от сверхпродолжительных выбросов нефти в море возможен при условии предварительно проведенного реанализа гидрометеорологических полей, включая характеристики ледовых условий, такие, как сплоченность и скорость дрейфа ледяного покрова.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 18-07-00373 и № 18-07-01001.

Acknowledgments. This work has been partly supported by RFBR grants № 18-07-00373 and № 18-07-01001.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Reed M., Johansen O., Brandvik P.J., Daling P., Lewis A., Fiocco R., Mackay D., Prentki R. Oil spill modeling towards the close of the 20th century: overview of the state-of-the-art // *Spill Science Technology Bulletin*. 1999. № 5. P. 3–16.
2. Stolzenbach K.D., Madsen O.S., Adams E.E., Pollack A.M., Cooper C.K. A review and evaluation of basic techniques for predicting the behavior of surface oil slicks // *Massachusetts Institute of Technology*. 1977. Report № MITSG 77-8. 325 p.
3. Зацепя С.Н., Ивченко А.А., Журавель В.И., Солбаков В.В., Становой В.В. Анализ риска распространения аварийных разливов нефти на примере Обской губы Карского моря // *Арктика: экология и экономика*. 2014. № 3 (15). С. 30–45.
4. Audunson T. The fate and weathering of surface oil from the Bravo blowout // *Marine Environmental Res.* 1980. V. 3. № 1. P. 35–61.

REFERENCES

1. Reed M., Johansen O., Brandvik P.J., Daling P., Lewis A., Fiocco R., Mackay D., Prentki R. Oil spill modeling towards the close of the 20th century: overview of the state-of-the-art. *Spill Science Technology Bulletin*. 1999, 5: 3–16.
2. Stolzenbach K.D., Madsen O.S., Adams E.E., Pollack A.M., Cooper C.K. A review and evaluation of basic techniques for predicting the behavior of surface oil slicks. *Massachusetts Institute of Technology*. 1977. Report MITSG 77-8: 325 p.
3. Zatsepa S.N., Ivchenko A.A., Zhuravel' V.I., Solbakov V.V., Stanovoy V.V. Risk analysis of oil spill spread: Case of the Ob Bay of the Kara Sea. *Arktika: ekologiya i ekonomika*. Arctic: ecology and economic. 2014, 3 (15): 30–45. [In Russian].
4. Audunson T. The fate and weathering of surface oil from the Bravo blowout. *Marine Environmental Res.* 1980, 3, 1: 35–61.

5. *Fay J. A.* Physical processes in the spread of oil on a water surface // International Oil Spill Conference. American Petroleum Institute, 1971. V. 1971. № 1. P. 463–467.
6. *Fay, J.A., Hoult, D.P.* Physical processes in the spread of oil on a water surface. AD-726 281. United States Coast Guard, Washington DC, 1971. 16 p.
7. *Двайт Г.Б.* Таблицы интегралов и другие математические формулы. М.: Наука, 1978. 224 с.
8. *Зацепя С.Н., Ивченко А.А., Солбаков В.В., Становой В.В.* О некоторых инженерных оценках параметров нефтяного разлива в море // Проблемы Арктики и Антарктики. 2018. Т. 64. № 2. С. 208–221.
9. *Зацепя С.Н., Ивченко А.А., Коротенко К.А., Солбаков В.В., Становой В.В.* Феноменологическая модель диспергирования нефтяного разлива в море и параметризации некоторых процессов // Океанология. 2018. Т. 58. № 6. С. 843–853.
10. *Phillips O.M.* Spectral and statistical properties of the equilibrium range in wind-generated gravity waves // J. Fluid Mech. 1985. V. 156. P. 505–531.
11. *Овсиенко С.Н., Зацепя С.Н., Ивченко А.А.* Моделирование разливов нефти и оценка риска воздействия на окружающую среду // Тр. ГОИН. 2005. Вып. 209. С. 248–271.
12. *Potter S., Buist I., Trudel K., Dickins D., Owens E.* Spill response in the Arctic offshore (ed. D. Scholz). Shell Exploration and Production Services, 140 p. URL: <https://www.shell.com/content/dam/shell-new/local/country/rus/downloads/pdf/wpc/new-oil/osr-book-rus.pdf> (дата обращения 10.07.2018).
5. *Fay J. A.* Physical processes in the spread of oil on a water surface. International Oil Spill Conference. American Petroleum Institute. 1971. 1971, 1: 463–467.
6. *Fay, J.A., Hoult, D.P.* Physical processes in the spread of oil on a water surface. AD-726 281. United States Coast Guard, Washington, DC, 1971. 16 p.
7. *Dwight H.B.* Tables of integrals and other mathematical data (Russian edition). Moscow: Nauka, 1978: 224 p. [In Russian].
8. *Zatsepa S.N., Ivchenko A.A., Solbakov V.V., Stanovoy V.V.* Some engineering estimations of oil spill parameters in the marine environment. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2018, 64, 2: 208–221. [In Russian].
9. *Zatsepa S.N., Ivchenko A.A., Korotenko K.A., Solbakov V.V., Stanovoy V.V.* Phenomenological model of natural dispersion of a marine oil spill and some associated processes parameterizations. *Okeanologiya*. Oceanology. 2018, 58, 6: 769–777. [English translation].
10. *Phillips O.M.* Spectral and statistical properties of the equilibrium range in wind-generated gravity waves. J. Fluid Mech. 1985, 156: 505–531.
11. *Ovsienko S.N., Zatsepa S.N., Ivchenko A.A.* *Modelirovanie razlivov nefi i ocenka riska vozdejstviya na okruzhayushchuyu sredu*. *Trudy Gosudarstvennogo Okeanographicheskogo instituta*. Proc. of SOI. 2005, 209: 248–271. [In Russian].
12. *Potter S., Buist I., Trudel K., Dickins D., Owens E.* Spill response in the Arctic offshore (ed. D. Scholz). Shell Exploration and Production Services: 140 p. Available at: <https://www.shell.com/content/dam/shell-new/local/country/rus/downloads/pdf/wpc/new-oil/osr-book-rus.pdf> (accessed 10.07.2018).

