

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, № 1, 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

ПИ № ФС77-35144 от 28 января 2009 г.

Выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи и массовых коммуникаций

Журнал включен в перечень рецензируемых научных изданий ВАК, 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.aari.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

ГЛЯЦИОЛОГИЯ И КРИОЛОГИЯ ЗЕМЛИ

И.И. Василевич, Р.А. Чернов. К оценке снегозапасов в русловых врезках методом георадиолокации на территории Арктического региона..... 5

П.В. Богородский, А.П. Макишас, В.Ю. Кустов, В.В. Мовчан. Динамика сезонного протаивания мерзлоты в районе научно-исследовательского стационара «Ледовая база “Мыс Баранова”» (о. Большевик, арх. Северная Земля)..... 16

ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ГИДРОСФЕРЫ

Ю.А. Шмелев, О.А. Мальцева, В.Е. Морозов, Д.И. Шилов, С.А. Безвытный. Тестирование модели IRI по данным российских ионосферных станций Ловозеро, Салехард, Диксон, Тунгуска и Якутск 31

ОКЕАНОЛОГИЯ

П.В. Аксенов, В.В. Иванов. «Атлантификация» как вероятная причина сокращения площади морского льда в бассейне Нансена в зимний сезон..... 42

МЕТЕОРОЛОГИЯ, КЛИМАТОЛОГИЯ

С.А. Солдатенко, Г.В. Алексеев, Н.Е. Иванов, А.Е. Вязилова, Н.Е. Харланенкова. Об оценке климатических рисков и уязвимости природных и хозяйственных систем в морской арктической зоне РФ 55

ЭКОЛОГИЯ. БИОЦЕНОЛОГИЯ. БИОГЕОГРАФИЯ

К.В. Маклаков, Н.В. Малыгина. Адаптивные изменения сезонных миграций диких северных оленей на Таймыре 71

ГИДРОЛОГИЯ СУШИ, ГИДРОХИМИЯ

В.А. Румянцев, А.В. Измайлова, Л.Н. Крюков. Состояние водных ресурсов озер Арктической зоны Российской Федерации 84

О.М. Макарьева, Н.В. Нестерова, И.Н. Бельдиман, Л.С. Лебедева. Актуальные проблемы гидрологических расчетов в арктической зоне Российской Федерации и сопредельных территориях распространения многолетней мерзлоты 101

CONTENTS

GLACIOLOGY AND CRYOLOGY OF THE EARTH

I.I. Vasilevich, R.A. Chernov. Ground-penetrating Radar Estimation of Snow Reserves in Watercourses in the Arctic Region..... 5

P.V. Bogorodskii, A.P. Makshtas, V.Yu. Kustov, V.V. Movchan. The Dynamics of Seasonal Thawing of Permafrost in the Region of Research Station “Ice Base “Cape Baranov” (Bolshevik Island, Severnaya Zemlya Archipelago)..... 16

ATMOSPHERE AND HYDROSPHERE PHYSICS

J.A. Shmelev, O.A. Maltseva, V.E. Morozov, D.I. Shilov, S.A. Bezvytnyj. Testing of the IRI Model by Data from Lovozero, Dickson, Tunguska, and Yakutsk Ionospheric Stations 31

OCEANOLOGY

P.V. Aksenov, V.V. Ivanov. “Atlantification” as a Possible Cause for Reducing of the Sea-Ice Cover in the Nansen Basin in winter 42

METEOROLOGY, CLIMATOLOGY

S.A. Soldatenko, G.V. Alekseev, N.E. Ivanov, A.E. Vyazilova, N.E. Kharlanenkova. On Assessment of Climatic Risks and Vulnerability of Natural and Economic Systems in the Sea Zone of the Russian Arctic 55

ECOLOGY. BIOCENOLOGY. BIOGEOGRAPHY

K.V. Maklakov, N.V. Malygina. Adaptive Change in Wild Reindeer Seasonal Migrations in the Taimyr Peninsula 71

HYDROLOGY OF LAND, HYDROCHEMISTRY

V.A. Rumyantsev, A.V. Izmailova, L.N. Kryukov. State of Lake Water Resources in the Russian Arctic Zone 84

O.M. Makarieva, N.V. Nesterova, I.N. Beldiman, L.S. Lebedeva. Actual Problems of Hydrological Assessments in the Arctic Zone of Russian Federation and Adjacent Permafrost Territories 101

ГЛЯЦИОЛОГИЯ И КРИОЛОГИЯ ЗЕМЛИ

УДК 551.324.3

DOI: 10.30758/0555-2648-2018-64-1-5-15

К ОЦЕНКЕ СНЕГОЗАПАСОВ В РУСЛОВЫХ ВРЕЗАХ МЕТОДОМ ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ НА ТЕРРИТОРИИ АРКТИЧЕСКОГО РЕГИОНА

И.И. ВАСИЛЕВИЧ¹*, Р.А. ЧЕРНОВ²

¹— Государственный научный центр РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

²— Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт географии Российской академии наук, Москва, Россия

*ii.vasilevich@gmail.com

ESTIMATION OF SNOW RESERVES IN THE WATERCOURSE BY THE GEORADIOLOCATION METHOD IN THE ARCTIC REGION

I.I. VASILEVICH¹*, R.A. CHERNOV²

¹— State Research Center Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia

²— Federal State Budgetary Institute "Institute of Geography", Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*ii.vasilevich@gmail.com

Received January, 11, 2018

Accepted March, 17, 2018

Keywords: ground-penetrating radar, Northern Land archipelago, river beds, snow cover.

Summary

For a reliable estimate of snow reserves in the Arctic Archipelago proper allowance must be made for snow accumulation in the areas of relief lowering such as riverbeds, ravines and canyons. As applied to calculating the water yield from the catchment area, unaccounted reserves in the channels may be even larger than recorded. For thickness of the snow cover on similar objects measuring was used Picor-Led ground-penetrating radar. Test measurements of the thickness of the snow cover performed both by radar and manually showed good repeatability of measurements. Data on snow reserves in the catchments of the Mushketov and Amba rivers were obtained using the radar method for northern part of Bolshevik Island in spring 2017.

Measurements results has revealed significant differences in the amount of snow reserves between the plateau sections and the river valleys. The thickness of seasonal snow cover in the riverbeds and canyons varied widely and reached 10.5 meters depth. The average values of snow thickness cover on the plateau and in the riverbeds of the Mushketov and Amba rivers were 0.37, 1.80 and 1.86 m respectively during the period of maximum snow accumulation. Our estimates showed that snow deposits in riverbeds have specific snow reserves 6.5–7.5 times higher than specific snow reserves on the plateau. In addition,

Citation: Vasilevich I.I., Chernov R.A. Ground-penetrating Radar Estimation of Snow Reserves in Watercourses in the Arctic Region. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2018, 64 (1): 5–15. [In Russian]. doi: 10.30758/0555-2648-2018-64-1-5-15

the radar survey revealed the possibility not only to determine the actual thickness of seasonal snow cover but also to study the structure of perennial snowfields and their ice nuclei.

Поступила 11 января 2018 г.

Принята к печати 17 марта 2018 г.

Ключевые слова: георадар, речные русла, Северная Земля, снегозапас, толщина снежного покрова.

Для достоверной оценки снегозапасов на территории арктических архипелагов необходимо учитывать накопление снега на участках понижения рельефа, таких как: речные русла, овраги и каньоны. Для измерения толщины снежного покрова на подобных объектах был применен метод радиолокации при использовании георадара «Пикор-Лед» (ООО «ФПК “ЭКСТРА”», г. Москва). Весной 2017 г. в северной части о. Большевик методом радиолокации были получены данные о снегозаписах в водосборах рек Мушкетова и Амба. В период максимального снегонакопления средние значения толщины снега на плато и в руслах рек Мушкетова, Амба составляли 0,37, 1,80 и 1,86 м соответственно.

ВВЕДЕНИЕ

При оценке снегозапасов в условиях арктических архипелагов следует учитывать влияние метелевого переноса снега на их распределение. На территории, где присутствуют речные русла, овраги и глубокие каньоны, происходит значительная аккумуляция твердых осадков в местах понижения рельефа. В сравнении с окружающим рельефом, в таких местах величина снегозапасов может в десятки раз превышать фоновые значения.

Гляциологические и гидрологические исследования территории о. Большевик проводились в рамках экспедиции «Север-2017», организованной ААНИИ. Экспедиция базировалась на НИС «Ледовая база “Мыс Баранова”», расположенной на берегу пролива Шокальского. Основными целями исследований были оценка пространственной изменчивости снегозапасов на территории острова и выявление основных закономерностей залегания снежного покрова. Для выполнения гляциологической части исследований были проведены снегомерные маршруты в центральной части острова в период максимального снегонакопления, в которых проводились измерения как традиционным методом (измерения рейкой), так и с использованием метода радиолокации [1].

По результатам измерений выявлены заметные различия в величине снегозапасов между пологими участками плато и долинами рек, имеющими узкие и глубокие каньоны. При расчете водного баланса пренебрежение этими объектами может приводить к ошибочным результатам. В северной части острова Большевик речные каньоны в глубину достигают 30 метров и в отдельных местах полностью или частично заполнены снегом. Применительно к расчетам влагоотдачи с площади водосборного бассейна в условиях арктических пустынь, где преобладают равнинные типы рельефа, со средней высотой снежного покрова 20–50 см, неучтенные запасы могут быть даже больше, чем учтенные. Для уточнения и учета снегозапасов, как сезонных, так и многолетних, залегающих в руслах рек и каньонах рек, наиболее эффективным оказалось использование радиолокационных методов.

ОПИСАНИЕ РАЙОНА И ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

Остров Большевик является вторым по величине островом архипелага Северная Земля и располагается на его южной части. На западе он отделен проливом Шокальского от острова Октябрьской Революции, на юге пролив Вилькицкого разделяет остров с материком. Центральная часть острова возвышена и представляет собой

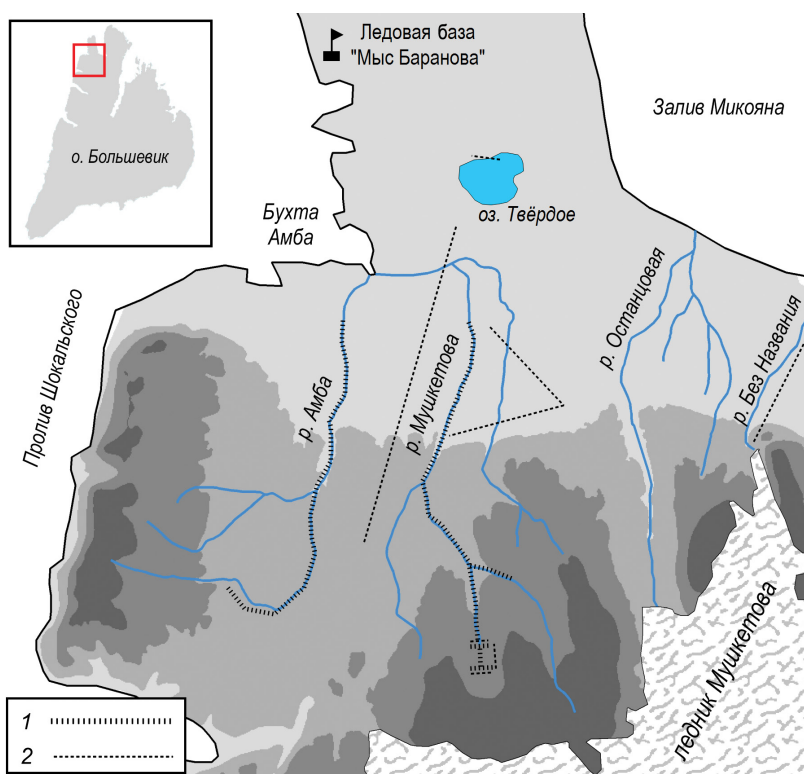


Рис. 1. Карта-схема северной части острова Большевик.

1 — профили, измеренные георадаром «Пикор-Лед», 2 — маршрутные снегомерные съемки

Fig. 1. Map-scheme of the northern part of Bolshevik Island.

1 — profiles measured by the "Picor-Ice" georadar, 2 — route snow surveys

пологое каменистое плато, на котором лежат ледниковые купола — Ленинградский, Семенова-Тян-Шанского, Аэрофотосъемки и Мушкетова. В северной части острова рельеф понижается и переходит в холмистые равнины. Речная сеть хорошо развита по всему острову, крупнейшие реки — Студеная, Обрывистая, Базовая, Амба, Мушкетова. Реки практически на всем своем протяжении имеют русло в виде каньона с глубиной от 2–3 м до 30 м и шириной от 10 до 100 м.

Исследования на архипелаге Арктический и антарктический научно-исследовательский институт проводит начиная с 1962 г. В 1968 и 1969 гг. впервые проведено радиолокационное зондирование ледников, а в 1974 г. был открыт гляциологический стационар «Купол Вавилова» [2].

Объектом наших исследований был водосбор рек Мушкетова и Амба, которые лежат в северной части острова. На его площади организован гидрологический полигон ААНИИ на о. Большевик. Река Мушкетова берет свое начало у подножия ледника Мушкетова и впадает в бухту Амба пролива Шокальского. Река Амба протекает параллельно с рекой Мушкетова, исток реки начинается у вершины мыса Визе, впадает река также в бухту Амба. В верховьях рек расположены крупные многолетние снежники, таяние которых обеспечивает летний сток. Протяженность обеих рек около 20 км (рис. 1).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Работа была выполнена в рамках программы гидрологических исследований о. Большевик в 2016 и 2017 гг. Были проведены снегомерные съемки северной территории острова в береговой линии, на возвышенном плато и на ледниковом куполе Мушкетова. Протяженность исследуемой территории с юга на север составляла 25 км с общей площадью около 500 км². В качестве основы снегомерных съемок были проложены линейные профили по основным формам рельефа, включая поверхность ледникового купола. Снегомерная съемка проводилась вручную и с использованием георадара на снегоходах по многокилометровым профилям, а также пешком на тестовых площадках, размером 100×100 м.

Измерения толщины снега проводились с помощью металлического шупа и посредством устройства снежных шурфов. По результатам измерений была проведена оценка толщины, плотности и стратиграфии снежного покрова. Основная часть работ была выполнена в мае, в период максимального снегонакопления, что дает истинные значения снегозапасов на исследуемой территории. Особенности распределения снежного покрова на территории показали, что значительные снегозапасы аккумулируются в руслах рек и каньонах. При этом ручные измерения таких объектов становятся чрезвычайно трудоемкими и малоэффективными уже при толщине снежного покрова более 1,5 м.

Для измерения толщины снега в руслах рек был успешно применен метод радиолокации снежного покрова. Для этого использовался георадар ООО «ФПК “ЭСТРА”» (г. Москва) «Пикор-Лед» [3].

Программное обеспечение георадара позволяет вести непрерывную запись результатов измерений со скоростью от 8 кадров в секунду. Радиолокация проводилась по оси речных долин и каньонов от истока до нижней точки каньона. Также был выполнен ряд поперечных промеров толщины снежного покрова. Уже непосредственно в ходе измерений выяснилось, что на записи отражаются как сезонные снегозапасы, так и многолетние. Таким образом, в ходе однократного измерения удавалось оценить и толщину снежного покрова, и мощность снежника.

Радиозондирование на профилях проводилось сериями в движении до момента остановки транспортного средства. Радар был закреплен вертикально на санях в кормовой части. Расстояние от нижней части подвешенного на кронштейне прибора до снежной поверхности в результате составляло 40 см. Скорость движения снегохода с санями во время измерений поддерживалась 20 км/ч. В силу характера рельефа в случае непредвиденной остановки запись радара прерывалась до момента начала движения.

Программное обеспечение радара «Пикор-Лед» позволяет производить пространственную привязку каждого кадра. Однако сигнал радара создавал помехи для работы встроенного в полевой ноутбук GPS-приемника, находящегося рядом. Поэтому координаты движения были записаны отдельно на GPS-приемник водителя снегохода, и в дальнейшем была осуществлена пространственная привязка по времени движения. Точность пространственной привязки зависит от устройства, используемого в работе. Средняя погрешность у навигаторов марки «Garmin» (США), применяемых в работе, ±3,6 м.

Георадар «Пикор-Лед» является высокочастотным антенным модулем с центральной неизменяемой частотой 1600 МГц. В настройках антенного модуля можно изменять масштаб и усиление принятого сигнала. При максимальном усилении сигнала было достигнуто значение максимальной глубины в 11 м, которое явля-

ется пределом аппаратных возможностей. Георадар отображает границы между различными по диэлектрической проницаемости средами, что на практике означает возможность изучения стратиграфии снега или льда.

Физические основы применимости радиолокационных средств в гляциологии приведены в классической монографии [4], где показано, что для пресноводных льдов и снежного покрова можно ожидать получение оценок морфометрических параметров подстилающей поверхности толщиной от единиц до десятков метров на частотах радарных сигналов 100...1000 МГц. Основной физической характеристикой, определяющей качество отображения отраженного сигнала, является диэлектрическая проницаемость среды ϵ , на изменчивость которой и, соответственно, на точность полученных результатов влияют (для льда и снега) температура, пористость, плотность, соленость, кристаллическое строение. В [4] показано, что при отсутствии солевых включений и незначительных изменениях температуры вариации других указанных факторов несущественно влияют на качество измерений. Указанные физические принципы использованы разработчиками георадара «Пикор-Лед» для составления встроенных алгоритмов обработки и визуализации радарограмм, при этом учет фактических значений природных факторов предлагается выполнять корректировкой значения ϵ . По результатам шурфирования средняя плотность снега в руслах рек и каньонах была равна 0,42 г/см³. Такому значению плотности сухого снега соответствует значение диэлектрической проницаемости, равное 2,0 Ф/м [5], которое было предустановлено в настройках георадара и использовано при выполнении данных наблюдений.

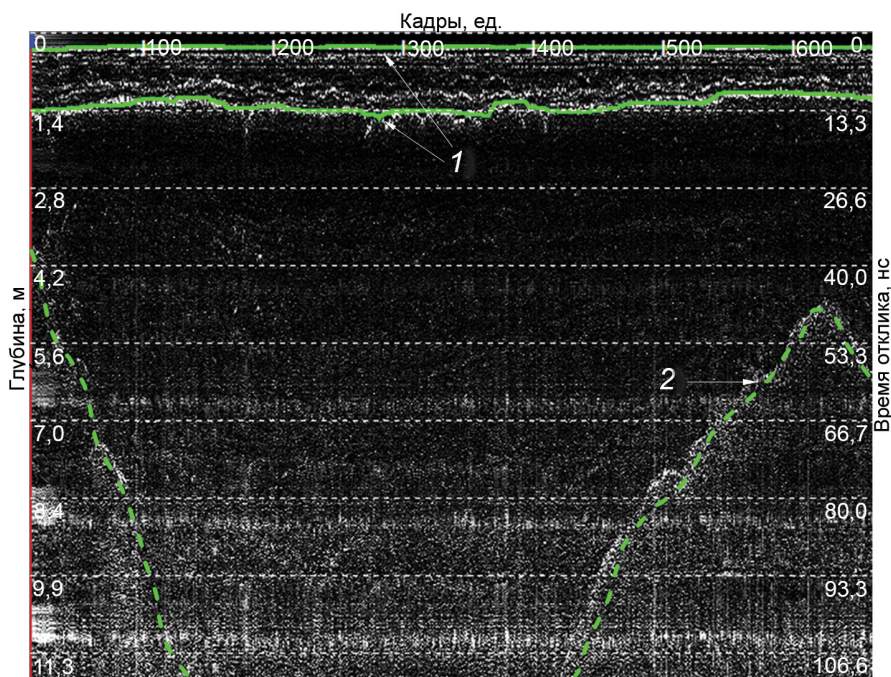


Рис. 2. Радарограмма с указанием границ слоев снега и подстилающей поверхности.
1 — верхняя и нижняя границы снежного покрова, 2 — подстилающая поверхность

Fig. 2. Radarogram with boundaries of snow layers and underlying surface.
1 — upper and lower boundaries of the snow cover, 2 — underlying surface



Рис. 3. График распределения снега на снежнике у подножия ледника Мушкетова

Fig. 3. The snow distribution schedule on the snowfield at the foot of the Mushketov glacier

Результаты записи радиолокации записываются в бинарные файлы, на основе которых при обработке формируются двумерные радарограммы. Численная информация о толщине слоев хранится в форме таблиц формата Excel с пространственной привязкой по данным GPS-приемника.

Тестовые измерения толщины снежного покрова георадаром «Пикор-Лед» были проведены на стометровом профиле, захватывающем поверхность ледового покрова на озере и его пологий берег. Радарные записи толщины снега были сравнены с ручными промерами толщины снега с шагом 5 м. Тест показал, что запись радара достаточно хорошо определяет толщину снега, которая на этом профиле изменялась от 27 до 55 см. Среднеквадратическое отклонение разностей результатов измерений рейкой и радаром оказалось равно 7 см. Результат радарной записи сравнения представлен на рис. 3.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Промеры в верховье реки Мушкетова показали, что слой снега в 1–1,5 метра лежит на снежнике (см. рис 2), толщина которого варьируется от 7 и более метров. В верхней части радарограммы показана толща снега, которая неоднородна по своей структуре до глубины около 1,4 м. Подстилающий слой увеличивается по толщине от 1,5 на краю до 9 м в середине долины. Нижняя граница характеризует подстилающую поверхность — грунт, которая во всех случаях записей определяется однозначно. Согласно инструментальным измерениям на этом участке сезонный снежный покров лежит поверх фирна и льда.

Общая длина измеренных профилей на реке Мушкетова составляет 20 км. После первичной обработки и интерпретации данных измерений [6] на профилях р. Мушкетова было получено, что средняя толщина снега в истоке реки составляет около одного метра. В русле р. Мушкетова были выполнены серии измерений толщины сезонного снега, результаты отражены в таблице 1.

**Результаты измерений толщины снежного покрова в долине р. Мушкетова
(о. Большевик)**

Профиль	Количество промеров на профиле, шт	Длина профиля, м	Средняя толщина снега, см	Минимальная толщина снега, см	Максимальная толщина снега, см
14	2549	560	108	80	146
15	1370	300	114	83	149
16	1473	550	109	75	111
17	764	220	96	71	133
18	7331	3300	176	68	283
19	1920	700	170	134	201
20	5824	1700	202	90	281
21	6308	2300	260	48	720
22	5600	2300	250	42	589
23	4421	1700	152	9	352
Среднее	3756	1363	164	70	296

По данным радарограмм, в верховье реки лежит многолетний снежник шириной до 600 м и протяженностью 5 км. На этом участке сезонный слой снежного покрова имеет среднюю толщину около 1,5 м (см. табл. 1, профили 14–17). В среднем и нижнем течении средняя высота снега на этом участке составляет 2,5 м. На отдельных участках каньона максимальная толщина снега составляла 7 м (см. табл. 1). При этом ледяные многолетние снежники становятся редкими. Таким образом, толщина снега во врезках увеличивается вниз по течению от истока реки.

На плато, по которому протекают реки Мушкетова и Амба, наблюдается противоположная картина распределения снежного покрова. Снегомерные маршруты на плато показали, что толщина снега равномерно растет с абсолютной высотой, достигая максимума на вершине купола Мушкетова. Однако прирост толщины снега с высотой сравнительно небольшой — всего 7 см на каждые 100 м подъема. Наши измерения на поперечном профиле в верховье речной долины показали среднюю толщину снежного покрова 128 см, а средняя плотность снега, измеренная по шурфам, была равна 0,42 г/см³. На этом профиле также были проведены тестовые измерения толщины снега двумя способами. Сравнение результатов измерений радаром и при помощи рейки показано на рис. 3. Ручной способ измерений является наиболее точным, но чрезвычайно трудоемким. Его применение при толщине снега более 2 м невозможно, так как большая плотность снега препятствует глубокому проникновению рейки в его толщу, поэтому граница сезонного снега и фирна не определяется. Различия в определении толщины снега на выбранном профиле не превышают в среднем 10 см, что соизмеримо с пространственной изменчивостью толщины снега в радиусе 1–2 м от точки измерения. Помимо границы снежного покрова была определена нижняя граница многолетнего снежника (см. пунктир на рис. 2), это дает представление об общих снегозапасах в верхнем течении реки.

Характер продольного распределения толщины снежного покрова в русле реки Амбы схож с его распределением на р. Мушкетова. В истоке реки на пологом склоне мыса Визе средняя высота снега в верхнем течении составляет 1 м. Ниже по течению снегозапасы увеличивались, достигая максимальных значений на среднем участке

Результаты измерения снегозапасов в руслах рек Мушкетова и Амба

Место измерения	Длина профиля, км	Средняя толщина снега, см	Максимальное значение толщины снега, см	Средняя плотность снега, г/см ³	Средний влагозапас, мм
р. Мушкетова	9,8	180	720	0,36	648
р. Амба	8,7	186	1049	0,40	750
Плато	15,0	37	125	0,27	100

течения. Толщина снежного покрова в среднем течении достигает 4 м. В нижнем течении река Амба имеет заполненный снегом каньон шириной до 50 м с практически вертикальными склонами глубиной до 10–20 м. Обобщенные результаты промеров по руслам рек и на плато отражены в таблице 2.

ОБСУЖДЕНИЕ

Период летнего таяния на о. Большевик начинается в первой декаде июня и продолжается до конца августа [7]. Средние летние температуры на уровне моря по данным метеостанции НИС «Ледовая база “Мыс Баранова”» не превышают 0,5 °С. Тем не менее таяние снега идет достаточно интенсивно, и снежный покров сходит уже к концу июня в береговой линии и к середине июля на возвышенном плато. Однако значительная часть русел рек и оврагов остается заполненной снежниками, многие из которых сохраняются до конца лета. Основная часть стока в реках обеспечивается их таянием.

Общая протяженность снегомерных маршрутов на плато составила 15 км. По руслам рек измерено 39 км профилей. На плато и на прибрежной территории в бассейне исследуемых рек средняя толщина снежного покрова составляла 37 см, при его средней плотности 0,27 г/см³, что соответствует снегозапасу 100 мм в.э. Средние снегозапасы по р. Мушкетова и р. Амбе в конце зимнего сезона были равны 648 и 750 мм в.э. соответственно. Таким образом, величина снегозапасов в руслах превышала средние показатели по территории более чем в 7 раз. Согласно подсчетам, применительно к участку исследуемого полигона площадью 100 км², который сочетает в себе такие элементы рельефа, как плато и русловые врезы, доля снегозапасов последних составляет 10 % от общих снегозапасов полигона. В период многоснежных зим этот показатель может быть больше, так как зима 2016/17 г. была малоснежной и русла были заполнены снегом лишь наполовину.

Результаты радарной съемки показали, что применительно к руслам рек, где высота снега достигает 7 и более метров, измерение радиолокационным способом является единственным возможным методом измерений. Достоинством этого метода является также то, что по радарограммам можно выделить границы не только сезонного снежного покрова, но и многолетних снежников и таким образом оценить полностью запасы снега и льда во врезках. Заявленная производителем инструментальная точность радара позволяет оценить толщину слоев снега до 2 см. Однако точность в 10 см, по нашему мнению, является достаточной, учитывая пространственную изменчивость слоев снега на расстоянии 1–2 м и точность определения координат GPS-приемником. По нашим оценкам, при толщине снежного покрова около 2 м ошибка в измерениях составляет не более 10 см. Основной проблемой при обработке данных радарограмм остается привязка профилей к координатам дис-

танционного GPS-приемника. Очевидными преимуществами используемого радара «Пикор-Лед» являются быстрая подготовка к работе, ударозащищенность корпуса и возможность эксплуатации в режиме непрерывной профильной съемки даже при неблагоприятных погодных условиях.

В условиях образования многометровых толщ снега и льда в руслах наши измерения толщины сезонного снега с помощью радара были нацелены на определение границ сезонного снега, фирна, льда и грунта. Поэтому структурные особенности снежной толщи, такие как ледяные корки и границы слоев снега различной плотности, не учитывались. Настройка радара на максимальное усиление сигнала позволила проводить радиолокацию на глубину до 10 м. Для такого масштаба структурные особенности величиной в несколько сантиметров были трудноразличимы. Однако для развития метода необходимо было иметь данные о строении снежной толщи и плотности снега, которые были получены из описания стратиграфии снежного покрова в шурфах.

Стратиграфические исследования снежного покрова показали, что слои свежеснежавшего снега формируются из твердых осадков преимущественно в виде звездчатых кристаллов и пластин и их обломков. Метаморфизм кристаллов свежеснежавшего снега приводит к образованию мелкозернистого снега типа (3sr) в течение нескольких дней. Кристаллы снега преобразуются в округлые бесформенные зерна размерами около 0,5 мм. Этот тип снега чрезвычайно распространен на различных элементах ландшафта о. Большевик, большинство слоев снежной толщи сложены именно этим типом снега (получено нами по результатам описания 40 шурфов). Отдельные слои снега перешли в стадию конструктивного метаморфизма и были сложены ограниченными кристаллами и смешанными формами (4mx, 4fa) [8].

Как правило, начальная плотность свежеснеженного снега была в диапазоне 0,18–0,22 г/см³. Без воздействия ветра верхние слои снега уплотняются незначительно, в среднем их плотность на плато и в прибрежной территории составляла 0,29 г/см³. На леднике плотность снега была всегда выше. На его склоне средняя плотность составляла 0,38 г/см³, а на плато купола, где сильные ветра наиболее вероятны, плотность снега достигала величины 0,45 г/см³. Полученные значения плотности снега были использованы при расчете снеготопливных запасов (см. табл. 2).

В речных долинах, где повышенное накопление снега приводит к его уплотнению под действием весовой нагрузки, плотность снега также была максимальной — 0,40–0,45 г/см³. В шурфах наблюдается постепенное увеличение плотности снега с глубиной, границы соседних слоев снега слабо различимы между собой как по плотности, так и по структуре. В связи с этим на радарограмме структурные особенности сезонного снежного покрова были слабо выражены. Как правило, нижняя граница сезонного снега хорошо маркирована плотным фирном или льдом, не стаявшим в течение прошлого лета. Эта граница хорошо различима на радарограмме снежников, так как, кроме скачка плотности, в этом горизонте присутствует загрязнение минеральными частицами, нанесенными на поверхность в летний период с окружающих склонов. По-видимому, подобные маркеры годовых слоев накопления льда и снега мы встречаем в толще снежников на некоторых радарограммах.

ВЫВОДЫ

Применение радиолокации снежного покрова оказалось эффективным способом исследования распределения снежного покрова на тундровых территориях и для оценки их снеготопливных запасов. Измерение толщины снега было проведено как

на плоских участках — плато и равнина, так и в местах повышенного снегонакопления — долины рек и каньоны. Использование радиолокации совместно с описанием снежной толщи в шурфах дает возможность оценить снегозапасы в исследуемом районе. Нами были получены данные о толщине снежного покрова и снежных наносов в руслах и каньонах р. Мушкетова и Амба. Наиболее вероятно, что массы снега и льда, накопленные в речных долинах, определяют летний сток в реках острова.

Для таких объектов применение радиолокации может быть единственным возможным методом, так как традиционные способы измерений рейкой не могут быть использованы. Кроме того, радиолокационная съемка выявила границы не только сезонного снега, но и многолетних снежников и их ледяных ядер, что в дальнейшем может быть отдельным элементом исследования изменений в нивально-гляциальной системе.

Оценка мощности снежных наносов в речных руслах имеет также большую практическую значимость для проведения изыскательских работ во врезках, где предполагается в дальнейшем добыча драгоценных металлов на о. Большевик.

Благодарности. Работа выполнена в рамках программы гидрологических исследований экспедиции «Север-2017», организованной ААНИИ на территории о. Большевик (архипелаг Северная Земля).

Acknowledgments. The work was carried out within the hydrological research program of the expedition “Sever-2017”, organized by AARI in the territory of Fr. Bolshevik (the Northern Land archipelago).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вознесенский А.С., Дручинин С.В., Изюмов С.В. Теория и методы георадиолокации. М.: Изд-во Московского государственного горного университета, 2008. 196 с.
2. Говоруха Л. С. Исследования Североземельского гляциологического стационара // Труды ААНИИ. 1981. Т. 367. С. 5–8.
3. Многофункциональный контрольно-измерительный прибор Пикор-Лед: Руководство по эксплуатации. URL: <http://uwbs.ru/texpodderzhka/> (дата обращения 08.01.2018)
4. Богородский В.В., Гаврило В.П. Лед. Физические свойства. Современные методы гляциологии. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 384 с.
5. Мачерет Ю.Я. Радиозондирование ледников. М.: Научный мир, 2006. 389 с.
6. Старовойтов А.В. Интерпретация георадиолокационных данных. М.: Изд-во МГУ, 2008. 187 с.
7. Атлас снежно-ледовых ресурсов мира. М.: Институт географии РАН, 1997. 392 с.

REFERENCES

1. Voznesenskii A.S., Druchinin S.V., Izumov S.V. Theory and methods of georadiolocation. Moscow: Moscow State Mining University, 2008: 196 p. [In Russian].
2. Govorukha L.S. Research of the Severozemel Glaciological Station. *Trudy AANII*. Proceedings of AARI. 1981, 367: 5–8. [In Russian].
3. Ice meter PikoR-ICE (ice thickness gauge). Manual. Available at: <http://uwbs.ru/texpodderzhka/> (accessed 08.01.2018). [In Russian].
4. Bogorodsky V.V., Gavrilov V.P. Ice. Physical properties. Modern methods of glaciology. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1980: 384 p. [In Russian].
5. Macheret Yu.Ya. Radio sounding of glaciers. Moscow: Nauchnyi mir, 2006: 389 p.
6. Starovoitov A.V. Interpretation of georadar locating data. Moscow: Moscow State University, 2008: 187 p. [In Russian].
7. Atlas of snow and ice resources world. Moscow: Institute of Geography RAS, 1997: 392 p. [In Russian].

8. Международная классификация для сезонно-выпадающего снега (руководство для описания снежной толщи и снежного покрова). Русское издание // Материалы гляциологических исследований. 2012. Вып. 2. 80 с.

8. International classification for seasonally falling snow (a guide for the description of the snow layer and snow cover). Russian Edition. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 2012, 2: 80 p. [In Russian].

УДК 551.322

DOI: 10.30758/0555-2648-2018-64-1-16-30

**ДИНАМИКА СЕЗОННОГО ПРОТАИВАНИЯ МЕРЗЛОТЫ
В РАЙОНЕ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО СТАЦИОНАРА
«ЛЕДОВАЯ БАЗА “МЫС БАРАНОВА”»
(О. БОЛЬШЕВИК, АРХ. СЕВЕРНАЯ ЗЕМЛЯ)**

П.В. БОГОРОДСКИЙ, А.П. МАКШТАС, В.Ю. КУСТОВ, В.В. МОВЧАН*

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

**bogorodski@aari.ru*

**THE DYNAMICS OF SEASONAL THAWING
OF PERMAFROST IN THE REGION
OF RESEARCH STATION “ICE BASE “CAPE BARANOV”
(BOLSHEVIK ISLAND, SEVERNAYA ZEMLYA ARCHIPELAGO)**

P.V. BOGORODSKII, A.P. MAKSHITAS, V.YU. KUSTOV, V.V. MOVCHAN*

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

**bogorodski@aari.ru*

Received March, 22, 2018

Accepted April, 17, 2018

Keywords: active soil layer, measurements, modeling, permafrost, thawing, Severnaya Zemlya Archipelago, snow cover, thermal regime, vegetation.

Summary

The results of permafrost observations in the northern part of the Bolshevik Island (Severnaya Zemlya Archipelago) started in February 2016 at the meteorological site of the research station “Ice Base “Cape Baranov” are presented. Features of two-year measurements of temperature, heat flux and humidity in the soil active layer due to the processes of its seasonal thawing/freezing, including the so-called “zero curtain effect” are described. The review of climatic and landscape characteristics of the research area, as well as the parameterization of thermophysical properties of the three main types of arctic soils (sandy, sandy loamy and clayey) in the frozen and thawed state was performed. Using the stationary model, realizing the Kudryavtsev’s algorithm, the data of atmospheric reanalysis and direct meteorological observations, interannual variability of seasonal thawing depth as well as mean annual temperature of permafrost surface for various soil types on the Bolshevik Island were obtained. It is shown that the permafrost-climatic changes during

Citation: *P.V. Bogorodskii, A.P. Makshtas, V.Yu. Kustov, V.V. Movchan.* The dynamics of seasonal thawing of permafrost in the region of the Ice Base “Mys Baranova” (Bolshevik Island, Severnaya Zemlya Archipelago). *Problemy Arktiki i Antarktiki.* Arctic and Antarctic Research. 2018, 64 (1): 16–30. [In Russian]. doi: 10.30758/0555-2648-2018-64-1-16-30

last 70 years, despite significant interannual fluctuations, reflecting the variability of atmospheric conditions at the Severnaya Zemlya Archipelago, are consistent with global temperature increase, and taken into account variations in the snow layer thicknesses and vegetation cover are close to the same measured in 2016–2017 years.

Поступила 22 марта 2018 г.

Принята к печати 17 апреля 2018 г.

Ключевые слова: архипелаг Северная Земля, вечная мерзлота, деятельный слой грунта, измерение, моделирование, протаивание, растительный и снежный покровы, термический режим.

Представлены результаты первых мерзлотных наблюдений в северной части о. Большевик (арх. Северная Земля), начатых в феврале 2016 г. на НИС «Ледовая база “Мыс Баранова”». Описаны особенности температурной структуры и влажности деятельного слоя грунта, обусловленные процессами сезонного протаивания/промерзания, включая так называемый «эффект нулевого занавеса». Выполнена параметризация теплофизических свойств основных типов арктических грунтов в мерзлом и талом состоянии. С помощью стационарной модели, основанной на известном алгоритме Кудрявцева, данных атмосферного реанализа и прямых метеонаблюдений получены оценки многолетней изменчивости глубины сезонного протаивания грунтов о. Большевик. Показано, что мерзлотно-климатические изменения последних 70 лет, несмотря на существенные межгодовые колебания, согласуются с ходом глобального повышения температуры.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время научно-исследовательский стационар ААНИИ «Ледовая база “Мыс Баранова”» (НИС ЛБМБ) является единственной станцией в западной части моря Лаптевых, располагающей возможностями проведения регулярных комплексных наблюдений за состоянием криосферы. Стационар расположен на берегу пролива Шокальского, вблизи мыса Баранова в северной части о. Большевик (79° 16' с.ш., 101° 45' в.д.), составляющего почти треть (30,6 %) площади арх. Северная Земля, одного из наиболее крупных районов оледенения на территории России. Климат архипелага типично арктический [1]. При коротком и холодном лете и суровой продолжительной зиме, отличающейся сильными ветрами (до 40 м/с), среднегодовая температура воздуха близка к –14 °С, а минимальные температуры зимой достигают –50 °С. Во время длительной полярной ночи (с октября по март включительно) происходит значительная потеря тепла через эффективное излучение, формирующее очень низкие средние температуры подстилающей поверхности (–31,2... –31,8 °С). Поэтому значительная часть островов архипелага покрыта льдами. Свободные ото льда участки бедны растительностью, для них типичны ландшафты арктических пустынь с пятнистым характером почвенно-растительного покрова, в котором господствуют мхи и лишайники [2]. На о. Большевик территория, занятая арктической тундрой, не превышает 10 % от общей площади, причем с ростом широты этот показатель уменьшается. На глубине в несколько десятков сантиметров находится многолетняя мерзлота.

В июне 2015 г. решением 17 Конгресса ВМО (резолюция 4.2.6(2)/1 – Глобальная служба криосферы — ГСК) ЛБМБ наряду с Гидрометеорологической обсерваторией Тикси была включена в список 36 наземных пунктов наблюдений сети ГСК — Крионет, как интегрированная станция наблюдений. В настоящей работе представлены первые результаты мерзлотных наблюдений, начатых в феврале 2016 г. Описаны особенности двухлетних измерений температуры, теплового потока и влажности в деятельном слое грунта, обусловленные процессами сезонного протаивания/промерзания, включая так называемый «эффект нулевого занавеса». Выполнен обзор климатических и ландшафтных

характеристик района исследований, а также параметризация теплофизических свойств основных типов арктических грунтов (песчаных, супесистых и глинистых) в мерзлом и талом состоянии. Описана основанная на известном алгоритме Кудрявцева математическая модель, с помощью которой осуществлены расчеты многолетней динамики температуры границы талого и мерзлого грунта и глубины сезонного протаивания — основных характеристик, определяющих интенсивность геоморфологических процессов и физико-механические свойства грунтов. Модельные данные дополнены оценками мощности сезонно-протаивающего слоя (СПС) для различных типов грунтов о. Большевик, выполненными по эмпирической зависимости.

ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Исследования верхнего деятельного слоя грунта на НИС ЛБМБ были начаты в феврале 2016 г., после установки на метеоплощадке стационара комплекса аппаратуры для измерения его термической структуры (рис. 1). В комплекс вошли предоставленная Финским метеорологическим институтом (ФМИ) термокоса (рис. 1а), укомплектованная датчиками температуры IKES PT00 (диапазон измерений $-40...+60$ °C, погрешность измерений $\pm 0,1$ °C), установленными на глубинах 20, 40, 60, 80 и 100 см, датчик потока тепла в грунте HFP-01 (диапазон измерений $-2000...+2000$ Вт/м₂, погрешность измерения $\pm 10\%$, глубина установки 10 см) и два датчика для измерений влажности грунта «ThetaProbe type ML3» (диапазон измерений влажности 0–100 %, погрешность ± 1 %). Частота опроса датчиков составляет 10 мин. Из рис. 1б видно, что грунт в районе метеоплощадки представлен частично покрытыми мхами выходами дочетвертичных пород с небольшим количеством элювия.