СТРАНИЦЫ ИСТОРИИ

УДК 910.424.2(99)

DOI: 10.30758/0555-2648-2018-64-4-3-455-458

ОТЕЧЕСТВЕННОЙ АНТАРКТИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ ПОЛЮС НЕДОСТУПНОСТИ — 60 ЛЕТ

В.В. ЛУКИН

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

lukin@aari.ru

RUSSIAN ANTARCTIC STATION POLE OF INACCESSIBILITY — 60 YEARS OLD

V.V. LUKIN

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

lukin@aari.ru

Received October, 29, 2018

Accepted December, 12, 2018

Keywords: Antarctica, sledge-tracked train, station Pole of Inaccessibility.

Summary

The history of the Antarctic station The Pole of Inaccessibility establishing and opening up in 1958 is recorded here. The aim of this station was academic study within the scope of the IGY general program 1957–1958 of Soviet scientists.

Поступила 16 ноября 2018 г.

Принята к печати 12 декабря 2018 г.

Ключевые слова: Антарктида, санно-гусеничный поезд, станция Полюс недоступности.

Излагается история организации и открытия сезонной антарктической станции Полюс недоступности в 1958 г. в целях проведения научных исследований в рамках участия советских ученых в общей программе МГГ 1957–1958 гг.

14 декабря 2018 г. исполняется 60 лет со дня открытия советской сезонной антарктической станции Полюс недоступности. Ее создание было определено необычной исторической ситуацией.

С 30 сентября по 4 октября 1954 г. Международный совет научных союзов (МСНС) провел в Париже расширенное заседание Специального международного комитета по проведению Международного геофизического

Citation: Lukin V.V. Domestic Antarctic station Polyus inaccessibility — 60 years. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2018, 64, 4: 455–458. [In Russian]. doi: 10.30758/0555-2648-2018-64-4-455-458

года (МГГ) с 1 июля 1957 г. по 31 декабря 1958 г. Наибольшее внимание в его программе уделялось выполнению геофизических, метеорологических, океанографических, гляциологических, геологических и биологических исследований в антарктическом регионе. Руководитель советской делегации на этом заседании член-корреспондент АН СССР геолог Владимир Владимирович Белоусов при обсуждении вопросов распределения национальной научной деятельности на шестом континенте по программе МГГ предложил от имени Правительства Советского Союза проект создания научной станции на Южном географическом полюсе. Однако руководство совещания предпочло аналогичное предложение США, которые в 1956 г. открыли в этой географической точке свою станцию Амундсен Скотт. В результате В.В. Белоусов был вынужден оперативно подготовить и внести новое предложение о создании отечественных внутриконтинентальных станций в Антарктиде. Он предложил организацию советских научных исследований по программе МГГ в районе Южного геомагнитного полюса и полюса относительной недоступности. Эти советские предложения были включены в общую программу МГГ 1957–1958 гг. [1].