На рис. 2 представлены результаты измерений, выполненных в 2016 и 2017 гг. Видно, что, несмотря на существенные межгодовые различия термической структуры верхнего слоя грунта, глубина сезонного протаивания за два года не превышала 60 см. Эффект «нулевого занавеса» (постоянство температуры замерзания верхнего слоя грунта в переходный период от его таяния к замерзанию), впервые отмеченный в работе [3] и отчетливо проявившийся по данным наблюдений в Обсерватории Тикси, практически отсутствовал здесь в 2016 г., но присутствовал в течение 20 дней в 2017 г. Особенно

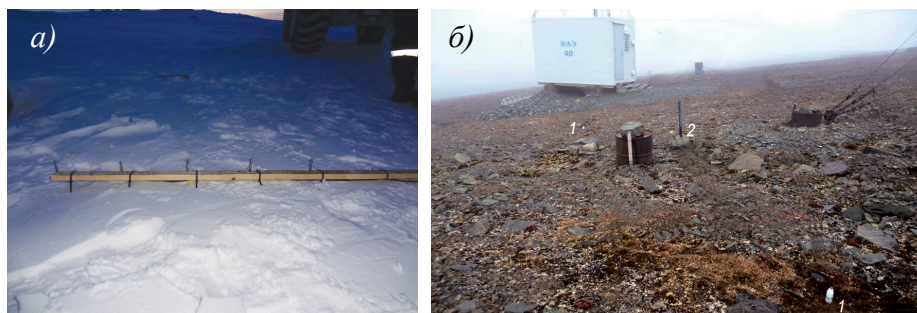


Рис. 1. Термокоса ФМИ (а) и участок метеоплощадки стационара с размещенными на нем датчиками влажности и потока тепла в верхнем слое грунта (б): 1 — влагомеры; 2 — датчик потока тепла и термокоса

Fig. 1. FMI thermistor string (a) and a section of the meteorological site of the Station with moisture and heat flux sensors placed in it in the upper layer of the soil (b): 1 — moisture meter; 2 — heat and thermocross sensor

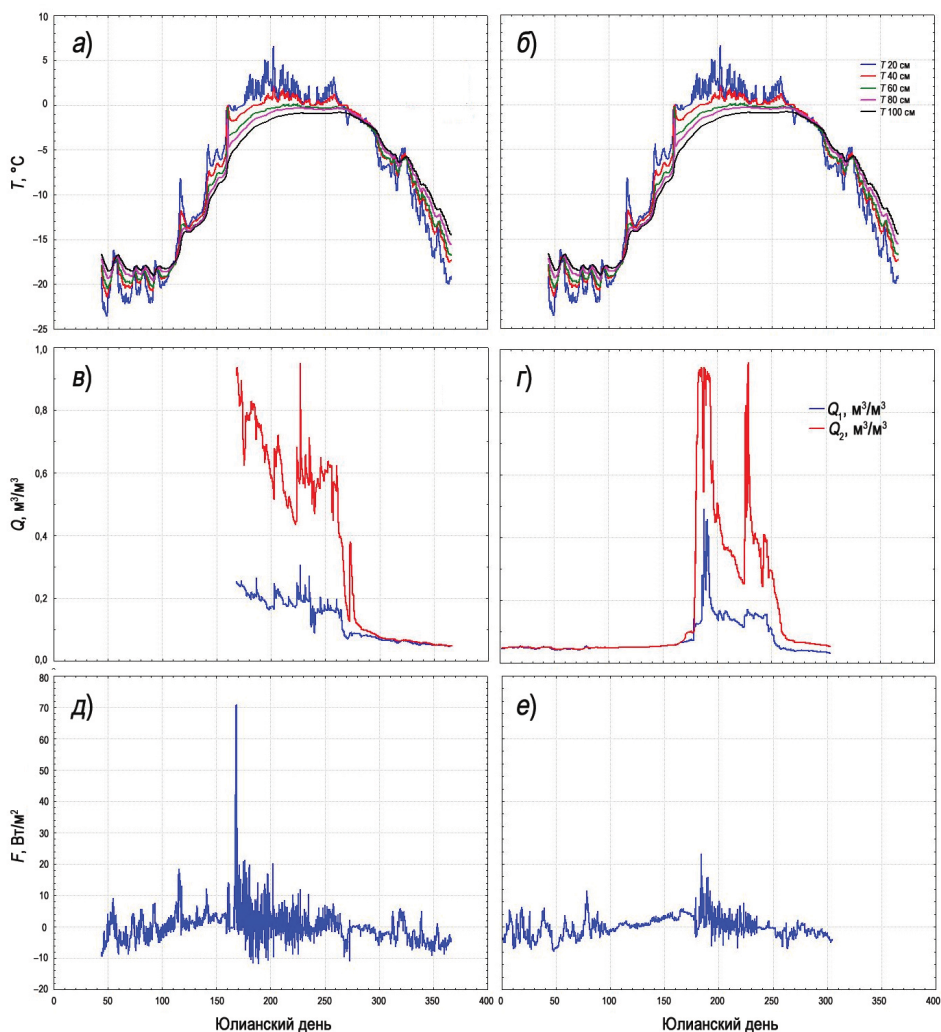


Рис. 2. Сезонная изменчивость температур (а, б) и влажности (в, г) в деятельном слое грунта и потока тепла на глубине 10 см (д, е) в 2016 (а, в, д) и 2017 гг. (б, г, е)

Fig. 2. Seasonal variability of temperatures (a, б) and humidity (в, г) in the soil active layer and the heat flux at a 10 cm depth (д, е) during 2016 (а, в, д) and 2017 гг. (б, г, е)

наглядно эффект «нулевого занавеса» иллюстрирует рис. 3. Можно отметить, что в 2016 г. температура грунта оставалась близкой к температуре замерзания на глубине 40 см (до 10 дней). При этом температура на глубине 20 см в этот же период закономерно понижалась до -2°C . В 2017 г. окончание периода существования «нулевого занавеса» на глубинах 20 и 40 см происходило практически одновременно.

Представляет интерес изменение влажности грунта, которая, как видно из рис. 2, уменьшается на каменистом участке (от 0,4 до $0,05\text{ м}^3/\text{м}^3$) от практически насыщенного водой верхнего 5 см слоя грунта, покрытого мхом ($0,9\text{--}0,8\text{ м}^3/\text{м}^3$) в июне, до $0,6\text{--}0,4\text{ м}^3/\text{м}^3$ в августе–сентябре и составляет порядка $0,05\text{ м}^3/\text{м}^3$ в осталь-

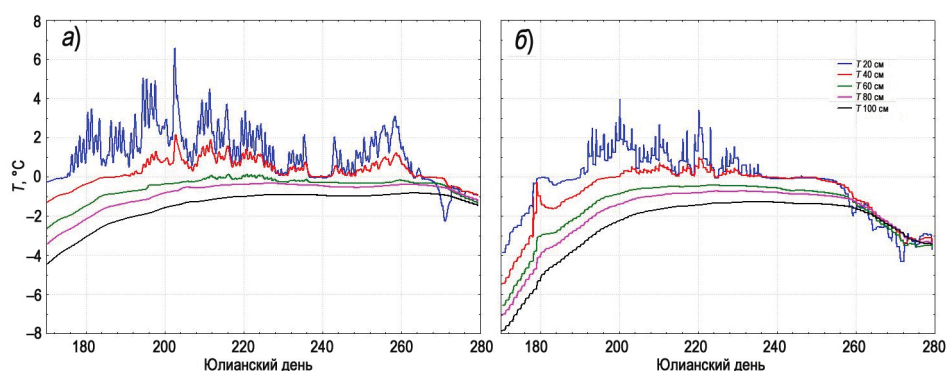


Рис. 3. Изменчивость температуры деятельного слоя грунта на различных глубинах летом 2016 (а) и 2017 (б) гг.

Fig. 3. Variability of the temperature active layer of the soil at various depths in the summer of 2016 (a) and 2017 (b)

Таблица 1

Экстремальные значения характеристик верхнего 100-сантиметрового слоя грунта

Год	$T_{\max}$ 20 см	$T_{\min}$ 20 см	$T_{\max}$ 100 см	$T_{\min}$ 100 см	$F_{\max}$ 10 см	$F_{\min}$ 10 см	Q_1 max 0–15 см	Q_1 min 0–15 см	Q_2 max 0–15 см	Q_2 min 0–15 см
2016	6,6	–23,6	–0,8	–19,4	70,9	–11,7	0,31	0,05	0,95	0,05
2017	4,0	–23,6	–1,3	–9,0	23,2	–7,7	0,49	0,03	0,96	0,04

ное время года на обоих участках. Отдельного внимания заслуживает некоторое уменьшение влажности покрытого мхами участка грунта в июле и ее повторное увеличение в конце августа — начале сентября 2017 г., не наблюдаемое на каменистом участке и связанное, вероятно, с уменьшением испарения при наличии растительного покрова. Этому вопросу планируется уделить особое внимание при измерениях в 2018 г.

Поток тепла в грунт (положительные значения F на рис. 2д, е) относительно невелик и достигает максимальных значений (до 70 Вт/м²) в конце июня — июле, времени окончания таяния снега и, соответственно, уменьшения альбедо подстилающей поверхности и максимума приходящей коротковолновой радиации. Следует отметить, что небольшая высота снежного покрова в районе установки датчиков обуславливает спорадический прогрев верхнего десятисантиметрового слоя грунта даже в периоды низких температур воздуха весной и осенью.

В табл. 1 приведено сравнение экстремальных значений характеристик, зафиксированных в 2016 и 2017 гг. в грунте на глубинах 20 и 100 см. Из нее видно, что минимальные значения температуры как в верхнем, так и в нижнем слоях грунта практически одинаковы. В то же время их максимальные температуры, зафиксированные в июле, различаются более чем на 2 °C на глубине 20 см и на 0,5 °C — на 100 см. Вероятно, это обусловлено существенно большим притоком тепла летом 2016 г., отчетливо видном как на рис. 2, так и в табл. 1. Следует отметить, что в этом же году максимальная влажность грунта была существенно меньше, а период с положительными и более высокими температурами верхнего слоя грунта продолжался более 90 дней, по сравнению с 50 днями в 2017 г.

Выявленные в ходе двухлетних наблюдений особенности теплового режима верхнего слоя грунта требуют как подробного изучения его теплофизических характеристик, так и комплексного анализа особенностей процессов радиационного и турбулентного энергообмена подстилающей поверхности с атмосферой в месте проведения наблюдений, особенно в летний сезон. К сожалению, таких исследований на островах Российской Арктики не проводилось. Как следствие, неизвестной остается и многолетняя динамика термической структуры и мощности СПС, определяющих интенсивность геоморфологических процессов и физико-механические свойства мерзлых грунтов. Согласно имеющимся сведениям, глубина сезонного протаивания грунтов арктического побережья и островов обладает высокой пространственной изменчивостью, варьируя от первых десятков до первых сотен сантиметров [4–6]. Помимо широты места, определяющей поток солнечной радиации и, в значительной степени, температуру воздуха, такой разброс объясняется теплофизическими характеристиками компонентов среды: напочвенного покрова (растительного слоя, мха и торфа) и самого грунта. Ситуацию осложняет существенная, до 100 % и более, разница их значений даже в пределах одного и того же типа и при одинаковых влажностях и плотностях скелета [5]. Причиной такого расхождения является разнообразие минерального состава и дисперсности частиц, обусловленное, прежде всего, условиями образования и криогенным строением, а также погрешностями инструментального и постановочного характера экспериментов. Из-за этого грунты сезонного промерзания/протаивания характеризуются эффективными теплофизическими свойствами, их определение является достаточно сложной задачей, решение которой невозможно без существенных упрощений.

МОДЕЛЬ

В этих условиях, до получения сколько-нибудь продолжительных рядов данных измерений, оценка динамики протаивания мерзлоты возможна только методами математического моделирования. В настоящее время для этого имеется целый ряд моделей, иерархически упорядоченный по степени сложности [7]. Среди всего их многообразия важное место занимают модели среднего уровня сложности, их типичным представителем является стационарная модель GIPL (США) [8], вариант которой был реализован для расчетов мерзлоты о. Большевик. Несмотря на ряд упрощений реальных процессов, модель GIPL, использующая известный алгоритм Кудрявцева для приближенного решения задачи Стефана для грунта [9], позволяет учесть эволюцию снежного и растительного покровов грунта, а также разницу теплофизических свойств грунта в мерзлом и талом состоянии. По этой причине она широко применяется для анализа динамики мерзлоты, давая при более чем скромных требованиях к вычислительному ресурсу результаты, вполне сопоставимые по точности как с данными измерений, так и расчетов по физически полным моделям гидротермического режима грунта [10], применение которых для абсолютного большинства полярных районов практически невозможно из-за отсутствия необходимых данных. На рис. 4 приведены блок-схема модели, огибающие годовых температурных колебаний, амплитуда которых экспоненциально затухает по мере распространения тепловой волны вглубь и становится пренебрежимо малой на глубине X , а также среднегодовой профиль температуры деятельного слоя грунта. Расчет осуществляется поэтапно, с последовательным учетом влияния снежного покрова, растительности и сдвиги температур за счет различия коэффициентов теплопроводности талого

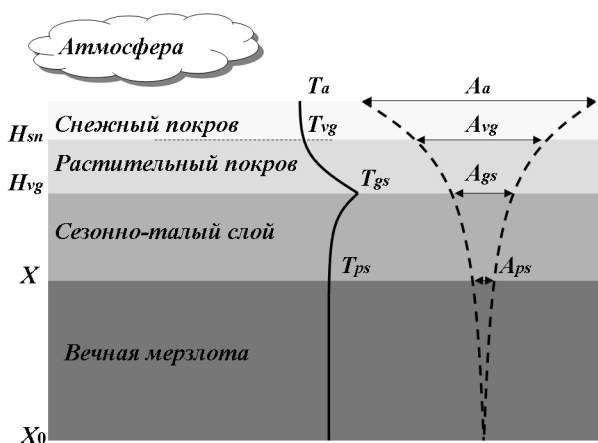


Рис. 4. Схема вертикального распределения среднегодовых температур и их амплитуд в слоях среды. Обозначения приведены в табл. 2 и 3

Fig. 4. The scheme of the vertical distribution of mean annual temperatures and their amplitudes in the layers of the medium. Notations are given in Tables 2 and 3

Таблица 2

Входные данные модели	
Параметр, размерность	Обозначение
Амплитуда годовых колебаний воздуха, °C	A_a
Среднегодовая температура воздуха, °C	T_a
Среднегодовая толщина снега, м	H_{sn}
Продолжительность теплого периода года, сутки	τ_2
Плотность снега, кг/м ³	ρ_{sn}
Коэффициент теплопроводности снега, Вт/(м·K)	K_{sn}
Высота растительности, м	H_v
Коэффициент температуропроводности мерзлой растительности, м ² /с	a_v^f
Коэффициент температуропроводности талой растительности, м ² /с	D_v^t
Коэффициент теплопроводности мерзлого грунта, Вт/(м·K)	K_f^f
Коэффициент теплопроводности талого грунта, Вт/(м·K)	K_f^t
Объемная теплота фазовых переходов воды, кДж/м ³	Q
Объемная теплоемкость снега, Дж/(м ³ ·K)	C_{sn}
Объемная теплоемкость мерзлого грунта, Дж/(м ³ ·K)	C_f^f
Объемная теплоемкость талого грунта, Дж/(м ³ ·K)	C_f^t

Таблица 3

Выходные данные модели	
Параметр, размерность	Обозначение
Поправка T_a на влияние снежного покрова, °C	ΔT_{sn}
Поправка A_a на влияние снежного покрова, °C	ΔA_{sn}
Поправка T_a на влияние растительности, °C	ΔT_v
Поправка A_a на влияние растительности, °C	ΔA_v
Сезонная амплитуда температуры на поверхности почвы, °C	A_{gs}
Среднегодовая температура на поверхности почвы, °C	T_{gs}
Среднегодовая температура на подошве СПС, °C	T_{ps}
Амплитуда годовых колебаний температуры на подошве СПС, °C	A_{ps}
Глубина СПС, м	X_{ps}

и мерзлого грунта. Глубина СПС X геометрически располагается на пересечении огибающей отметки 0°C и определяется из решения алгебраической задачи

$$X \left(2A_{ps} C_t + Q \right) = 2 \left(A_{gs} - |T_{ps}| \right) \sqrt{K_t C_t P / \pi} + \frac{\left(2A_{ps} C_t x + Qx \right) Q \sqrt{K_t P / \pi C_t}}{2A_{ps} C_t x + QX + \left(2A_{ps} C_t + Q \right) \sqrt{K_t P / \pi C_t}}, \quad (1)$$

где $x = \frac{2 \left(A_{gs} - |T_{ps}| \right) \sqrt{K_t C_t P / \pi}}{2A_{ps} C_t + Q}$.

Соответствующие температуры T , амплитуды A и поправки к ним ΔT и ΔA являются функциями входных параметров задачи и находятся из соотношений, многократно приведенных в литературе [8, 9, 10, 11]. Их обозначения даны в табл. 2 и 3.

ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ СВОЙСТВ ГРУНТОВ

Вследствие недостаточной изученности тепломассобменных свойств грунтов о. Большевик, в предположении их соответствия арктическим грунтам в целом, известным может считаться лишь их состав. По-видимому, в нем преобладают мерзлотные (горно-тундровые глеевые, горно-тундровые дерновые, горно-арктические) и примитивные (неразвитые песчаные и щебнисто-скелетные) арктические грунты. Экспериментальные данные о зависимости изменения коэффициента теплопроводности от двух основных факторов: влажности и плотности скелета в мерзлом и талом состоянии — позволяют разделить арктические грунты на два (песчаные и глинистые) [12] или три [4, 5] основных типа (пески, супеси и суглинки). Для них установлены некоторые общие зависимости, универсальные для всех дисперсных материалов криолитозоны как в мерзлом, так и в талом состоянии [4, 5]. Помимо этих работ имеются справочные данные, обобщенные в Системе нормативных документов (см., напр., [13] и приведенные там ссылки).

Объемная теплоемкость незасоленных грунтов, находящихся в талом и охлажденном состояниях при температуре выше температуры замерзания обладает аддитивным свойством по отношению к теплоемкостям составных частей: органического скелета, льда и прочносвязанной незамерзшей воды.

$$C_{th} = (c_d + c_w W_{tot}) \rho_{d,th}, \quad (2)$$

где c_d — удельная теплоемкости скелета грунта; $c_w = 4200 \text{ Дж/(кг} \cdot ^\circ\text{C)}$ — удельная теплоемкость воды; W_{tot} — суммарная весовая влажность; $\rho_{d,th}$ — плотность скелета грунта. Для незасоленных грунтов в мерзлом состоянии при условии, что температура грунта ниже или равна температуре начала замерзания, величина C_f находится по формуле

$$C_f = [c_d + c_w W_w + c_i (W_{tot} - W_w)] \rho_{d,f}, \quad (3)$$

где W_w — влажность незасоленного грунта за счет прочносвязанной (незамерзшей) воды, а c_i — удельная теплоемкость льда.

Величина объемной теплоты замерзания (таяния) грунта Q (Дж/м^3) принимается равной количеству теплоты, необходимой для замерзания воды (таяния льда) в единице объема грунта, и определяется по формуле

$$Q = Q_0 (W_{tot} - W_w) \rho_{d,th}, \quad (4)$$

где $Q_0 = 3,35 \cdot 10^5 \text{ (Дж/кг)}$ — значение удельной теплоты фазовых превращений вода — лед.

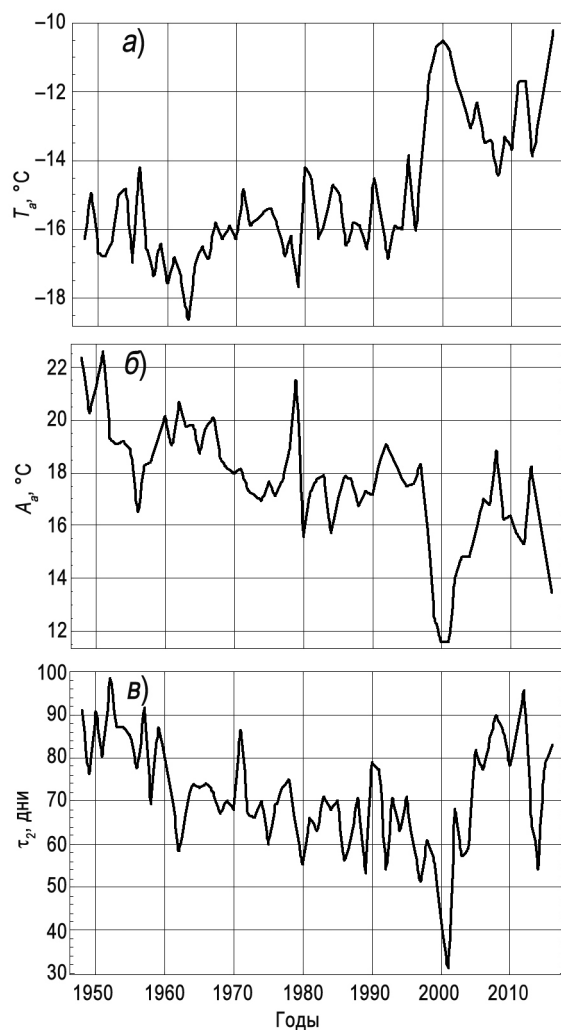


Рис. 5. Временной ход среднегодовых температур воздуха (а), их амплитуд (б) и количества суток с положительной температурой (в) на о. Большевик по данным реанализа (1948–2014 гг.) и метеонаблюдений (2015–2016 гг.)

Fig. 5. The time course of mean annual air temperatures (а), their amplitudes (б) and the number of days with a positive temperature (в) on Bolshevik Island according to reanalysis (1948–2014) and meteorological observations (2015–2016)

Следуя [2, 4], в качестве напочвенного покрова принимается мохово-лишайниковый растительный покров, что позволяет считать грунт двухслойным, состоящим из верхней органической и нижней минеральной части. Для простоты рассматривается так называемый сухой напочвенный покров, который становится талым к моменту схода снежного покрова и мерзлым с началом зимы, что позволяет пренебречь происходящими в нем фазовыми переходами. По этой же причине влияние этого слоя на условия снегонакопления, отражательную способ-

ность поверхности, испарение влаги, величину турбулентного теплообмена почвы с атмосферой не рассматривается.

На величины основное влияние оказывают значения суммарной весовой влажности, что описывается эмпирическими формулами [4]

$$K_{vt} = 0,034 + 0,1257 W_{tot} - 0,0227 W_{tot}^2 + 0,00133 W_{tot}^3, \quad (5)$$

$$K_{vf} = 0,034 + 0,132 (W_{tot} - 0,5), \quad (6)$$

где $0 \leq W_{tot} \leq 10$ для талого мха и $0,5 \leq W_{tot} \leq 5$ для мерзлого; при $W_{tot} \leq 0,5$ величина K_{vf} полагается постоянной.

Значения $C_{vt, vf}$ можно рассчитать по универсальным для дисперсного материала формулам (2) – (3), приняв $c_d = 1,6 \cdot 10^3$ Дж/(кгК), $\rho_d = 1800$ кг/м³, $W_w = 0$ [14], что позволяет определить значение $a_{vt, vf}$ как

$$a_{vt, vf} = K_{vt, vf} / C_{vt, vf}. \quad (7)$$

В качестве атмосферного форсинга в модели используются данные реанализа ERA-Interim для северной части о. Большевик (1948–2013 гг.) и данные стандартных 8-срочных метеорологических наблюдений на стационаре (2014–2016 гг.). Из всех необходимых для расчета параметров непосредственно из метеоданных могут быть определены величины T_a , A_a , τ_2 и H_{sn} (для реанализа в виде водного эквивалента), многолетняя динамика которых приведена на рис. 5. Как следует из рисунка, для них характерны существенные межгодовые колебания, отражающие изменчивость атмосферных условий арх. Северная Земля, причем отчетливые тенденции к увеличению и уменьшению демонстрирует лишь температура воздуха и ее амплитуда. Интересно, что, согласно данным реанализа, тренд среднегодовой температуры совершенно не соответствовал тренду количества дней с положительной температурой: 2000 и 2001 гг. характеризовались наибольшими температурами (–10,5 и –10,8 °C) и в то же время минимальным количеством теплых дней (41 и 31). Учитывая неудовлетворительное качество воспроизведения реанализами осадконакопления, высота снега задавалась постоянной и равной 8,8 см, что соответствовало данным прямых измерений 2014–2016 гг., толщина растительного слоя — 2 см.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Расчеты по модели (1) выполнялись для типичных сезоннопротаивающих грунтов о. Большевик: песка, супеси и суглинка (глины) с примесью гравия, гальки и щебня в количестве до 20 % и валунов до 10 % со средней плотностью в естественном залегании от 1750 до 1950 кг/м³. Согласно [14], удельная плотность скелета грунтов и их суммарная весовая влажность могут быть приняты одинаковыми и равными 1800 кг/м³ и 0,1 соответственно; количество прочносвязанной влаги (при $t = -10$ °C) 0,003 д.е. для песка, 0,022 д.е. для супеси и 0,049 д.е. для глины; удельная теплоемкость 693, 735 и 777 Дж/(кг·К) соответственно. Подстановка этих значений в формулы (2) – (4) дает следующие величины входных параметров модели: $K_t = 1,97$ Вт/(м·°C), $K_f = 2,30$ Вт/(м·°C) (для песков); $K_t = 1,45$ Вт/(м·°C), $K_f = 1,59$ Вт/(м·°C) (для супесей); $K_t = 1,06$ Вт/(м·°C); $K_f = 1,26$ Вт/(м·°C) (для суглинков и глин); $C_t = 2,42 \cdot 10^6$ Дж/(м³·°C) и $C_f = 2,04 \cdot 10^6$ Дж/(м³·°C) (для всех типов грунтов), а также $Q = \kappa$ Дж/м³. Для органического слоя из формул (5) – (7) следует $a_{vf} = 50,9 \cdot 10^{-8}$ м²/с; $a_{vt} = 24,6 \cdot 10^{-8}$ м²/с. Из-за основного вклада холодного сезона в формирование среднегодовой температуры грунта в геокриологии обычно

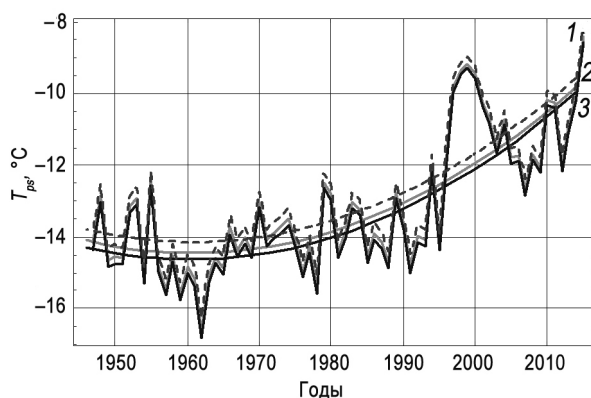


Рис. 6. Динамика температуры кровли мерзлоты и ее квадратичные тренды для песчаного (1), супесистого (2) и глинистого (3) грунтов о. Большевик

Fig. 6. The dynamics of the permafrost surface temperature and its quadratic trends for sandy (1), sandy loam (2) and clayey (3) soils of Bolshevik Island

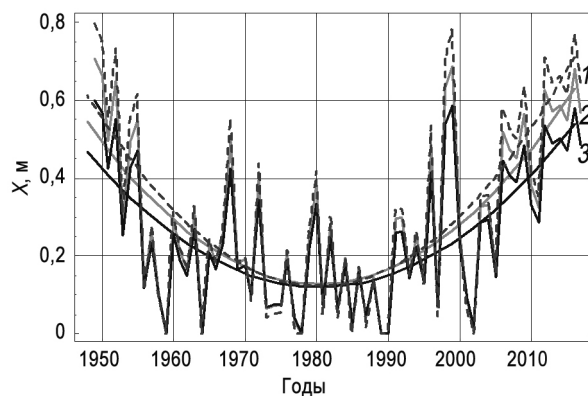


Рис. 7. Динамика глубины СПС и ее квадратичные тренды для песчаного (1), супесистого (2) и глинистого (3) грунтов о. Большевик

Fig. 7. The dynamics of the active layer thickness and its quadratic trends for sandy (1), sandy loam (2) and clayey (3) soils of Bolshevik Island

Таблица 4

Характеристики квадратичных трендов величин T_{ps} и X для трех типов грунта о. Большевик

Грунт		Коэффициент		
Параметр	Тип	$a \cdot 10^4$	$b \cdot 10^2$	c
T_{ps}	песчаный	16,2541	-4,87749	-13,7742
	супесистый	16,3208	-4,82508	-14,0937
	суглинистый	16,3561	-4,79378	-14,2754
X	песчаный	4,64963	-3,02104	0,614305
	супесистый	3,96036	-2,57079	0,545368
	суглинистый	3,30774	-2,14506	0,467228

используется условный годовой период, за начало которого принимается дата начала промерзания грунта [15]. В данных расчетах за начало года принималось 1 января и соответственно параметры грунтов рассчитывались для данного календарного года. Поэтому в тексте, таблице и на рисунках приводятся только календарные годы.

Динамика изменения величин среднегодовой температуры мерзлоты под СПС и его мощности, включая их квадратичные тренды вида $\Phi = a_1 t^2 + b_1 t + c_1$, где Φ — параметр; a_1 , b_1 и c_1 — коэффициенты; t — время, для основных типов грунтов изображена на рис. 6, 7 и в табл. 4. Расчеты показали, что величины T_{ps} (рис. 6), закономерно повторяя динамику T_a (см. рис. 5а), оказались довольно близкими для всех типов грунтов, различаясь друг от друга на величину порядка 0,1 °С. Наибольшей она оказалось у песков, наименьшей у глин, причем различия в величинах в масштабе рисунка различимы лишь на пиках зависимостей и в линиях тренда, тогда как в периоды, соответствующие их минимумам, разница существенно уменьшалась, становясь в масштабе рисунка неразличимой. Тренды имеют выраженную тенденцию к увеличению с начала 1970-х гг., сохраняющуюся до даты окончания расчетов (2016 г.).

Как и ожидалось, глубина протаивания песчаных грунтов оказалась выше, чем супесистых и глинистых. Соответствующая разность составила величину, близкую к 10 см. Как видно из рис. 7, процесс протаивания мерзлоты имеет черты, сходные с динамикой температуры мерзлоты под СПС. Однако в отличие от величины T_{ps} линии тренда величины X имеют симметричный характер: в период с конца 1940-х — начала 1980-х гг. происходило его постепенное понижение, сменившееся затем ростом, превысившим значение минимума больше чем в три раза и продолжающимся до настоящего времени. Следует отметить, что, несмотря на достаточно грубое задание высоты снежного и растительного покровов и комбинацию данных атмосферного реанализа и прямых метеонаблюдений, рассчитанная глубина протаивания оказалась достаточно близкой к измеренной в 2016 г. В то же время имеются данные мерзлотных наблюдений, согласно которым глубина СПС в 1970–1980-е гг. на архипелаге не опускалась ниже 0,15 м, причем на о. Октябрьской Революции, лежащем севернее о. Большевик, ее величина составляла в среднем 0,3–0,4 м, достигая в отдельные годы 0,9 м. Это противоречит как полученным модельным результатам, так и общей тенденции многолетних изменений мощности СПС и, по-видимому, может объясняться отепляющим эффектом снежного покрова, межгодовая изменчивость толщины которого, к сожалению, игнорировалась в данных расчетах.

Сравнение полученных результатов с результатами расчетов по этой же модели, выполненных для песчаных и глинистых грунтов района п. Тикси [14], показало в целом сходный характер многолетней динамики рассчитанных величин в обоих пунктах. При этом значения T_{ps} и X для о. Большевик, судя по линиям трендов, оказались примерно на 3–4 °С и 1 м ниже. Адекватность полученных оценок на качественном уровне может быть проверена по эмпирическому соотношению, связывающему величину X в м с географической широтой местности φ в градусах с.ш. для островов и побережья моря Лаптевых без учета гипсометрического фактора, приведенному в работе [6]:

$$X = a_2 \varphi + b_2, \quad (8)$$

где a_2 и b_2 — эмпирические коэффициенты. Результаты расчетов по (8), приведенные в табл. 5 для ЛБМБ ($\varphi = 79^\circ 25'$ с.ш.) и Тикси ($\varphi = 71^\circ 38'$ с.ш.) в целом соответствуют данным расчетов по (1) и показывают, что с уменьшением широты на 1 градус глу-

Глубина сезонного протаивания для различных типов грунта для ЛБМБ и Тикси

Тип грунта	$W_{\text{лот}}, \%$	a_2	b_2	$X, \text{м}$		$\text{м}/^\circ \text{с.ш.}$
				ЛБМБ	Тикси	
Суглинок	45	–0,0485	4,11	0,27	0,64	0,05
	20	–0,0550	4,70	0,34	0,76	0,06
Песок	25	–0,0719	6,09	0,39	0,94	0,07
	5	–0,0816	6,97	0,50	1,13	0,08

бина сезонного протаивания суглинков увеличивается на 0,05–0,06 м, а песков — на 0,07–0,08 м, что соответствует колебаниям широтного градиента от 0,05 до 0,08 $\text{м}/^\circ \text{с.ш.}$ При этом следует иметь в виду, что из-за значительной пространственно-временной вариативности теплофизических свойств грунтов и напочвенных покровов реальная глубина протаивания грунта является, в известном смысле, случайной величиной и может отличаться от модельной, рассчитанной в виде единственного числа X . Это следует из детерминистического характера моделей (1) и (2), изначально разработанных для точечных расчетов, что противоречит стохастической природе процессов сезонного протаивания/промерзания мерзлоты [7]. Очевидно, что любые расчеты с использованием детерминистического метода оправданы лишь при использовании средних значений параметров грунтов при условии пренебрежения их естественной изменчивостью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итоги, следует отметить, что модельные оценки мерзлотно-климатических изменений последних 70 лет вполне удовлетворительно согласуются с ходом глобальных изменений температуры, по крайней мере в рамках предположений о неизменности толщины снежного и растительного покровов. При этом представленные в настоящей работе результаты дают лишь общее представление о процессах формирования деятельного слоя грунта и являются стимулом для продолжения и расширения начатых на НИС «Ледовая база “Мыс Баранова”» исследований, особенно в плане изучения сезонной эволюции свойств напочвенных покровов и их влияния на эволюцию его термической структуры.

Благодарности. Авторы выражают искреннюю признательность рецензентам, чьи замечания способствовали улучшению качества статьи. Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ (идентификатор проекта RFMEFI61617X0076).

Acknowledgments. The authors are sincerely grateful to the reviewers, whose comments have contributed to the improvement of the quality of the article. This study was supported by Ministry of Science and Education of the Russian Federation (Project identification RFMEFI61617X0076).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник по климату СССР. Ч. II: Температура воздуха и почвы. Вып. 24: Якутская АССР. Л.: Гидрометеиздат, 1966. 398 с.
2. Почвенно-географическое районирование СССР. URL: <http://www.ecosystema.ru/08nature/soil/i13.htm> (дата обращения 01.02.2018).

REFERENCES

1. *Spravochnik po klimatu SSSR. Ch. II: Temperatura vozdukh i pochvy. Vyp. 24: Yakutskaja ASSR.* Reference book on the climate of the USSR. Part II: Air and soil temperature. Issue 24: The Yakut ASSR. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1966: 398 p. [In Russian].

3. Сумгин М.И., Качурин С.П., Толстихин Н.И., Тумель В.Ф. Общее мерзотоведение. М.: Изд-во АН СССР, 1940. 340 с.
4. Гаврильев Р.И. Теплофизические свойства компонентов природной среды в криолитозоне. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2004. 145 с.
5. Гаврильев Р.И. Теплофизические свойства горных пород и напочвенных покровов криолитозоны. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1998. 280 с.
6. Заболотник С.И. Широтные и высотные закономерности сезонного протаивания грунтов в Якутии // Проблемы геокриологии. Якутск: Ин-т мерзотоведения СО РАН, 1998. С. 88–94.
7. Анисимов О.А. Вероятностно-статистическое моделирование мощности сезонного слоя в условиях современного и будущего климата: результаты // Криосфера Земли. 2009. Т. XIII. № 3. С. 36–44.
8. Romanovsky V.E., Marchenko S. The GIPL permafrost dynamic model, 2013. URL: <http://www.snap.uaf.edu/attachments/The%20GIPL-1%20Model-final.pdf> (дата обращения 10.02.2018).
9. Кудрявцев В.А., Гарагуля Л.С., Кондратьева К.А., Меламед В.Г. Основы мерзлотного прогноза при инженерно-геологических исследованиях. М.: Наука, 1974. 431 с.
10. Sazonova T.S., Romanovsky V.E. A model for regional-scale estimation of temporal and spatial variability of active-layer thickness and mean annual ground temperatures // Permafrost and Periglacial Processes. 2003. № 2. P. 125–140.
11. Анисимов О.А. Современные и будущие изменения вечной мерзлоты: синтез наблюдений и моделирования // Проблемы Арктики и Антарктики. 2008. № 1 (78). С. 7–16.
12. Керстен М.С. Тепловые свойства грунта // Мерзлотные явления в грунте. М.: Иностранная литература, 1955. С. 200–207.
13. СНиП 2.02.04-88 «Основания и фундаменты на многолетнемерзлых грунтах». М.: Стройиздат, 1990. 53 с.
14. Богородский П.В., А.П. Махитас, В.Ю. Кустов, А.С. Грубый, В.В. Мовчан. Динамика сезонного протаивания вечной мерзлоты в районе гидрометеорологической обсерватории Тикси // Проблемы Арктики и Антарктики. 2015. № 4 (106). С. 89–99.
2. Pochvenno-geograficheskoe raionirovanie SSSR. Soil-geographical division of the USSR. Available at: <http://www.ecosystema.ru/08nature/soil/i13.htm> (accessed 01.02.2018).
3. Sumgin M.I., Kachurin S.P., Tolstikhin N.I., Tumel' V.F. Obshchee merzlotovedenie. General permafrost studies. Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1940: 340 p. [In Russian].
4. Gavril'ev R.I. Teplofizicheskie svoistva komponentov prirodnoi sredy v kriolitozone. Thermophysical properties of the components of the natural environment in the permafrost zone. Novosibirsk: Publishing house SB RAS, 2004: 145 p. [In Russian].
5. Gavril'ev R.I. Teplofizicheskie svoistva gornyykh porod i napochvennykh pokrovov kriolitozony. Thermophysical properties of rocks and soil cover of permafrost zone. Novosibirsk: Publishing house SB RAS, 1998: 280 p. [In Russian].
6. Zabolotnik S.I. Latitudinal and high-altitude patterns of seasonal thawing of soils in Yakutia. Problemy geokriologii. Problems of geocryology. Yakutsk: Institute of Permafrost SB RAS, 1998: 88–94. [In Russian].
7. Anisimov O.A. Probabilistic-statistical modeling of seasonal thickness in the current and future climate: results. Kriosfera Zemli. Cryosphere of the Earth. 2009: XIII, 3: 36–44. [In Russian].
8. Romanovsky V.E., Marchenko S. The GIPL permafrost dynamic model, 2013. Available at: <http://www.snap.uaf.edu/attachments/The%20GIPL-1%20Model-final.pdf> (accessed 02.02.2018).
9. Kudriavtsev V.A., Garagulia L.S., Kondrat'eva K.A., Melamed V.G. Osnovy merzlotnogo prognoza pri inzhenerno-geologicheskikh issledovaniyakh. Fundamentals of the permafrost forecast for engineering-geological studies. Moscow: Nauka, 1974: 431 p. [In Russian].
10. Sazonova T.S., Romanovsky V.E. A model for regional-scale estimation of temporal and spatial variability of active-layer thickness and mean annual ground temperatures. Permafrost and Periglacial Processes. 2003, 2: 125–140.
11. Anisimov O.A. Modern and future changes in permafrost: the synthesis of observations and modeling. Problemy Arktiki i Antarkтики. Problems of Arctic and Antarctic. 2008, 1 (78): 7–16. [In Russian].
12. Kersten M.S. Thermal properties of soil. Merzlotnye iavleniia v grunte. Frozen phenomena in the ground. Moscow: Inostrannaya literatura, 1955: 200–207. [In Russian].

15. Константинов П.Я., Аргунов Р.Н., Герасимов Е.Ю., Угаров И.С. О связи глубины сезонного протаивания с межгодовой изменчивостью средней годовой температуры грунтов // Криосфера Земли. 2006. Т. X. № 3. С. 15–22.

13. SNiP 2.02.04-88 «*Osnovaniia i fundamenty na mnogoletnemerzlykh gruntakh*». Foundations and foundations on permafrost soils. Moscow: Stroiizdat, 1990: 53 p. [In Russian].

14. Bogorodskii P.V., A.P. Makshtas, V.Iu. Kustov, A.S. Grubiyi, V.V. Movchan. Dynamics of seasonal thawing of permafrost in the area of Tiksi Hydrometeorological Observatory. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Problems of Arctic and Antarctic, 2015, 4 (106): 89–99. [In Russian].

15. Konstantinov P.Ia., Argunov R.N., Gerasimov E.Iu., Ugarov I.S. On the connection of the depth of seasonal thawing with the interannual variability of the average annual soil temperature. *Kriosfera Zemli*. Cryosphere of the Earth, 2006, X, 3: 15–22. [In Russian].

ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ И ГИДРОСФЕРЫ

УДК 550.388.2

DOI: 10.30758/0555-2648-2018-64-1-31-41

ТЕСТИРОВАНИЕ МОДЕЛИ IRI ПО ДАННЫМ РОССИЙСКИХ ИОНОСФЕРНЫХ СТАНЦИЙ ЛОВОЗЕРО, САЛЕХАРД, ДИКСОН, ТУНГУСКА И ЯКУТСК

Ю.А. ШМЕЛЕВ^{*1,3}, О.А. МАЛЬЦЕВА², В.Е. МОРОЗОВ³,
Д.И. ШИЛОВ³, С.А. БЕЗВЫТНЫЙ³

¹ — ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

² — Научно-исследовательский институт физики, Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

³ — Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия

*shmelev.juri@yandex.ru

TESTING OF THE IRI MODEL BY DATA FROM LOVOZERO, SALEKHARD, DICKSON, TUNGUSKA AND YAKUTSK IONOSPHERIC STATIONS

J.A. SHMELEV^{*1,3}, O.A. MALTSEVA², V.E. MOROZOV³,
D.I. SHILOV³, S.A. BEZVYTYNYJ³

¹ — State Scientific Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, , Russia

² — Research Institute of Physics, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

³ — St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia

*shmelev.juri@yandex.ru

Received January, 24, 2018

Accepted April, 17, 2018

Keywords: Arctic region, critical frequency, Ionosphere, total electron content.

Summary

Empirical models are one of effective ways to set and predict a condition of the ionosphere. To estimate an accuracy of such setting it is necessary to test models by means of experimental data. One of most widely used models is IRI (International Reference Ionosphere), however it is insufficiently tested in the region of high latitudes. In the given article results of testing of the model IRI according to vertical sounding on Russian ionosondes, located in subauroral and high-latitude zones in March–

Citation: J.A. Shmelev, O.A. Maltseva, V.E. Morozov, D.I. Shilov, S.A. Bezvytnyj. Testing of the IRI Model by Data from Lovozero, Dickson, Tunguska, and Yakutsk Ionospheric Stations. *Problemy Arktiki i Antarkтики*. Arctic and Antarctic Research. 2018, 64 (1): 31–41. [In Russian]. doi: 10.30758/0555-2648-2018-64-1-31-41

April 2016 are presented. Feature of the period is presence of several geomagnetic disturbances. The studied parameter is a critical frequency foF2, the basic analyzed magnitude is the deviation of a model value from experimental one and its relative mean square deviation. Despite increase last years of numbers of ionosondes in a Russian Arctic zone by efforts of AARI, their number is not enough for detailed monitoring. Additionally, it is possible to use receivers of signals of navigation satellites of such systems, as GPS, GLONASS, providing the information about a total electron content (TEC). In a number of papers, possibility of use of TEC to obtain critical frequencies is shown. In the present paper, confirmation of this possibility is given in subauroral and high-latitude regions. Results are presented for five Russian stations (Lovozero, Salekhard, Dickson, Tunguska, Yakutsk) in comparison with data of reference middle-latitude station Juliusruh. It is shown, that deviations of model values of foF2 from experimental medians in high latitudes are at level of middle-latitude values, relative deviations for instant values of foF2 day by day do not exceed 20–25 %. The TEC usage allows decreasing this estimation in 2 times. Values of correlation coefficients between foF2 and TEC, defining possibility to use TEC for obtaining foF2, lay within 0.6–0.99. The TEC usage allows filling absent values of foF2.

Поступила 24 января 2018 г.

Принята к печати 17 апреля 2018 г.

Ключевые слова: ионосфера, критическая частота, полное электронное содержание, арктическая зона

В данной статье приводятся результаты тестирования модели IRI (International Reference Ionosphere) по данным вертикального зондирования на российских ионозонах, расположенных в арктической зоне, в марте–апреле 2016 г. Особенностью периода является наличие нескольких геомагнитных возмущений. Полученные в работе данные подтверждают возможность использования TEC для определения критических частот в арктическом регионе. Результаты исследования приводятся для пяти российских станций (Ловозеро, Салехард, Диксон, Тунгуска, Якутск) в сравнении с данными эталонной среднеширотной станции Юлиусрух. Показано, что отклонения модельных значений foF2 от экспериментальных медиан в высоких широтах находятся на уровне среднеширотных, для мгновенных значений foF2 день ото дня относительные изменения могут составлять до 20–25 %. Использование TEC позволяет в 2 раза уменьшить эту оценку. Значения коэффициентов корреляции между foF2 и TEC, определяющей возможность использования TEC для расчета foF2, лежат в пределах 0,6–0,99.

ВВЕДЕНИЕ

Для функционирования современных систем связи и навигации необходима информация о параметрах ионосферы [1]. Это особенно существенно для региона высоких широт. Для получения этой информации существуют две возможности: 1) базы экспериментальных данных, 2) модели ионосферы. К основным параметрам ионосферы относятся критическая частота слоя F2, его высота hmF2, полное электронное содержание (Total Electron Content, TEC). Существующие трудности в получении экспериментальных данных заставляют широко использовать модели ионосферы, в частности эмпирические модели. Существует множество эмпирических моделей, однако наиболее применяемой является Международная справочная модель ионосферы IRI [2], поэтому она используется в данной статье. Однако существует мнение, что она обеспечивает хорошие точности в средних широтах и недостаточно хорошо работает в высоких широтах. Это связано с меньшим количеством станций, чем в средних широтах, данные которых использовались при построении модели, с намного большей изменчивостью поведения ионосферы и т. д., поэтому необходимы конкретные оценки соответствия между модельными и экспериментальными

значениями параметров в высоких широтах. В данной статье внимание уделяется критической частоте foF2, непосредственно связанной с максимальной применимой частотой при распространении КВ-радиоволн вдоль трасс.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ И РАССЧИТЫВАЕМЫЕ ВЕЛИЧИНЫ

Рассматриваются данные за март–апрель 2016 г. Значения foF2 выбраны из базы SPIDR (<http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr>), значения TEC из системы глобальных карт IGS рассчитываются по данным файлов IONEX (<ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/pub/gps/products/ionex>), Dst-индекс брался из базы всемирного центра World Data Center for Geomagnetism, Kyoto (http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_final/index.html). В качестве модели IRI использовалась online версия IRI2016 на сайте (http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/iri2016_vitmo.html), чтобы избежать неточностей, связанных с введением новых солнечных индексов [3]. Необходимо сделать замечание по поводу использования базы SPIDR: университет Colorado CIRES сообщил, что работа базы прекращена из-за недостатка компьютерного ресурса и возможных проблем с безопасностью в мае 2016 г. Данные для проведенного исследования были выбраны до закрытия базы.

В марте 2016 г. средний индекс F10.7 = 90,6 sfu. В год максимума солнечной активности (2014) F10.7 = 148,4 sfu, в следующем, 2015 г. F10.7 = 73,9 sfu, т.е. март 2016 г. характеризуется средним уровнем активности. То же самое можно сказать и об апреле с его средним значением F10.7 = 94,1 sfu. Уровень геомагнитной активности для этих месяцев представлен на рис. 1 в виде поведения индекса Dst для каждого дня.

Видно, что март 2016 г. характеризуется довольно сильным возмущением 6–7 марта с минимальным значением Dst = –96 nT. В первой половине апреля 2016 г. довольно регулярно наблюдаются умеренные возмущения.

Основными анализируемыми величинами являются отклонения рассчитанных значений foF2 от экспериментальных величин. Это в первую очередь относится

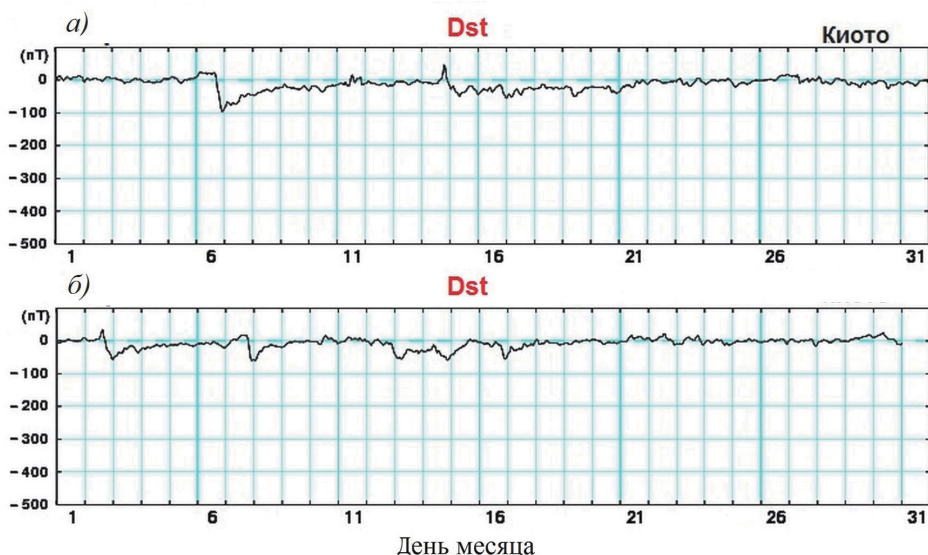


Рис. 1. Поведение индекса Dst в марте (а) и апреле (б) 2016 г.

Fig. 1. Behaviour of index Dst in March (a) and April (б) 2016

к значениям модели IRI (foF2(IRI)). Поскольку модель является медианной, она не описывает вариации foF2 день ото дня. Особенностью подхода является использование мгновенных значений TEC для расчета foF2, что позволяет определить вариации ото дня ко дню. Традиционный метод определения foF2 по TEC основан на использовании эквивалентной толщины ионосферы τ (IRI) для модели IRI (τ (IRI) = TEC(IRI)/NmF2(IRI)) [4–6]. Мгновенные значения NmF2 получаются при использовании экспериментальных значений TEC(obs), т.е. реконструированные (reconstruction) значения NmF2(rec) = TEC(obs)/ τ (IRI). В работе [7] предложена экспериментальная медиана эквивалентной толщины ионосферы $\tau_{\text{мед}}$ и получены некоторые результаты, показывающие возможность использования как самой модели, так и TEC в высоких широтах. Необходима дополнительная статистика, подтверждающая эти результаты в других условиях солнечной активности.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В табл. 1 приводятся статистические данные, характеризующие соответствие между модельными и экспериментальными значениями критической частоты foF2 для марта 2016 г. Эта статистика не является всеобъемлющей, но дает пример, ограниченный наличием данных. В первом столбце приводятся станции. Первой стоит среднеширотная станция Юлиусрух, являющаяся эталонной. Остальные станции расположены в порядке увеличения долготы. В столбцах 2–3 даются географические и геомагнитные (в скобках) координаты станций (широта и долгота) в градусах. Столбцы 4–6 содержат абсолютные отклонения модельных foF2 от экспериментальных значений для трех опций: 1) сравнение значений модели IRI с экспериментальными медианами (основная характеристика точности модели, так как модель обеспечивает медианные значения), 2) сравнение значений модели IRI с мгновенными экспериментальными значениями (характеризует средние отклонения foF2 день ото дня при использовании значений модели для описания ежедневных значений), 3) сравнение для оценки эффективности использования TEC. Столбцы 7–9 показывают соответствующие среднеквадратические отклонения. Последний столбец

Таблица 1

Статистика сравнения модельных и экспериментальных значений foF2 в марте 2016 г.

Станция	Широта	Долгота	ΔfoF2 , MHz			σ, %			ρ (foF2, TEC)
			Медиана	IRI	$\tau_{\text{мед}}$	Медиана	IRI	$\tau_{\text{мед}}$	
Юлиусрух	54°36' (53°56') с.ш.	13°24' (99°31') в.д.	0,27	0,57	0,30	8,40	15,3	8,10	0,97
Ловозеро	67°97' (63°34') с.ш.	35°02' (127°03') в.д.	0,32	0,75	0,52	9,5	18,8	8,1	0,83
Салехард	66°30' (58°28') с.ш.	66°30' (149°58') в.д.	0,41	1,05	0,79	10,4	23,6	14,4	0,68
Диксон	73°30' (64°26') с.ш.	80°24' (162°35') в.д.	0,66	0,96	0,44	17,3	20,7	9,8	0,6
Тунгуска	62° (52°32') с.ш.	90° (166°41') в.д.	0,36	0,43	0,11	8,6	10,5	8,5	0,99
Якутск	62° (52°46') с.ш.	129°36' (162°46') в.д.	0,21	0,44	0,31	5,6	12,2	8,5	0,94

включает значения коэффициента корреляции между f_oF_2 и ТЕС, рассчитанного по двухчасовым значениям за все дни месяца. Видно, что станции расположены как в субавторальной, так и в высокоширотной зонах.

Цифры для станции Юлиусрух являются ориентиром. Видно, что отклонения для медиан у арктических станций не намного хуже, чем у среднеширотной, т.е. модель IRI вполне адекватно описывает среднее состояние ионосферы. Это отличается от распространенного мнения, что модель IRI плохо работает в высоких широтах. За исключением станции Диксон СКО не превышает 10 %. Случай станции Диксон можно использовать для иллюстрации особенностей и трудностей получения и использования ионосферной информации. На рис. 2 показано поведение ионосферных параметров для станции Диксон в период с 1 по 8 марта 2016 г. Для f_oF_2 результаты даются для четырех опций: 1) экспериментальные значения (черные точки), 2) значения модели IRI (полые квадраты), 3) значения, рассчитанные с использованием ТЕС (треугольники), 4) экспериментальные медианы (крестики). Для ТЕС приводятся экспериментальные значения и медианы.

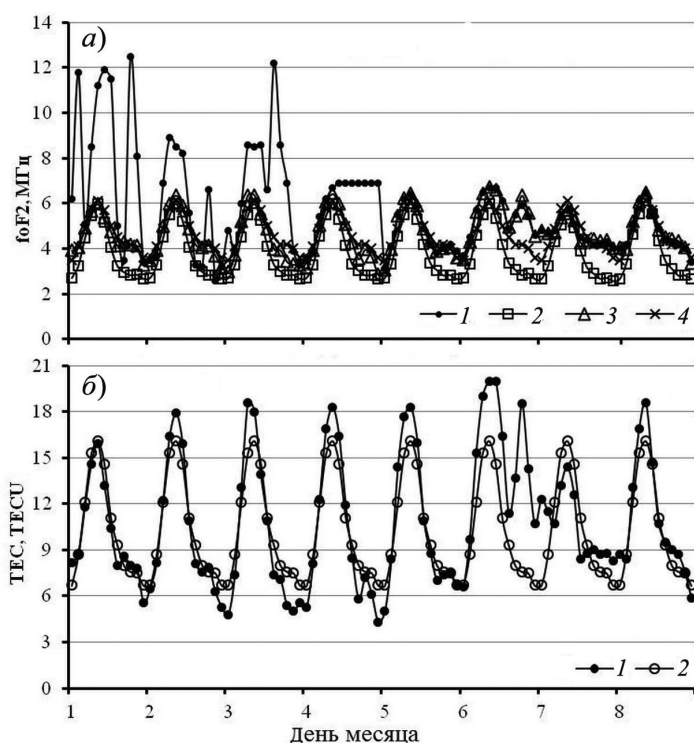


Рис. 2. Поведение параметров ионосферы в период 1–8 марта 2016 г.

a) 1 — экспериментальные значения; 2 — значения модели IRI; 3 — значения, рассчитанные с использованием ТЕС; 4 — экспериментальные медианы; *б)* 1 — экспериментальные значения; 2 — экспериментальные медианы

Fig. 2. Behaviour of ionospheric parameters in March, 1–8st 2016.

a) 1 — experimental values; 2 — model IRI values; 3 — values calculated using TEC; 4 — experimental medians; *б)* 1 — experimental values; 2 — experimental medians

Видны всплески ионизации в первые три дня, для которых нет соответствия в поведении ТЕС. Это может свидетельствовать о наличии спорадической ионизации в слое E, которая была принята во время съема информации за foF2 и привела к большим отклонениям. Определенным свидетельством в пользу такого объяснения может быть наличие спорадической ионизации 4 марта 2016 г. и четкое соответствие foF2 и ТЕС во время типичных дневных и ночных усилений 6 марта 2014 г., связанных с геомагнитными возмущениями в соответствии с поведением индекса Dst.

Возвращаясь к таблице, можно увидеть, что и точность описания состояний день ото дня для выбранных станций не сильно отличается от среднеширотной. Что касается использования ТЕС, то в данном случае получаемые отклонения всегда меньше отклонений для случая день ото дня модели IRI примерно в 2 раза и часто лежат на уровне оценок для медиан и лучше. В последнем столбце приводятся коэффициенты корреляции между foF2 и ТЕС. Видно, что везде корреляция значимая, причем в высоких широтах она может быть на уровне среднеширотных значений. Это свидетельствует о том, что коэффициент пропорциональности (эквивалентная толщина ионосферы τ) между foF2 и ТЕС может использоваться для определения foF2 по экспериментальным значениям ТЕС. В работе [8] показана важная роль τ для

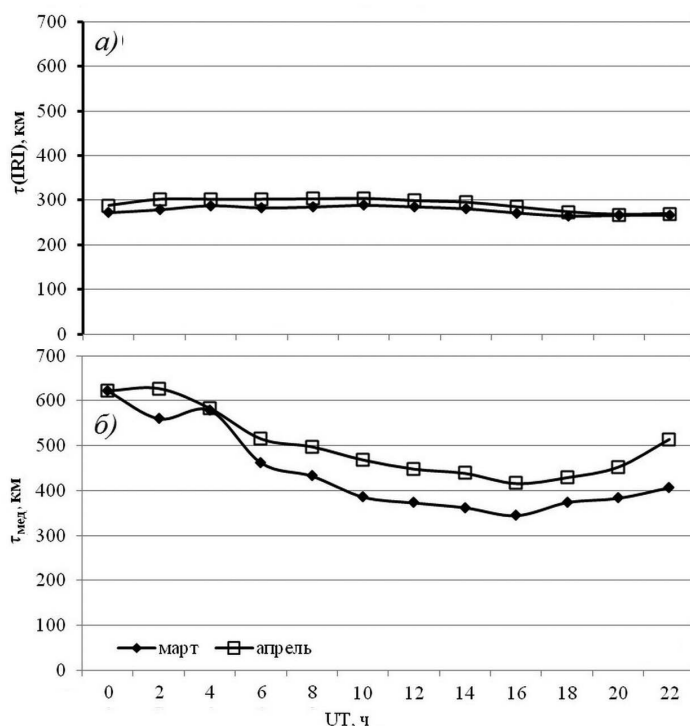


Рис. 3. Сравнение эквивалентной толщины ионосферы для модели $\tau(iri)$ (a) с экспериментальной медианой τ_{med} (б). Ловозеро, март–апрель 2016 г.

Fig. 3. Comparison of an equivalent slab thickness of the ionosphere for the IRI model $\tau(iri)$ (a) with an experimental median τ_{med} (b). Lovozero, March-April 2016

характеристики и мониторинга состояния ионосферы и ее отличие от модельных значений. На рис. 3 иллюстрируются различия между $\tau(\text{IRI})$ и экспериментальной медианой $\tau_{\text{мед}}$ на примере станции Ловозеро для марта и апреля 2016 г.

Видны принципиальные различия как по характеру поведения, так и по величине. Такие же различия характерны и для всех других станций, в том числе и для среднеширотной.

Дополнительно можно привести результаты для апреля 2016 г. Здесь данных было меньше. Этот случай характеризует табл. 2.

Таблица 2

Статистика сравнения модельных и экспериментальных значений foF2 в апреле 2016 г.

Станция	Широта	Долгота	ΔfoF2], MHz			σ , %			ρ (foF2, TEC)
			Медиана	IRI	$\tau_{\text{мед}}$	Медиана	IRI	$\tau_{\text{мед}}$	
Юлиусрух	54°36' (53°56') с.ш.	13°24' (99°31') в.д.	0,16	0,44	0,23	3,9	11,6	7,5	0,96
Ловозеро	67°97' (63°34') с.ш.	35°02' (127°03') в.д.	0,26	0,54	0,37	7,7	16,4	6,1	0,75
Тунгуска	62° (52°32') с.ш.	90° (166°41') в.д.	0,55	0,68	0,31	13,8	18,2	9	0,92
Якутск	62° (52°46') с.ш.	129°36' (162°46') в.д.	0,36	0,58	0,35	9	15,2	11,6	0,92

В целом подтверждается статистика марта 2016 г. Ввиду того, что отклонения для арктических станций существенно больше, чем в среднеширотной зоне, необходимо посмотреть, не играет ли роль возмущенное состояние. Для этого на рис. 4 приводятся графики отклонений совместно со среднесуточными значениями индекса Dst (уменьшенными в 10 раз для наглядности) для четырех станций.

При очень низких значениях Dst отклонения увеличены, но четкой связи с индексом Dst не видно. Это подтверждается и соответствующими коэффициентами корреляции между отклонениями и Dst, которые составили $-0,295$; $0,175$; $0,319$; $-0,209$ для этих станций по всем дням месяца.

Важным аспектом использования ТЕС является возможность восстанавливать значения foF2 при отсутствии данных ионозонда. Среди исследуемых случаев данные отсутствовали с 1 по 12 марта 2016 г. для станции Якутск. Эти значения были восстановлены по измерениям ТЕС с использованием медиан $\tau_{\text{мед}}$ рассчитанных по данным с 13 по 31 марта. Результаты для этих периодов представлены на рис. 5 в виде суточных ходов ТЕС и foF2. На рис. 5а и 5б приводятся результаты для периода с 13 по 31 марта с целью контроля соответствия, на рис. 5в и 5г — для периода с 1 по 12 марта. Приведены мгновенные значения (точки) и медианы. Крестиками и полыми треугольниками показаны значения foF2, восстановленные по экспериментальным значениям ТЕС в эти периоды. На графиках (рис. 5а и 5б) видно, что восстановленные значения foF2 ближе к экспериментальным, чем медианы и тем более чем значения для модели IRI, не показанные на рисунках, и отражают характер поведения, в частности, положительные и отрицательные возмущения.

Это позволяет предположить, что и динамика поведения foF2 в период с 1 по 12 марта воспроизведена правильно.

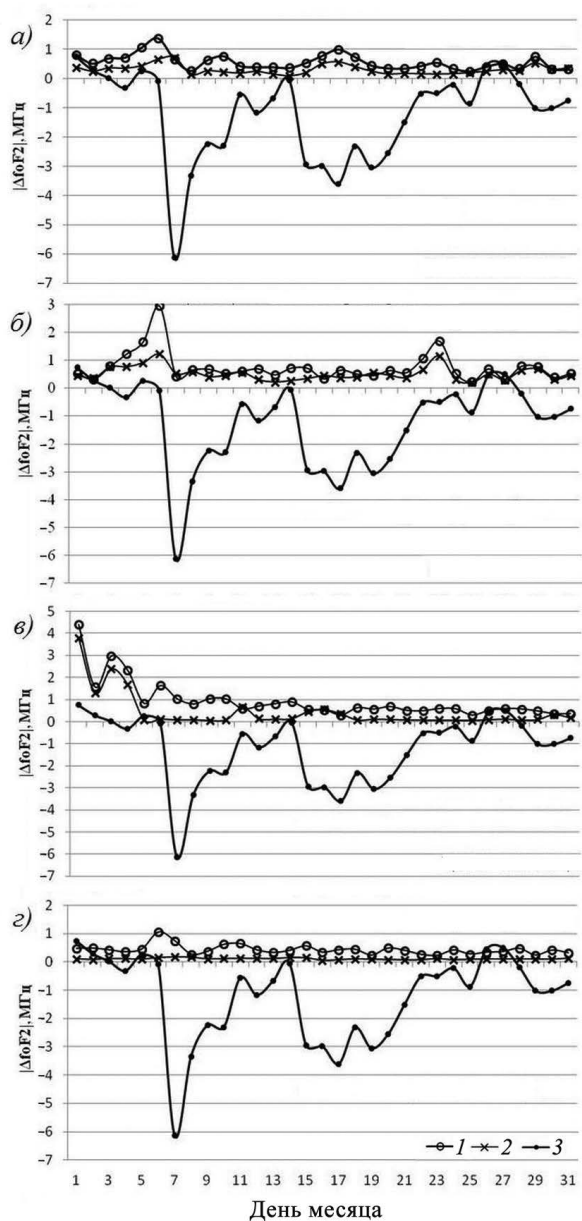


Рис. 4. Иллюстрация связи между отклонениями $foF2$ и индексом Dst в марте 2016 г.

а) — Юлиусрух, б) — Ловоозеро, в) — Диксон, з) — Тунгуска; 1 — IRI, 2 — $\tau_{\text{мес}}$, 3 — 0,1Dst (среднее)

Fig. 4. An illustration of connection between deviations of $foF2$ and index Dst.

а) — Juliusruh, б) — Lovozero, в) — Dixon, з) — Tunguska; 1 — IRI, 2 — $\tau_{\text{мес}}$, 3 — 0,1Dst (average)

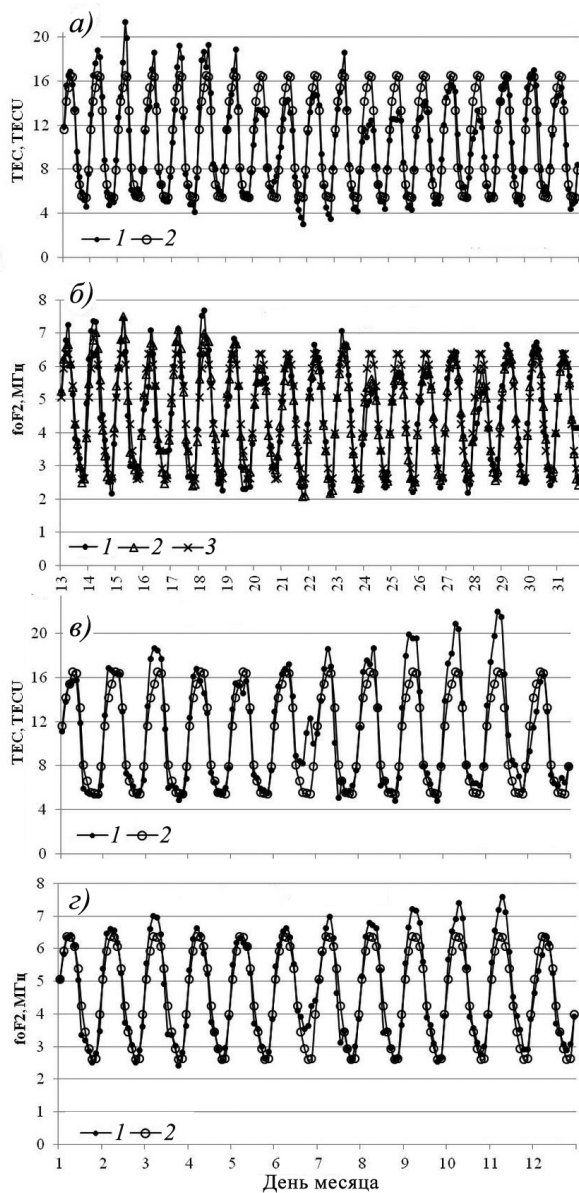


Рис. 5. Иллюстрация результатов восстановления отсутствующих значений foF2.

а) — Якутск (13–31 марта 2016 г.): 1 — экспериментальные значения, 2 — рассчитанные медианы; б) — Якутск (13–31 марта 2016 г.): 1 — экспериментальные значения, 2 — восстановленные значения, 3 — рассчитанные медианы; в) — Якутск (1–12 марта 2016 г.): 1 — экспериментальные значения, 2 — рассчитанные медианы; г) — Якутск (1–12 марта 2016 г.): 1 — восстановленные значения, 2 — рассчитанные медианы

Fig. 5. An illustration of results of reconstruction of absent values of foF2.

а) — Yakutsk (13–31 March 2016): 1 — experimental values, 2 — calculated medians; б) — Yakutsk (13–31 March 2016): 1 — experimental values, 2 — recovered values, 3 — calculated medians; в) — Yakutsk (1–12 March 2016): 1 — experimental values, 2 — calculated medians; г) — Yakutsk (1–12 March 2016): 1 — recovered values, 2 — calculated medians

ВЫВОДЫ

В результате сравнения рассчитанных и экспериментальных foF2 получено, что отклонения модельных значений foF2 от медиан в субавроральных и высоких широтах находятся на уровне среднеширотных, для мгновенных значений foF2 отклонения могут составлять до 20–25 %. Использование TEC позволяет в 2 раза уменьшить эту оценку. Значения коэффициентов корреляции между foF2 и TEC, определяющей возможность использования TEC для задания foF2, лежат в пределах 0,6–0,99. Это, возможно, связано с малой долей плазмосферной части в TEC.

Благодарности. Авторы благодарят группы исследователей, разрабатывающих модель IRI, за предоставление online версии; группы исследователей, обеспечивающих данные баз SRIDR и глобальных карт GIM TEC. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18–05–00343А. Авторам были предоставлены данные вертикального зондирования для станций Юлиусрух, Ловозеро, Салехард и других для марта и апреля 2016 г., загруженные из базы данных SRIDR до прекращения доступа.

Acknowledgments. Authors thank groups of the researchers, developing the IRI model, for providing an online option of the model; groups of the researchers, providing of SRIDR database and global maps GIM TEC. This work is supported by the Russian Foundation for Basic Research, Grant 18–05–00343A. Authors were provided with vertical sounding data for stations Juliusruh, Lovozero, Salekhard and others for March and April 2016, downloaded from the SPIDR database prior to the termination of access.

ЛИТЕРАТУРА

1. Goodman J.M. Operational communication systems and relationships to the ionosphere and space weather // Adv. Space Res. 2005. V. 36. C. 2241–2252. doi:10.1016/j.asr.2003.05.063.
2. Bilitza D., Altadill D., Zhang Y., Mertens C., Truhlik V., Richards P., McKinnell L.-A., Reinisch B. The International Reference Ionosphere 2012 — a model of international collaboration // J. Space Weather Space Clim. 2014. V. 4, A07. doi: 10.1051/swsc/2014004.
3. Gulyaeva T.L. Modification of solar activity indices in the international reference ionosphere IRI and IRI-PLAS models due to recent revision of sunspot number time series // Solar-Terrestrial Physics. 2016. V. 2. No. 3. doi:10.12737/20872.
4. McNamara L.F. The use of total electron density measurements to validate empirical models of the ionosphere // Adv. Space Res. 1985. V. 5 (7). P. 81–90.
5. Houminer Z., Soicher H. Improved short-term predictions of foF2 using GPS time delay measurements // Radio Science. 1996. V. 31 (5). P. 1099–1108.

REFERENCES

1. Goodman J.M. Operational communication systems and relationships to the ionosphere and space weather. Adv. Space Res. 2005, 36: 2241–2252. doi: 10.1016/j.asr.2003.05.063.
2. Bilitza D., Altadill D., Zhang Y., Mertens C., Truhlik V., Richards P., McKinnell L.-A., Reinisch B. The International Reference Ionosphere 2012 — a model of international collaboration. J. Space Weather Space Clim. 2014, 4 (A07). doi: 10.1051/swsc/2014004.
3. Gulyaeva T.L. Modification of solar activity indices in the international reference ionosphere IRI and IRI-PLAS models due to recent revision of sunspot number time series. Solar-Terrestrial Physics. 2016, 2 (3). doi: 10.12737/20872.
4. McNamara L.F. The use of total electron density measurements to validate empirical models of the ionosphere. Adv. Space Res. 1985, 5 (7): 81–90.
5. Houminer Z., Soicher H. Improved short-term predictions of foF2 using GPS time delay measurements. Radio Science. 1996, 31 (5): 1099–1108.

6. *Gulyaeva T.L.* International standard model of the Earth's ionosphere and plasmasphere // *Astronomical and Astrophysical Transaction*. 2003. V. 22 (4). P. 639–643.
7. *Maltseva O.A., Mozhaeva N.S., Nikitenko T.V.* Comparison of model and experimental ionospheric parameters at high latitudes // *Adv. Space Res.* 2013. V. 51. No. 4. P. 599–609. <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2012.04.009>.
8. *Stankov S.M., Warnant R.* Ionospheric slab thickness — Analysis, modelling and monitoring // *Adv. Space Res.* 2009. V. 44. P. 1295–1303. doi:10.1016/j.asr.2009.07.010.
6. *Gulyaeva T.L.* International standard model of the Earth's ionosphere and plasmasphere. *Astronomical and Astrophysical Transaction*. 2003, 22 (4): 639–643.
7. *Maltseva O.A., Mozhaeva N.S., Nikitenko T.V.* Comparison of model and experimental ionospheric parameters at high latitudes. *Adv. Space Res.* 2013, 51 (4): 599–609. <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2012.04.009>.
8. *Stankov S.M., Warnant R.* Ionospheric slab thickness — Analysis, modelling and monitoring. *Adv. Space Res.* 2009, 44: 1295–1303. doi: 10.1016/j.asr.2009.07.010.

ОКЕАНОЛОГИЯ

УДК 551.465.41

DOI: 10.30758/0555-2648-2018-64-1-42-54

«АТЛАНТИФИКАЦИЯ» КАК ВЕРОЯТНАЯ ПРИЧИНА СОКРАЩЕНИЯ ПЛОЩАДИ МОРСКОГО ЛЬДА В БАССЕЙНЕ НАНСЕНА В ЗИМНИЙ СЕЗОН

П.В. АКСЕНОВ^{1,2}, В.В. ИВАНОВ^{1,3*}

¹ — ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

² — Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия

³ — Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*vladimir.ivanov@aari.ru

«ATLANTIFICATION» AS A POSSIBLE CAUSE FOR REDUCING THE SEA-ICE COVER IN THE NANSEN BASIN IN WINTER

P.V. AKSENOV^{1,2}, V.V. IVANOV^{1,3*}

¹ — State Scientific Center of the Russian Federation Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia

² — Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russia

³ — Moscow State University, Moscow, Russia

*vladimir.ivanov@aari.ru

Received April, 02, 2018

Accepted April, 17, 2018

Keywords: Arctic Ocean, hydrological regime, ice cover, reanalysis, thermal convection, vertical structure.

Summary

The paper presents arguments in favor of an explanation of the reduction of the ice-covered area in the Nansen basin of the Arctic Ocean (AO) in winter by the so-called “atlantification” — the strengthening of the influence of waters of Atlantic origin on the hydrological regime of the Arctic Ocean. We hypothesize that the main agent of “atlantification” in the Western Nansen Basin is winter thermal convection, which delivers heat from the deep to the upper mixed layer, thus melting sea ice and warming the near-surface air. To check up this hypothesis we used ocean reanalysis MERCATOR data for time interval 2007–2017. The quantitative criterion of thermal convection, based on the type of vertical thermohaline structure in the upper ocean layer, was applied to access the change of

Citation: P.V. Aksenov, V.V. Ivanov. “Atlantification” as a Possible Cause for Reducing of the Sea-Ice Cover in the Nansen Basin in winter. *Problemy Arktiki i Antarkтики*. Arctic and Antarctic Research. 2018, 64 (1): 42–54. [In Russian]. doi: 10.30758/0555-2648-2018-64-1-42-54

convection depth between climatic values in 1950–1990 and the present time. The main conclusion of the paper can be summarized as the following. Due to a gradual reduction of sea ice in the 1990s, the vertical stratification of waters in the Western Nansen Basin has changed. As a result, the potential for penetration of vertical thermal convection into the warm and saline Atlantic layer and the consumption of heat and salt content of this layer for warming and salinification of the overlying waters increased, thus leading to additional loss of sea ice in winter.

Поступила 02 апреля 2018 г.

Принята к печати 17 апреля 2018 г.

Ключевые слова: вертикальная структура, гидрологический режим, ледяной покров, реанализ, термическая конвекция, Северный Ледовитый океан.

В статье представлены аргументы в пользу объяснения сокращения площади ледяного покрова в бассейне Нансена Северного Ледовитого океана (СЛО) в зимний сезон так называемой «атлантификацией». Хотя сам термин был изначально введен в обращение применительно к гидрофизическим процессам в Баренцевом море, в последние годы он все чаще употребляется для обозначения усиления влияния вод атлантического происхождения на гидрологический режим СЛО. Согласно представленным в статье результатам, основным агентом «атлантификации» в бассейне Нансена выступает зимняя термическая конвекция, обеспечивающая эффективный вертикальный теплообмен между теплым слоем атлантической воды и верхним квазиоднородным слоем. Основной причиной возрастания интенсивности зимней конвекции в бассейне Нансена является сокращение объема (площади и толщины) морского льда в СЛО в 1990–2010-е гг. Вследствие уменьшения поступления талой воды солезапас верхнего слоя вод возрастает, что ведет к ослаблению вертикальной плотностной стратификации и созданию благоприятных предпосылок для более глубокого проникновения конвекции.

ВВЕДЕНИЕ

Термин «атлантификация», вероятно, был впервые использован в [1] для того, чтобы охарактеризовать периодическую смену вертикальной структуры вод в центральной части Баренцева моря. В дальнейшем авторы [2] расширили понятие «атлантификации» на все Баренцево море, определив ее как возрастание притока атлантических вод (АВ), приводящее к сокращению морского льда в море. Иванов и др. [3] применили термин «атлантификация» для западной части бассейна Нансена в СЛО, связав зимнее сокращение площади ледяного покрова к востоку от Шпицбергена с повышением температуры АВ и особенностями сезонных изменений ее характеристик. Результаты экспедиционных исследований в СЛО в 2013 и 2015 гг. показали расширение зоны влияния АВ далее на восток вдоль траектории их распространения, что дало основание применить понятие «атлантификации» уже к всему бассейну Нансена [4].

Фундаментальный вопрос о причинах ускоренного сокращения ледяного покрова в СЛО в последнее десятилетие [5] по-прежнему остается одним из дискуссионных в климатологическом сообществе. В этом контексте регион так называемой приатлантической Арктики (ПА), включающей Баренцево море и западную часть бассейна Нансена [6], особенно значим, поскольку именно здесь в последние годы наблюдается заметное сокращение площади морского льда не только в летний сезон, но и на пике его максимального сезонного развития [7, 8]. За всю историю регулярных спутниковых наблюдений (с 1979 г.) площадь зимнего ледяного покрова в западной части бассейна Нансена в 2016–2017 гг. достигла абсолютного минимума в январе–феврале. В данной статье на основе данных океанского ре-

нализа МЕРКАТОР [9, <https://www.mercator-ocean.fr/>] и исторических наблюдений анализируются возможные причины наблюдаемых изменений. В качестве наиболее вероятного механизма «атлантификации» бассейна Нансена рассматривается зимняя термическая конвекция, способная обеспечить эффективный перенос тепла из глубин к поверхности океана в условиях сократившегося объема морского льда в этом районе СЛО. В частности, показано, что дополнительный приток тепла из атлантического слоя к поверхности океана способствует замедлению нарастания льда и его таянию в зимний сезон, когда положительный атмосферный форсинг отсутствует.

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Океанский реанализ, основанный на различных методах усвоения (ассимиляции) данных наблюдений математическими моделями, является активно развивающимся и перспективным подходом в изучении физических процессов в океане. По существу, продукты реанализа могут рассматриваться как «виртуальные данные наблюдений», покрывающие всю акваторию Мирового океана регулярной сеткой с высоким пространственным разрешением. При этом необходимым условием применения данных реанализа для содержательного исследования является адекватность воспроизведения известных из наблюдений (базовых) процессов и явлений в заданных физических границах, что предварительно тестируется разработчиками соответствующего продукта (напр.: <http://cmems-resources.cls.fr/documents/QUID/CMEMS-OSI-QUID-011-001to007-009to012.pdf>).

Для исследования особенностей зимней конвекции в бассейне Нансена в современный период, характеризующийся пониженной ледовитостью, были использованы данные по температуре и солёности из системы океанского реанализа МЕРКАТОР с пространственным разрешением $1/12^\circ$. Ядром вычислительной системы является модельный комплекс NEMO v.3.2 [10]. Для ассимиляции данных используется алгоритм фильтрации Калмана [11]. Модель имеет пятьдесят расчетных уровней по вертикали (в том числе двадцать два в верхнем 100-метровом слое). Вертикальное разрешение меняется от 1 м у поверхности океана до 450 м в глубинном слое. С моделью океана сопряжена модель динамики и термодинамики морского льда LIM2. Граничные условия на поверхности задаются из атмосферного реанализа Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды ERA-Interim [12]. Наблюдения, усваиваемые системой, включают спутниковую альтиметрию, температуру поверхности моря (ТПМ), вертикальные профили температуры/солёности и концентрацию льда. Режим ассимиляции данных для поверхности океана включен для ТПМ, превышающей -1°C . При более низкой ТПМ относительный вклад данных наблюдений в расчетные переменные на поверхности океана постепенно снижается и становится равным нулю при достижении ТПМ $-1,7^\circ\text{C}$. В этом случае считается, что поверхность океана полностью покрыта льдом.