Станция Восток была открыта 16 декабря 1957 г. в районе Южного геомагнитного полюса в координатах $78^{\circ} 28' \text{ ю.ш.}$, $106^{\circ} 48' \text{ в.д.}$, высота над уровнем моря 3488 м, силами 2-й Комплексной антарктической экспедиции (КАЭ) АН СССР. Основной экспедиционно-логистической задачей 3-й КАЭ стало создание научной станции на Полюсе относительной недоступности (82° ю.ш. , 55° в.д.). Определение места расположения точки полюса относительной недоступности в Антарктиде является достаточно сложной и неоднозначной картографической задачей из-за значительной ежегодной изменчивости конфигурации ее ледяных берегов. Так, в конце XX в. специалисты Британского института им. Р. Скотта определяли географические координаты этой точки как $85^{\circ} 50' \text{ ю.ш.}$, $65^{\circ} 47' \text{ в.д.}$, специалисты организации Poles.com считают, что данный полюс находится в точке $82^{\circ} 53' \text{ ю.ш.}$, $55^{\circ} 04' \text{ в.д.}$, а ученые Британской антарктической службы — в точке $83^{\circ} 50' \text{ ю.ш.}$, $65^{\circ} 43' \text{ в.д.}$ Все эти координаты определены с использованием современных

спутниковых данных и высокоточных карт береговой линии Антарктиды. Вполне понятно, что во второй половине 1950-х гг. ученые не располагали всей этой информацией, поэтому положение Полюса относительной недоступности в Антарктиде определялось на основе тех скудных информационных ресурсов, которыми к этому времени обладало международное антарктическое сообщество [2].

23 декабря 1957 г. в район места расположения будущей новой станции на полюсе относительной недоступности Антарктиды был выполнен рекогносцировочный полет на самолете Ил-12, командиром которого был В.М. Перов, штурманом — Б.С. Бородин. В этом полете со станции Мирный принимали участие начальник 2-й КАЭ А.Ф. Трешников и начальник 3-й КАЭ Е.И. Толстиков. По результатам барометрических высотных измерений было установлено, что полюс относительной недоступности находится на высоте 3719 м над уровнем моря.

26 декабря 1957 г. со станции Мирный вышел санно-гусеничный поход (СГП) в составе десяти тягачей. В задачу похода входило материально-техническое обеспечение внутриконтинентальных станций Комсомольская и Восток и открытие станции на полюсе недоступности, которая должна была быть названа Советская. 15 января 1958 г. СГП прибыл на станцию Комсомольская и после кратковременного отдыха и ремонта транспортной техники в составе восьми тягачей направился на станцию Восток. После возвращения на станцию Комсомольская 3 февраля СГП двинулся в юго-западном направлении к точке полюса относительной недоступности. Этот поход возглавил начальник 3-й КАЭ Е.И. Толстиков. 10 февраля 1958 г. в точке с координатами $78^{\circ} 24' \text{ ю.ш.}$, $87^{\circ} 35' \text{ в.д.}$ на высоте 3570 м над уровнем моря СГП остановился, и его участники приступили к строительству станции Советская, которая официально была открыта 16 февраля 1958 г. Начальником станции был назначен В.К. Бабарыкин — сотрудник Центральной аэрологической обсерватории. 18 февраля СГП в составе шести машин вышел в обратный путь через станции Комсомольская и Пионерская и 5 марта 1958 г. прибыл в Мирный.

Изменение местоположения станции Советская относительно фактического на-



Начало похода.
Поезд выходит со станции Молодежная

хождения полюса относительной недоступности было связано с невозможностью продолжать СГП в условиях наступающей антарктической осени, характеризующейся резким понижением температуры воздуха во внутриконтинентальных районах Антарктиды. В то же время наша страна должна была выполнить свои обязательства перед научным международным сообществом по проведению наблюдений непосредственно в районе полюса недоступности до 31 декабря 1958 г. В связи с этим 14 декабря 1958 г. с помощью санно-гусеничного похода под руководством геофизика Ю.Н. Авсюка из Института физики Земли АН СССР в точке с координатами $82^{\circ} 07' \text{ ю.ш.}$, $55^{\circ} 02' \text{ в.д.}$, на высоте 3719 м над уровнем моря была открыта сезонная станция Полюс недоступности. Она проработала до 26 декабря 1958 г., а ее коллектив, выполнив намеченную программу метеорологических, геофизических и гляциологических наблюдений, вернулся на станцию Мирный тем же санно-гусеничным походом.