Для количественного сравнения исторических и современных гидрологических данных был использован так называемый критерий конвекции [13], который более корректно именовать критерием термической конвекции. Этот критерий (K_k) определяется безразмерным соотношением между изменением плотности, зависящим от исходного теплозапаса и солезапаса верхнего квазиоднородного слоя океана, и плотностным контрастом в пределах потенциального конвективного слоя (h).

$$Kk_h = \frac{\alpha(T_s - T_f) + \beta(\bar{S}_h - S_s)}{\rho_h - \rho_s},$$

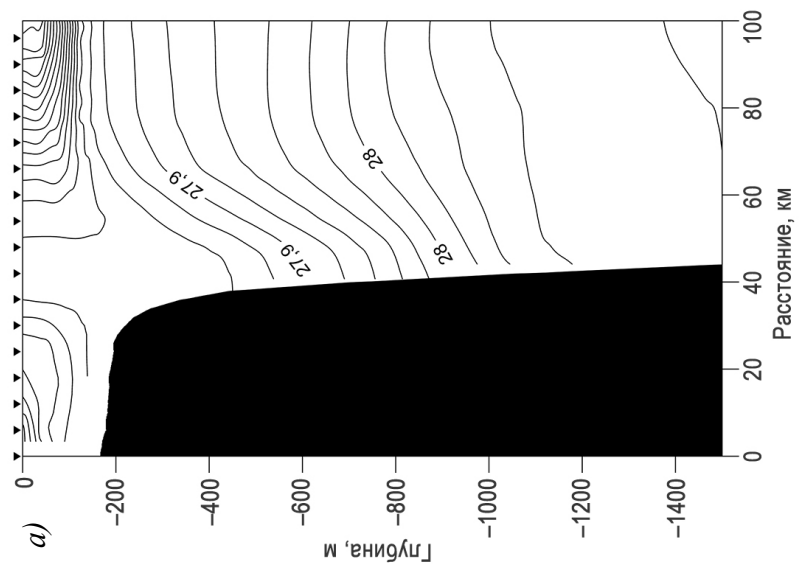
где α и β — коэффициенты термического расширения и солёностного сжатия соответственно; T_s , S_s и ρ_s — температура, солёность и потенциальная плотность верхнего квазиоднородного слоя в конце летнего сезона; T_f — температура замерзания, зависящая от солёности; ρ_h — потенциальная плотность на глубине h ; $\bar{S}_h$ — средняя солёность в слое от поверхности до глубины h . Если в заданной точке числовое значение критерия термической конвекции превышает единицу, то конвективное перемешивание способно охватить рассматриваемый слой при благоприятных атмосферных условиях, т.е. достаточно интенсивной теплоотдаче на границе океана и атмосферы. Физический смысл критерия термической конвекции связан с ограничением на охлаждение воды температурой замерзания. При достижении этой температуры вода далее не охлаждается, а происходит нарастание льда (возможное дальнейшее развитие конвекции по халинному типу Kk_h не описывает). Из этого очевидно следует, что чем больше тепла накоплено в верхнем квазиоднородном слое, тем больше диапазон охлаждения воды (и связанного с этим возрастания плотности) до достижения температуры замерзания. Важную роль при этом играет повышенная солёность, обеспечивающая большую плотность в верхнем слое и, соответственно, ослабленную плотностную стратификацию. Плотностная стратификация определяет устойчивость вод, которая в конечном итоге и контролирует вертикальное перемешивание при благоприятных атмосферных условиях. Критерий термической конвекции был применен для картирования районов приатлантической Арктики с высоким потенциалом для развития термической конвекции, достигающей заданной глубины. При выполнении расчетов толщина потенциального конвективного слоя (h) варьировалась в диапазоне 50–125 м, что соответствует глубине залегания верхней части атлантического слоя в исследуемом районе.

ТЕРМИЧЕСКАЯ КОНВЕКЦИЯ В ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ БАСЕЙНА НАНСЕНА В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ

Эффективность зимней термической конвекции в западной части бассейна Нансена зимой 2016–2017 гг. проиллюстрирована на рисунке 1а вертикальным распределением потенциальной плотности на гидрологическом разрезе, пересекающем континентальный склон вдоль 30° в.д. (рисунок 1б).

Гомогенизация вод от поверхности до глубины более 400 м над континентальным склоном хорошо заметна по характерному разряжению и заглублению изопикн. Для детального анализа особенностей конвекции были использованы ежедневные значения расчетных параметров за весь доступный период реанализа: с 1 января 2007 г. по 31 марта 2017 г. Рассматривалась область 25×25 км вокруг центральной части разреза, представленного на рис. 1б. На рис. 2 приведен график временных изменений плотностного контраста между горизонтом 155 м (соответствующего среднегодовому положению теплого ядра атлантической водной массы) и поверхностью океана.

Отличительной особенностью временных изменений является ярко выраженный сезонный цикл, проявляющийся в изменении плотностного контраста от 2–3 кг/м³ в летний сезон до нулевых значений зимой. Гипотеза о том, что наблюдаемая в зимний



б)

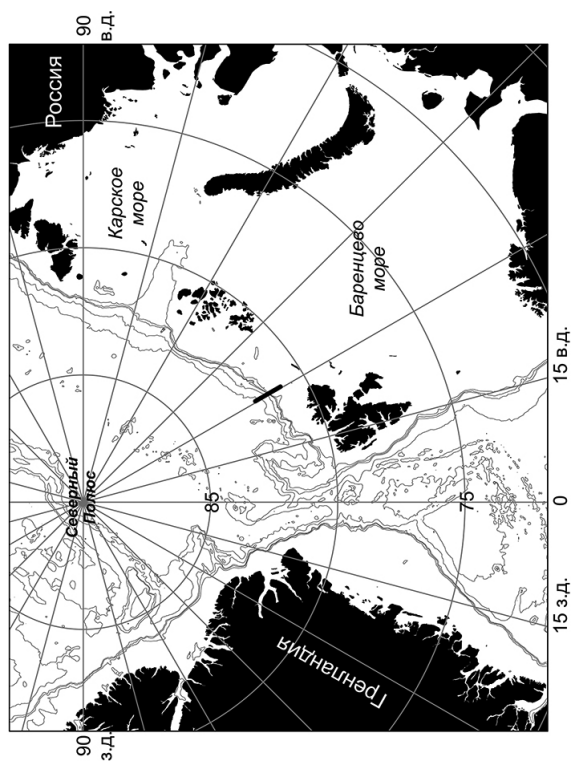


Рис. 1. Вертикальное распределение потенциальной плотности (кг/м^3) на гидрологическом разрезе 31 декабря 2016 г. по данным океанского ре-анализа МЕРКАТОР (а) и рельеф дна в регионе приатлантической Арктики (б). Положение анализируемого гидрологического разреза показано жирной черной линией

Fig. 1. Vertical distribution of potential density (kg / m^3) at the hydrological transect on December 31, 2016 according to the ocean reanalysis MERCATOR (a) and bottom topography in the Atlantic sector of the Arctic Ocean (b). Position of the analyzed hydrological transect is shown by a thick black line

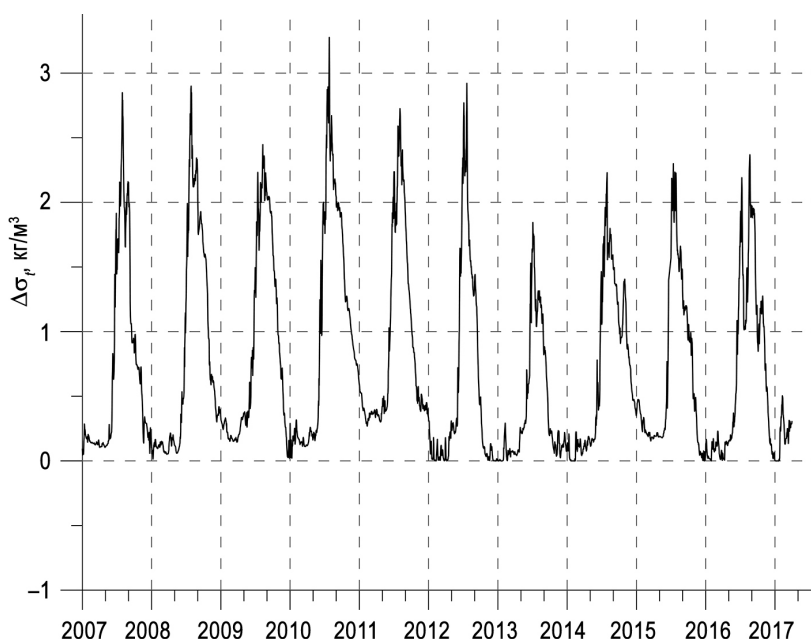


Рис. 2. Временные изменения контраста потенциальной плотности (кг/м^3) между горизонтом 155 м и поверхностью океана внутри области 25×25 км с центром в точке $81^\circ 30'$ с.ш., 31° в.д. по данным реанализа MERCATOR

Fig. 2. Temporal changes of the potential density contrast (kg/m^3) between the 155 m horizon and the ocean surface within a 25×25 km area centered at $81^\circ 30'$ N, 31° E. according to MERCATOR reanalysis data

сезон вертикальная однородность является следствием конвективного перемешивания, предполагает, что корреляция между значениями температуры и солёности по вертикали меняет знак на глубине, где опускающаяся с поверхности более холодная/пресная вода встречается с поднимающейся из глубин океана более тёплой/солёной водой. Графики корреляции между временными рядами температуры и солёности, центрированные относительно глубины 47 м для всего интервала реанализа (2007–2016 гг.) и для отдельных лет, показаны на рис. 3. На этих графиках представлен только зимний сезон. Глубина 47 м приблизительно соответствует середине верхнего слоя. Таким образом, можно ожидать, что вода, опускающаяся с поверхности, достигает этого уровня даже в годы с ослабленной вертикальной конвекцией. Корреляционная зависимость от глубины очень похожа во все годы: положительная корреляция в верхней части водной толщи и отрицательная корреляция в нижней.

Предлагаемое объяснение этой закономерности заключается в следующем: на активной стадии термической конвекции холодная (вследствие охлаждения на поверхности океана) вода опускается и охлаждает нижележащую воду. Компенсационный подъем тёплой воды из глубин повышает температуру вышележащей воды. Это приводит к противоположным изменениям температуры в верхней и нижней частях водной толщи, находящейся под действием конвекции. Граница между двумя слоями с противоположными изменениями температуры (уровень, где температура не меняется) может рассматриваться как «нейтральный» уровень, на котором эффекты дви-

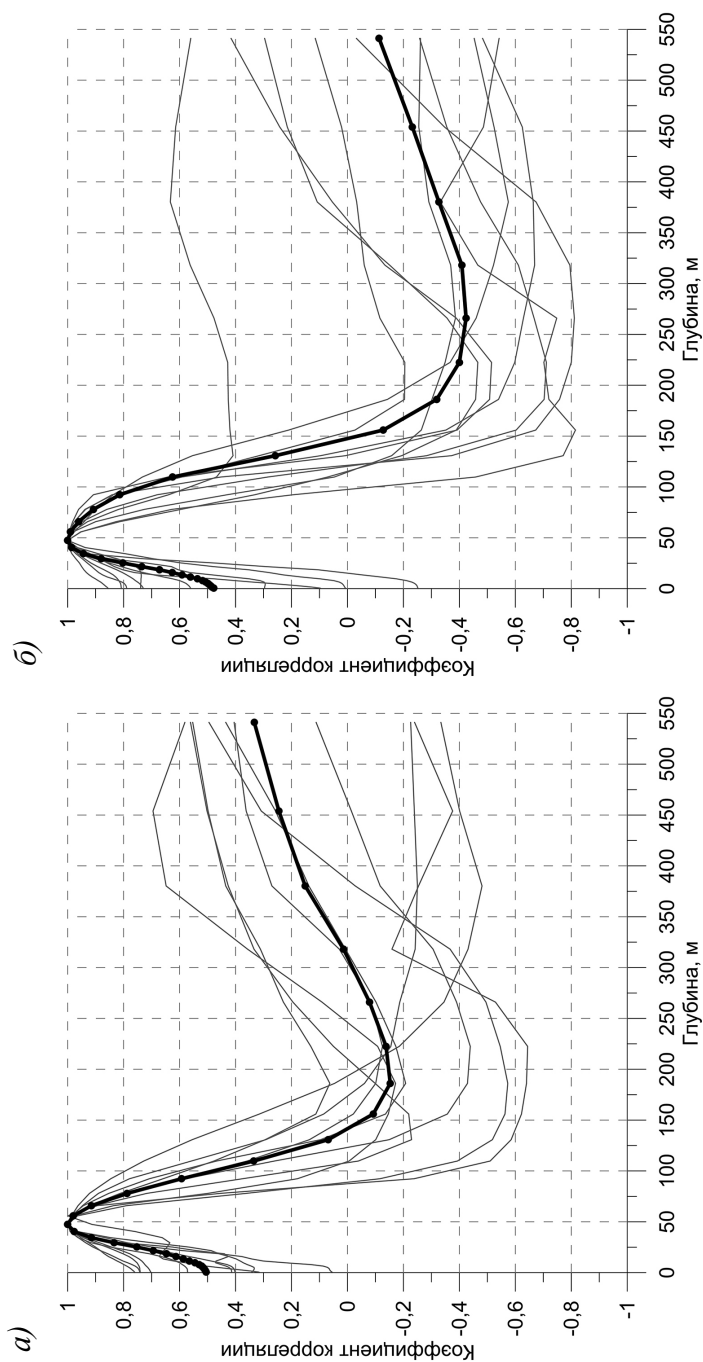


Рис. 3. Коэффициент корреляции по вертикали между временными рядами температуры (а) и солёности (б) внутри области 25×25 км с центром в точке $81^{\circ}30'$ с.ш., 31° в.д. на различных горизонтах относительно уровня 47 м для отдельных зим (с 1 декабря по 30 апреля) с 2007 по 2017 г. — тонкие линии, и средние за интервал 2007–2017 г. — жирные линии (по данным реанализа МЕРСАТОР)

Fig. 3. Vertical correlation coefficient between time series of temperature (a) and salinity (б) within 25×25 km with center at $81^{\circ}30' N$, $31^{\circ} E$ at different horizons with respect to the 47 m depth for individual winters (from December 1 to April 30) from 2007 to 2017 — thin lines, and for the entire interval 2007–2017 — thick lines (according to reanalysis MERCATOR)



Рис. 4. Положение средней границы морского льда с концентрацией более 50 % (выделена серой заливкой) в феврале 2017 г. по данным спутниковых наблюдений [14]

Fig. 4. The position of the average sea ice extent with a concentration of more than 50% (highlighted with gray fill) in February 2017 according to satellite observations [14]

жущихся в противоположных направлениях объемов воды нейтрализуют друг друга. После окончания активной стадии конвекции вода в верхнем гомогенизированном слое охлаждается (приобретает избыточную плотность) за счет дальнейшей теплоотдачи в атмосферу, а вода в глубинном слое нагревается вследствие поступления тепла за счет горизонтальной адвекции. Эти процессы также ведут к противоположным изменениям температуры в верхней и нижней частях водной толщи. Как следует из рис. 3, «нейтральный» уровень (где знак корреляции меняется) находится в среднем на глубине 100–150 м. Коэффициент корреляции между зимней температурой и соленостью для всего временного ряда равен 0,86, что косвенно подтверждает, что термическая конвекция доминирует над халинной в исследуемой области. Однако этот вывод следует делать с оговоркой, что такой высокий коэффициент корреляции является также следствием положительной корреляции температуры и солености в атлантической водной массе.

Чтобы оценить, насколько полученные на основе реанализа выводы соответствуют реальности, были использованы спутниковые данные [14] о распространении морского льда в исследуемом районе (рис. 4). Как следует из рисунка, до февраля 2017 г. наблюдалась аномально-смещенная к северо-востоку граница сплоченного морского льда. Данные реанализа свидетельствуют в пользу того, что этому в значительной степени способствовала развитая термическая конвекция (см. рис. 1), обеспечившая подъем теплой и соленой воды из атлантического слоя к поверхности океана.

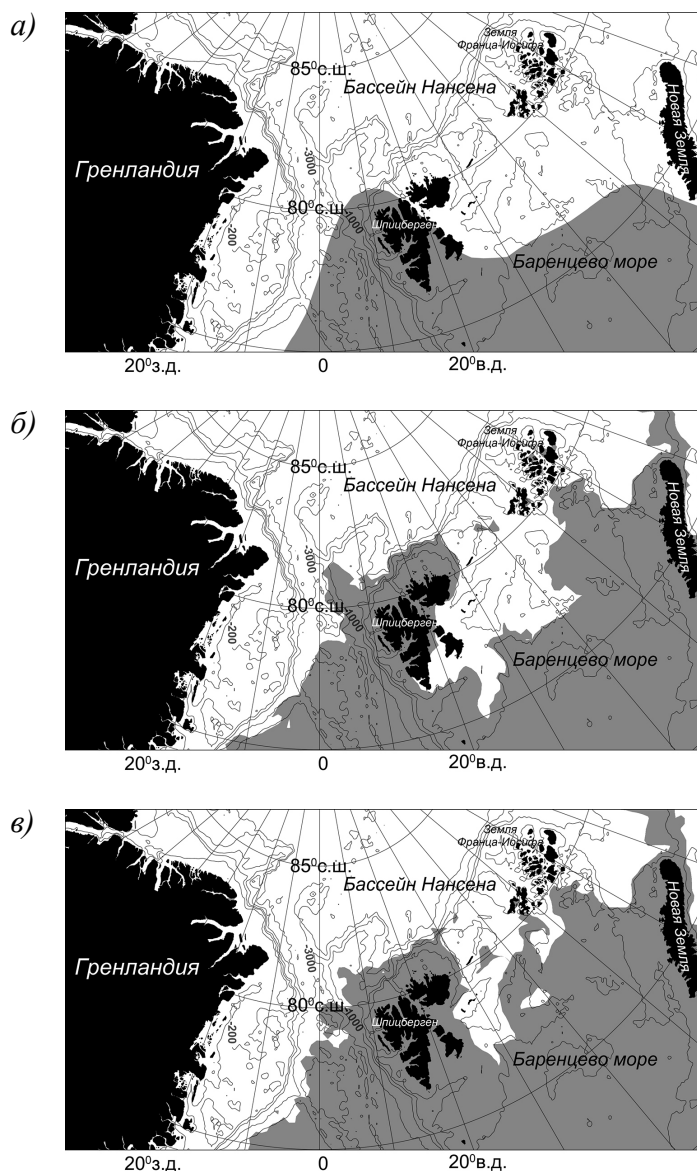


Рис. 5. Карта распределения критерия термической конвекции на акватории приатлантической Арктики для глубины 125 м: расчет по средним летним климатическим значениям 1950–1990 гг. [15] (а); расчет по данным реанализа МЕРКАТОР за 15 ноября 2015 г. (б); расчет по данным реанализа МЕРКАТОР за 15 ноября 2016 г. (в). Область, в пределах которой критерий конвекции превышает единицу, выделена серой заливкой.

Fig. 5. Map of the distribution of the thermal convection criterion in the Atlantic sector of the Arctic Ocean for 125 m depth: calculation for the average summer climatic values of 1950–1990. [15] (a); calculation based on reanalysis data from MERCATOR for November 15, 2015 (б); calculation based on reanalysis data from MERCATOR for November 15, 2016 (в). The region within which the convection criterion exceeds one is highlighted by a gray fill.

РАСШИРЕНИЕ КОНВЕКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ В 2000-е ГОДЫ

Пространственное распределение критерия термической конвекции относительно глубины 125 м (Kk_{125}), рассчитанное по климатическим данным из электронного Атласа СЛО [15] и данным реанализа МЕРСАТОР для 15 ноября 2015 и 2016 гг. на акватории ПА, представлено на рис. 5.

Штриховкой выделены зоны, где $Kk_{125} > 1$. Распределение критерия по климатическим данным (рис. 5а) в значительной мере повторяет ареал распространения вод атлантического происхождения в поверхностном слое ПА в XX в. [16]. В Баренцевом море граница $Kk_{125} > 1$ проходит приблизительно по линии полярного фронта [17], оставляя всю северо-восточную часть моря в зоне, где термическая конвекция не в состоянии охватить 125-метровый слой до начала ледообразования. В бассейне Нансена распространение зоны термической конвекции, достигающей искомой глубины, ограничено так называемой Китовой бухтой [18], расположенной непосредственно к северо-западу от Шпицбергена. К востоку от Шпицбергена граница $Kk_{125} > 1$ не простирается далее 15° в.д., а к северу находится на расстоянии 40–50 морских миль от побережья архипелага.

Расширение потенциальных конвективных зон в 2010-е гг. наглядно проиллюстрировано на рис. 5б и 5в. Сопоставление пространственных распределений Kk_{125} в 2015 и 2016 гг. со средним климатическим позволяет выделить следующую закономерность: продвижение зон, в которых термическая конвекция способна достигнуть глубины 125 м вдоль траекторий распространения ветвей АВ в Баренцевом море и в бассейне Нансена. Степень этого продвижения является более высокой в Баренцевом море, где зона с $Kk_{125} > 1$ в ноябре 2016 г. сдвинулась на северо-восток на расстояние более 600 км, с возрастанием площади охвата на 185 тыс. кв. морских миль. В бассейне Нансена аналогичное продвижение зоны конвекции, достигающей глубины 125 м, примерно вдвое меньше (около 300 км с увеличением площади охвата на 40 тыс. кв. морских миль), но тоже достаточно заметно. Одновременно наблюдается также изменение общей конфигурации границы $Kk_{125} > 1$, заключающееся в сужении зоны ослабленной термической конвекции, ее вытягивании с северо-востока на юго-запад вдоль «языка» пакового льда между Шпицбергеном и Землей Франца-Иосифа (см. рис. 4). Последнее, возможно, связано с компенсационным выносом льда из бассейна Нансена в Баренцево море вследствие усиления адвекции в ветвях АВ с севера и с юга.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Аномально низкая площадь ледяного покрова в 2010-е гг. наблюдается в так называемой приатлантической Арктике, включающей Баренцево море и западную часть бассейна Нансена. Существенным при этом является то, что устойчивое уменьшение площади льда в этом регионе отмечено не только летом, но и зимой. Зима 2016/17 г. оказалась рекордной за имеющийся ряд спутниковых наблюдений по абсолютному минимуму площади ледяного покрова на пике его сезонного максимума. Как обосновывается в статье, связь наблюдаемых аномалий параметров ледяного покрова с поступающими из умеренных широт теплыми атлантическими водами реализуется через усиление вертикального теплового потока из океана, обусловленного интенсификацией вертикального конвективного перемешивания. Благодаря постепенному сокращению объема морского льда в 1990–2010-е гг. изменилась вертикальная стра-

тификация вод. В результате этого возросла потенциальная возможность проникновения вертикальной термической конвекции в теплый и соленый атлантический слой и расходование теплозапаса и солезапаса этого слоя на прогрев и осолонение вышележащих вод. Выносимый на теплую воду лед быстро разрушается и тает, следствием чего является длительное сохранение обширных зон открытой воды в западной части бассейна Нансена в зимний сезон. В климатическом контексте [19] такая последовательность событий может трактоваться как усиление «атлантификации» СЛО, заключающейся в продвижении зоны влияния атлантических вод на гидрологический и ледовый режим вдоль траектории распространения этих вод.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 17-05-00558.

Acknowledgments. The reported study was funded by RFBR according to the research project № 17-05-00558.

ЛИТЕРАТУРА

1. Reigstad M., Wassmann P., Riser C. W., Øygarden S., Rey F. Variations in hydrography, nutrients and chlorophyll a in the marginal ice-zone and the central Barents Sea // *Journal of Marine Systems*. 2002. № 38. С. 9–29.
2. Årthun M.A., Eldevik T., Smedsdrud L.H., Skagseth O., Ingvaldsen R.B. Quantifying the influence of Atlantic heat on the Barents Sea ice variability and retreat // *Journ. Clim.* 2012. № 25. С. 4736–4743.
3. Иванов В.В., Алексеев В.А., Репина И.А. Возрастание воздействия атлантических вод на ледяной покров Северного Ледовитого океана // Турбулентность, динамика атмосферы и климата: Труды международной конференции памяти академика А.М. Обухова. М.: ГЕОС, 2014. С. 267–273.
4. Polyakov I.V., Pnyushkov A.V., Alkire M.B., Ashik I.M., Baumann T.M., Carmack E.C., Goszczko I., Guthrie J., Ivanov V.V., Kanzow T., Krishfield R., Kwok R., Sundfjord A., Morison J., Rember R., Yulin A. Greater role for Atlantic inflows on sea-ice loss in the Eurasian Basin of the Arctic Ocean // *Science*. 2017. № 356. P. 285–291.
5. Иванов В.В., Алексеев В.А., Алексеева Т.А., Кольдун Н.В., Репина И.А., Смирнов А.В. Арктический ледяной покров становится сезонным? // Исследования Земли из космоса. 2013. № 4. С. 50–65.
6. Иванов В.В. Климатообразующие гидрофизические процессы в приатлантической Арктике: Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. М., 2012. 305 с.

REFERENCES

1. Reigstad M., Wassmann P., Riser C. W., Øygarden S., Rey F. Variations in hydrography, nutrients and chlorophyll a in the marginal ice-zone and the central Barents Sea. *Journal of Marine Systems*. 2002, 38: 9–29.
2. Årthun M.A., Eldevik T., Smedsdrud L.H., Skagseth O., Ingvaldsen R.B. Quantifying the influence of Atlantic heat on the Barents Sea ice variability and retreat. *Journ. Clim.* 2012, 25: 4736–4743.
3. Ivanov V.V., Alekseev V.A., Repina I.A. *Turbulentnost', dinamika atmosfery i klimata. Trudy mezhdunarodnoi konferentsii pamiati akademika A.M. Obukhova "Vozrastanie vozdeistviia atlanticheskikh vod na ledianoi pokrov Severnogo Ledovitogo okeana"*. The increase in the impact of Atlantic waters on the ice cover of the Arctic Ocean. Turbulence, atmospheric and climate dynamics. Proc. of the International Conference in memory of Academician A.M. Obukhov. Moscow: GEOS, 2014: 267–273. [In Russian].
4. Polyakov I.V., Pnyushkov A.V., Alkire M.B., Ashik I.M., Baumann T.M., Carmack E.C., Goszczko I., Guthrie J., Ivanov V. V., Kanzow T., Krishfield R., Kwok R., Sundfjord A., Morison J., Rember R., Yulin A. Greater role for Atlantic inflows on sea-ice loss in the Eurasian Basin of the Arctic Ocean. *Science*. 2017, 356: 285–291.
5. Ivanov V.V., Alekseev V.A., Alekseeva T.A., Koldunov N.V., Repina I.A., Smirnov A.V. Does the Arctic ice cover become seasonal? *Issledovaniia Zemli iz kosmosa*. Earth exploration from space. 2013, 4: 50–65. [In Russian].

7. Ivanov V., Alexeev V., Koldunov N.V., Repina I.A., Sandoe A.B., Smedsrud L.H., Smirnov A. Arctic ocean heat impact on regional ice decay: a suggested positive feedback // *Journ. Phys. Oceanogr.* 2016. № 46. C. 1437–1456. doi: 10.1175/JPO-D-15-0144.1.
8. Onarheim I. H., Årthun M. Toward an ice-free Barents Sea // *Geophys. Res. Lett.* 2017. № 44. P. 8387–8395. doi:10.1002/2017GL074304.
9. Lellouche J.-M., Le Galloudec O., Drévillon M., Régnier C., Greiner E., Garric G. et al. Evaluation of real time and future global monitoring and forecasting systems at Mercator Océan // *Ocean Science Discussions*. 2012. V. 9. № 2. P. 1123–1185. <https://doi.org/10.5194/osd-9-1123-2012>.
10. Madec G.V. NEMO Ocean engine. Laboratoire d’Oceanographie et du Climat: Experimentation et Approches Numeriques. 2008. URL: www.nemo-ocean.eu (дата обращения 01.02.2018).
11. Pham D., Verron J., Christine Roubaud M. A singular evolutive extended Kalman filter for data assimilation in oceanography // *Journal of Marine Systems*. 1998. V. 16. P. 323–340. [https://doi.org/10.1016/S0924-7963\(97\)00109-7](https://doi.org/10.1016/S0924-7963(97)00109-7).
12. Dee D. P., Uppala S. M., Simmons A. J., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S. et al. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2011. V. 137. P. 553–597. <https://doi.org/10.1002/qj.828>
13. Иванов В.В., Репина И.А. Влияние сезонной изменчивости атлантической воды на ледяной покров Северного Ледовитого океана // *Изв. РАН, Сер. Физика атмосферы и океана*. 2018. Т. 54. № 1. С. 73–82.
14. Cavalieri D., Parkinson C., Gloersen P., Zwally H.J. (updated daily). Sea Ice Concentrations from Nimbus-7 SMMR and DMSP SSM/I-SSMIS Passive Microwave Data, Version 1. Boulder, Colorado USA // SA DAAC at the National Snow and Ice Data Center. 1996. <http://dx.doi.org/10.5067/8GQ8LZQVL0VL>.
15. Environmental Working Group (EWG): Joint U.S.-Russian Atlas of the Arctic Ocean (1997). National Snow and Ice Data Centre, Boulder, Co., USA. <http://nsidc.org/data/g01961>
16. Korablev A., Smirnov A., Baranova O.K. Climatological Atlas of the Nordic Seas and Northern North Atlantic. 2014. D. Seidov, A.R. Parsons, Eds., 6. Ivanov V.V. Klimatoobrazuiushchie gidrofizicheskie protsessy v priatlanticheskoi Arktike. Climate-forming hydrophysical processes in the Atlantic area of the Arctic. Dr. phys. and math. sci. diss. Moscow: 2012: 305 p. [In Russian].
7. Ivanov V., Alexeev V., Koldunov N.V., Repina I.A., Sandoe A.B., Smedsrud L.H., Smirnov A. Arctic Ocean heat impact on regional ice decay: a suggested positive feedback. *Journ. Phys. Oceanogr.* 2016, 46: 1437–1456. doi: 10.1175/JPO-D-15-0144.1.
8. Onarheim I. H., Årthun M. Toward an ice-free Barents Sea. *Geophys. Res. Lett.* 2017, 44: 8387–8395. doi:10.1002/2017GL074304.
9. Lellouche J.-M., Le Galloudec O., Drévillon M., Régnier C., Greiner E., Garric G. et al. Evaluation of real time and future global monitoring and forecasting systems at Mercator Océan. *Ocean Science Discussions*. 2012, 9: 1123–1185. <https://doi.org/10.5194/osd-9-1123-2012>.
10. Madec G.V. NEMO Ocean engine. Laboratoire d’Oceanographie et du Climat: Experimentation et Approches Numeriques. 2008. Available at: www.nemo-ocean.eu (accessed 01.02.2018).
11. Pham D., Verron J., Christine Roubaud M. A singular evolutive extended Kalman filter for data assimilation in oceanography. *Journal of Marine Systems*. 1998, 16: 323–340. [https://doi.org/10.1016/S0924-7963\(97\)00109-7](https://doi.org/10.1016/S0924-7963(97)00109-7).
12. Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S. et al. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2011, 137: 553–597. <https://doi.org/10.1002/qj.828>
13. Ivanov V.V., Repina I.A. Influence of seasonal variability of Atlantic water on the ice cover of the Arctic Ocean. *Izvestiia RAN, Seriya Fizika atmosfery i okeana*. Proc. of the Russian Academy of Sciences, Series Physics of the Atmosphere and Ocean. 2018, 54: 73–82. [In Russian].
14. Cavalieri D., Parkinson C., Gloersen P., Zwally H.J. (updated daily). Sea Ice Concentrations from Nimbus-7 SMMR and DMSP SSM/I-SSMIS Passive Microwave Data, Version 1. Boulder, Colorado USA. SA DAAC at the National Snow and Ice Data Center. 1996. <http://dx.doi.org/10.5067/8GQ8LZQVL0VL>.

NOAA Atlas NESDIS 77, 122, dataset doi: 10.7289/V54B2Z78.

17. Нукифоров Е.Г., Шнайхер А.О. Закономерности формирования крупномасштабных колебаний гидрологического режима Северного Ледовитого океана. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 270 с.

18. Ivanov V.V., Alexeev V.A., Repina I.A., Koldunov N.V., Smirnov A.V. Tracing Atlantic water signature in the Arctic sea ice cover East of Svalbard // *Advances in Meteorology*. V. 2012. Article ID 201818, 11 p. <https://doi.org/10.1155/2012/201818>.

19. IPCC: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* / Eds T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner et al. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013.

15. Environmental Working Group (EWG): *Joint U.S.-Russian Atlas of the Arctic Ocean* (1997). National Snow and Ice Data Centre, Boulder, Co., USA. <http://nsidc.org/data/g01961>

16. Korablev A., Smirnov A., Baranova O.K. *Climatological Atlas of the Nordic Seas and Northern North Atlantic*. 2014. D. Seidov, A.R. Parsons, Eds., NOAA Atlas NESDIS 77, 122 pp., dataset doi: 10.7289/V54B2Z78.

17. Nikiforov E.G., Shpaikher A.O. *Zakonomernosti formirovaniia krupnomasshtabnykh kolebaniy gidrologicheskogo rezhima Severnogo Ledovitogo okeana*. Regularities in the formation of large-scale fluctuations in the hydrological regime of the Arctic Ocean. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1980: 270 p. [In Russian].

18. Ivanov V.V., Alexeev V.A., Repina I.A., Koldunov N.V., Smirnov A.V. Tracing Atlantic water signature in the Arctic sea ice cover East of Svalbard. *Advances in Meteorology*. 2012, Article ID 201818, 11 p. <https://doi.org/10.1155/2012/201818>.

19. IPCC: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Eds T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner et al. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013.

МЕТЕОРОЛОГИЯ, КЛИМАТОЛОГИЯ

УДК 504.5: 332 (985)

DOI: 10.30758/0555-2648-2018-64-1-55-70

ОБ ОЦЕНКЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ РИСКОВ И УЯЗВИМОСТИ ПРИРОДНЫХ И ХОЗЯЙСТВЕННЫХ СИСТЕМ В МОРСКОЙ АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ РФ

С.А. СОЛДАТЕНКО, Г.В. АЛЕКСЕЕВ*, Н.Е. ИВАНОВ,
А.Е. ВЯЗИЛОВА, Н.Е. ХАРЛАНЕНКОВА

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

*alexgv@aari.ru

ON ASSESSMENT OF CLIMATIC RISKS AND VULNERABILITY OF NATURAL AND ECONOMIC SYSTEMS IN THE SEA ZONE OF THE RUSSIAN ARCTIC

S.A. SOLDATENKO, G.V. ALEKSEEV*, N.E. IVANOV,
A.E. VYAZILOVA, N.E. KHARLANENKOVA

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

*alexgv@aari.ru

Received April, 07, 2018

Accepted April, 20, 2018

Keywords: Arctic, climatic risks, economic systems, vulnerability.

Summary

The article presents an analysis of the impacts of climate change on the natural and economic systems of the Arctic and the existing methods for assessing climatic risks. Based on the analysis of the impact of climate change on natural and economic systems and the Arctic population, a register of risks due to climate change has been formed. A conceptual model for assessing the impact of climate change on various systems is proposed. The main problems in the identification of climatic risks in the Arctic are identified. Indicators of climate change were selected: the surface air temperature; sea ice extent and the frequency of dangerous hydrometeorological phenomena that affect economic activity in the Arctic sea zone and its individual regions. The assessment methodology of natural and economic systems vulnerabilities in the Russian Arctic sea zone, including susceptibility to impacts, sensitivity and adaptive potential, is considered. These are the key factors on the basis of which the

Citation: S.A. Soldatenko, G.V. Alekseev, N.E. Ivanov, A.E. Vyazilova, N.E. Kharlanenkova. On Assessment of Climatic Risks and Vulnerability of Natural and Economic Systems in the Sea Zone of the Russian Arctic. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2018, 64 (1): 55–70. [In Russian]. doi: 10.30758/0555-2648-2018-64-1-55-70

systems vulnerability to climate change is determined, as well as the information support of the processes of assessment and reduction of the consequences of climate threats. The algorithm of the developed methodology for vulnerability determining includes a sequence of 7 steps.

Поступила 07 апреля 2018 г.

Принята к печати 20 апреля 2018 г.

Ключевые слова: Арктика, климатические риски, уязвимость, хозяйственные системы.

В статье представлены описания воздействий изменения климата на природные и хозяйственные системы Арктики и существующих методов оценки климатических рисков. Сформирован реестр рисков, рассмотрены методы оценки климатических рисков в арктической зоне РФ, индикаторы изменения климата в Арктике, предложен подход к оценке уязвимости природных систем и экономики в морской Арктической зоне РФ к изменению климата, обоснованы рекомендации по принятию адаптационных мер.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее десятилетие все больше внимания уделяется последствиям изменений климата и рискам, связанным с климатическими изменениями в Арктике. Арктическая зона РФ (АЗРФ), территория которой составляет более четверти общей площади территории страны, имеет важнейшее геополитическое и экономическое значение [1–3]. Однако арктические системы — природные, экономические, социальные — в силу экстремальности климатических условий оказываются чрезвычайно уязвимыми к изменениям климата [4–6].

Прибрежные зоны арктических морей (природные экосистемы, население, инфраструктура, объекты природопользования и другие естественные и антропогенные системы), морская деятельность (грузоперевозки, поиск, разведка и освоение месторождений нефти и газа на шельфе Арктики, лов рыбы и иных морепродуктов), в том числе оборонная, морские экосистемы, вследствие особенностей изменения климата Арктики, оказались сегодня в зоне климатических рисков [7, 8].

Изучением климатических рисков занимаются различные международные группы экспертов под патронатом ряда подразделений ООН (IPCC, UNEP, UNDP и др.), экспертные группы, финансируемые правительствами, крупными транснациональными корпорациями, неправительственными фондами и организациями. В целом исследование климатических рисков в АЗРФ находится на начальной стадии и ограничивается в основном общими умозаключениями.

Ввиду огромной площади АЗРФ и вариативности погодных, гидрологических и климатических условий картина климатических рисков в Арктике должна быть очень пестрой. Современное состояние вопроса позволяет заключить — сегодня в России не существует структурированной и многогранной стратегии оценки и менеджмента климатических рисков для АЗРФ, отсутствуют интегрированные математические модели оценки рисков, такие, например, как [9], не выработаны агрегированные показатели уязвимости для каждого класса систем, функционирующих в арктическом мегарегионе, не получены достоверные количественные оценки влияния климатических изменений на природные и антропогенные системы и основные виды экономической деятельности, а следовательно, надежные оценки климатических рисков для территории Российской Арктики отсутствуют.

Наблюдаемые изменения глобального климата проявляются с наибольшей интенсивностью в арктическом регионе. Наиболее ярким региональным откликом на

развивающиеся процессы глобального потепления является сокращение протяженности и толщины арктических морских льдов. Распространение льдов в арктических морях оказывает прямое влияние на морскую хозяйственную деятельность. Льды стали дальше отступать от берегов, хотя отступление не было одинаковым вдоль всего побережья сибирских арктических морей.

Более частое появление айсбергов вследствие разрушения островных ледников увеличивает риск для морских перевозок и проектируемой добычи углеводородов на арктическом шельфе. Произошедшие изменения климата оказали негативное влияние на берега арктических морей, которые стали разрушаться вследствие повышения температуры воздуха, сопровождающегося таянием мерзлых пород, и усиления ветрового волнения, оказывая негативное влияние на прибрежную инфраструктуру. Экосистемы северных морей в условиях меняющегося климата также претерпевают заметные изменения. Так, в связи с сокращением площади морских льдов значительно ухудшились условия обитания белого медведя. Изменения климата окажут существенное влияние и на условия рыбного промысла в арктических морях.

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ КЛИМАТИЧЕСКИХ РИСКОВ МОРСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ РФ

На основе анализа существующих подходов и методов оценки воздействия изменения климата на человека, социальные, экономические и природные системы, а также принимая во внимание то, что эти методы являются неотъемлемой составной частью процедур оценки климатических рисков и выработки адаптационных мер, можно заключить, что информационные компьютеризированные системы, построенные на идеологии так называемых интегрированных оценочных моделей (систем), представляют собой наиболее целесообразное и перспективное направление развития методического аппарата анализа и оценки влияния климатических изменений на живые и неживые объекты и системы.

Интегрированная оценка предполагает междисциплинарный подход к проблеме, имеющий в своей основе использование знаний различных дисциплин, а также широкого спектра подходов и методов исследований из разных научных областей, естественно, во взаимной увязке между собой. В итоге интегрированная оценка имеет то преимущество, что ее результаты могут использоваться в комплексном управлении социально-экономической, политической и иной деятельностью в арктическом регионе Российской Федерации. Однако разработка подобной системы оценки требует математического и, что очень важно, информационного обеспечения.

Объем информации о земной климатической системе и природных экосистемах достаточно большой и вполне достаточен для выполнения оценки. Хотя значительные неопределенности, характерные для сценариев роста концентрации парниковых газов и изменения глобального и регионального (арктического) климата, ухудшают качество оценки. Более серьезная проблема — отсутствие (или очень малый объем) реалистичной ретроспективной и прогностической экономической и социальной информации. Отсутствие качественной социально-экономической информации становится серьезным барьером на пути получения достоверных оценок влияния изменения климата на конкретные регионы, промышленные кластеры, города и отдельные отрасли и предприятия, поскольку непонятно, как выполнять валидацию соответствующих математических моделей. В сложившихся обстоятельствах



Рис. 1. Концептуальная модель оценки воздействия изменения климата на различные системы
 Fig. 1. A conceptual model of assessing the impact of climate change on different systems

качественные методы оценки, по-видимому, будут иметь предпочтение перед количественными методами.

Оценка влияния изменения климата на системы (природные, социальные, экономические) предполагает наличие информации о стресс-факторах (сценарии изменения климата, как в масштабах планеты, так и в Российской Арктике), формулировку целей оценки, определение субъектов, представляющих интерес (сектора экономики, регионы и др.), обоснование требований к входным данным, математическим моделям и методам. Результат оценки — показатели как качественные («значительное влияние», «слабое влияние» и т.д.), так и количественные (коэффициенты чувствительности). На рис. 1 представлена концептуальная модель оценки воздействия изменения климата на различные системы, в рамках которой планируется выполнять оценку. Данная модель является результатом синтеза исследований, связанных с климатическим риск-менеджментом (см., например, [10–13]).

Климатический риск, как принято считать, обусловлен изменениями глобального климата, воздействующими на природные и антропогенные системы. Универсальный подход к оценке рисков и риск-менеджменту был предложен Международной организацией по стандартам (ISO) в 2009 г. (семейство стандартов ISO 31000). В нашей стране данные стандарты известны как стандарт ГОСТ Р ИСО/МЭК 31010-2011 «Менеджмент риска. Методы оценки риска» [14]. Этот

документ является методологической основой для выполнения оценки во многих областях человеческой деятельности, в том числе и для оценки климатического риска и климатического риск-менеджмента. Семейство стандартов ISO 31000 предлагает общие принципы по оценке рисков и управлению ими в организациях и бизнес-структурах на основе общепризнанной на сегодняшний день парадигмы риск-менеджмента.

Согласно ISO 31000, оценка риска (risk assessment) объединяет три основных процесса: идентификацию риска, его анализ и «материализованную» оценку риска (risk evaluation). Данный взгляд на оценку климатического риска в настоящее время является общепризнанным и используется различными агентствами и организациями в их практической деятельности.

Целью идентификации риска является определение источников риска и тех неблагоприятных событий, которые могут повлиять на эффективность функционирования рассматриваемой системы. Существуют три основных метода риск-анализа: анализ чувствительности системы к риск-факторам, анализ сценариев (является дальнейшим шагом после анализа чувствительности) и метод стохастического математического моделирования.

Для анализа чувствительности и сценариев могут использоваться как качественные методы анализа (при отсутствии необходимого количества данных и при отсутствии математических моделей рассматриваемых систем), так и количественные методы. Поскольку каждая система реагирует на климатические изменения по-разному, оценка климатического риска должна выполняться для каждой конкретной системы (процесса) индивидуально с учетом уровня приемлемого риска. Определяемый в результате анализа уровень риска соотносится с допустимыми критериями.

Арктика — очень специфический регион с точки зрения происходящих в нем климатических изменений под влиянием глобального изменения климата. Данное обстоятельство предъявляет высокие требования к составлению перечня риск-факторов для основных систем, находящихся в арктическом регионе, и социально-экономических процессов, происходящих в нем. Ниже представлен реестр климатических рисков для морского транспорта, портовой инфраструктуры, морского рыболовства.

Риски, связанные с морскими льдами [15]:

1. *Риск раннего появления льда и региональных вторжений льдов.* Раннее замерзание морей Западной Арктики оказывает существенное воздействие на проведение морских операций в раннеосенний сезон при появлении льда или припая в ранние сроки повторяемость не чаще одного раза в 10 лет. Образование молодого ледяного покрова после периода очищения моря решающим образом сказывается на сроках завершения безледокольного плавания и начала ледокольной проводки.

2. *Риск вторжения труднопроходимых льдов на трассы плавания.* При определенных синоптических условиях, в результате дрейфа и перемещения сплоченного льда, на трассах плавания могут очень быстро формироваться тяжелые ледовые условия. Плавание судов в этих случаях становится исключительно сложным и опасным и может приводить к срыву морских операций, к авариям и катастрофам.

3. *Риск возникновения опасных ледовых явлений.* К ним относится сжатие льдов, когда дрейфующие льдины оказывают давление друг на друга. Сжатие льдов считается одним из наиболее опасных ледовых явлений, поскольку чаще всего служит причиной вынужденного дрейфа и даже гибели судов. Облипание корпуса судна снежно-ледяной массой, когда внезапно образуется многотонная снежно-ледяная подушка на бортах корпуса ледокола, в осенне-зимний период во время форсирования сплошного или 9–10-балльного очень заснеженного ледяного покрова — частое явление при сжатиях. Облипание в значительной степени влияет на движение судна во льдах.

4. *Риск обледенения судов.* Обледенение судов развивается под действием брызг и атмосферных осадков, когда температура воздуха устойчиво держится ниже температуры замерзания воды, а поверхность моря еще свободна ото льда, и заключается в отложении льда на поверхности судна. Обледенение затрудняет работу экипажа на палубе, использование палубного и радионавигационного оборудования, а для небольших судов создает опасность потери остойчивости.

5. *Риск столкновения с айсбергом.* Айсберги широко распространены в ряде районов арктических морей евразийского шельфа. Айсберги и их обломки из-за своей значительной массы и большой осадки представляют серьезную опасность для транспортных судов и ледоколов, инженерных сооружений и коммуникаций, а также газонефтяных комплексов, эксплуатация которых осуществляется или планируется на арктическом шельфе.

Климатические риски, связанные с опасными гидрометеорологическими явлениями [16]:

1. *Риск от штормового ветра.* Многие виды морской деятельности в арктических морях ограничивает выход скорости ветра за уровень 15 м/с.

2. *Риск от штормового волнения.* В результате сильного волнения создается опасность для судов, наносится ущерб портам, терминалам и другим транспортным структурам в береговой и прибрежной зоне. Значительный экономический ущерб сильное волнение вызывает и при морской добыче нефти и газа.

3. *Риск от повышения и штормовых колебаний уровня моря.* Для арктических морей негативные последствия повышения уровня могут оказаться более значительными, чем для других акваторий, что связано с низким положением обширных участков берегов, состоящих из мерзлых пород и ископаемого льда. Штормовые нагоны под действием ветра могут вызвать повышение уровня на несколько метров, что представляет опасность для береговой инфраструктуры.

ИНДИКАТОРЫ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА В АРКТИКЕ

Приповерхностная температура воздуха, площадь морского льда и повторяемость опасных гидрометеорологических явлений в морской Арктике и отдельных ее районах являются наиболее важными индикаторами изменений климата, влияющих на хозяйственную деятельность.

Температура воздуха в области морской Арктики

В области морской Арктики (рис. 2а) самым теплым за период наблюдений с 1951 г. оказался 2016 год. Средняя приповерхностная температура воздуха (ПТВ) зимой в этот год по данным 41 станции (рис. 2б) составила $-19,3^{\circ}\text{C}$. Летом средняя температура 2016 г. ($5,8^{\circ}\text{C}$) стала второй в ряду теплых летних сезонов после 2012 г. ($5,9^{\circ}\text{C}$). В 2017 г. обе температуры понизились, особенно летом (рис. 2в).

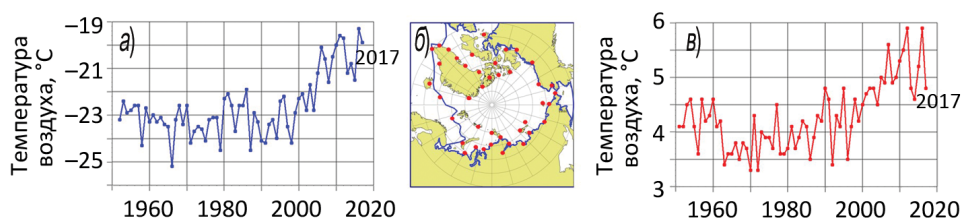


Рис. 2. Средняя за декабрь–февраль (а) и за июнь–август (б) приповерхностная температура воздуха на 41 станции в морской Арктике (с) в 1951–2017 гг. (точки на карте — положение станций)

Fig. 2. Average surface air temperature in December–February (a) and June–August (b) at 41 stations in marine Arctic (c) in 1951–2017 (the points on the map are the position of the stations)

Морской лед

По данным ГНЦ РФ ААНИИ (<http://www.aari.ru/datasets>), минимальная среднемесячная площадь морского льда в 2017 году, наблюдаемая в сентябре, составила 4,74 млн км² (рис. 3), что является седьмым значением в ряду минимальных значений за период с 1979 г. Абсолютный минимум достигнут в сентябре 2012 г., в 2016 г. сентябрьский минимум оказался четвертым, в 2017 г. произошел дальнейший рост.

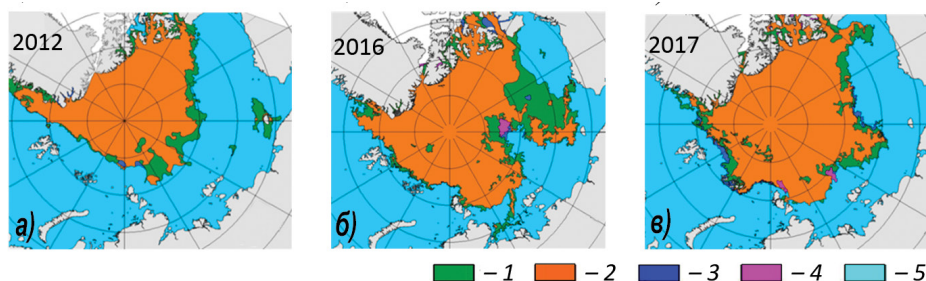


Рис. 3. Распространение и сплоченность морского льда в Арктике в сентябре 2012, 2016 и 2017 гг., средние за месяц: 1 — 1–6 баллов, 2 — 7–10 баллов, 3 — nilas (0–10 см), 4 — молодой лед (0–30 см), 5 — чисто

Fig. 3. Average sea ice concentration in Arctic in September 2012, 2016 and 2017: 1 — 1–6 tenths, 2 — 7–10 tenths, 3 — nilas (0–10 cm), 4 — young ice (0–30 cm), 5 — ice free

Сокращение площади льда в сентябре и повышение летней температуры воздуха находятся в тесном согласии (коэффициент корреляции $-0,92$), испытывая при этом значительные межгодовые колебания. Одновременно с сокращением площади льда происходит уменьшение его толщины вследствие исчезновения значительной части многолетних льдов.

Повторяемость опасных гидрометеорологических явлений

Квантили многолетнего распределения, тенденции и тренды межгодовой изменчивости повторяемости низкой температуры определены по рядам ежегодных сумм N_{-30} числа дней (хотя бы 1 раз в сутки) с температурой -30 °C и ниже за холодный сезон с ноября по март. Значения N_{-30} за каждый год обобщены по сети ГМС для каждого из арктических морей. Тренды повторяемости числа дней с опасными явлениями для всех характеристик также определены по сети ГМС для каждого из арктических морей. На рис. 4 приведены диаграммы временных рядов и линии

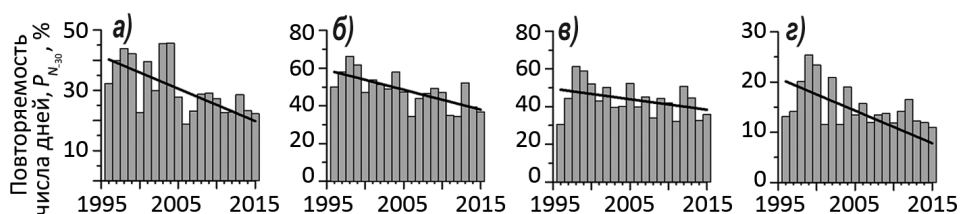


Рис. 4. Диаграммы и тренды повторяемости числа дней с опасными явлениями в российских арктических морях. Температура воздуха -30°C и ниже, ноябрь–март: а) — Карское море, б) — море Лаптевых, в) — Восточно-Сибирское море, з) — Чукотское море

Fig. 4. Diagrams and trends of extreme weather frequency in Russian Arctic seas. Air temperature -30°C and below, November–March: а) — Kara Sea, б) — Laptev Sea, в) — East Siberian Sea, д) — Chukchi Sea

трендов. Коэффициент тренда определен изменением повторяемости числа дней с событием за 10 лет ($\%/10$ лет).

В сибирских арктических морях в ноябре–марте с 1995 по 2015 г. тренд повторяемости дней с низкой температурой воздуха отрицательный (незначим в Восточно-Сибирском море и значим в остальных морях). Наблюдается тенденция пространственного изменения в направлении с запада на восток: тренд ослабевает в Восточно-Сибирском море сравнительно с морями Карским и Лаптевых, а в Чукотском море опять увеличивается. Соответствующие дисперсии тренда составили 40–45, 15 и 40 %.

Повторяемость штормов (ветер более 30 м/с) и сильных ветров (более 15 м/с) получены интегрально по всем румбам (без учета направления). На многих ГМС нет полных данных о максимальных порывах между сроками. Поэтому использованы данные только в срок измерения (4 раза в сутки). Тенденции и тренды межгодовой изменчивости определены для ветра 15 м/с и более по ежегодным суммам числа дней за сезон (ноябрь–март), в которые ветер достигал и превышал 15 м/с хотя бы один раз в сутки. Приведены характеристики многолетней изменчивости непрерывной продолжительности сильного ветра 15 м/с и более.

Тенденции и тренды многолетней изменчивости повторяемости сильного ветра определены по рядам ежегодных значений числа дней N_{15} с ноября по март. Тренды повторяемости дней с ветром более 15 м/с с ноября по март за 1995–2015 гг. в морях Баренцевом, Лаптевых, Восточно-Сибирском исчезающе малые — относительная дисперсия тренда менее 5 %. Только в Карском море и в Чукотском море (положительный тренд) относительная дисперсия составила 10–35 %. Подчеркнем оппозицию между западным сектором Арктики (отрицательный тренд) и Чукотским морем (положительный тренд).

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ УЯЗВИМОСТИ ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ И ЭКОНОМИКИ К ИЗМЕНЕНИЮ КЛИМАТА В МОРСКОЙ АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ РФ

Разрабатываемая в рамках интегрированно-оценочного подхода методика оценки уязвимости природных систем и экономики в морской Арктической зоне РФ к изменению климата является продуктом анализа и последующего синтеза результатов многочисленных отечественных и зарубежных исследований, связанных с рассмотрением различных сторон климатического риск-менеджмента. Особое

внимание обращено на анализ исследований и разработок, выполненных в арктических странах: Канаде, Дании, Финляндии, Исландии, Норвегии, Швеции и США.

Уязвимость природных и антропогенных систем к изменению климата лежит в основе большой группы методов оценки климатических рисков. При выполнении широкого спектра междисциплинарных исследований уязвимость на протяжении многих лет служит мерой оценки ущерба, который изменение климата наносит социально-экономическим и природным системам.

Термин «уязвимость» имеет множество определений и интерпретаций. Согласно документам Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК), уязвимость определяется как «степень восприимчивости системы к неблагоприятным последствиям изменения климата, включая его изменчивость и экстремальные явления, с которыми система не может совладать». Уязвимость характеризует предрасположенность системы понести ущерб, обусловленный неблагоприятным воздействием изменения климата. Под неблагоприятными воздействиями понимаются воздействия, затрудняющие нормальное функционирование системы в соответствии с ее целевым предназначением и обусловленные как экстремальными погодными и климатическими событиями, так и климатическими трендами.

Согласно IPCC 2007 [17], уязвимость систем к изменению климата определяется посредством следующих трех компонентов:

- подверженность систем неблагоприятным воздействиям, обусловленным изменением климата (exposure), выражающаяся, например, в виде некоторого ущерба (материального или нематериального), являющегося следствием природных событий, возможность появления которых обусловлена климатическими изменениями (таким событием может быть, например, экстремальная температура в каком-либо регионе);

- чувствительность систем к изменению климата (sensitivity), количественно характеризующая степень реакции системы на изменение климата (причем реакция систем может быть как положительной, так и негативной);

- адаптивный потенциал (адаптивная способность), присущий системе (adaptive capacity) и характеризующий степень нивелирования потенциально-возможного ущерба, который может быть нанесен системе как результат изменения климата.

Следовательно, уязвимость может быть представлена формально (рис. 5) в виде следующей функциональной зависимости:

$$V = f(E, S, A_c),$$

где E — подверженность системы воздействию климатических изменений; S — чувствительность системы к изменению климата; A_c — адаптивная способность системы и f — некоторая функция, определяемая эмпирическим путем для каждой рассматриваемой системы.

Роль и место уязвимости в системе климатического риск-менеджмента, а также факторы, ее обуславливающие, показаны на рис. 6. Очевидно, что система является сильно уязвимой, если ее чувствительность к малым изменениям климата высока, негативные последствия климатических изменений значительны, а адаптационные способности системы сильно ограничены. Для определения уязвимости три компонента, от которых она зависит (E , S и A_c), необходимо выразить количественно. Данная процедура осуществляется с помощью некоторого набора показателей (как качественных, так и количественных), которые затем преобразуются в интегрированный индекс — уязвимость. Показатели, относящиеся к подверженности риску и чувствительности



Рис. 5. Формальное представление «уязвимости»

Fig. 5. Formal presentation of “vulnerability”

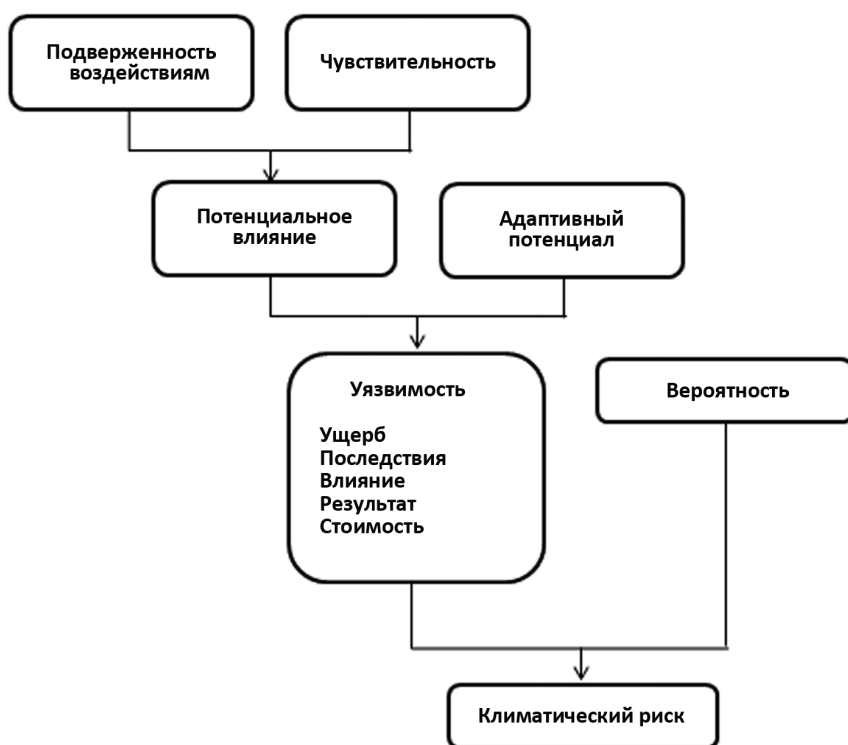


Рис. 6. Роль, место и обуславливающие факторы «уязвимости» в системе климатического риск-менеджмента

Fig. 6. Role, position and factors responsible for “vulnerability” in the system of climate risk management

системы, имеют физический и биологический смысл, а показатели, относящиеся к адаптивной способности, — экономический смысл. Таким образом, для того, чтобы оценить уязвимость конкретной системы к трансформациям, происходящим в природе и обществе под влиянием изменения климата, необходимо иметь оценки трех указанных выше компонентов, которые в конечном счете определяют уязвимость. На рис. 6 под «вероятностью» понимается оценка вероятности возможности наступления рассматриваемого неблагоприятного погодного-климатического события.

В разрабатываемой методике три компонента — подверженность воздействиям, чувствительность и адаптационный потенциал — служат ключевыми факторами, на основе которых определяется уязвимость систем к изменению климата, а также осуществляется информационное обеспечение процессов оценки и уменьшения последствий климатических угроз. Как отмечается в многочисленных публикациях, одной из основных задач при оценке уязвимости является определение так называемых локальных (местных) показателей уязвимости, привязанных к конкретному, небольшому по площади, географическому региону. Это обусловлено тем, что адаптационные меры разрабатываются на местном уровне (уровень региона или муниципалитета, поскольку пространственная протяженность отдельных субъектов федерации может быть очень значительной) структурами планирования органов местного управления, а также руководителями отдельных предприятий. Однако глобальные показатели уязвимости также принимаются во внимание при оценке локальных показателей уязвимости. В результате подверженность воздействию, чувствительность и адаптационный потенциал природных и социально-экономических систем должны оцениваться на местном уровне с привлечением информационных ресурсов федеральных органов государственного управления и научных организаций.

Как правило, для оценки локальной уязвимости используется так называемый подход «снизу вверх», который концентрируется на оценке уязвимости различных систем, расположенных на относительно малых территориях. Уязвимость при этом рассматривается относительно климатической изменчивости, а не относительно долгосрочных климатических трендов. Алгоритм «снизу вверх» в полной мере «вписывается» в существующие системы поддержки принятия управленческих решений органами власти. Оценка уязвимости сосредотачивается на оценке ущерба, обусловленного изменением климата, с целью максимизации потенциальных выгод и минимизации возможных потерь, а оценка адаптационных возможностей фокусируется на адаптационных мерах, повышающих устойчивость и надежность социально-экономических систем к изменению климата.

Подход «снизу вверх» основан на признании важности детализации при оценке рисков и выработке адаптационной политики. По этой причине анализ начинается с локального масштаба, оценки текущих и возникающих рисков, социальных и экологических факторов, лежащих в основе оценки риска, и потенциала риск-менеджмента. И только потом осуществляется долгосрочное планирование и разрабатываются адаптационные сценарии будущего.

Алгоритм разрабатываемой методики определения уязвимости включает в себя следующую последовательность шагов:

- климатическое районирование Российской Арктики (материковой и морской частей), т.е. разделение ее территории на области с более или менее однородными климатическими условиями;

– формирование вектора индикаторов изменения климата, компонентами которого являются как глобальные показатели (например, объем годовой эмиссии парниковых газов в мире и отдельных экономических конгломераций, величина роста среднеглобальной приповерхностной температуры), так и индикаторы, отражающие региональные особенности глобального изменения климата (например, арктическое усиление, площадь ледяного покрова);

– функциональное зонирование Арктического региона, т.е. разделение его территории на области с однородными видами хозяйственной и/или иной деятельности экономических субъектов;

– сопряжение зон с однородными климатическими условиями с зонами с однородными видами хозяйственной деятельности и на этой основе выделение территориальных образований (ТО), в рамках которых предполагается определять показатели уязвимости;

– составление реестра систем (природных, социально-экономических) для каждого ТО. Инвентаризация систем является основой для оценки подверженности воздействию изменения климата данного ТО. Заметим, что подверженность воздействию является необходимым, но недостаточным фактором оценки уязвимости

Таблица

Суммарные показатели уязвимости для данного (конкретного) сектора (города, предприятия)*

Компонент	Возможные индикаторы	
Подверженность воздействию	– прибрежные морфологические процессы (эрозия береговой зоны, затопление прибрежных низин и заболоченных земель, засоленность поверхностных и грунтовых вод и др.), – волновая активность и приливные волны, – экстремальные погодные явления, – повышение уровня моря, – динамика прибрежных вод	
Чувствительность	Население	Влияние изменения климата на население, проявляющееся, например, в росте заболеваний
	Прибрежные города и поселки	Изменение экономических показателей субъектов экономической деятельности
	Прибрежные экосистемы	Миграция видов
	Рыбное хозяйство	Изменение продуктивности рыбных запасов
	Прибрежный туризм	Изменение экономических показателей отелей и баз отдыха
Адаптационный потенциал	Экономика	Степень зависимости от морской деятельности (в частности, от рыболовства и грузоперевозок)
	Инфраструктура	Состояние строений, жилищ и дорог в прибрежной зоне
		Состояние дренажных систем
	Индивидуумы	Доступность медицинских учреждений
	Местная власть	Признание факта влияния изменения климата
		Степень влияния местных органов управления на социальную и экономическую деятельность

* В качестве примера — некоторые суммарные показатели уязвимости для прибрежной зоны западного сектора Российской Арктики

и, следовательно, климатического риска. Система (регион, ТО) может быть подвергнута воздействию, но не быть уязвимой;

- оценка чувствительности природных и антропогенных систем к изменению климата. В идеале для этой цели целесообразно использовать эконометрические модели, в которых вектор входных параметров включает в себя параметры, характеризующие климатическую систему и изменения, происходящие в ней. Однако для верификации таких моделей необходима ретроспективная информация, которая в силу объективных причин зачастую отсутствует;

- определение пороговых значений индикаторов изменения климата для отдельных систем;

- формирование основных индикаторов уязвимости каждой конкретной системы к изменению климата (в основном методом экспертных оценок) (см. таблицу).

ВЫВОДЫ

Целью идентификации климатического риска является определение источников риска и тех неблагоприятных событий, которые могут повлиять на эффективность функционирования рассматриваемой системы. Идентификация риска и его анализ выполняются на основе информации о внешней по отношению к системе среде, факторах риска и самой системы (процесса), подверженной климатическому риску. Вторая проблема — определение чувствительности изучаемых систем к климатическим риск-факторам. Для оценки климатического риска, когда риск-факторы известны, требуется разработка адекватных математических моделей социально-экономических и природных систем.

На основе анализа воздействия изменений климата на природные и хозяйственные системы и население Арктики сформирован реестр рисков, обусловленных климатическими изменениями. Предложена концептуальная модель оценки воздействия изменения климата на различные системы. Оценка влияния изменения климата на системы (природные, социальные, экономические) предполагает наличие информации о стресс-факторах (сценарии изменения климата, как в масштабах планеты, так и в Российской Арктике), формулировку целей оценки, определение субъектов, представляющих интерес (сектора экономики, регионы и др.), обоснование требований к входным данным, математическим моделям и методам. Результат оценки — показатели как качественные («значительное влияние», «слабое влияние» и т.д.), так и количественные (коэффициенты чувствительности).

Выделены основные проблемы в идентификации климатического риска в Арктике. Арктика — очень специфический регион с точки зрения происходящих в нем климатических изменений под влиянием глобального изменения климата. Данное обстоятельство предъявляет высокие требования к составлению перечня риск-факторов для основных систем, находящихся в Арктическом регионе, и социально-экономических процессов, происходящих в нем. Вторая проблема — определение чувствительности изучаемых систем к климатическим риск-факторам. В идеальном случае для решения данной проблемы необходимо иметь соответствующие математические модели рассматриваемых систем. Исследование этих моделей в пространстве параметров позволит сделать вывод о том, насколько та или иная система подвержена климатическому риску.

Индикаторами изменения климата в Арктике могут служить приповерхностная температура воздуха, площадь морского льда и повторяемость опасных гидрометеорологических явлений в морской Арктике и отдельных ее районах, которые являются наиболее важными факторами, влияющими на хозяйственную деятельность.

В области морской Арктики самым теплым за период наблюдений с 1951 г. оказался 2016 год. Средняя приповерхностная температура воздуха (ПТВ) зимой в этот год по данным 41 станции составила $-19,3^{\circ}\text{C}$. Летом средняя температура 2016 г. стала второй в ряду теплых летних сезонов. В 2017 г. обе температуры понизились, особенно летом. Минимальная среднемесячная площадь морского льда в 2017 г., наблюдаемая в сентябре, составила 4,74 млн км², что является седьмым значением в ряду минимальных значений за период с 1979 г. Морской ледяной покров в арктических морях летом быстро сокращается начиная с 1998 г. В последние 13 лет его площадь в сентябре колеблется около 200 тыс. км², что в 6 раз меньше, чем в 1996–1998 гг. Тренд повторяемости дней с низкой температурой воздуха морях в ноябре–марте с 1995 по 2015 гг. отрицательный. Тренды повторяемости дней с ветром более 15 м/с с ноября по март за 1995–2015 г. в морях Баренцевом, Лаптевых, Восточно-Сибирском исчезающе малые — относительная дисперсия тренда менее 5 %. Только в Карском море и в Чукотском море (положительный тренд) относительная дисперсия составила 10–35 %.

В разрабатываемой методике три компонента — подверженность к воздействиям, чувствительность и адаптационный потенциал — служат ключевыми факторами, на основе которых определяется уязвимость систем к изменению климата, а также осуществляется информационное обеспечение процессов оценки и уменьшения последствий климатических угроз. Алгоритм разрабатываемой методики определения уязвимости включает в себя последовательность из 7 шагов: 1) климатическое районирование Российской Арктики, формирование вектора индикаторов изменения климата, компонентами которого являются как глобальные показатели, так и индикаторы, отражающие региональные особенности глобального изменения климата; 2) функциональное зонирование Арктического региона; 3) сопряжение зон с однородными климатическими условиями с зонами с однородными видами хозяйственной деятельности и на этой основе выделение территориальных образований (ТО); 4) составление реестра систем (природных, социально-экономических) для каждого ТО; 5) оценка чувствительности природных и антропогенных систем к изменению климата; 6) определение пороговых значений индикаторов изменения климата для отдельных систем; 7) формирование основных индикаторов уязвимости каждой конкретной системы к изменению климата.

Благодарности. Статья подготовлена по результатам проектов 1.3.3.1 и 1.3.4.2 ЦНТП Росгидромета.

Acknowledgments. The article was prepared based on the results of the projects of 1.3.3.1 and 1.3.4.2 of the Roshydromet CSTEP.

ЛИТЕРАТУРА

1. Матишов Г.Г., Чилингаров А.Н. Объект изучения — российская Арктика // Вестник РАН. 2002. Т. 72. № 8. С. 687–691.
2. Филиппов В.В., Жуков М.А. Проблемы экономического развития арктической зоны Российской Федерации // НЭП – XXI век. Наука. Экономика. Промышленность. 2006. № 2. С. 19–22.

REFERENCES

1. Matishov G.G., Chilingarov A.N. Object of research – Russian Arctic // *Vestnik Rossiiskoi Akademii Nauk*. Bulletin of the Russian Academy of Sciences. 2002, 72 (8): 687–691. [In Russian].
2. Filippov V.V., Zhukov M.A. Problems of Russian Arctic zone economic development. *NEP – XXI vek. Nauka. Ekonomika. Promyshlennost'*. NEP – XXI Century. Science Economy Industry. 2006, 2: 19–22. [In Russian].

3. Матишов Г.Г., Дженюк С.Л. Проблемы управления морским природопользованием и обеспечения экологической безопасности в российской Арктике // Вестник Мурманского государственного технического университета. 2014. Т. 3. С. 531–539.
4. Порфирьев Б.Н. Глобальные климатические изменения: новые риски и новые возможности экономического развития страны // Российский экономический журнал. 2009. № 6. С. 66–76.
5. Селин В.С., Васильев В.В. Тенденции и риски хозяйственной деятельности в Арктике в условиях долговременных климатических изменений // Арктика и север. 2011. № 1. С. 125–133.
6. Катцов В.М., Порфирьев Б.Н. Климатические изменения в Арктике: последствия для окружающей среды и экономики // Арктика: экология и экономика. 2012. № 2 (6). С. 66–79.
7. Данилов А.И., Алексеев Г.В., Клепиков А.В., Ковалевский Д.В., Пересыпкин В.И. Морская деятельность в Арктике // Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2014. С. 898–917.
8. Дмитриев В.Г., Ковалевский Д.В., Алексеев Г.В., Бобылев Л.П. К оценке рисков, обусловленных неблагоприятными гидрометеорологическими явлениями и климатическими аномалиями в Арктике // Проблемы Арктики и Антарктики. 2012. № 4 (92). С. 52–62.
9. Soldatenko S.A., Alekseev G.V., Danilov A.I. A modeling system for climate change risk assessment, management and hedging in coastal areas // Proceedings of the Joint Conference “Managing risk to coastal regions and communities in a changing world” (EMECS’11 Sea Coast XXVI). August 22–27. St. Petersburg, 2016. P. 10.
10. Jones R. N., Boer R. Assessing Current Climate Risks // Adaptation Policy Frameworks for Climate Change: Developing Strategies, Policies and Measures / Lim B., Spanger-Siegfried E., Burton I., Malone E., Huq S. (eds.). Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2004. P. 91–117.
11. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation /
3. Matishov G.G., Dzheniuk S.L. Problems of environmental management and supplying of ecological safety in Russian Arctic. *Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. Bulletin of Murmansk State Technical University. 2014, 3: 531–539. [In Russian].
4. Porfir'ev B.N. Global climatic changes: new risks and new capabilities of economical country development. *Rossiiskii ekonomicheskii zhurnal*. Russian economic journal. 2009, 6: 66–76. [In Russian].
5. Selin V.S., Vasil'ev V.V. Tendencies and risks of economic activities in Arctic in conditions of long-term climatic changes. *Arktika i sever*. Arctic and North. 2011, 1: 125–133. [In Russian].
6. Kattsov V.M., Porfir'ev B.N. Climate changes in Arctic: consequences for environment and economy. *Arktika: ekologiya i ekonomika*. Arctic: ecology and economy. 2012, 2 (6): 66–79. [In Russian].
7. Danilov A.I., Alekseev G.V., Klepikov A.V., Kovalevskii D.V., Peresypkin V.I. Maritime activities in the Arctic. Second assessment report of Roshydromet on climate change and its impact on the territory of the Russian Federation. Moscow: Roshydromet, 2014: 898–917. [In Russian].
8. Dmitriev V.G., Kovalevskii D.V., Alekseev G.V., Bobylev L.P. On estimation of risks defined by adverse hydrometeorological conditions and climatic anomalies in Arctic. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Problems of Arctic and Antarctic. 2012, 4 (92): 52–62. [In Russian].
9. Soldatenko S.A., Alekseev G.V., Danilov A.I. A modeling system for climate change risk assessment, management and hedging in coastal areas. Proc. of the Joint Conference “Managing risk to coastal regions and communities in a changing world” (EMECS’11 Sea Coast XXVI). St. Petersburg, August 22–27. 2016: 10.
10. Jones R. N., Boer R. Assessing Current Climate Risks. Adaptation Policy Frameworks for Climate Change: Developing Strategies, Policies and Measures. Lim B., Spanger-Siegfried E., Burton I., Malone E., Huq S. (eds.). Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2004: 91–117.
11. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation.

C.B. Field, V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, P.M. Midgley (Eds.) // A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK, and New York, USA: Cambridge University Press, 2012. P. 582.

12. Bowyer P., Bender S., Rechid D., Schaller M. Adapting to Climate Change: Methods and Tools for Climate Risk Management. Climate Service Centre, Germany, 2014. 124 p.

13. Papathoms-Köhle M., Promper C., Glade T. A common methodology for risk assessment and mapping of climate change related hazards – implications for climate change adaptation policies // Climate. 2016. V. 4 (1). P. 1–23.

14. ГОСТ Р ИСО/МЭК 31010-2011 «Менеджмент риска. Методы оценки риска». Федеральное Агентство по техническому регулированию и метрологии. М.: Стандартинформ, 2011. 74 с.

15. Миронов Е.У., Смирнов В.Г. Разработка экспериментального аппаратнопрограммного комплекса спутникового мониторинга и прогноза ледовой обстановки в зоне архипелага Шпицберген и в Западной Арктической зоне РФ // Российские полярные исследования. 2016. № 3 (25). С. 24–26.

16. Алексеев Г.В. Разработка экспериментального аппаратнопрограммного комплекса мониторинга и прогноза климатических изменений на архипелаге Шпицберген и в Западной Арктической зоне РФ // Российские полярные исследования. 2015. № 4 (22). С. 26–28.

17. IPCC (2007). Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / S. Solomon, D. Quin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller (eds.). United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, Cambridge, 996 p.

C.B. Field, V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, P.M. Midgley (Eds.). A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, USA, 2012: 582.

12. Bowyer P., Bender S., Rechid D., Schaller M. Adapting to Climate Change: Methods and Tools for Climate Risk Management. Climate Service Centre, Germany, 2014: 124 p.

13. Papathoms-Köhle M., Promper C., Glade T. A common methodology for risk assessment and mapping of climate change related hazards – implications for climate change adaptation policies. Climate. 2016, 4 (1): 1–23.

14. GOST R ISO/MEK 31010-2011 «Menedzhment riska. Metody otsenki riska». Federal'noe Agentstvo po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii. Moscow: Standartinform, 2011: 74 p. [In Russian].

15. Mironov E.U., Smirnov V.G. Development of experimental hardware environment for satellite monitoring and sea-ice conditions forecast in Svalbard area and Western Arctic zone of Russian Federation. *Rossiiskie poliarnye issledovaniia*. Russian Polar Investigations. 2016, 3 (25): 24–26. [In Russian].

16. Alekseev G.V. Development of experimental hardware environment for climate change monitoring and forecast in Svalbard area and Western Arctic zone of Russian Federation. *Rossiiskie poliarnye issledovaniia*. Russian Polar Investigations. 2015, 4 (22): 26–28. [In Russian].

17. IPCC (2007). Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / S. Solomon, D. Quin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller (eds.). United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, Cambridge: 996 p.

ЭКОЛОГИЯ. БИОЦЕНОЛОГИЯ. БИОГЕОГРАФИЯ

УДК 574.36

DOI: 10.30758/0555-2648-2018-64-1-71-83

АДАПТИВНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ СЕЗОННЫХ МИГРАЦИЙ ДИКИХ СЕВЕРНЫХ ОЛЕНЕЙ НА ТАЙМЫРЕ

К.В. МАКЛАКОВ¹*, Н.В. МАЛЫГИНА²

¹ — Институт экологии растений и животных УрО РАН, Екатеринбург, Россия

² — Уральский федеральный университет им. Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

*kvm@ipae.uran.ru

ADAPTIVE CHANGE IN WILD REINDEER SEASONAL MIGRATIONS IN THE TAIMYR PENINSULA

K.V. MAKLAKOV¹*, N.V. MALYGINA²

¹ — Institute of Plant and Animal Ecology of Urals Dep. of RAS, Yekaterinburg, Russia

² — Ural State University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia

*kvm@ipae.uran.ru

Received November, 13, 2017

Accepted March, 11, 2018

Keywords: ambient temperature, bioenergetics, climate change, energy expenditures, grazing, local populations, population, *Rangifer tarandus L.*, reindeer, Taimyr.

Summary

As the largest in the world the Taimyr population of wild reindeer displays pronounced seasonal migrations from forest zone to tundra for fawning in spring and return motion in fall. These motions are characterized with dynamics varying from year to year. Evidences of experience suggest that migration course cannot yet be interrupted or curtailed with artificial constructions or anthropogenic disturbance. By results of long-term observations carried out by one of the authors during 20 years, migration timing and speed were related to current ambient temperature and varied from year to year. As foreseen temperature rise happens more intensively in Arctic than upon an average through the Planet and is higher overland than it is over ocean it must apparently exert influence on the pattern of reindeer migrations. We hold that this phenomenon consists with changes in migration activity for recent decades and manifests increasing all-year-round separate reindeer groups presence in tundra. Some of these groups are registered and presented on the skeleton map. In the light of current climatic trend the ecological mechanism of migrations decrease should be grounded on reindeer bioenergetics and derived from ecological function of their migrations. Energy expenditures for far movements are getting less appropriate and the proportion of total heads staying in tundra zone all-year-round will increase. Available bioenergetics parameters and the simple model let to make a prediction. In the end we propose some preventive conservation arrangements to secure the mass heads of wild reindeer staying in tundra against adverse factors, mainly pending anthropogenic.

Citation: K.V. Maklakov, N.V. Malygina. Adaptive Change in Wild Reindeer Seasonal Migrations in the Taimyr Peninsula. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2018, 64 (1): 71–83. [In Russian]. doi: 10.30758/0555-2648-2018-64-1-71-83

Ключевые слова: корм, локальные популяции, миграция, популяция, потепление климата, *Rangifer tarandus L.*, температура среды, энергозатраты.

Обитающая на Таймыре популяция диких северных оленей характеризуется четко выраженными сезонными миграциями, динамика которых варьирует от года к году. На основе многолетних полевых наблюдений показана зависимость начального времени и скорости сезонных миграций от текущей приземной температуры воздуха. Рассмотрено влияние на миграции прогнозируемых климатических изменений, приводится картосхема отмечаемых изменений в миграционной активности популяции за последние десятилетия. В свете наблюдаемой тенденции обоснованы экологические причины сокращения миграций оленей с позиций биоэнергетики. Предлагаются превентивные природоохранные меры, призванные обезопасить поголовье оленей в тундровой зоне от неблагоприятных, прежде всего антропогенных факторов.

ВВЕДЕНИЕ

Ввиду возрастающего промышленного освоения региона Таймыра таймырская популяция дикого северного оленя (*Rangifer tarandus L.*), будучи крупнейшей в мире и ключевой для тундровой экосистемы, оказывается весьма уязвимой [1] и нуждающейся в пристальном внимании специалистов при построении программ ее охраны и управления. На эту ситуацию накладывается фактор климатических изменений. По индексу тренда арктических видов (Arctic Species Trend Index (ASTI)), который приводится комиссией по оценке климатического воздействия на Арктику (Arctic Climate Impact Assessment (ACIA)), спад обилия в популяциях позвоночных наземных экосистем Крайнего Севера на –28 % с 1970 по 2004 г. произошел главным образом за счет травоядных (северных оленей и леммингов) [2]. При этом там же отмечается, что срок в 34 года недостаточен для оценки вклада климата в общий тренд позвоночных, так как популяции оленей обладают собственной циклической динамикой с длинным периодом, что отмечается другими авторами [3], в том числе и для Таймыра [4]. Поэтому динамика численности не является четким показателем влияния климатических изменений на диких оленей. Мы обратили внимание на качественные характеристики популяции. Некоторыми исследователями, изучающими вопрос влияния изменений климата на миграционную активность оленей, для аналогичных мигрирующих популяций карibu предсказано увеличение ареала (размаха миграции) для одних стад и его сокращение — для других на период 2040–2069 гг. [5].

Адаптивными видоспецифическими признаками северных оленей являются стадный образ жизни и сезонные миграции. В миграционной активности дикого северного оленя, обитающего на Таймыре, присутствует своя специфика тундрового подвида: посезонное неравномерное распределение стад с протяженными и массовыми перемещениями по всему региону и даже за его пределами. Одним из регулирующих внутрипопуляционных механизмов является и то, что, хотя сезонные перемещения оленей происходят по всему Таймыру, они осуществляются не сплошным потоком, а определенными «миграционными коридорами», или «рукавами» [6, 7] (рис. 1), которые смещаются с годами, что, по-видимому, регулирует численность животных и одновременно предотвращает перевыпас и вытаптывание тундр. Эта особенность подтверждается методами спутникового слежения за карibu [8] и была использована при учете миграционной активности оленей.

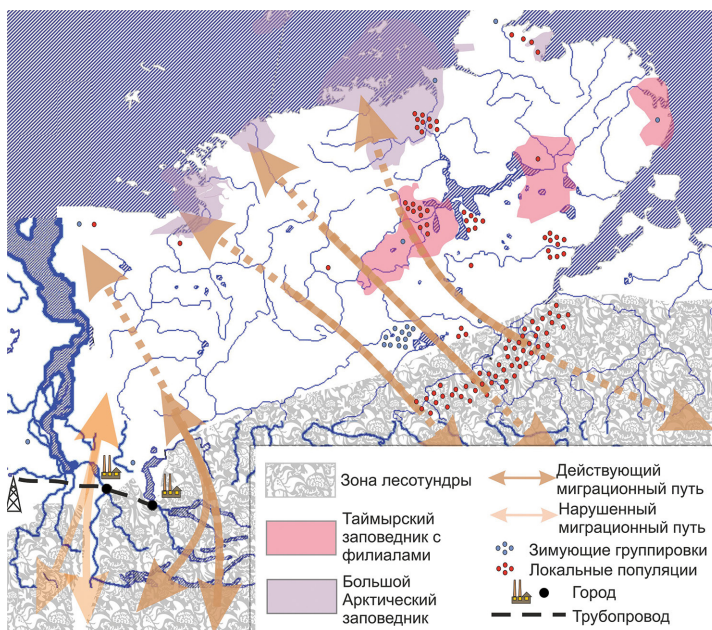


Рис. 1. Пути сезонных миграций дикого северного оленя на полуострове Таймыр.