Таким образом, СССР, выполняя свои обязательства по программе МГГ, организовал две круглогодично действующие внутрикон-



Ремонт коробки передач на АТТ 15
во время похода

тинентальные станции Восток и Советская, а также сезонную станцию на полюсе недоступности. Станция Советская прекратила выполнение своих научных программ и была законсервирована 3 января 1959 г., когда на нее пришел СГП сезонной базы Полюс недоступности, оба коллектива вернулись на станцию Мирный. Станция Восток работает и в настоящее время [3].

Впоследствии участники советских научных СГП станцию Полюс недоступности посещали дважды. Первый раз — в 1964 г., когда участники научного СГП из состава 9-й САЭ выполняли программу сейсмических, гляциологических, метеорологических, геомагнитных и геодезических исследований по маршруту станция Восток — Полюс недоступности — станция Молодежная. Поход проходил с 3 января по 21 марта 1964 г. В его составе было 16 человек, два транспортера «Харьковчанка» и один тяжелый тягач. Руководителем похода был геофизик А.П. Капица. В период выполнения этого СГП его участники пять дней работали на сезонной станции Полюс недоступности. Второй раз эту сезонную станцию 22 февраля 1967 г. посетили участники 12-й САЭ, в программу

Станция Полюс недоступности





Панорама станции «Полюс относительной недоступности» (2015 г.)

работ которой было включено выполнение научного СГП по маршруту станция Молодежная — Полюс недоступности — американская внутриконтинентальная сезонная станция Плато — станция Новолазаревская. Поход проходил в период с 28 декабря 1966 г. по 26 марта 1967 г. В нем участвовали 17 сотрудников экспедиции, руководителем которых был гляциолог И.Г. Петров [4]. Транспортный парк похода был аналогичен 9-й САЭ. На этот раз участники СГП работали на Полюсе недоступности три дня.

В 1964 г. на стационарном помещении сезонной базы Полюс недоступности была установлена табличка в память о советских первооткрывателях этой уникальной географической точки. На деревянном постамен-

те, смонтированном на крыше здания, был поставлен бронзовый бюст В.И. Ленина. В 1972 г. на VII Консультативном совещании по Договору об Антарктике (г. Веллингтон, Новая Зеландия) была принята Рекомендация VII-9 о присвоении этому объекту статуса исторического памятника в Антарктике. Он включен в перечень таких мест в Антарктике под № 4. В настоящее время здание полностью занесено снегом, а на его поверхности находится лишь бюст В.И. Ленина. В последние годы станцию несколько раз посещали участники российских и иностранных неправительственных экспедиций.

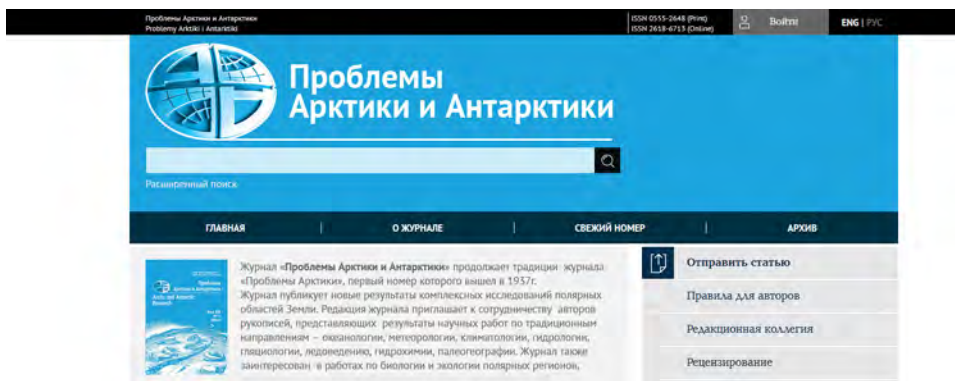
В материале использованы фотоматериалы из фондов ГНЦ РФ ААНИИ

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В.В. Лукин. 60 лет внутриконтинентальной станции Восток // Российские полярные исследования. 2017. № 4. С. 51–54.
2. В.В. Лукин. Первые шаги ААНИИ в Антарктиде // Проблемы Арктики и Антарктики. 2015. № 2 (104). С. 101–119.
3. Саватиугин Л.М., Преображенская М.А. Станция Полюс недоступности // Российские исследования в Антарктике. Т. 1. СПб.: Гидрометеиздат, 1999. 337 с.
4. Петров И.Г. Через полюс недоступности. Л.: Гидрометеиздат, 1971. 192 с.