Для зимующих группировок и локальных популяций один кружок соответствует примерно 1000 особей

Fig. 1. Seasonal migration routes of wild reindeer in the Taimyr Peninsula.

For wintering groups and local populations a circle signifies approximately 1000 individuals

Целями нашей работы было выяснение по результатам многолетних полевых работ того, являются ли климатические изменения фактором, влияющим на миграции дикого северного оленя на Восточном Таймыре, и обоснование предварительных природоохранных мер, необходимых ввиду региональных климатических изменений и грядущей эскалации освоения территории.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Местом проведения работ была восточная часть полуострова Таймыр: обширный район, меридионально протянувшийся широкой полосой, площадью около 132 тыс. км². С юга он ограничен бассейном р. Хатанги — 72° с.ш., а с севера — горами Бырранга, с расстоянием 293 км между самыми крайними точками. На востоке район исследований ограничивался 108° в.д., а на западе 96° в.д., с расстоянием между самыми крайними точками — 420 км.

Полевые работы, общей продолжительностью 22 месяца, проводились в период с 1984 по 2013 г., при этом наблюдения за общим ходом миграций велись до 2004 г., далее наблюдения велись только в районах летовок оленей. Слежение за пространственным распределением, интенсивностью хода и сроками посезонной динамики, структурой и интенсивностью миграционного потока на территории Восточного Таймыра с фиксированием времени начала и окончания миграции велось различными методами.

Регулярный учет проводился по стандартной методике аэровизуальных наблюдений на маршрутах с двух бортов самолета Ан-2 либо вертолета Ми-8, а также на

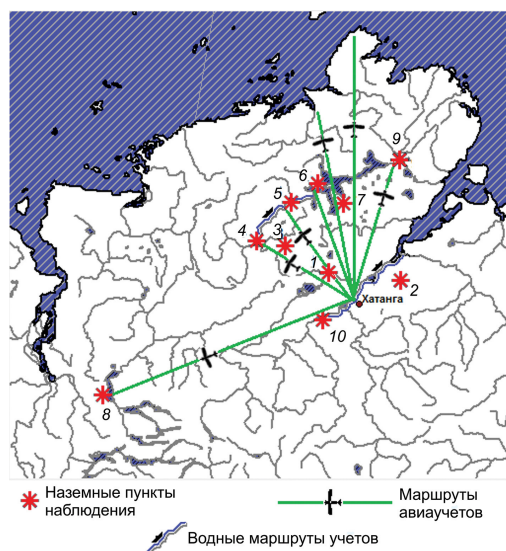


Рис. 2. Маршруты и пункты наблюдений: 1 — $72^{\circ} 27' \text{ с.ш.}, 102^{\circ} 00' \text{ в.д.}$, урочище Ары-Мас в среднем течении реки Новая; 2 — $72^{\circ} 30' \text{ с.ш.}, 105^{\circ} 10' \text{ в.д.}$, устье реки Лукунская; 3 — $73^{\circ} 26' \text{ с.ш.}, 98^{\circ} 22' \text{ в.д.}$, среднее течение реки Малая Логата; 4 — $73^{\circ} 11' \text{ с.ш.}, 95^{\circ} 48' \text{ в.д.}$, устье реки Логата; 5 — $74^{\circ} 13' \text{ с.ш.}, 97^{\circ} 59' \text{ в.д.}$, устье реки Большая Боотанка; 6 — $74^{\circ} 23' \text{ с.ш.}, 100^{\circ} 01' \text{ в.д.}$, мыс Рысюкова, устье реки Верхняя Таймыра; 7 — $74^{\circ} 12' \text{ с.ш.}, 101^{\circ} 28' \text{ в.д.}$, озеро Таймыр (залив Байкуранеру); 8 — $69^{\circ} 28' \text{ с.ш.}, 86^{\circ} 19' \text{ в.д.}$, сопредельная территория г. Дудинка; 9 — $74^{\circ} 44' \text{ с.ш.}, 106^{\circ} 21' \text{ в.д.}$, среднее течение реки Бикада; 10 — $71^{\circ} 34' \text{ с.ш.}, 100^{\circ} 15' \text{ в.д.}$, среднее течение реки Хета

Fig. 2. Observation routes and points: 1 — $72^{\circ} 27' \text{ N}, 102^{\circ} 00' \text{ E}$; 2 — $72^{\circ} 30' \text{ N}, 105^{\circ} 10' \text{ E}$; 3 — $73^{\circ} 26' \text{ N}, 98^{\circ} 22' \text{ E}$; 4 — $73^{\circ} 11' \text{ N}, 95^{\circ} 48' \text{ E}$; 5 — $74^{\circ} 13' \text{ N}, 97^{\circ} 59' \text{ E}$; 6 — $74^{\circ} 23' \text{ N}, 100^{\circ} 01' \text{ E}$; 7 — $74^{\circ} 12' \text{ N}, 101^{\circ} 28' \text{ E}$; 8 — $69^{\circ} 28' \text{ N}, 86^{\circ} 19' \text{ E}$; 9 — $74^{\circ} 44' \text{ N}, 106^{\circ} 21' \text{ E}$; 10 — $71^{\circ} 34' \text{ N}, 100^{\circ} 15' \text{ E}$

водных маршрутах по рекам Верхняя Таймыра (180 км) и Хатанга (240 км). Общая протяженность водных маршрутов за период наблюдения составила около 40 тыс. км. В обоих случаях на кинокамеру проводились съемки на участках, максимально благоприятных для демографической дифференциации животных (взрослых самцов от самок и в летне-осенний период — телят текущего года рождения от молодняка 1–2 лет). Общая продолжительность авианаблюдений — 500 часов. Общая протяженность маршрутов авианаблюдений за весь период составила около 60 тыс. км. На основных миграционных путях проводился наземный учет на стационарных участках (рис. 2). Использованы материалы «Летописи природы» и «Дневника лесника» государственного природного биосферного заповедника «Таймырский», опросные данные. Опрашивался летный состав Хатангского объединенного авиаотряда, работники Таймырской нефтеразведочной экспедиции Горно-металлургического комбината им. А.С.Завенягина, рыбаки-охотники совхозов Хатангского района, работники Таймырского государственного заповедника. Показатели приземной температуры воздуха даются по метеоданным станции Хатанга ($71,98^{\circ} \text{ с.ш.}, 102,47^{\circ} \text{ в.д.}$), полученным с сайта Российской федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (<http://aisori-m.meteo.ru/waisori/>).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Адаптивная роль миграций. Механизм сезонных миграций оленей на Крайнем Севере задается прежде всего годовым циклом температуры и динамикой уровня инсоляции. Оба эти фактора определяют доступность кормов, к которой привязан и репродуктивный цикл оленей. Если углеводсодержащие лишайники в разной степени доступны круглогодично, то зеленые корма доступны только в бесснежный период. Критическое значение для оленей имеет краткосрочное пополнение запасов белков, солей и витаминов на весь последующий год. Наиболее продуктивным источником таких кормов является молодая зелень, доступная только в короткий весенний период. Путем весенней миграции с юга на север олени удлиняют этот кормовой период на 20 дней [9]. Этот же период совпадает с периодом интенсивного роста плода у беременных самок. Таким образом, механизмом весенней миграции на Таймыре является кормовая доминанта поведения оленей, проявляющаяся в следовании на север по мере появления молодой зелени. На заключительной стадии весенней миграции в мае–июне происходит отел беременных самок. Еще одним экологическим фактором, определяющим места отела в таймырской тундре далеко от лесной зоны, является ограниченная мобильность волков в этих районах, которые устраивают логова не далее 50 км от лесной зоны [10]. Это связано с появлением помета у волков в это же время года. Тундровые волки малочисленны и маломобильны в период отела, они максимально обеспечены ресурсами потенциальных жертв (28 тыс. кг потребляемой биомассы на одного волка) и изымают лишь 2,5 % от всей тундровой популяции северных оленей [11], что позволяет беременным самкам оленей сосредотачиваться в тундре в период отела до 50–100 оленей на км² [10]. Кроме этого, перемещение оленей на север Таймыра летом обеспечивает оленям в период гнуса наиболее комфортные условия в горах Бырранга и на морских побережьях (комфортная доминанта поведения).

Доказано, что летом происходит увеличение энергопотребления оленей по сравнению с зимним периодом на 30–40 % [12]. Это связано с повышенной двигательной активностью и нагулом массы тела на летних, богатых зеленью, пастбищах, выкармливанием новорожденных. В то время как зимой олени тратят всего 2 % суточного бюджета на двигательную активность и 17 % — на тебенежку и пастьбу. Обратный ход диких северных оленей в осеннюю миграцию также обусловлен их движением за уходящим на юг поясом зеленой растительности. Заканчивается осенняя миграция у накопивших жировые запасы и достигших наибольшей за весь год массы тела оленей в сентябре–октябре периодом гона и спаривания. Зимовка в лесной зоне дает оленям больше возможностей доступа к ветоши и населяющим нижние ветви деревьев лишайникам, а также к укрытиям в условиях ветра и низких температур (удовлетворение пищевой и комфортной доминант поведения).

Антропогенные изменения. Антропогенные изменения ландшафта на западном Таймыре, связанные со строительством промышленных объектов Норильского металлургического комбината во второй половине XX в. (нитки трубопроводов, железная дорога, шахты, корпуса завода, городская застройка), привели к перегораживанию привычных путей миграций диких северных оленей. Хотя некоторые авторы считают эти явления катастрофическими для популяции, по другим данным [13, 14], олени быстро находят обходные пути миграции, что через некоторое время произошло на западном Таймыре (см. рис. 1).

Наблюдаемая зависимость направления и скорости миграций от сезонной динамики температуры воздуха. Для миграционного хода оленей характерны следующие временные закономерности: как весной, так и осенью явно выделяются начало миграции (появление первых групп или следов передвижений), ее пик (массовое движение группировок) и окончание (уход последних групп, отсутствие следов передвижений). При этом данные многолетних наблюдений за миграциями дикого северного оленя (ДСО) на восточном Таймыре указывают на то, что динамика движения стад непостоянна от года к году: например, начало весеннего движения в урочище Ары-Мас варьирует с 24 апреля до 12 июня (в среднем 12 мая), в устье реки Логата — с 10 апреля до 21 июня (в среднем 29 мая), в среднем течении реки Большая Боотанкага — с 20 апреля до 1 июля (в среднем 7 июня) и т.д. Календарную дату появления первых мигрирующих групп оленей во время весенней и осенней миграции мы тесно связываем с естественно варьирующей каждый год приземной температурой воздуха. Так, начало весенней миграции происходит при повышении температуры на Таймыре до -10°C , а начало осенней — при понижении в летние месяцы до $+5^{\circ}\text{C}$. В течение периода наблюдений 1984–2004 гг. обычно хроно-хорологическая картина миграций менялась незначительно, но были и нетипичные годы с заметными отклонениями как температур, так и по срокам и интенсивности миграций, такие как 1986, 1989, 1990, 1998 гг. Поскольку миграции оленей неравномерны не только по времени, но и количественно в течение каждого сезона, варьируя от одиночных особей до стад по 20 тыс. особей, сроки и интенсивность хода, а также численность группировок, проходящих по каждому миграционному пути (см. рис. 1), различны в разные годы и даже в один сезон. Это объясняет такие случаи, как появление первых групп у реки Большая Боотанкага в некоторые годы раньше, чем на более южном участке — устье реки Логата и даже на самом южном участке — урочище Ары-Мас. Так, в нетипичном по миграционной динамике оленей 1990 г. начало весенней миграции отмечено в устье реки Логата — 10 апреля, у реки Большая Боотанкага — 20 апреля, в урочище Ары-Мас — 6 мая (рис. 3а). Возможны и некоторые отклонения, как по срокам, так и по направлению движения в решающие периоды сезона. Например, наблюдаемое после начала миграции ослабление ее интенсивности, вплоть до прекращения прохода животных, обратная миграция, а затем возобновление первоначального движения.

Такая картина отмечена в период осенней миграции 1990 г. (рис. 3а, б): устье реки Большая Логата — начало 13 июля (и одновременно — пик), затем обратный ход вплоть до урочища Ары-Мас и возобновление 12 августа первоначального движения, у реки Большая Боотанкага — 19 июля и 12 августа, на мысе Рысюкова (юго-западная оконечность озера Таймыр) — 16 июля и 11 августа, соответственно. В 1991 г. на Восточном Таймыре (рис. 3в) завершение весенней миграции (III декада июля) одновременно стало началом осенней, довольно интенсивной на начальной фазе, сменившейся затем на обратный ход при потеплении с $+7,8^{\circ}\text{C}$ 17 июля до $+13,2^{\circ}\text{C}$ 20 июля и снова возобновившейся при падении температуры с $+16,7^{\circ}\text{C}$ 25 июля до $+6,0^{\circ}\text{C}$ 30 июля. В первых числах августа наблюдался резко выраженный и сжатый по срокам проход больших группировок. 19 августа отмечен массовый выход животных с основной территории Таймыра в сопредельные районы (к реке Хатанга) с дальнейшим движением оленей на юг. Новая волна миграции, территориально захватившая западный и частично центральный миграционный путь,

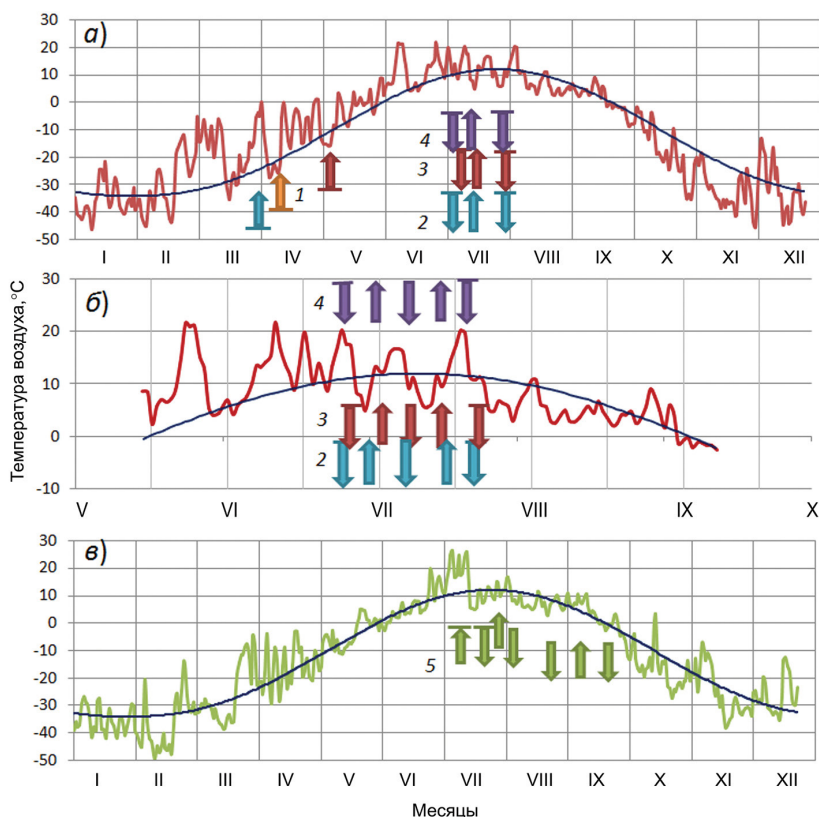


Рис. 3. Динамика приземной температуры воздуха в два года наблюдений.

a — за весь 1990 г., *б* — в летние месяцы 1990 г. (увеличено), *в* — за весь 1991 г. Стрелками отмечен характер движений стад (с юга на север и с севера на юг) в разных пунктах наблюдения (дифференцированы цветом); синусоида обозначает среднемноголетнюю динамику температуры. Объяснения в тексте

Fig. 3. Surface ambient temperature dynamics in two years of observations.

a — all over 1990, *b* — summer months of 1990 (enlarged), *c* — all over 1991. The arrows signify herds movement directions (north/south); the sinusoid signifies mean annual temperature dynamics. Explanation is in the text

проходила во второй половине сентября. В середине сентября начался обратный ход животных на север, к концу месяца олени вновь двинулись на юг.

Таким образом, межгодовое разнообразие миграционного хода диких оленей мы объясняем изменчивостью температурного режима, действующего на животных, по-видимому, опосредованно через состояние кормов. Сама поведенческая программа миграционного движения не только определяется внешним фактором, но, как мы покажем далее, вообще не является жестко детерминированной.

Климатические изменения. Хотя на основе цикличности климата существуют прогнозы в пользу похолодания к 2030–2040 гг. [15] в приполярной зоне, для Таймыра, как и для других арктических регионов [16], доминирует представление о том, что грядущие климатические изменения будут в сторону потепления [17]. Многочисленные научные данные свидетельствуют о весьма существенном потеплении в Арктике с се-

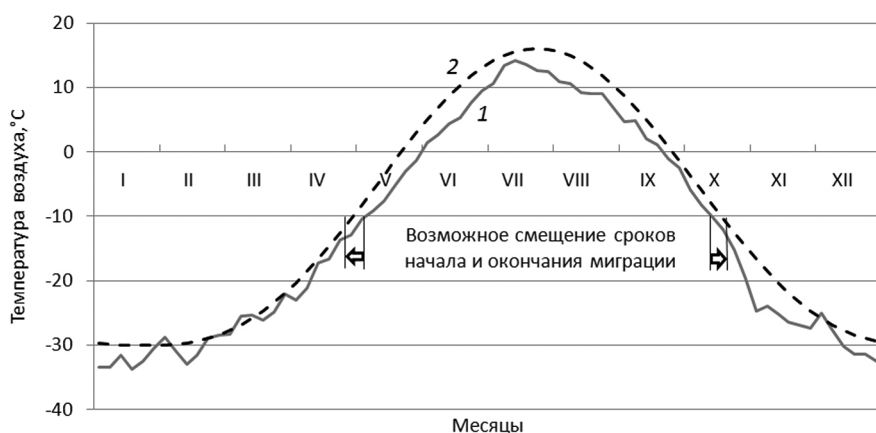


Рис. 4. Среднеголетняя сезонная динамика зарегистрированных и прогнозируемых температур воздуха на Таймыре.

1 — средняя за 1984–2000 гг. температура воздуха по данным метеонаблюдений; 2 — температура воздуха по прогнозу к 2050 г. [20]

Fig. 4. Mean annual seasonal dynamics of registered and forecast ambient temperatures in Taimyr.

1 — the average for 1984–2004 air temperature according to meteorological data; 2 — the air temperature is forecasted by 2050 [20]

редины XX в., что связывают с деятельностью человека. По прогнозам, потепление в Арктическом регионе будет происходить более быстрыми темпами, чем в среднем на планете, а над сушей с весьма высокой степенью достоверности оно будет более значительным, чем над океанами [18].

По данным оценочного доклада Росгидромета, наибольшая скорость увеличения среднегодовой температуры (более $0,7\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$) наблюдается на Арктическом побережье (от Ямала до Чукотки), с максимумом на полуострове Таймыр (до $+0,8\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$) во все сезоны, кроме лета. При этом зафиксировано уменьшение летом осадков на Таймыре [19]. В частности, прогнозируется увеличение средней за год температуры приземного воздуха на $2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ в центральной зоне Таймыра к 2050 г. [20]. Анализ средних температур по данным метеостанции Хатанга ($71,98^{\circ}\text{ с.ш.}$, $102,47^{\circ}\text{ в.д.}$) с 1984 по 2000 г. дал возможность смоделировать круглогодичную динамику температуры за этот период с помощью синусоидального уравнения сезонных изменений. Сезонные изменения (по дням) приземной температуры (в градусах по Цельсию) на Таймыре точнее всего описываются уравнением:

$$S(d) = 46 \left(0,5 \times \left(1 + \sin \left(2\pi \frac{d-120}{365} \right) \right) \right)^{1,4} - 33,$$

где $S(d)$ — температура ($^{\circ}\text{C}$) в день года под номером d . Рост температуры на $2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ приведет к началу теплого периода (выше $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, когда начинается весенняя миграция у оленей) примерно на полторы недели раньше весной и окончанию — на полторы недели позже осенью (рис. 4). Логично ожидать закономерных изменений в режиме вегетации, увеличивающих время летних кормов на три недели и сокращающих на этот же срок время наличия только зимних.

Биоэнергетика миграций оленей. Судя по измерениям отечественных авторов [12], затраты на локомоцию (по горизонтальной поверхности) для оленя массой в 130 кг (зимой) составляют 95 мл O_2 /кг/км, а для животного массой в 150 кг (летом) — 82 мл O_2 /кг/км. И то, и другое значение в пересчете на все животное можно оценить примерно в $130 \text{ кг} \cdot (95 \text{ мл } O_2/\text{кг}/\text{км}) / (208 \text{ мл } O_2/\text{ккал}) \approx 150 \text{ кг} \cdot (82 \text{ мл } O_2/\text{кг}/\text{км}) / (208 \text{ мл } O_2/\text{ккал}) \approx 59 \text{ ккал}/\text{км}$, что дает при 500 км миграции только через тундру Таймыра энергозатраты $(59 \text{ ккал}/\text{км}) \cdot 500 \text{ км} = 29,5 \text{ Гкал}$. Измерения энергозатрат животных меньших размеров (93 и 109 кг), выполненные зарубежными авторами [21, 22], согласуются с общей закономерностью и оказываются на 20–30 % меньше. Также приводятся цифры суточной энергии, метаболизированной оленем в летнее и зимнее время. Суточная энергия, метаболизированная из зимних кормов, составляет 2280 ккал на 100 кг живой массы. При дальнейшем расчете оказывается, что энергетические расходы на однонаправленную миграцию по таймырской тундре оленя массой в 100 кг покрываются $29500 \text{ ккал} / (2280 \text{ ккал}/\text{день}) = 13$ днями пастбы в зимнее время (полторы-две недели). Причем чем меньше масса тела животного, тем меньше энергии ему требуется на поддержание. Этот эффект хорошо описан у оседлых видов млекопитающих, в частности у грызунов, которые переживают неблагоприятный зимний сезон в нерепродуктивном состоянии, характеризующемся малой массой и энергозатратами [23]. Это же явление должно приводить популяцию оленей к экологической и, как следствие, весовой дифференциации на более крупных мигрирующих и более мелких зимующих в тундре оленей, что, однако, требует тщательного сбора данных и дальнейшего изучения.

Миграционные движения оленей в таежной зоне отслеживать пока не удастся: эти исследования требуют массового радиомечения. Но можно уверенно сказать, что зимовка в тайге происходит в более благоприятных по сравнению с тундрой кормовых условиях и перемещения по лесу лучше «окупаются» энергетически. Относительно смертности новорожденных оленят летом лесные условия неблагоприятны из-за обилия хищников, болезней (паразитов), отсутствия защищающего от гнуса ветра, большого риска сломать ногу; с другой стороны, тундровые местообитания неблагоприятны по причине худших кормовых условий и, соответственно, риска для детенышей родиться недоношенными, а также более худших защитных условий и риска замерзнуть в пургу. Эти различия были показаны на смертности новорожденных у домашних оленей [10]. Климатические изменения в сторону потепления неизбежно должны смещать баланс определяющих экологию оленя факторов в пользу тундровых местообитаний. По сведениям автора [6], сейчас наблюдается общая тенденция к смещению популяции в восточную часть ареала, что уже привело к изменению районов отела. Значительное количество самок телится южнее, чем раньше, а продвижение отставших с новорожденными самок задерживается ледоходом, что приводит к высокой смертности приплода при преодолении крупных водных преград. Возможно, это еще один фактор, ограничивающий миграцию.

В случае спрогнозированного дальнейшего потепления на Таймыре энергопотребление оленей на постоянных местах будет все увеличиваться и все больше компенсировать время, затрачиваемое на миграцию. В таком случае энергетический баланс между необходимостью миграции и возможностью круглогодичного выживания в районах летних пастбищ будет смещаться в пользу второго. Возможно, нынешние экологические параметры для ДСО находятся в районе точки бифуркации

выбора между двумя стратегиями: отправляться в миграцию или оставаться в локальном тундровом обитании на весь год. Остающиеся на зимовку в лесотундре Хатангского района (на границе с тундрой) олени, по всей видимости, демонстрируют смешанную стратегию: получить хоть и меньший «выигрыш» от миграции (обильные зимними кормами леса), но за сотни, а не за тысячи километров. Нами различаются зимующие группировки, чье зимнее присутствие в тундре отмечалось эпизодически, от постоянно обитающих в тундре и систематически наблюдаемых на одних и тех же местах локальных популяций (см. рис. 1), чье количество постепенно увеличивается [6, 7]. Чтобы определить, насколько постоянен состав локальных популяций от года к году, необходимы дальнейшие исследования с индивидуальным мечением животных. Рекогносцировочные облеты и наблюдения на местах летовок до 2013 г. не показали видимых отклонений в путях и сроках миграций от путей и сроков, выявленных при круглогодичных и регулярных наблюдениях конца прошлого века. Однако интенсивность миграций, по-видимому, постепенно меняется. Чтобы четко ответить на этот вопрос, исследования должны быть продолжены на более современном уровне с использованием новых технологий (радиомечение оленей, спутниковое наблюдение, наблюдение с использованием беспилотных летательных аппаратов, генетический анализ популяции).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Если антропогенные изменения не способны надолго нарушить ход миграций у ДСО, то климатические изменения, по всей видимости, могут стать решающим фактором в сокращении и затормаживании миграций. Общее потепление должно приводить к повышению продуктивности растительных кормов и в следующую очередь к рассеянию общей популяции на множество локальных, что при сокращении миграционной активности оленей увеличит продолжительность, но снизит интенсивность локального воздействия на кормовые ресурсы, которых должно быть достаточно для круглогодичного обитания в тундре больших масс оленей. Прояснение этого положения требует тщательных исследований растительных ресурсов Таймыра, в том числе сочетания геоботанических полевых работ с космическим мониторингом.

В таких условиях, когда все большее число оленей будет оставаться в центральной части полуострова круглый год, они будут уязвимыми для широкомасштабного браконьерства, легко осуществляемого на открытой местности. Проблема того, что изменения климата вызывают увеличение присутствия карибу в местах добычи, уже возникла на другом континенте и потребовала активных мер мониторинга и охраны [24]. Важной становится круглогодичная защита территории вокруг мест отела и летовок, которые сосредоточены в центральной части полуострова, и расширение зоны охраны путем включения пространств, соединяющих изолированные филиалы Таймырского государственного заповедника в особую зону с присвоением ей статуса национального парка. Это позволит продолжить начавшееся промышленное освоение на этих территориях при одновременном сохранении поголовья популяции ДСО, являющегося главной туристической достопримечательностью тундр и кормовой базой коренных народов.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания Института экологии растений и животных УрО РАН, а также частично поддержана Комплексной программой УрО РАН (проект № 18-4-4-28).

Acknowledgments. This study was performed within the frameworks of state contract with the Institute of Plant and Animal Ecology, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, and partly supported by the complex program of fundamental studies of Urals Dep. of RAS (Project №18-4-4-28).

ЛИТЕРАТУРА

1. Маклаков К.В., Малыгина Н.В. Сравнительный анализ внешних факторов для таймырской популяции дикого северного оленя // Сибирский экологический журнал. 2016. № 1. С. 81–93.
2. ACIA Scientific Report. Chapter 10. Principles of Conserving the Arctic's Biodiversity. Fairbanks, 2007. P. 539–596. URL: <http://www.acia.uaf.edu/pages/scientific.html> (дата обращения 01.02.2018).
3. Vors L.S., Boyce M.S. Global declines of caribou and reindeer // Global Change Biology. 2009. V. 15. P. 2626–2633. doi: 10.1111/j.1365-2486.2009.01974.x
4. Малыгина Н.В., Маклаков К.В., Крызhimский Ф.В. Population dynamics of wild reindeer (*Rangifer tarandus* L.) on the Taimyr Peninsula: a simulation model // Russian Journal of Ecology. 2013. V. 44. № 5. P. 415–421.
5. Sharma S., Couturier S., Côté S.D. Impacts of climate change on the seasonal distribution of migratory caribou // Global Change Biology. 2009. V. 15. P. 2549–2562. doi: 10.1111/j.1365-2486.2009.01945.x
6. Малыгина Н.В. Дикий северный олень (*Rangifer tarandus* L.) Восточного Таймыра: особенности пространственного размещения // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Биология. Экология». 2010. Т. 3. № 3. С. 26–32.
7. Малыгина Н.В. Пространственное распределение локальных популяций дикого северного оленя (*Rangifer tarandus* L.) на Восточном Таймыре // Вестник КрасГАУ. 2015. № 9. С. 40–45.
8. Nicholson K.L., Arthur S.M., Horne J.S., Garton E.O., Del Vecchio P.A. Modeling caribou movements: seasonal ranges and migration routes of the Central Arctic herd // PLoS ONE. 2016. 11(4). URL: <http://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0150333> (дата обращения 06.04.2018).

REFERENCES

1. Maklakov K.V., Malygina N.V. Comparative analysis of external factors affecting the population of wild reindeer in Taimyr. *Sibirskii ekologicheskii zhurnal*. Contemporary Problems of Ecology. 2016, 9(1): 68–77. [In Russian].
2. ACIA Scientific Report. 2005. Chapter 10. Principles of conserving the Arctic's biodiversity. Fairbanks, 2007: 539–596. Available at: <http://www.acia.uaf.edu/pages/scientific.html> (accessed 01.02.2018).
3. Vors L.S., Boyce M.S. Global declines of caribou and reindeer. *Global Change Biology*. 2009, 15: 2626–2633. doi: 10.1111/j.1365-2486.2009.01974.x
4. Malygina N.V., Maklakov K.V., Kryzhimskiy F.V. Population dynamics of wild reindeer (*Rangifer tarandus* L.) on the Taimyr Peninsula: a simulation model. *Russian Journal of Ecology*. 2013, 44 (5): 415–421.
5. Sharma S., Couturier S., Côté S.D. Impacts of climate change on the seasonal distribution of migratory caribou. *Global Change Biology*. 2009, 15: 2549–2562. doi: 10.1111/j.1365-2486.2009.01945.x
6. Malygina N.V. Wild reindeer (*Rangifer tarandus* L.) of the East Taimyr: features of spatial distribution. *Izvestiia Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Biologiya. Ekologiya»*. Proceedings of Irkutsk State University. Series “Biology. Ecology”. 2010, 3: 26–32. [In Russian].
7. Malygina N.V. Spacial distribution of wild reindeer (*Rangifer tarandus* L.) local populations in Eastern Taimyr. *Vestnik KrasGAU*. Bulletin of Krasnoyarsk State University. 2015, 9: 40–45. [In Russian].
8. Nicholson K.L., Arthur S.M., Horne J.S., Garton E.O., Del Vecchio P.A. Modeling caribou movements: seasonal ranges and migration routes of the Central Arctic herd. *PLoS ONE*. 2016: 11(4). Available at: <http://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0150333> (accessed 06.04.2018).

9. Мордовин В.Ю., Михайлов В.В., Колпачиков Л.А., Шапкин А.М. Моделирование энергозатрат диких северных оленей (*Rangifer tarandus* L.) в зависимости от погодно-климатических факторов // Зоологический журнал. 2008. Т. 87. № 8. С. 1004–1011.
10. Баскин Л.М. Северный олень. Управление поведением и популяциями. Оленеводство. Охота. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2009. 284 с.
11. Суворов А.П. Волк в бассейне Енисея: биологические аспекты управления популяциями: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Красноярск, 2004. 25 с.
12. Соколов А.Я., Кушнир А.В. Терморегуляция и биоэнергетика северного оленя. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1997. 178 с.
13. Скробов В.Д. Влияние антропогенного фактора на диких северных оленей // Дикий северный олень в СССР. М.: Сов. Россия, 1975. С. 99–104.
14. Shiedeler R.T. Impacts of human developments and land use on caribou: a literature review // Alaska Department of Fish and Game, Habitat Division. 1986. V. 2. 127 p.
15. Фролов И.Е., Гудкович З.М., Карклин В.П., Смоляницкий В.М. Изменения климата Арктики и Антарктики — результат действия естественных причин // Проблемы Арктики и Антарктики. 2010. № 2 (85). С. 52–61.
16. Стишов М.С., Липка О.Н., Постнова А.И., Кокорин А.О., Суткайтис О.К., Никифоров В.В., Элиас В.В., Шварц Е.А., Жбанова П.И., Краснопольский В.Г., Згуровский К.А., Фомин С.Ю., Уваров С.А. Роль изменений климата и антропогенной нагрузки в динамике экосистем острова Вайгач // Проблемы региональной экологии. 2013. № 4. С. 132–138.
17. Алексеев Г.В., Радионов В.Ф., Александров Е.И., Иванов Н.Е., Харланенкова Н.Е. Изменения климата Арктики при глобальном потеплении // Проблемы Арктики и Антарктики. 2015. № 1 (103). С. 32–41.
18. Оценочный доклад МГЭИК (IPCC). Изменения климата 2013: Физическая научная основа. Швейцария, 2013. 34 с. URL: www.climatechange2013.org (дата обращения 01.02.2018).
19. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях
9. Mordovin V.U., Mikhaylov V.V., Kolpaschickov L.A., Shapkin A.M. Simulation of wild reindeer (*Rangifer tarandus* L.) energy expenditures depending on weather-climatic factors. *Zoologicheskii zhurnal*. Journal of Zoology. 2008, 87 (8): 1004–1011. [In Russian].
10. Baskin L.M. *Reindeer*. Management of behavior and populations. Husbandry. Hunting. Moscow: The Partnership of Scientific Publications of KMC, 2009: 284 p. [In Russian].
11. Suvorov A.P. Wolf in Yenisey's basin: biological aspects of population management. Abstract PhD Thesis. Krasnoyarsk: 2004. 25 p. [In Russian].
12. Sokolov A.J., Kushnir A.V. *Termoregulyatsiya i bioenergetika severnogo olenia*. Reindeer thermoregulation and bioenergetics. Novosibirsk: Sib. Dept. of RAS. 1997: 178 p. [In Russian].
13. Scrobov V.D. Anthropogenic factor influence on the wild reindeer. *Dikii severnyi olen' v SSSR*. Wild reindeer in the USSR. Moscow: Soviet Russia, 1975: 99–104. [In Russian].
14. Shiedeler R.T. Impacts of human developments and land use on caribou: a literature review. Alaska Department of Fish and Game, Habitat Division. 1986, 2: 127 p.
15. Frolov I.E., Gudkovich Z.M., Karklin V.P., Smolianitskiy V.M. Climate change in Arctic and Antarctic is the result of natural cause effects. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Problems of Arctic and Antarctic. 2010, 2 (85): 52–61. [In Russian].
16. Stishov M.S., Lipka O.N., Postnova A.I., Kokorin A.O., Sutcaytis O.K., Nikiforov V.V., Elias V.V., Schwarz E.A., Zhbanova P.I., Krasnopolskiy V.G., Zgurovskiy K.A., Fomin S.U., Uvarov S.A. The role of climate change and anthropogenic pressure in ecosystems dynamics of island Voygach. *Problemy regional'noi ekologii*. Regional Environmental Issues. 2013, 4: 132–138. [In Russian].
17. Alexeyev G.V., Radionov V.F., Alexandrov E.I., Ivanov N.E., Harlanenkova N.E. Arctic climate change in global warming. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Problems of Arctic and Antarctic. 2015, 1 (103): 32–41. [In Russian].
18. IPCC Assessment Report. Climate Change 2013: the Physical Science Basis. Swiss, 2013: 34 p. Available at: www.climatechange2013.org. (accessed 01.02.2018)

- на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2014. 60 с.
20. Клименко В.В., Микушин О.В., Ларин Д.А. Температурные тренды Таймырского региона в условиях глобального изменения климата // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2001. № 3. С. 195–203.
21. White R.G., Yousef M.K. Energy expenditure in reindeer walking on roads and tundra // Canad. J. Zool. 1978. V. 56. № 2. P. 215–223.
22. Luick B.R., White R.G. Oxygen consumption for locomotion by caribou calves // J. Wildlife Manag. 1986. V. 50. № 1. P. 149–152.
23. Маклаков К.В., Оленев Г.В., Кряжмиский Ф.В. Типы онтогенеза и территориальное распределение мелких грызунов // Экология. 2004. № 5. С. 366–374.
24. McNeil Ph., Russell D.E., Griffith B., Gunn A., Kofinas G.P. Where the wild things are: Seasonal variation in caribou distribution in relation to climate change // Rangifer. 2005. № 16. P. 51–63.
19. *Vtoroi otsenochnyi doklad RosGidroMeta ob izmeneniiakh klimata i ikh posledstviakh na territorii Rossiiskoi Federatsii*. The 2nd Assessment Report of Roshydromet about climate change and their consequences on the territory of Russian Federation. Moscow: Roshidromet, 2014: 60 p. [In Russian].
20. Klimenko V.V., Mikushin O.V., Larin D.A. Temperature trends of the Taimyr region in the context of global climate change. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya*. Geoecology. Engineering geology. Hydrogeology. Geocryology. 2001, 3: 195–203. [In Russian].
21. White R.G., Yousef M.K. Energy expenditure in reindeer walking on roads and tundra. Canad. J. Zool. 1978, 56 (2): 215–223.
22. Luick B.R., White R.G. Oxygen consumption for locomotion by caribou calves. J. Wildlife Manag. 1986, 50 (1): 149–152.
23. Maklakov K.V., Olenov G.V., Kryazhimskiy F.V. Ontogenesis types and territorial distribution of small Rodents. *Ekologiya*. Ecology. 2004, 5: 366–374. [In Russian].
24. McNeil Ph., Russell D.E., Griffith B., Gunn A., Kofinas G.P. Where the wild things are: Seasonal variation in caribou distribution in relation to climate change. Rangifer. 2005, 16: 51–63.

ГИДРОЛОГИЯ СУШИ, ГИДРОХИМИЯ

УДК 556.55 (211)

DOI: 10.30758/0555-2648-2018-64-1-84-100

СОСТОЯНИЕ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ ОЗЕР АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

В.А. РУМЯНЦЕВ*, А.В. ИЗМАЙЛОВА, Л.Н. КРЮКОВ

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт озероведения
Российской академии наук (ИНОЗ РАН). Санкт-Петербург, Россия*

**rum.ran@mail.ru*

STATE OF THE LAKE WATER RESOURCES OF THE RUSSIAN ARCTIC ZONE

V.A. RUMYANTSEV*, A.V. IZMAILOVA, L.N. KRYUKOV

*Federal State Budgetary Institution Research Institute of Lake Hydrology of the Russian
Academy of Sciences (RAS INOS), St. Petersburg, Russia*

**rum.ran@mail.ru*

Received February, 19, 2018

Accepted March, 12, 2018

Keywords: Arctic zone, Far North, microorganism, , toxic contamination, virus, water resources.

Summary

Regions of the Russian Federation classified among Arctic zone estimated to 22% of Russian territory. Arctic is characterized by the richest reserves of natural resources, and its phased, balanced development is the most important strategic task of Russia's socioeconomic development. Production and household activities of the population of Russia living and working in the far North is associated with difficult climatic and geographical conditions. In this case, the constant cold and consumption of contaminated water can lead to aggravation of various human disease. The Arctic zone of the Russian Federation is characterized by the richness of water resources as rapidly renewable (river runoff and its underground component), and static one to which are assigned the waters of lakes, underground waters, waters (ice) of mountain and polar glaciers. A characteristic feature of water consumption in the Arctic regions is the active use of lake water, which in a number of settlements is the main source of drinking water supply. In this regard, the assessment of the lake's fund of Arctic zone and its ecological status is extremely topical.

According to the assessments, more than 2.5 million water bodies, that is a ~2/3 of all water bodies of the country, are decoded in the Arctic zone of the Russian Federation on satellite images. Mainly, these are small water bodies, only about 975 thousand of them exceed 1 ha. The total area of the water surface of Arctic lakes is ~160 thousand km² (slightly less than a half of the total water surface of all natural water bodies of the Russian Federation), and the total volume of water enclosed in them is ~760 km³.

Citation: V.A. Rumyantsev, A.V. Izmailova, L.N. Kryukov. State of Lake Water Resources in the Russian Arctic Zone. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2018, 64 (1): 84–100. [In Russian]. doi: 10.30758/0555-2648-2018-64-1-84-100

Even in the middle of the 20th century, the lakes of the Russian Arctic, with rare exceptions, were characterized by the highest quality of their waters, but by now the ecological status of many water bodies has deteriorated significantly. The vulnerability of Arctic lakes to pollution is enhanced both by virtue of the peculiarities of their orometry and by the simplicity of the biological communities of northern ecosystems characterized by a low degree of stability. The poor knowledge of Arctic water bodies does not allow taking the necessary preventive measures for their protection and rational use. In this connection, attention to the expansion of works on the integrated study of limnology of water bodies included in the lake fund of the Arctic zone should be paid.

An estimation of water resources of lakes of the Arctic zone of Russia, their ecological status and the questions of etiology of diseases on the territories of the Far North are given in this article. The morbidity of the population of the Arctic regions of Russia today is much higher than the national average. Further development of the territory and the observed warming of the climate will lead to increasing pollution of freshwater resources with toxic substances, pathogenic microorganisms and viruses. This will exacerbate the issue of ensuring environmental safety and meeting the needs of the population in quality drinking water. The situation is further aggravated by the fact that the most affordable technologies for water treatment and wastewater treatment in conditions of low temperatures and high content of humic substances in the initial water cannot ensure the proper level of disinfection. In this regard, one of the topical issues is the creation of innovative technologies for water purification that are more adequate to the conditions of the Arctic zone of Russia.