REFERENCES

1. V.V. Lukin. 60 years of the inland Vostok station. *Rossiiskie poliarnye issledovaniia*. Russian polar research. 2017, 4: 51–54. [In Russian].
2. V.V. Lukin. First steps of the AARI in Antarctica. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2015, 2 (104): 101–119. [In Russian]
3. Savatiugin L.M., Preobrazhenskaya M.A. Station Pole of Inaccessibility. *Rossiiskie issledovaniia v Antarktike*. T. 1. Station Pole of Inaccessibility. Russian Studies in Antarctica St. Petersburg: Hydrometeoizdat, 1999. 337 p. [In Russian].
4. Petrov I.G. *Cherez polius nedostupnosti*. Through the pole of inaccessibility. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1971: 192 p. [In Russian].



Друзья и коллеги, будущие авторы и будущие рецензенты!

Редколлегия журнала «Проблемы Арктики и Антарктики» сердечно поздравляет вас с наступающим 2019 годом. Благодарим всех авторов и рецензентов, которые помогают сделать наш журнал лучше.

Редакция журнала рада сообщить вам о новом, профессионально сделанном сайте журнала, который подготовлен нами с помощью компании НЭИКОН (<http://aaresearch.ru>). Здесь вы можете просмотреть в удобном формате выпуски журнала с 2016 г., осуществить поиск статей по авторам, рубрикам или ключевым словам, увидеть статистику по наиболее загружаемым статьям и, самое главное, — через электронный кабинет отправить вашу новую статью в редакцию и в дальнейшем там же общаться с редакторами и рецензентами. Надеемся, что эта страница вам понравится.

Редакция журнала информирует о начале работы электронного кабинета, доступ к которому открывается пользователям после регистрации.

Появление электронного кабинета журнала откроет новые возможности как для авторов и рецензентов, так и для редакционной коллегии, приблизит наш журнал к международным стандартам. В первую очередь электронный кабинет позволит редакции, а также авторам и рецензентам наиболее эффективно работать с поступившими рукописями. Как написано в руководстве, «программный комплекс «Платформа по управлению деятельностью распределенной редакционной коллегии электронного издания» поможет нам автоматизировать процессы подготовки научных статей.

Новая редакционная система позволит:

- обеспечить удаленный доступ всех пользователей (авторов, редакционной коллегии, рецензентов, редакторов, корректоров) к ресурсам журнала с использованием web-браузера;
- решить основные функциональные задачи управления научно-технической редакционной деятельностью;
- обеспечить возможности обмена данными с другими системами с помощью стандартов XML;
- получить статистику в общепринятом международном формате COUNTER.

Система обладает многими возможностями — например, позволяет осуществлять взаимодействие с авторами и читателями, многоэтапное взаимодействие с рецензентами; финальную подготовку к публикации (литературное редактирование, корректура, дизайн, верстка); выполнение задач медиа-информационной (аудио, видео, флеш) поддержки и многое другое.

Редакция журнала информирует всех авторов, направляющих статьи в наш журнал, что с января 2019 года новые статьи, направляемые в журнал «Проблемы Арктики и Антарктики», будут приниматься только через электронный кабинет.

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ ЖУРНАЛА «ПРОБЛЕМЫ АРКТИКИ И АНТАРКТИКИ»

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

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

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

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

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

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

Summary должно быть понятно без обращения к самой публикации как независимый от статьи источник информации. Оно должно отвечать следующим критериям: информативности (не содержать общих слов); содержательности (отражать основное содержание статьи: задачи работы, методы, главные результаты исследований); последовательности изложения. Перевод Summary на английский язык должен быть выполнен качественно, с использованием англоязычной специальной терминологии,

не быть дословным переводом русскоязычной версии (при необходимости следует также включать пояснения для иностранного читателя, связанные со спецификой исследований).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Подписано в печать 18.12.2018
Формат 70×100 1/16
Тираж 200

Печать цифровая
Печ. л. 7,25
Заказ №

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