Поступила 19 февраля 2018 г.

Принята к печати 12 марта 2018 г.

Ключевые слова: Арктическая зона, вирус, водные ресурсы, Крайний Север, микроорганизм, токсическая загрязненность.

Производственно-бытовая деятельность населения России, проживающего и работающего в районах Крайнего Севера, связана со сложными климатическими и географическими условиями. При этом фактически постоянный холод и потребление некачественной воды может приводить к обострению различных заболеваний. Особенностью арктических регионов России является наличие значительного количества озер и рек. Во многих северных регионах озерные воды являются важнейшим источником водоснабжения. В этой связи в настоящей работе дана оценка водных ресурсов озер Арктической зоны России, проанализировано их экологическое состояние и рассмотрены вопросы этиологии заболеваний на территориях Крайнего Севера.

ВВЕДЕНИЕ

Регионы, отнесенные к Арктической зоне Российской Федерации, составляют ~22 % территории государства. Арктика характеризуется богатейшими запасами природных ископаемых, и ее поэтапное сбалансированное освоение является важнейшей стратегической задачей socioэкономического развития России. В области охраны окружающей среды основным вопросом является определение возможностей рационального использования имеющихся здесь ресурсов, в том числе — водных, обеспечивающих как экономический рост, так и развитие необходимых параметров качества жизни проживающего в Арктике населения. Закономерно, что в число приоритетных направлений развития северных регионов Российской Федерации входят технологии снижения потерь от социально значимых заболеваний. При этом в области медицины экстремальных территорий остается много необъясненных фактов, противоречивых данных и нерешенных проблем, требующих фундаментального изучения и дальнейшей разработки [1].

Результаты современных медико-биологических исследований существенно расширили представления о причинно-следственных связях инфекционных и неинфекционных заболеваний с загрязнением воды и безусловным воздействием водного

фактора на формирование здоровья человека. Известны многочисленные сведения о связи уровня раковых и сосудистых заболеваний, являющихся лидерами в числе причин повышенной смертности населения, с состоянием поверхностных и подземных источников водоснабжения и качеством питьевой воды [2]. Воздействие водных растворов биологически активных веществ в малых и сверхмалых дозах в сочетании с солнечной активностью, электромагнитными полями, ионизирующим и неионизирующим излучением приводит к «массовым заболеваниям неясной этиологии» типа «токсической ангины», «токсического полиневрита» и даже «синдрома войны в Персидском заливе» [3–5]. Обращает на себя внимание тот факт, что при этих заболеваниях в первую очередь происходило поражение пищеварительного тракта. Причем в употребляемой воде уровень предельно допустимых концентраций (ПДК) вредных веществ соответствовал самым строгим современным нормативам качества.

В этой связи, оценивая значение водного фактора в формировании здоровья человека на Севере, следует отметить, что влияние этого фактора необходимо рассматривать в контексте гидрологической и гидрогеологической обстановки в территориальном разрезе, зависящей от количества, качества и термического режима вод. Прежде всего это касается прямого патогенного воздействия водных сред в зависимости от их природного состава и антропогенных примесей, что рассмотрено далее.

ОЦЕНКА ОЗЕРНОГО ФОНДА АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Арктическая зона РФ характеризуется богатством водных ресурсов, как быстро возобновляемых (речной сток и его подземная составляющая), так и статических (вековых), к которым отнесены воды озер, подземные воды, воды (льды) горных и полярных ледников. Характерной чертой водопотребления арктических регионов является активное использование озерных вод, которые в целом ряде населенных пунктов являются основным источником питьевого водоснабжения. В этой связи оценка озерного фонда Арктической зоны и его экологического состояния представляется крайне актуальной.

В пределах Арктической зоны РФ на современных спутниковых снимках дешифрируется более 2,5 млн водоемов, то есть $\sim 2/3$ всех водоемов страны или $3/4$ всех водоемов, расположенных в пределах российской части водосбора Северного Ледовитого океана [6]. Необходимо уточнить, что почти вся Арктическая зона относится к бассейну Северного Ледовитого океана, за исключением части территории Чукотского автономного округа, имеющей сток в Тихий океан. Около 975 тысяч водоемов Арктической зоны превышают по площади зеркала 1 га (площадь, выше которой водоем принято считать озером), большинство из них характеризуются малыми размерами. Лишь ~ 19 тысяч озер имеют площадь более 1 км², 930 относятся к категории средних (с площадью зеркала от 10 до 100 км²), 70 — к категории больших (от 100 до 1000 км²) и одно (оз. Таймыр) — к категории очень больших или великих (>1000 км²).

Суммарная площадь водной поверхности арктических озер составляет ~ 160 тыс. км², или чуть менее половины суммарной площади водной поверхности всех естественных водоемов РФ. Удельной величиной, характеризующей площадь водной поверхности региона, является его озерность, рассчитанная как отношение суммарной водной поверхности к его площади. Средняя озерность Арктической зоны РФ составляет 4,2 %, что в 2 раза превышает среднюю озерность по стране (рис. 1). Высокий коэффициент озерности характерен практически для всех территорий,

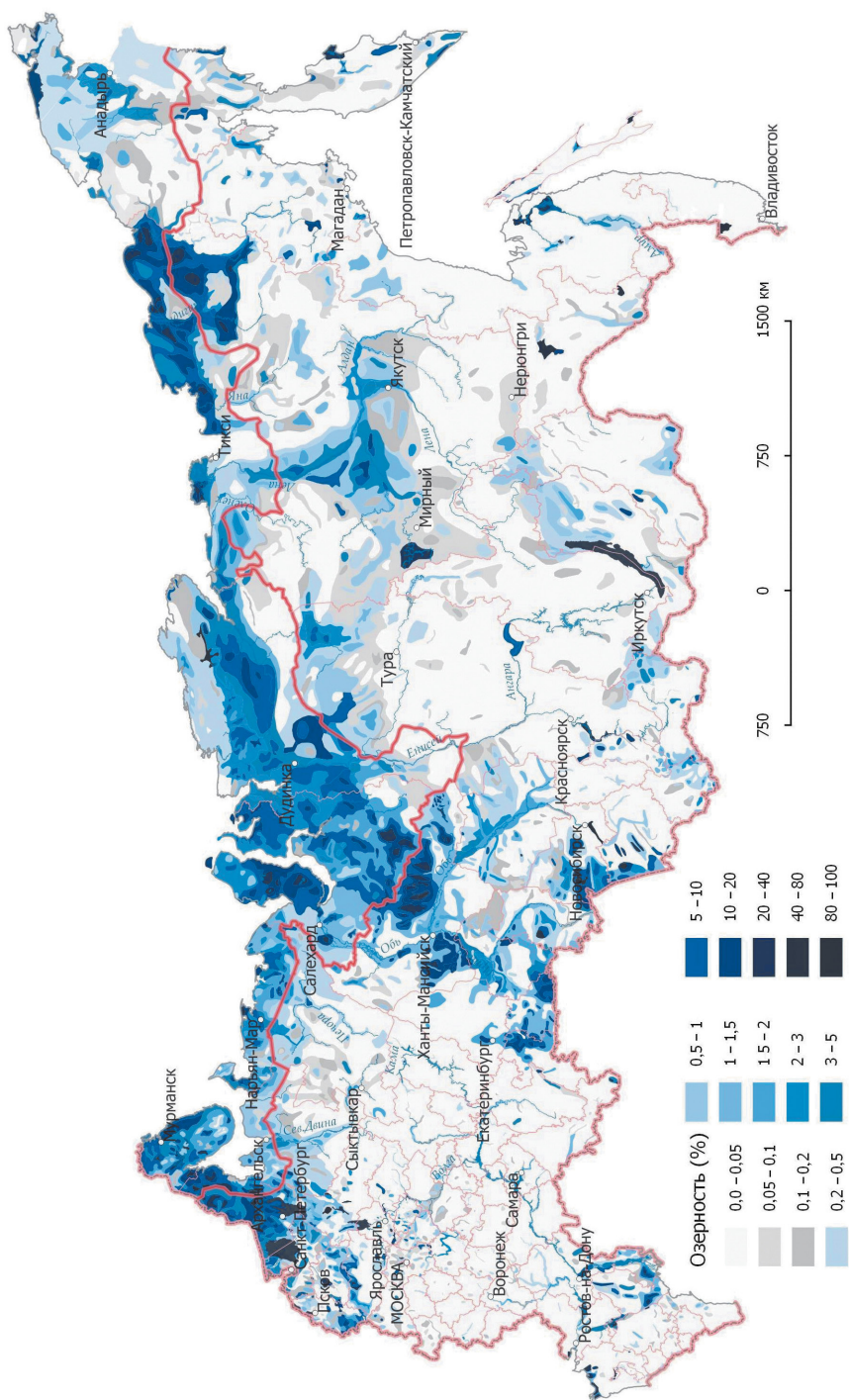


Рис. 1. Естественная озерность Российской Федерации
 Fig. 1. Natural lakeiness of the Russian Federation

включенных в Арктическую зону. Наиболее высокие его значения наблюдаются в пределах входящих в зону районов Республики Карелия (~12 %), Мурманской области (7,64 %) и Ямало-Ненецкого автономного округа (5,06) % [6]. Пониженные значения коэффициента озерности характерны лишь для Чукотского авт. округа (1,87 %) и входящих в Арктическую зону районов Архангельской области (~1,5 %).

Суммарный объем вод, заключенных в озера Арктической зоны, составляет ~760 км³, или ~3 % от суммарного запаса озерных вод России, который согласно последней оценке [6] без учета вод водохранилищ достигает 25 910 км³. Поскольку ~91 % озерных вод РФ заключен в оз. Байкал, а без его учета суммарный запас российских озерных вод составляет лишь 2295 км³, можно заключить, что 1/3 этой величины приходится на водоемы Арктической зоны.

В пределах Арктической зоны находятся разнообразные по своему происхождению озера. Побережье морей Северного Ледовитого океана практически повсеместно покрыто густой сетью водоемов, значительная часть которых обязана своим происхождением относительно недавним (в геологическом масштабе времени) морским трансгрессиям. Непосредственно вдоль прибрежной зоны располагаются прибрежно-лагунные водоемы с соленой водой и близкие к ним морские реликтовые озера — обособившиеся и опреснившиеся морские заливы. Наряду с прибрежно-лагунными водоемами, в пределах морских аккумулятивных, водно-ледниковых и озерно-аллювиальных равнин широко распространены термокарстовые, ледниковые, просадочные, пойменные и западинные озера. Большинство из них характеризуется малыми площадями и незначительными глубинами, составляющими от 1 до 2 м и лишь иногда — до 3 и более метров. Самым крупным среди расположенных здесь озер является оз. Таймыр.

Наиболее глубокие озера в пределах Арктической зоны приурочены к плато Путорана и Балтийскому кристаллическому щиту. Плато Путорана представляет собой комплекс высоких плосковершинных горных массивов, появившихся благодаря поднятию древних лавовых плато и разделенных глубокими и широкими ступенчатыми каньонами, образованными в результате гигантских тектонических разломов. В четвертичное время, согласно ряду гипотез [7], плато являлось одним из центров Сибирского оледенения. Сползавшие с него ледники переуглубили существующие здесь тектонические впадины, расширили каньоны и сформировали ущелья современных рек и глубочайшие узкие, вытянутые озера. Среди наиболее крупных озер — Хантайское, Кета, Лама, Мелкое, Виви, Дюпкун, Глубокое, Агата и другие. Максимальные глубины некоторых путоранских озер превышают сто метров. Озера плато Путорана — крупнейшее в Арктикеместилище пресных вод, только в 32 самых крупных водоемах сконцентрировано ~45 % от суммарного запаса озерных вод российской Арктической зоны.

Наряду с плато Путорана, достаточно глубокие водоемы встречаются и в пределах российской части Балтийского кристаллического щита. В период позднего плейстоцена данная территория находилась под сплошным покровом валдайского ледника. Наследием оледенения явилось огромное число озер, встречающихся на Кольском полуострове и в Карелии; значительная их часть имеет ледниковое происхождение, а наиболее крупные и глубокие — ледниково-тектоническое (оз. Имандра, Умбозеро, Ловозеро, Топозеро, Пяозеро и др.). Несмотря на то, что площадь Балтийского кристаллического щита в пределах Арктической зоны невелика (менее 5 %), в расположенных здесь

водоемах сконцентрировано более 11 % от суммарного объема вод Арктической зоны. Значительными глубинами (превышающими 10 м) характеризуется также ряд горных ледниковых и ледниково-тектонических водоемов Полярного и Приполярного Урала, а также островов архипелага Новая Земля. Здесь нет больших водоемов, а к категории средних относятся озера Гольцовое, Ледниковое, Нехватова 1, Нехватова 2, Гусиное, Крест-То (Саханова), Большое Пуховое, Обманный Шар, Большое Щучье.

ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ОЗЕР АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ

Еще в середине XX столетия озера Российской Арктики, за редким исключением, характеризовались высочайшим качеством своих вод. Постепенное загрязнение северных озер происходило по мере разработки здесь месторождений полезных ископаемых, создания вблизи них населенных пунктов и развития производственной и социальной инфраструктуры.

Первым арктическим регионом, освоение рудных месторождений которого сопровождалось значительными экологическими изменениями, явился Кольский полуостров. В 1930 г. было начато строительство апатит-нефелиновой обогатительной фабрики в Хибинах, на берегу оз. Большой Вудъявр. В 1935 г. на берегу оз. Имандра (губа Монче) развернулось строительство медно-никелевого предприятия. В 1946 г. на месте открытого в 1921 г. Печенегского рудного месторождения был сооружен комбинат «Печенганикель» с горнорудным и металлургическим производством. С 1953 г. комбинированным способом ведется разработка Оленегорского месторождения железных руд, а с 1962 г. — Ковдорского. В конце 1940-х гг. начата добыча лопарита на рудниках Ловозерского месторождения редкоземельных металлов [8].

Активное развитие горнодобывающей и перерабатывающей промышленности привело к значительной антропогенной нагрузке на поверхностные воды Кольского полуострова [9, 10]. Только с конца 1980-х гг. предпринятые природоохранные меры, а также снижение объема производства, связанное с начавшимся в это время экономическим кризисом, позволили приостановить масштабы и скорости загрязнения поверхностных вод полуострова. Восстановление ряда производств, начавшееся с конца 1990-х гг., проходило уже на фоне принятых мер по охране окружающей среды [11]. Снижение токсической нагрузки способствовало интенсификации процессов самоочищения водных экосистем, и экологическое состояние ряда водоемов заметно улучшилось. Однако и в настоящее время загрязнение озер Кольского полуострова остается актуальной проблемой, а комплекс предложенных для региона мер пока недостаточен. На водные объекты Мурманской области приходится около 80 % всех случаев высокого и экстремально высокого загрязнения в континентальной Арктической зоне РФ [12]. Тысячи тонн минеральных солей, взвешенных веществ, биогенных элементов, сотни тонн тяжелых металлов продолжают поступать в озера со стоками горнопромышленного комплекса. Кроме того, происходит аэротехногенное загрязнение территории за счет переноса некоторых из этих веществ через атмосферу. Находящиеся в зоне влияния промышленных предприятий природные комплексы испытывают деградацию на всех уровнях организации, прежде всего это сказывается на озерах центральной и западной части Кольского п-ова, где сконцентрировано основное производство. Так, важнейшие промышленные объекты Мурманской области сосредоточены в бассейне озера Имандра, среди основных производств выделяются ОАО «Апатит», Кольский ГМК ОАО «Североникель» и Оленегорский горно-обогатительный комбинат (ОАО «Олкон»). Разрабатывающее апатит-нефе-

линовые месторождения ПО «Апатит» загрязняет восточную часть оз. Имандра, а занимающийся переработкой медно-никелевого сырья комбинат «Североникель» сбрасывает сточные воды по реке Нюдуай в его северо-западную часть. В северную часть Большой Имандры поступает загрязнение с Оленегорского ГОК (ОАО «Олкон»), а в губу Молочная — подогретые воды Кольской АЭС. Основными поступающими в озеро загрязнителями являются сульфаты, хлориды, фосфор, нефтепродукты, никель, железо, медь, взвешенные и органические вещества, до 1975 г. к ним также относились гематитовые шлаки и фенолы. Кроме того, аэротехногенное загрязнение водосбора вызывают выбросы сернистого газа, приводящие к закислению водосбора. Многолетнее загрязнение озера привело к значительному росту минерализации воды и существенным изменениям ее ионного состава. Даже в относительно незагрязненном плесе Бабинская Имандра минерализация воды к концу XX в. повысилась до 45 мг/л, а в наиболее загрязненном плесе Большая Имандра — до 72 мг/л [10]. В воде большинства плесов увеличилось содержание общего фосфора, что способствовало быстрому антропогенному эвтрофированию водоема. Эвтрофирование, в сочетании с изменениями ионного состава воды, привело к значительным изменениям в озерной биоте, охватывающим не только планктонные и бентосные сообщества, но и рыбное население. В природном состоянии оз. Имандра являлось сигово-гольцовым водоемом, в настоящее время в озере преобладают сиговые, значительно сократилась численность гольцов и кумжи. В зонах загрязнения у рыб наблюдаются массовые патологии [10, 11]. Среди других наиболее изученных озер Кольского полуострова, экологическое состояние которых существенно изменено в связи с антропогенной активностью, — озера Большой Вудъявр, Умбозеро, Ловозеро, Куэтъярви, Ковдор, Чунозеро.

С середины 1930-х гг. крупное промышленное строительство, связанное с освоением Норильского медно-никелевого месторождения, было развернуто и на севере Центральной Сибири. Решение о постройке рудников и обогатительной фабрики было принято в 1935 г., и к 1939 г. на открывшемся комбинате был получен первый медно-никелевый штейн. Уже к началу 1950-х гг. комбинат вышел на лидирующие позиции в цветной металлургии страны, однако наибольшее развитие медно-никелевое производство получило после создания в 1989 г. концерна «Норильский никель».

Многолетняя деятельность крупнейшего горнодобывающего и металлопроизводящего комбината привела к огромным экологическим проблемам как в непосредственной к нему близости, так и на значительной части Таймырского полуострова. Выбросы в атмосферу загрязняющих веществ от ГМК «Норильский никель» в 2016 г. составили около 1,76 млн т, в отдельные годы они достигали 22,5 млн т. Для Норильска характерны самые загрязненные сульфатами в стране атмосферные осадки, содержание которых в 2016 г. составляло 89,5 мг/л (62 % от суммарного состава ионов осадков) [12]. Номенклатура нормируемых загрязняющих компонентов ГМК «Норильский никель» превышает 30 позиций, среди которых диоксид серы вносит наибольший вклад. Как результат колоссального аэрогенного загрязнения, вызываемого деятельностью ГМК «Норильский никель», кислотные дожди, выпадающие на Таймырском п-ове, привели к закислению большинства водоемов и другим негативным изменениям среды. Особенно опасны они в районах выходов обедненных кристаллических пород, где водоемы характеризуются минимальной буферной способностью. Площадь, попадающая в зону закисления атмосферных

осадков, покрывает все пространство Северного Таймыра к западу от оз. Таймыр до берегов Пясинского залива [13]. Особенно сильно деятельность ГМК «Норильский никель» сказалась на экологии оз. Пясино, принимающего часть сточных вод горно-металлургического производства. Вследствие значительного загрязнения, уже не одно десятилетие поступающего в водоем, озеро приобрело дистрофный статус [14], почти полностью лишилось рыбы, оставшиеся же особи характеризуются аномалиями и уродствами внутренних органов.

Особого масштаба география загрязнения поверхностных вод Арктической зоны достигла на рубеже XX–XXI вв., когда было развернуто активное освоение нефтегазовых месторождений Сибири (Западно-Сибирская нефтегазоносная провинция) и европейского северо-востока (Тимано-Печорская нефтегазоносная провинция). Интенсивное развитие нефтегазовых промыслов обусловило создание в регионах их добычи развитой инфраструктуры и резкое увеличение антропогенной нагрузки на экосистемы, в том числе лимнические. Среди загрязняющих веществ, связанных с нефте- и газодобычей, наиболее жесткое влияние на экологическое состояние водных объектов оказывают тяжелые металлы и нефтепродукты. Повышенные концентрации нефтепродуктов наблюдаются не только вблизи источников их поступления, но и на значительном расстоянии от них, так как, в силу своей гидрофобности, они разносятся с речным стоком на дальние расстояния, вызывая загрязнение всей водной системы, включая озера. Загрязнение еще более усиливается из-за неудовлетворительного технического состояния трубопроводов нефтедобывающих предприятий. Только в Республике Коми, согласно данным [15], в 2013 г. было официально зарегистрировано 14 случаев (в 2012 г. — 7 случаев) аварийных разливов нефти и нефтепродуктов общим объемом 79,1 м³.

Проведенное в 1990-е гг. сотрудниками ИНОЗ РАН на озерах Большеземельской тундры исследование антропогенных преобразований в водных объектах, связанных с проведением буровых работ, позволило выявить формирование в регионе специфических техногенных ландшафтов [16]. Мелководные озера техногенных территорий в наибольшей степени реагируют на антропогенное воздействие, которое затрагивает их функциональные особенности, что отрицательно сказывается на жизнеспособности обитающих в них организмов. Наличие существенного загрязнения озерных вод было выявлено и сотрудниками ИППЭС КНЦ РАН, изучавшими экологическое состояние озер в бассейне р. Печоры в 2000–2003 гг. в рамках международного проекта «Устойчивое развитие Печорского региона в изменяющихся условиях природы и общества». На ряде озер исследования проходили повторно, спустя несколько десятилетий после 1960-х гг., когда гидрохимический режим водоемов полностью определялся природными факторами. В рамках работ выяснилось, что содержание Fe, Cu, Mn, Al и нефтепродуктов в воде практически всех водоемов превышало значения предельно допустимых концентраций для воды водоемов рыбохозяйственного назначения. Ряд загрязнителей, и прежде всего обнаруженные нефтепродукты (110–170 мкг/л), был связан исключительно с развитием нефтегазовой индустрии в регионе [17].

Активное развитие в арктических регионах нефте- и газодобычи приводит также и к аэротехногенному загрязнению водоемов. Его причиной являются растущие в регионе крупные центры хозяйственного освоения. Исследования, проведенные на водоемах севера Западной Сибири, показывают снижение pH [18], связанное

с глобальным и локальным атмосферными переносами. Опасность закисления озер заключается не только в его негативном воздействии на водные организмы, оно приводит к изменениям геохимических циклов элементов, увеличивая концентрацию и токсичность тяжелых металлов [19]. Работы, проведенные на 11 водоемах Надым-Пурского междуречья Е.В. Агбалян и др. [20] с целью выявления экологических изменений, происходящих в водных экосистемах ЯНАО, не подверженных прямому антропогенному воздействию, показали, что воды 18 % обследованных малых озер имеют признаки антропогенного закисления, выражающиеся в низких значениях pH и цветности при преобладании сульфатов в анионном составе. Во всех обследованных озерах были выявлены повышенные концентрации свинца, представляющие высокую экологическую опасность для окружающей среды. Кроме того, для 40 % обследованных озер Надым-Пурского междуречья отмечалось чрезмерное обогащение вод фосфором и азотом.

Ухудшение экологического состояния арктических озер связано и с возросшим загрязнением речных вод. Согласно данным [12] наиболее высоким уровнем загрязненности («грязная» — «очень грязная» — «экстремально грязная») в пределах Ямало-Ненецкого АО характеризуются воды рек Надым, Пур, Таз. Как «грязные» — «очень грязные» характеризуются воды рек Роста (Мурманская область), Онега и Мезень (Архангельская область), Печора (Ненецкий автономный округ). Значительно загрязнены малые реки Кольского п-ова — Колос-йоки, Хаука-лампи-йоки, Нюдуай. В последние годы наблюдается снижение качества воды дельты р. Лены, воды нижнего течения которой в придонном слое характеризуются как «загрязненные», а в поверхностном — «слабо загрязненные». По содержанию нефтепродуктов значительно загрязнены воды низовьев рек, протекающих по основным регионам нефтегазопромыслов, — Оби (в 2016 году поступление нефтепродуктов с водосбора в замыкающем створе составило 6,41 тыс. т), Печоры (6,17 тыс. т) и Северной Двины (2,83 тыс. т) [12].

Северные озерные экосистемы в силу своей упрощенности характеризуются меньшей устойчивостью к загрязнениям, чем водоемы таежной зоны. Их реакция на антропогенное воздействие резко проявляется уже на этапе разведывательных работ. Использование гусеничного транспорта сопровождается широкомасштабными нарушениями почв и растительности водосборов, вызывает развитие гидротермокарстовых, водно-эрозионных и дефляционных процессов, усиливающих вынос различных химических элементов, в том числе обогащающих озерные воды органическим веществом. В результате большинство северных озер, расположенных в регионах разведки новых месторождений, уже сегодня начинают испытывать значительный антропогенный пресс.

В настоящее время география промышленного производства в северных регионах продолжает расширяться. Наряду с уже протянутыми нефте- и газопроводами идет активная разведка новых месторождений на п-ове Ямал. Разведаны Лено-Тунгусская нефтегазоносная и Лено-Вилуйская газонефтеносная провинции. Предполагается расширение геологоразведочных работ на платиноиды и никель на п-ове Таймыр, проведение широкого комплекса геологоразведочных работ по оценке золотоносности на островах Северной Земли, в прибрежной части Таймыра, на полуострове Челюскин.

В целом, по мере усиления антропогенного пресса, следует ожидать значительное химическое и механическое загрязнение крайне чувствительных арктических

экосистем с соответствующими последствиями для биоты, в том числе уникальной. При этом обращает на себя внимание слабая изученность большинства озер Арктической зоны, прежде всего регионов активного современного освоения, таких как арктические острова, север Западной и Центральной Сибири.

ЭТИОЛОГИЯ ЗАБОЛЕВАНИЙ НА ТЕРРИТОРИЯХ АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ РОССИИ

Широко известно, что водные среды Севера характеризуются повышенным содержанием гумуса, накопившегося за многие миллионы лет эволюции планеты. Эти вещества при повышении температуры окружающей среды становятся источником активного размножения микроорганизмов и образования метана, одного из основных парниковых газов. При этом в свете рассматриваемой проблемы исключительное значение имеют данные экспериментальных исследований северных вод, в результате которых были установлены следующие закономерности сродства металлов к гумусовым веществам: $Fe > Cu > Pb > Al > Co > Ni > Cd > Zn > Cr > Mg > Sr > Ca > Mn$ [21]. В этой связи при оценке качества воды источников питьевого водоснабжения на северных территориях России пристальное внимание в первую очередь следует обращать на динамику золь-гель процессов образования наноразмерных частиц Fe, Cu, Pb и Al с гумусовыми веществами. Известно, что избыток железа провоцирует онкологические заболевания (ферроптоз), болезни крови, печени, кожи и подкожной клетчатки у человека [22]. Было также детально изучено биологическое действие наночастиц железа размером 20–40 нм, установлено их токсическое действие при попадании в желудочно-кишечный тракт, проявляющееся в изменении показателей углеводного, липидного и белкового обмена [23]. Сильными токсическими свойствами обладают наночастицы алюминия размером 30–103 нм, которые способны подавлять синтез мРНК, вызывать пролиферацию клеток, индуцировать проатерогенное воспаление и нарушение функций митохондрий [24]. Результаты зарубежных изысканий подтверждают значение наночастиц Fe, Al и других металлов, включая Pb, Ag, Co и Zr, в этиологии онкологических заболеваний человека [25–27]. С высокой долей вероятности золь-гель процессы в водных объектах Севера России могут быть важной причиной роста онкологических патологий, аналогично медико-экологической обстановке на территориях водосбора Ладоги [28].

Вместе с тем в соответствии с руководящими документами Российской Федерации (ГН 2.1.5.1315-03; СанПиН 2.1.4.1074-01) предельно допустимые концентрации вредных веществ в воде имеют достаточно высокие значения и не учитывают постоянное (хроническое) воздействие малых и сверхмалых концентраций этих соединений на человека на территориях Крайнего Севера. Более того, нормативы ПДК до сих пор устанавливаются в стационарных лабораториях без учета того, что в природных экосистемах нет изолированного действия множества факторов.

В этой связи, исследуя соответствующие медико-экологические закономерности, нельзя не обратить внимания на тот факт, что в полярных широтах происходит быстрый перенос на большие расстояния аэрозолей из частиц (до 400 нм) вредных органических соединений (полиароматических углеводородов) и тяжелых металлов (Ni, Co, Zn, Se, As и Sb) [29, 30]. Не вызывает сомнений, что с течением времени происходит их седиментация на поверхность воды, снега, льда и почвы с последующей трансформацией в условиях низких температур и образованием веществ неизвестной молекулярной структуры и биологической активности. При

этом отмечается, что развитие экологически зависимых заболеваний индуцируется пролонгированным воздействием какого-либо фактора и действием на очень малом, подпороговом (субпороговом) уровне [3]. В частности, в лабораторных условиях было детально исследовано резкое повышение биологической активности химических соединений в результате воздействия электромагнитного поля на водные растворы веществ в малых и сверхмалых дозах за счет образования наноассоциатов размером до 400 нм [31].

Закономерно, что в ИНОЗ РАН среди причин заболеваемости населения на территориях Севера был рассмотрен сложный комплекс механических, физических, химических, биологических и генетических факторов [32]. Показатели динамики заболеваемости населения, проживающего в пределах субъектов РФ, включенных в Арктическую зону России в течение 2000–2016 гг., и число наиболее опасных патологий у взрослых и детей до 14 лет в 2012 и 2016 гг. суммированы в таблицах 1 и 2. Таблицы составлены на основании публикаций сборников «Здравоохранение в России», информация в которых приведена по данным Федеральной службы государственной статистики [33, 34]. Приведены данные по количеству зарегистрированных заболеваний у пациентов с диагнозом, установленным впервые в жизни, на 1000 человек населения. Для сравнения, наряду с регионами, входящими в Арктическую зону, также приведены сведения для Российской Федерации в целом, Москвы и Санкт-Петербурга.

Из анализа данных табл. 1 следует, что во всех субъектах РФ, полностью или частично включенных в Арктическую зону, заболеваемость населения выше средней по стране и чем в Москве. Наибольшую озабоченность вызывает состояние здоровья людей, проживающих и работающих в Ненецком, Ямало-Ненецком и Чукотском автономных округах, в Республиках Коми, Саха (Якутия) и Карелия, а также в Архангельской области. Чуть лучшая статистика наблюдается лишь в Мурманской области и Красноярском крае. Однако необходимо иметь в виду, что статистические данные публикуются по всему Красноярскому краю в целом, так что они могут не отражать специфику ситуации, складывающейся в его северной части, где основное население проживает вблизи ГМК «Норильский никель».

Таблица 1

**Динамика заболеваемости населения районов,
отнесенных к Арктической зоне России**

Субъект статистики	2000	2005	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Российская Федерация	731	744	780	797	794	799	787	778	785
Москва	727	680	697	715	699	684	662	631	645
Санкт-Петербург	694	725	857	879	884	877	878	932	1010
Мурманская область	870	799	892	851	853	897	850	836	876
Республика Карелия	1002	1027	1079	1101	1076	1115	1114	1114	1126
Архангельская область	915	927	1049	1061	1067	1029	1007	1031	1016
Республика Коми	1092	960	1035	1047	1054	1047	1055	1072	1121
Ненецкий АО	1296	1632	1813	1750	1752	1573	1437	1422	1381
Ямало-Ненецкий АО	1096	1178	1152	1181	1122	1192	1132	1097	1180
Красноярский край	671	761	813	831	826	808	805	785	783
Республика Саха (Якутия)	774	882	1023	1047	1067	1107	1098	1027	1044
Чукотский АО	1041	1189	1214	1247	1173	1123	1025	1076	1289

**Опасные заболевания в 2012 и 2016 гг. взрослых / и детей до 14 лет,
проживающих в районах, отнесенных к Арктической зоне России**

Субъект статистики	Год	Онкология	Болезни сосудистой системы	Болезни эндокринной системы	Инфекционные и паразитарные болезни
Российская Федерация	2012	11,6 / 4,8	4,7 / 16,2	10,6 / 16,8	32,1 / 82,4
	2016	11,4 / 4,7	4,7 / 13,6	13,9 / 15,5	27,9 / 71,0
Москва	2012	12,5 / 6,7	0,7 / 3,8	7,8 / 18,9	24,6 / 68,1
	2016	10,3 / 7,0	0,9 / 3,6	8,1 / 14,3	21,2 / 54,3
Санкт-Петербург	2012	13,8 / 8,9	1,6 / 6,2	10,8 / 21,5	42,5 / 135,1
	2016	15,7 / 10,1	2,3 / 5,5	18,1 / 17,5	39,2 / 110,3
Мурманская область	2012	14,5 / 8,3	3,1 / 9,2	14,6 / 39,3	32,4 / 93,4
	2016	15,3 / 9,4	3,0 / 7,8	17,8 / 33,4	36,6 / 98,0
Республика Карелия	2012	16,1 / 8,3	3,9 / 11,5	17,6 / 29,5	47,2 / 128,2
	2016	14,4 / 8,2	3,8 / 10,3	17,0 / 23,0	42,2 / 128,4
Архангельская область	2012	12,8 / 11,0	5,4 / 18,4	14,0 / 19,9	41,4 / 138,5
	2016	11,4 / 9,4	4,8 / 15,4	13,6 / 21,8	40,2 / 129,9
Республика Коми	2012	12,2 / 8,8	6,2 / 23,7	14,4 / 21,2	51,3 / 129,0
	2016	15,9 / 7,3	6,1 / 12,0	18,7 / 36,5	45,7 / 143,8
Ненецкий АО	2012	29,9 / 12,9	11,1 / 23,4	44,8 / 54,8	102,2 / 228,8
	2016	15,0 /	8,9 /	30,7 /	55,6 /
Ямало-Ненецкий АО	2012	16,0 / 6,0	7,9 / 20,4	16,2 / 15,6	44,7 / 104,0
	2016	16,1 / 6,9	10,2 / 27,2	19,3 / 19,4	37,2 / 86,2
Красноярский край	2012	14,8 / 6,8	4,1 / 10,3	12,1 / 22,6	36,1 / 88,9
	2016	15,9 / 7,2	3,9 / 9,6	13,8 / 19,2	30,1 / 67,7
Республика Саха (Якутия)	2012	11,9 / 8,4	5,3 / 10,9	14,7 / 11,8	27,9 / 66,0
	2016	10,4 / 6,9	4,3 / 8,1	9,2 / 6,8	28,2 / 66,3
Чукотский АО	2012	17,8 / 13,9	4,6 / 11,0	19,5 / 15,4	27,8 / 66,7
	2016	14,3 / 8,0	9,5 / 22,7	12,9 / 4,5	33,4 / 86,7

Хочется обратить внимание на данные табл. 2, касающиеся болезней сосудистой системы, которые, по нашему мнению, напрямую связаны с питьевой водой. Известна связь некоторых патологических состояний человека с употреблением «мягкой» и «жесткой» питьевой воды [2]. В случае «мягкой» воды и низкой концентрации карбонатов и гидрокарбонатов кальция и магния происходит инициация сосудистых патологий, а при «жесткой» воде с повышенным содержанием названных соединений имеет место прогрессирование заболеваний желудочно-кишечного тракта. Дети более чувствительны к качеству питьевой воды, поэтому доля заболеваний сосудистой системы у них выше, чем у взрослых. Для снижения уровня этих заболеваний в советское время в регионах с «мягкой» водой существовала оправдавшее себя практика выдачи молока в детских и учебных заведениях. По-видимому, к этой практике стоит вернуться и в наше время.

В результате наблюдающегося потепления и вызванного этим таяния ледников Севера происходит элиминирование из льда патогенных микроорганизмов, которые до этого находились в состоянии анабиоза много веков. Удивительным примером этого процесса является обнаружение в 2014 г. в вечных льдах Сибири

вируса *Pithovirus sibericum*, который покоился в холоде нетронутым ~30 тыс. лет [35]. Вирионы *Pithovirus* достигают около 1,5 мкм в длину и 0,5 мкм в диаметре, что в полтора раза больше открытого в 2013 г. вируса *Pandoravirus* ($1,0 \times 0,5$ мкм), считавшегося до этого самым крупным из известных вирусов. После длительного анабиоза гигантский вирус *Pithovirus sibericum* все еще активен и способен поражать даже клетки амёб [35]. В дополнение к этому напомним, что совсем недавно, в августе 2016 г. в России была зафиксирована неожиданная вспышка сибирской язвы, которая, по данным СМИ, стала причиной смерти 12-летнего мальчика и госпитализации 72 односельчан-сибиряков. Эта эпидемия напрямую связана с заражением местных грунтовых вод трупными останками оттаявших оленей, умерших от опасной инфекции.

Таким образом, как следует из кратко представленных выше данных, целесообразно обратить пристальное внимание на содержание патогенных микроорганизмов и наноассоциатов размером до 400 нм в воде хозяйственно-бытового назначения на Севере России.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Арктическая зона РФ включает важнейшие регионы современного и перспективного промышленного освоения. В ее пределах расположено огромное количество водных объектов, в большинстве своем малых размеров, слабая изученность которых не позволяет принимать необходимые упреждающие меры по их охране и рациональному использованию. Уязвимость таких объектов к загрязнению усиливается как в силу особенностей их морфометрии, так и в силу упрощенности биологических сообществ северных экосистем, характеризующихся пониженной степенью устойчивости. В силу особой чувствительности северных водоемов к антропогенным нагрузкам, реализация существующих планов промышленного развития Арктики может привести к катастрофическим последствиям для водных экосистем, оказавшихся в непосредственной близости к зонам освоения. Это отразится на снижении биоразнообразия водных экосистем, обеднении рыбных запасов и на заметном ухудшении параметров качества жизни проживающего здесь населения. В связи с этим следует обратить внимание на расширение работ по комплексному изучению лимнологии водоемов, входящих в озерный фонд Арктической зоны РФ.

Заболеваемость населения арктических регионов России сегодня существенно выше, чем в среднем по стране. Дальнейшее освоение территории и наблюдающееся потепление климата приведут к возрастающему загрязнению пресноводных водоемов токсическими веществами, патогенными микроорганизмами и вирусами. Это обострит вопрос обеспечения экологической безопасности и удовлетворения потребностей населения в качественной питьевой воде. Ситуация усугубляется еще и тем, что наиболее доступные технологии водоподготовки и очистки сточных вод в условиях пониженных температур и высокого содержания в исходной воде гумусовых веществ не могут обеспечить должного уровня обеззараживания. В связи с этим одним из первоочередных становится вопрос создания инновационных технологий очистки вод, более адекватных условиям Арктической зоны России.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания ИНОЗ РАН по темам № 0154-2014-0005 «Пространственная структура озерных и речных водных ресурсов России и ее изменение во времени» и № 0154-2014-0001 «Разра-

ботка физических и химико-биологических методов регулирования цветения воды в пресноводных водоемах» (№ гос. регистрации: № 01201363378).

Acknowledgments. This work was carried out within the framework of the state task of Institute of Limnology RAS on topics No. 0154-2014-0005 “Spatial structure of lake and river water resources in Russia and its change over time” and No. 0154-2014-0001 “Development of physical and chemical-biological methods for regulating water flow in freshwater bodies” (State Registration Number: No. 01201363378).

ЛИТЕРАТУРА

1. Солонин Ю.Г., Бойко Е.Р. Медико-физиологические аспекты жизнедеятельности в Арктике // Арктика: экология и экономика. 2015. № 1 (17). С. 70–75.
2. Эльпинер Л.И. Влияние водного фактора на формирование здоровья человека // Вода: химия и экология. 2009. № 3. С. 6–10.
3. Лошадкин Н.А., Голденков В.А., Дикий В.В., Пушкин И.А., Дружинин А.А., Рембовский В.Р., Дарьина Л.В., Хохоев Т.А. Случаи массовых заболеваний «неясной этиологии». Роль малых доз физиологически активных веществ // Российский химический журнал. 2002. Т. 56. № 6. С. 46–57.
4. Бурлакова Е.Б., Конрадов А.А., Е.Л. Мальцева Е.Л. Действие сверхмалых доз биологически активных веществ и низкоинтенсивных физических факторов // Химическая физика. 2003. Т. 22. № 2. С. 21–40.
5. Коновалов А.И. Образование наноразмерных молекулярных ансамблей в высоко-разбавленных водных растворах // Вестник Российской академии наук. 2013. Т. 83. № 12. С. 1076–1082.
6. Измайлова А.В. Водные ресурсы озер Российской Федерации // География и природные ресурсы. 2016. № 4. С. 5–14.
7. Сакс В.Н. Некоторые спорные вопросы истории четвертичного периода в Сибири // Тр. НИИГА. 1959. Т. 96. Вып. 8. С. 151–163.
8. Румянцев В.А., Драбкова В.Г., Измайлова А.В. Озера европейской части России. СПб.: Изд-во Лема, 2015. 392 с.
9. Никонов В.В., Моисеенко Т.И., Лукина Н.В. Структура и функции наземных и водных экосистем Севера в условиях антропогенного воздействия. Апатиты: Изд-во Кольского НЦ АН СССР, 1990. 130 с.

REFERENCES

1. Solonin YU.G., Bojko E.R. Medical-physiological aspects of life in the Arctic. *Arktika: ehkologiya i ehkonomika*. Arctic: ecology and economy. 2015, 1 (17): 70–75. [In Russian].
2. El'piner L.I. The influence of the water factor on the formation of human health. *Voda: khimiia i ekologiya*. Water: chemistry and ecology. 2009, 3: 6–10. [In Russian].
3. Loshadkin N.A., Goldenkov V.A., Dikij V.V., Pushkin I.A., Druzhinin A.A., Rembovskij V.R., Dar'ina L.V., KHokhoviev T.A. Cases of mass diseases “of unknown etiology”. The role of low doses of physiologically active substances. *Rossiiskij khimicheskij zhurnal*. Russian chemical journal. 2002, 56 (6): 46–57. [In Russian].
4. Burlakova E.B., Konradov A.A., Mal'tseva E.L. The Effect of ultra-low doses of biologically active substances and low intensity physical factors. *Khimicheskaya fizika*. Chemical physics. 2003, 22 (2): 21–40. [In Russian].
5. Konovalov A.I. The Formation of nanorazmernyh molecular ensembles in vysokorazvityh water solutions. *Vestnik Rossijskoj akademii nauk*. Bulletin of the Russian Academy of Sciences. 2013, 83 (12): 1076–1082. [In Russian].
6. Izmailova A.V. Water resources of the lakes of the Russia. *Geografiia i prirodnye resursy*. Geography and Natural Resources. 2016, 4: 281–289. [In Russian].
7. Saks V.N. Some controversial issues of the history of the Quaternary period in Siberia. *Tr. NIIGA*. Proc. NIIGA. 1959, 96 (8): 151–163. [In Russian].
8. Rumyantsev V.A., Drabkova V.G., Izmailova A.V. *Ozera evropeiskoi chasti Rossii*. Lake of the European part of Russia. St. Petersburg: Publishing house Lema, 2015: 392 p. [In Russian].
9. Nikonov V.V., Moiseenko T.I., Lukina N.V. Structure and functions of terrestrial and aquatic ecosystems of the North in conditions of anthropogenic impact. Apatity: Publishing house

10. Моисеенко Т.И., Яковлев В.А. Антропогенные преобразования водных экосистем Кольского Севера. Л.: Наука, 1990. 221 с.
11. Кашулин Н.А., Денисов Д.Б., Валькова С.А., Вандыш О.И., Терентьев П.М. Современные тенденции изменений пресноводных экосистем Евро-Арктического региона // Тр. Кольского НЦ РАН. Прикладная экология севера. Апатиты, 2012. № 1. С. 6–54.
12. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2016 году». М.: Минприроды России; НИА-Природа, 2017. 760 с.
13. Сыроечковский Е.Е., Рогачева Э.В., Сыроечковский-мл. Е.Е., Куваев В.Б., Лаппо Е.Г., Романенко Ф.А., Хрулева О.А., Чернов Ю.И., Чупров В.Л., Чупрова И.Л. Большой Арктический заповедник // Заповедники России. Заповедники Сибири. II. М.: Логата, 2000. С. 56–81.
14. Румянцев В.А., Драбкова В.Г., Измайлова А.В. Великие озера мира. СПб.: Изд-во Лема, 2012. 372 с.
15. Государственный доклад «О состоянии окружающей среды Республики Коми в 2013 году» / Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Коми, ГБУ РК «ТФИ РК». Сыктывкар, 2014. 199 с.
16. Особенности структуры экосистем озер Крайнего Севера (На примере озер Большеземельской тундры) / Отв. ред. В.Г. Драбкова, И.С. Трифонова. СПб.: Наука, 1994. 260 с.
17. Даувальтер В.А., Хлопцева Е.В. Гидрологические и гидрохимические особенности озер Большеземельской тундры // Вестн. МГТУ. 2008. Т. 11. № 3. С. 407–414.
18. Ермилов О.М., Грива Г.И., Москвин В.И. Воздействие объектов газовой промышленности на северные экосистемы и экологическая стабильность геотехнических комплексов в криолитозоне. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002. 148 с.
19. Моисеенко Т.И., Гашкина Н.А. Формирование химического состава вод озер в условиях изменения окружающей среды. М.: Наука, 2010. 268 с.
20. Азбалин Е.В., Хорошавин В.Ю., Шинкаур Е.В. Оценка устойчивости озерных экосистем Ямало-Ненецкого автономного округа к кислотным выпадениям // Вестник Тюменского
- of the Kola Science Center of the USSR Academy of Sciences, 1990: 130 p. [In Russian].
10. Moiseenko T.I., Yakovlev V.A. Anthropogenic transformations of the aquatic ecosystems of the Kola North. Leningrad: Nauka, 1990: 221 p. [In Russian].
11. Kashulin N.A., Denisov D.B., Valkova S.A., Vandysh O.I., Terentiev P.M. Modern trends in changes in freshwater ecosystems in the Euro-Arctic region. Tr. Kolskogo NC RAN. Prikladnaya ekologiya severa. Proc. Kola Scientific Center of RAS. Applied ecology of the North. Apatity: 2012, 1: 6–54. [In Russian].
12. State report “The status and environment of the Russian Federation in 2016”. M.: Minprirody Rossii; NIAPriroda. Moscow: Russian Ministry Of Natural Resources; NIA-Priroda, 2017: 760 p. [In Russian].
13. Syroechkovskiy E.E., Rogacheva E.V., Syroechkovski, Jr, E.E., Kuvaev, V.B., Lappo E.G., Romanenko F.A., Khruleva O.A., Chernov Y.I., Chuprova V.L. Great Arctic nature reserve. Zapovedniki Rossii. Zapovedniki Sibiri. M.: Logata. II. Moscow: Logata. 2000: 56–81. [In Russian].
14. Rumyantsev V.A., Drabkova V.G., Izmailov A.V. Great lakes of the world. SPb.: Izd-vo Lema, 2012. St. Petersburg: Publishing house Lema, 2012: 372 p. [In Russian].
15. State report “The status and environment of the Komi Republic in 2013”. Ministerstvo prirodnih resursov i ohrany okruzhayushchei sredy Respubliki Komi; GBU RK “TFI RK”. Syktyvkar, 2014: 199 p. [In Russian].
16. Features of ecosystem structure of lakes of the far North (On the example of lakes Bolshezemelskaya tundra) / Ed. edited by V.G. Drabkova, I.S. Trifonova. SPb.: Nauka, 1994. St. Petersburg: Science, 1994: 260 p. [In Russian].
17. Dauvalter V.A., Hloptseva E.V. Hydrological and hydrochemical features of the lakes Bolshezemelskaya tundra. Vestn. MGTU. Vestn. MSTU, 2008, 11(3): 407–414. [In Russian].
18. Ermilov O.M., Griva G.I., Moskvina V.I. The impact of the gas industry in Northern ecosystems and the ecological stability of geotechnical systems in cryolithozone. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN. Novosibirsk: Publishing house SO RAS, 2002: 148 p. [In Russian].
19. Moiseenko T.I., Gashkina N.A. Formation of the chemical composition of lake waters under conditions of environmental change. M.: Nauka. Moscow: Science, 2010: 268 p. [In Russian].

- го гос. ун-та. Экология и природопользование. 2015. Т. 1. № 1 (1). С. 45–54.
21. Дину М.И. Взаимодействие ионов металлов в водах с гумусовыми веществами глееподзолистых почв // Геохимия. 2015. № 3. С. 276–288.
22. Иванов С.Д. Железо и рак: роль ионов железа в процессе канцерогенеза и при лучевой терапии опухоленосителей // Успехи современной биологии. 2013. № 5. С. 481–494.
23. Бородулин В.Б., Горошинская И.А., Качесова П.С., Бабушкина И.В., Положенцев О.Е., Дурнова Н.А., Василиадис Р.А., Лосев О.Э., Чесовских Ю.С., Чеботарева Е.Г. Изучение биологического действия наночастиц железа // Российские нанотехнологии. 2015. № 3–4. С. 86–93.
24. Song H.M. Elastomeric nanoparticle composites covalently bound to Al₂O₃/GaAs surfaces // Langmuir. 2007. № 23. P. 9472–9480.
25. Donaldson K. Nanotoxicology // Occupational Environmental Medicine. 2004. Vol. 61. P. 727–728.
26. Gatti A.M., Rivasi F. Biocompatibility of micro- and nanoparticles Part 1 in liver and kidney // Biomaterials. 2002. Vol. 23 (11). P. 2381–2387.
27. Gatti A.M. Risk assessment of micro and nanoparticles and the human health // Chapter of Handbook of Nanostructured biomaterials and their applications ed American Scientific Publisher USA. 2005. No. 12. P. 347–369.
28. Румянцев В.А., Поздняков Ш.Р., Крюков Л.Н. Влияние золь-гель процессов в бассейне Ладоги на медико-экологическую обстановку на территориях водосбора озера // Вестник Российской академии наук. 2016. Т. 86. № 1. С. 43–47.
29. Шевченко В.П., Виноградова А.А., Иванов Г.И., Серова В.В. Состав морского аэрозоля в западной части Северного Ледовитого океана // Известия АН. Физика атмосферы и океана. 1998. Т. 34. № 5. С. 664–668.
30. Немировская И.А. Содержание и состав органических соединений в отделяющих озерах в Антарктиде и Арктике // Проблемы Арктики и Антарктики. 2017. № 4 (114). С. 76–85.
20. Aghbalyan E.V., Khoroshavin V.Yu., Sincar E.V. Assessment of the sustainability of lake ecosystems of the Yamal-Nenets Autonomous region to acid deposition. *Vestnik Tyumenskogo gos. un-ta. Ehkologiya i prirodopol'zovanie*. Bulletin of the Tyumen state University. Ecology and natural resource management. 2015, 1 (1): 45–54. [In Russian].
21. Dinu M.I. The Interaction of metal ions in waters with humic substances of soils leipojarvi. *Geohimiya. Geochemistry*. 2015, 3: 276–288. [In Russian].
22. Ivanov S.D. Iron and cancer: role of iron ions in the process of carcinogenesis and in radiation therapy of tumours. *Uspekhi sovremennoj biologii*. Successes of modern biology. 2013, 5: 481–494. [In Russian].
23. Borodulin V.B., Goroshinskaya I.A., Kachesova P.S., Babushkina I.V., Polozhencev O.E., Durnova N.A., Vasiliadis R.A., Losev O.E., Chesovskikh YU.S., Chebotareva E.G. Study of the biological action of iron nanoparticles. *Rossiiskie nanotekhnologii*. Russian nanotechnology. 2015, 3–4: 86–93. [In Russian].
24. Song H.M. Elastomeric nanoparticle composites covalently bound to Al₂O₃/GaAs surfaces. *Langmuir*. 2007, 23: 9472–9480.
25. Donaldson K. Nanotoxicology. *Occupational Environmental Medicine*. 2004, 61: 727–728.
26. Gatti A.M., Rivasi F. Biocompatibility of micro- and nanoparticles Part 1 in liver and kidney. *Biomaterials*. 2002, 23 (11): 2381–2387.
27. Gatti A.M. Risk assessment of micro and nanoparticles and the human health. Chapter of Handbook of Nanostructured biomaterials and their applications ed American Scientific Publisher USA. 2005, 12: 347–369.
28. Rumyantsev V.A., Pozdnyakov S.R., Kryukov L.N. The influence of Sol-gel processes in the basin of Ladoga on medical-environmental situation in the catchment areas of lakes. *Vestnik Rossiiskoi akademii nauk*. Herald of the Russian Academy of Sciences. 2016, 86 (1): 43–47. [In Russian].
29. Shevchenko V.P., Vinogradova A.A., Ivanov G.I., Serova V.V. Composition of marine aerosol in the Western part of the Arctic ocean. *Izvestiya AN. Fizika atmosfery i okeana*. Proceedings of the Academy of Sciences. Physics of atmosphere and ocean. 1998, 34 (5): 664–668. [In Russian].
30. Nemirovskaya I.A. Content and composition of organic compounds in the separating lakes in Antarctica and the Arctic. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Problems of Arctic and Antarctic. 2017, 4 (114): 76–85. [In Russian].

31. Коновалов А.И., Мальцева Е.Л., Рыжкина И.С., Муртазина Л.И., Киселева Ю.И., Каспаров В.В., Пальмина Н.П. Образование наноассоциатов — фактор, определяющий физико-химические и биологические свойства высокоразбавленных водных растворов // Доклады Академии наук. 2014. Т. 456. № 5. С. 561–564.
32. Стожаров А.Н. Медицинская экология. Минск: Высш. шк., 2007. 368 с.
33. Здравоохранение в России: Статистический сборник. М.: Росстат, 2013. 380 с. Табл. 2.22, 2.23, 2.25, 2.59, 2.66.
34. Здравоохранение в России: Статистический сборник. М.: Росстат, 2017. URL: http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/rosstat/ru/statistics/publications/catalog/doc_1139919134734 (дата обращения 30.01.2018).
35. Kou Z., Li T. Pithovirus: a new giant DNA virus found from more than 30,000-year-old sample // Virologica Sinica. 2014. Vol. 29. No. 2. P. 71–73.
31. Konovalov A.I., Mal'tseva E.L., Ryzhkina I.S., Murtazina L.I., Kiseleva YU.I., Kasparov V.V., Pal'mina N.P. The education of nonassociative factor that determines the physico-chemical and biological properties vysokorazvityh aqueous solutions. *Doklady Akademii nauk*. Reports of Academy of Sciences. 2014, 456 (5): 561–564. [In Russian].
32. Stozharov A.N. Medical ecology. Minsk: Vyssh. shk. Minsk: Vysshiaia shkola, 2007: 368 p. [In Russian].
33. *Zdravoohranenie v Rossii*. Health care in Russia. Moscow: Federal service of state statistics (Rosstat), 2013: 380 p. 2.22, 2.23, 2.25, 2.59, 2.66 tabl. [In Russian].
34. *Zdravoohranenie v Rossii*. Health care in Russia. M.: Federal'naya sluzhba gosudarstvennoy statistiki (Rosstat). Federal service of state statistics (Rosstat). URL: http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/rosstat/ru/statistics/publications/catalog/doc_1139919134734. (accessed 30.01.2018)
35. Kou Z., Li T. Pithovirus: a new giant DNA virus found from more than 30,000-year-old sample. *Virologica Sinica*. 2014, 29 (2): 71–73.

УДК 556.5

DOI: 10.30758/0555-2648-2018-64-1-101-118

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ И СОПРЕДЕЛЬНЫХ ТЕРРИТОРИЯХ РАСПРОСТРАНЕНИЯ МНОГОЛЕТНЕЙ МЕРЗЛОТЫ

О.М. МАКАРЬЕВА^{1,2,3,4}, Н.В. НЕСТЕРОВА^{3,4}, И.Н. БЕЛЬДИМАН¹,
Л.С. ЛЕБЕДЕВА²*

¹ — ООО НПО «Гидротехпроект», Санкт-Петербург, Россия

² — Институт мерзлотоведения им. М.П. Мельникова СО РАН, Якутск, Россия

³ — Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

⁴ — ФБГУ «Государственный гидрологический институт», Санкт-Петербург, Россия

**omakarieva@gmail.com*

ACTUAL PROBLEMS OF HYDROLOGICAL ASSESSMENTS IN THE ARCTIC ZONE OF RUSSIAN FEDERATION AND CONTIGUOUS PERMAFROST-AFFECTED TERRITORIES

O.M. MAKARIEVA^{1,2,3,4}, N.V. NESTEROVA^{3,4}, I.N. BELDIMAN¹,
L.S. LEBEDEVA²*

¹ — Ltd «Gidrotehproekt», St. Petersburg, Russia

² — Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, Russia

³ — St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

⁴ — State Hydrological Institute, St. Petersburg, Russia

**omakarieva@gmail.com*

Received April, 06, 2018

Accepted April, 20, 2018

Keywords: Arctic zone, floods, hydrological engineering, hydrological safety, mathematical modeling, permafrost, SP-33-101-2003.

Summary

The article reveals the main problems facing hydrologists in engineering design in the Arctic zone of Russia and adjacent territories of permafrost. Climate warming and degradation of permafrost cause a significant transformation of the hydrological cycle. The retrospective observations of runoff cannot be considered therefore in modern conditions. The density of the hydrological network in the permafrost zone of Russia has decreased by more than 1.5 times, and on small rivers – more than three

Citation: O.M. Makarieva, N.V. Nesterova, I.N. Beldiman, L.S. Lebedeva. Actual Problems of Hydrological Assessments in the Arctic Zone of Russian Federation and Adjacent Permafrost Territories. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2018, 64 (1): 101–118. [In Russian]. doi:10.30758/0555-2648-2018-64-1-101-118

times in recent decades. Thus, the use of standard calculation methods (SP 33-101-2003) to assess the runoff characteristics in the Arctic regions is practically impossible. It is shown that in the developed Arctic countries where the size of the territories and their inaccessibility could be compared with Russia, the low density of the standard observation network is compensated by the organization of small scientific research stations for studying hydrological processes in various physical and geographical conditions and the development of mathematical modeling methods. It is shown that historically Russia was the leader of hydrological research in cold regions. It is stated that there is an urgent need to create a state program aimed at restoring the previously operating in the cryolithozone and organizing new research hydrological watersheds, improving the standard hydrological network, and developing complex modeling systems and methods for their parameterization.

Поступила 06 апреля 2018 г.

Принята к печати 20 апреля 2018 г.

Ключевые слова: Арктическая зона, гидрологическая безопасность, инженерное проектирование, математическое моделирование, мерзлота, паводки, СП-33-101-2003.

В статье раскрыты основные проблемы, стоящие перед гидрологами при инженерном проектировании в Арктической зоне России и прилегающих территориях распространения многолетней мерзлоты. Основной из них является практическая невозможность использования стандартных методов расчета (СП 33-101-2003) для оценки характеристик стока в регионах с крайне ограниченными данными наблюдений гидрометрической сети в современных условиях изменений климата. Констатируется срочная необходимость создания государственной программы, направленной на восстановление ранее действовавших в криолитозоне и организацию новых научно-исследовательских гидрологических стационаров, совершенствование стандартной гидрологической сети, а также развитие комплексных моделирующих систем и методов их параметризации.

ВВЕДЕНИЕ

Стратегия развития Арктической зоны (АЗ) Российской Федерации [1] предусматривает ширококомасштабное развитие социально-экономической инфраструктуры, позволяющей добывать, перерабатывать и транспортировать природные ресурсы Арктики. Основу программы составляет формирование восьми опорных зон (рис. 1), связанных Северным морским путем и выбранных исходя из существующего административно-территориального деления, транспортных узлов и ресурсной базы, а также перспектив социально-экономического развития АЗ. Опорные зоны будут влиять и на развитие «тяготеющих территорий», хозяйственная деятельность которых напрямую зависит от состояния АЗ и ее инфраструктуры [2].

В настоящий момент сформирован перечень «якорных» проектов, запланированных для реализации в АЗ, из них транспортные проекты составляют 18 % от общего числа и являются приоритетными [2].

К крупным сухопутным транспортным проектам относится строительство «Северного широтного хода», железнодорожной магистрали, которая должна соединить ст. Обская на левом берегу р. Оби – Салехард – Надым – Коротчаево (рис. 1). В перспективе планируется продолжить магистраль до г. Норильска через города Игарка и Дудинка, то есть связать наземным транспортным коридором бассейны рек Обь и Енисей. Также начата реализация проекта железной дороги «Бованенково – Сабетта» на п-ве Ямал (рис. 1).

В последнее время получила развитие идея, имеющая 100-летнюю историю, а именно — проект строительства железнодорожной магистрали «Белкомур», которая

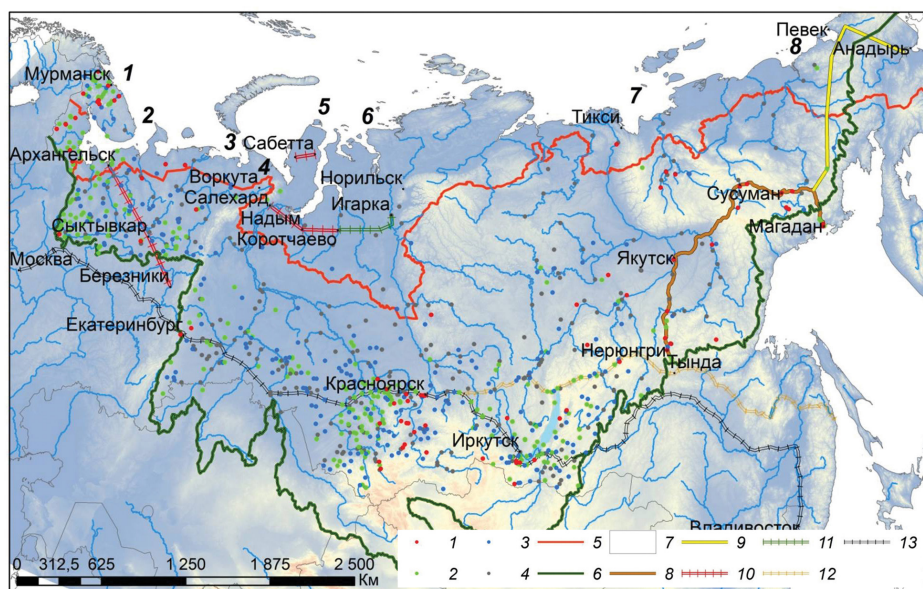


Рис. 1. Действовавшие в 2008 г. гидрологические посты, на которых измерялись расходы воды, на территории бассейна СЛО, а также существующие и планируемые транспортные проекты АЗ и сопредельных территорий РФ.

1, 2, 3, 4 — гидрологические посты, замыкающие водосборы площадью менее 200, 200–2000, 2000–10000 и более 10000 км² соответственно; 5 — граница АЗРФ; 6 — граница рек бассейна СЛО; 7 — государственные границы; 8 — федеральная трасса «Колыма» и часть федеральной трассы «Лена»; 9 — автомобильная трасса «Колыма» — Анадырь (проектируемая); 10 — ж/д «Северный широтный ход», «Бованенково — Сабетта», «Белкомур» (программа АЗРФ); 11 — ж/д Коротчаево — Игарка (проектируемая); 12 — Байкало-Амурская ж/д магистраль; 13 — Транссибирская ж/д магистраль. Цифрами (1–8) обозначены опорные зоны АЗРФ

Fig. 1. Discharge hydrological gauges in 2008 at the territory of the Arctic Ocean basin and existing and planned transport projects of the Arctic Zone and coherent territories of Russia.

1, 2, 3, 4 — hydrological gauges that closes an area of less than 200, 200–2000, 2000–10000 and more than 10000 km²; 5 — boundary of Arctic Zone of Russian Federation; 6 — the border of the Arctic Ocean basin; 7 — state borders; 8 — the Kolyma highway and the part of the Lena highway; 9 — the Kolyma — Anadyr highway (projected); 10 — the railway lines “Serny shirotny khod”, “Bovanenkovo-Sabetta”, “Belkomur” (the program of the Russian Arctic development); 11 — the railway Korotchaevo — Igarka (projected); 12 — the Baikal-Amur Mainline; 13 — Transsiberian railway. Numbers (1–8) — the base zones of the Russian Arctic development program

должна соединить порт Архангельск с городом Березники в Пермском крае, однако окончательное решение о его реализации пока не принято [3].

Регионы северо-востока страны также включены в программу развития Арктики. Восьмая опорная зона будет развиваться на Чукотке. В настоящее время транспортное сообщение с этим регионом осуществляется путем авиа и морских перевозок. В 2011 г. в рамках реализации федеральной целевой программы «Экономическое и социальное развитие Дальнего Востока и Забайкалья на период до 2013 года» началось строительство автодороги Колыма — Омсукчан — Омолон — Анадырь. Ее длина должна составить более 1800 км (рис. 1). Эта магистраль объединит три региона Дальнего Востока — Чукотку, Магаданскую область и Якутию, в том числе через федеральную трассу «Колыма».

Ежегодный ущерб от паводков на территории России оценивается примерно в 100 млрд рублей [4]. Значительная часть ущерба связана с повреждением транспортной инфраструктуры — размывами участков дорог, подтоплениями, смывами мостовых конструкций, разрушением гидротехнических сооружений.

Например, статистика по Магаданской области свидетельствует, что за последние пять лет катастрофические паводки в этом регионе происходят ежегодно. Так, в результате прохождения паводка в августе 2013 г. повреждено 74 км дорог и 15 мостов, в том числе на федеральной трассе «Колыма», ущерб составил более 600 млн рублей [5]. В 2014 г. в результате паводка оказалась закрыта областная дорога «Магадан – Балаганное – Талон», ущерб был оценен в размере 700 млн рублей. В августе 2016 г. ущерб от паводка в регионе достиг 250 млн рублей. В 2017 г. произошло разрушение подъезда к мосту на 542-м км трассы «Колыма», что привело к перекрытию трассы [5] и, как следствие, к блокаде некоторых населенных пунктов.

Чрезвычайные ситуации часто вызваны тем, что водопропускные и гидротехнические сооружения не справляются с пропуском паводков редкой обеспеченности. Они могут быть связаны не только с неправильной эксплуатацией, но и с ошибками на этапе инженерно-гидрологических изысканий, проектирования и строительства, в том числе с необоснованностью используемых методов расчета гидрологических характеристик при отсутствии данных наблюдений за стоком.

Учитывая высокую стоимость строительных проектов в Арктике, а также сопредельных территориях Сибири и Дальнего Востока, запланированная Программа развития АЗ требует научно обоснованных методов расчета характеристик стока рек, прогноза и оценки риска наводнений для проектируемой и уже действующей промышленной и социальной инфраструктуры.

Особенно актуальна данная задача в условиях изменения климата [6, 7]. Арктический регион претерпевает наиболее выраженные климатические изменения, которые влияют на все компоненты окружающей среды, включая водный баланс и гидрологический режим речных бассейнов [8, 9].

Целью статьи является анализ обеспеченности АЗ Российской Федерации данными гидрологических наблюдений, необходимыми для проведения инженерных изысканий и расчетов, а также формирование общих предложений по развитию научно-исследовательской гидрологической сети и созданию новых методов расчета характеристик стока на основе математического моделирования.

ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ БАСЕЙНОВ АРКТИЧЕСКИХ РЕК В УСЛОВИЯХ НЕСТАЦИОНАРНОСТИ КЛИМАТА

Одним из основных факторов, влияющих на процессы формирования стока Арктической зоны, является мерзлота. Тесная взаимосвязь потоков воды и тепла в речных бассейнах АЗ обуславливает значительную чувствительность системы к климатическим и антропогенным изменениям. Потепление климата и деградация многолетней мерзлоты вызывают трансформацию гидрологического цикла в арктической и субарктических зонах, в том числе изменения динамики влажности почвогрунтов, интенсификацию связи подземных и поверхностных вод, сезонное перераспределение элементов водного баланса [10].

Многочисленные исследования показывают увеличение общего стока воды крупных арктических рек во второй половине XX в. [11–13], смещение сроков половодий на более раннее время [14] и существенные изменения во внутригодовом распределении стока [15].

Так, в Западной Сибири и северной части европейской территории России за период 1936–1999 гг. увеличился минимальный сток рек, приходящийся в основном на зимний период [16]. Максимальный сток рек весеннего половодья снижается на Дальнем Востоке и в южной части Сибири, включая южные части бассейнов рек Енисей и Обь [17]. В то же время максимальные расходы средних и малых рек в бассейне р. Лены увеличивались за период 1930–2015 гг. [18].

Е.В. Шевнина [6] на основе климатических сценариев МГЭИК получила оценки ожидаемых изменений норм и коэффициентов вариации стока весеннего половодья рек АЗ до конца текущего столетия. По ее оценкам, на территории Российской Арктики ожидается увеличение нормы стока весеннего половодья на 23 % и снижение коэффициента его вариации на 14 % при осреднении по всем сценариям. В регионах наиболее сильное увеличение нормы стока весеннего половодья прогнозируется на территории Архангельской области, Республики Коми и Ненецкий АО (в среднем на 47 %) и большей части Восточной Сибири за исключением Чукотского полуострова [6]. В период 2010–2039 гг. значительные изменения нормы стока весеннего половодья ожидаются на территории Мурманской области, Республики Карелия, Ямало-Ненецкого АО и Долгано-Ненецкого АО, севере Республики Саха и Магаданской области, а также на востоке Чукотского АО [6].

Сложность взаимодействия процессов тепло- и влагопереноса в арктических ландшафтах обуславливает нелинейность реакции гидрологического цикла на климатические изменения, наблюдаемые в Арктике в настоящее время [19]. Неопределенность прогнозов характера гидрологических изменений в будущем связана в первую очередь с неизученностью механизмов, которые приводят к наблюдаемым изменениям речного стока в Арктической зоне [12, 16].

ПРОБЛЕМА СОКРАЩЕНИЯ СТАНДАРТНОЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ СЕТИ НАБЛЮДЕНИЙ В АЗ

Прогноз и оценка изменений гидрологических режима и характеристик стока осложняется также стремительным сокращением сети наблюдений. Несмотря на возрастающий интерес к ресурсам АЗ, она до сих пор является наименее обеспеченной данными стандартных гидрометеорологических измерений. Арктическая зона РФ является частью бассейна Северного Ледовитого океана (СЛО). Площадь СЛО составляет более 10 млн км², континентальной части АЗ — 2,2 млн км².

Расход воды различной обеспеченности является основной инженерной характеристикой стока. В 2008 г. количество гидрологических постов, на которых производились наблюдения за расходом воды на территории российского бассейна СЛО, составило 944 [20]. В 1980 г. общее количество расходных постов на той же территории составляло 1476 [21]. Из этого следует, что за последние 30 лет плотность сети сократилась более чем в полтора раза. С очень малыми реками (площадь водосбора < 200 км²) ситуация еще острее — количество пунктов наблюдений за стоком сократилось в три раза. На малых реках (площадь водосбора < 2000 км²) сокращение составило около 40 % (таблица, рис. 1).

К 2008 г. в АЗ количество расходных гидрологических постов в бассейнах любого размера составило 79 [20]. Из них чуть менее половины (38) находятся в подчинении Мурманского УГМС (площадь менее 150 000 км²), еще 16 — Северного УГМС. Таким образом, почти 70 % постов находятся на европейской части АЗ, только 25 — в Сибири.

Количество постов бассейна СЛО, в том числе в АЗ в 1980 и 2008 гг.

S водосбора/ УГМС	<200			200–2000			2000–10000			>10000			Любой площади		
	1980	2008		1980	2008		1980	2008		1980	2008		1980	2008	
		Σ	АЗ		Σ	АЗ		Σ	АЗ		Σ	АЗ		Σ	АЗ
Забайкальское	10	6	0	39	28	0	35	32	0	23	24	0	107	90	0
Западно-Сибирское	12	5	0	82	65	0	69	53	0	48	46	0	211	169	0
Иркутское	17	6	0	44	31	0	45	32	0	28	27	0	134	96	0
Колымское	34	7	0	16	6	1	18	3	0	16	4	2	84	20	3
Мурманское	20	8	8	39	18	18	15	11	11	9	1	1	83	38	38
Обь-Иртышское	7	0	0	35	18	2	35	23	2	54	37	5	131	78	9
Северное	18	7	2	91	58	7	63	47	4	34	31	3	206	143	16
Северо-Западное	12	6	0	27	16	0	10	4	0	7	0	0	56	26	0
Средне-Сибирское	34	15	0	80	45	1	41	34	1	52	43	6	207	137	8
Уральское	26	2	0	33	13	0	18	10	0	15	13	0	92	38	0
Якутское	43	20	2	30	13	0	27	17	0	65	59	3	165	109	5
Всего	233	82	12	516	311	29	376	266	18	351	285	20	1476	944	79

Анализ обеспеченности гидрологическими наблюдениями сибирских арктических регионов позволяет отнести их к категории гидрологически не изученных территорий:

– Ямало-Ненецкий автономный округ (опорная зона № 5, рис. 1), имеющий площадь около 770 тыс. км², занимает одно из ведущих мест в России по запасам углеводородов, природного газа и нефти. Именно в данном регионе до 2022 г. будет вестись наиболее активное строительство новых железнодорожных магистралей («Северный широтный ход», «Бованенково – Сабетта»). На территории округа на 2008 г. наблюдения за стоком велись на 9 постах, из них по 2 поста, замыкающих площади до 2000 и до 10000 км², 5 постов — более 10000 км²;

– на территории севера Красноярского края, входящей в шестую Таймыро-Туруханскую опорную зону (рис. 1), включающую северную часть бассейна р. Енисей, бассейны рек Пясины, Хатанги, Анабара, малые водосборы п-ова Таймыр и составляющую более 1 млн км², в 2008 г. функционировали 8 гидрологических постов, на которых велись измерения расходов воды, из них не было ни одного поста, замыкающего водосборы площадью менее 200 км², только 1 пост, замыкающий бассейн до 2000 км², 1 пост с площадью до 10000 км², 6 с площадями более 10000 км², из них 1 зарегулированный;

– в Республике Саха (Якутия), площадь которой составляет более 3 млн км², насчитывается 33 расходных поста на малых реках, из них 20 постов с площадью водосбора до 200 км² и 13 — до 2000 км². Основная часть постов расположена на юго-востоке региона, на севере и северо-востоке территории, относящейся к Арктической зоне, сеть за стоком наблюдений практически отсутствует. В АЗ Якутии

(опорная зона № 7) в 2008 г. функционировали всего 4 поста, 3 из которых являются замыкающими створами крупных рек Лена, Яна и Оленёк;

– на протяжении федеральной трассы «Колыма» (длина 2032 км), соединяющей города Якутск и Магадан, в 2008 г. количество действующих гидрологических постов составляло 11 (6 постов имели замыкающие площади менее 200 км²), из которых большая часть (5 постов) сконцентрирована в районе города Магадана;

– на Чукотке (737 тыс. км², опорная зона № 8) в 2008 г. действовали только 3 поста, на которых велись наблюдения за стоком: два — на реках с площадью водосбора более 10000 км², один — менее 2000 км², посты на очень малых реках отсутствуют.

Для сравнения: в Норвегии, площадь которой сопоставима с площадью Магаданской области и составляет 385 тыс. км², действует около 650 гидрологических постов, наблюдения на большинстве из них автоматизированы, по 300 постам данные наблюдений доступны пользователям сети Интернет в режиме реального времени [22].

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА ИНЖЕНЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СТОКА

Любое строительство требует проведения изысканий и проектирования. В настоящее время рекомендованным к использованию является расчетный Свод правил СП 33–101–2003 (далее СП) [23], основанный на применении методов статистической обработки многолетних рядов наблюдений за стоком и регламентирующий порядок гидрологических расчетов.

СП является актуализированной редакцией документа СНиП 2.01.14-83 [24], выпущенного в 1983 г., и принципиально ничем не отличается от своего предшественника в вопросах методик расчета характеристик стока. Предыдущая редакция издания базировалась на предположении о том, что гидрологические процессы являются статистически стационарными, а следовательно, ретроспективные наблюдения могут считаться репрезентативными для представления режима стока на период эксплуатации проектируемого объекта. В настоящее время все чаще для получения глобальных и региональных оценок изменения среднегодового стока, его внутригодового распределения и расчета наводнений редкой повторяемости используются сценарии изменения климата [25–29]. Авторы СП признают климатические изменения и требуют использования современной гидрометеорологической информации при проведении расчетов, а также уточнения параметров расчетных формул, основанного на обобщении современных данных по стоку. В последнее десятилетие был также выпущен ряд Методических рекомендаций [30–33], которые дополняют СП 33-101-2003, в том числе в части оценок расчетных значений по неоднородным рядам наблюдений. Однако такие рекомендации не предлагают путей учета влияния климата на режимные характеристики основных видов многолетнего стока [6].

В работе [34] на основе рекомендаций СП 33-101-2003 проведен расчет характеристик максимального стока для рек в зоне распространения многолетней мерзлоты. В качестве «неизученных» выбраны четыре очень малых (площадью до 200 км²) и две малых (до 2000 км²) реки в бассейне Северного Ледовитого океана с различным гидрологическим режимом, имеющие длинные ряды наблюдений за стоком. Рассчитанные характеристики максимального стока половодья и паводков сравнивались с величинами расходов воды, определенных по кривым обеспеченности, построенным на основе наблюдаемых данных. Оказалось, что в районах исследования выбор рек-аналогов, обеспеченных данными наблюдений за последние

20–25 лет, ограничен 2–3 вариантами водотоков, не имеющими альтернативы для территорий площадью до нескольких сотен тысяч квадратных километров. С этим связана практическая невозможность выполнения требований СП 33-101-2003 по уточнению параметров расчетных формул на основании современных фактических материалов наблюдений. Авторами показано, что рассчитанные величины расходов половодья и паводков различной обеспеченности могут отличаться в разы при использовании нескольких рек-аналогов, одновременно соответствующих требованиям СП 33-101-2003. Вместе с тем рекомендации СП 33-101-2003 по использованию усеченных кривых при нестационарности рядов рек-аналогов носят неопределенный характер, их применение приводит к большим погрешностям расчетных величин. Ввиду отсутствия каких-либо ближайших перспектив расширения существующей гидрометеорологической сети наблюдений дальнейшее развитие методов СП 33-101-2003 для обширных территорий Арктической зоны РФ практически невозможно. Выводы [34] подтверждаются анализом количества действующих гидрологических постов (см. таблицу, рис. 1).

МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КАК АЛЬТЕРНАТИВА ТРАДИЦИОННЫМ МЕТОДАМ РАСЧЕТА ИНЖЕНЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СТОКА

В условиях огромной и труднодоступной АЗ и сопредельных территорий, где сеть гидрометеорологических наблюдений либо очень редка, либо вообще отсутствует, представляется, что будущее любых гидрологических расчетов и прогнозов связано с использованием математических моделей формирования стока.

Детерминированные гидрологические модели позволяют рассчитывать непрерывные гидрографы стока воды в замыкающем створе речных бассейнов разных размеров. Входом в модель являются поля метеорологических данных разного временного разрешения. Метеорологические данные могут иметь различные источники: наземные метеорологические станции, данные реанализа, климатические модели, стохастические модели погоды. На основе результатов моделирования могут быть построены кривые распределения любых характеристик стока (годовых, месячных, суточных, максимальных и минимальных расходов), а также рассчитаны объемы стока половодья и паводков и пр. Дополнительно могут быть получены характеристики элементов водного баланса, переменных состояний почвенного и снежного покрова.

Метод детерминированно-стохастического (ДС) моделирования основан на совместном использовании двух моделей: детерминированной гидрологической модели и стохастической модели погоды. Он позволяет делать вероятностные оценки любых характеристик стока (например, экстремальных) или переменных состояний водосбора для прошлых, настоящих и будущих условий и ситуаций в бассейне, в том числе и с учетом прогнозных сценариев изменений климата и ландшафтов [35].

Арктика предъявляет повышенные требования к гидрологическим моделям. Подавляющая часть гидрологических моделей, хорошо себя зарекомендовавших на территориях с умеренным климатом, не может быть использована для расчета стока воды в АЗ. Динамика формирования деятельного слоя является одним из основных факторов, определяющих характер протекания гидрологических процессов АЗ, поэтому моделирование процессов формирования стока должно проводиться с учетом энергетического баланса не только поверхности водосборов, но и толщи почвогрунтов. Основными требованиями являются физическая обоснованность со-

ответствия моделей природным процессам [35], их универсальность в плане использования, как в различных ландшафтах, так и пространственных и временных масштабах, и главное, возможность оценки параметров модели на основе измеряемых свойств ландшафтов. Важно также, чтобы моделирование могло проводиться в условиях дефицита данных наблюдений, характерного для большей части арктических территорий, как России, так и мира. Такой подход характерен для последователей школы гидрологического моделирования проф. Ю.Б. Виноградова [35]. Необходимо отметить, что канадские исследователи [36] также работают над созданием и усовершенствованием физически обоснованной гидрологической модели Cold Region Hydrological Model (CRHM), оценка параметров которой производится без использования методов калибровки, на основе представлений о процессах формирования стока и ландшафтно-климатических условиях. Очевидно, что ограниченная доступность наблюдаемых данных, сложность процессов их формирования в условиях холодного климата подталкивает исследователей северных бассейнов к разработке альтернативных общему тренду методов математического моделирования.

СПЕЦИАЛЬНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ЗА СТОКОМ В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ РОССИИ И ДРУГИХ СТРАН

Для совершенствования и возможности применения методов математического моделирования в гидрологии необходимо изучение физических механизмов процессов тепло- и влагообмена в бассейнах арктических рек. Одним из важнейших препятствий для таких исследований является сложность получения натурных данных специальных и экспериментальных наблюдений.

Стационарные наблюдения на малых исследовательских водосборах являются главным источником информации о физических механизмах формирования стока и происходящих изменениях гидрологического цикла. Поэтому в Канаде и США (Аляска), где размеры арктических территорий и их труднодоступность соизмеримы АЗ России, низкая плотность стандартной сети наблюдений компенсируется развитием сети научно-исследовательских водосборов.

В США с 1980 г. функционирует многолетняя экологическая научная сеть Long-term Ecological Research Network [37], которая включает в себя 27 комплексных научно-исследовательских стационаров в США и Антарктиде. Также ведутся наблюдения на многочисленных научных водосборах на Аляске: Fish Creek, Toolik station, Tanana River, Kuparuk River, Innavaik River, Putuligayuk River и др., функционируют программы мониторинга арктических областей NPR-Hydrology [38], Arctic Observatory Network [39].

Высоким уровнем организации мониторинга гидрологических процессов в холодных регионах отличается Канада (рис. 2). Всего в Канаде существует более 20 научно-исследовательских водосборов площадью от 10 до 200 км², расположенных от южной границы страны до Канадского Арктического архипелага в различных условиях климата, растительности, рельефа и мерзлотных характеристик. Стандартные регулярные гидрометеорологические наблюдения дополняются специальными и экспериментальными исследованиями отдельных гидрологических процессов. Данные измерений обычно находятся в свободном доступе, например выкладываются в Интернете [40].

Исследования на водосборах в Канаде объединены в научные программы и сопровождаются обработкой и анализом данных, а также разработкой и применением методов математического моделирования. Например, проект Changing Cold Regions Network включает в себя полевые исследования на 14 водосборах и использование

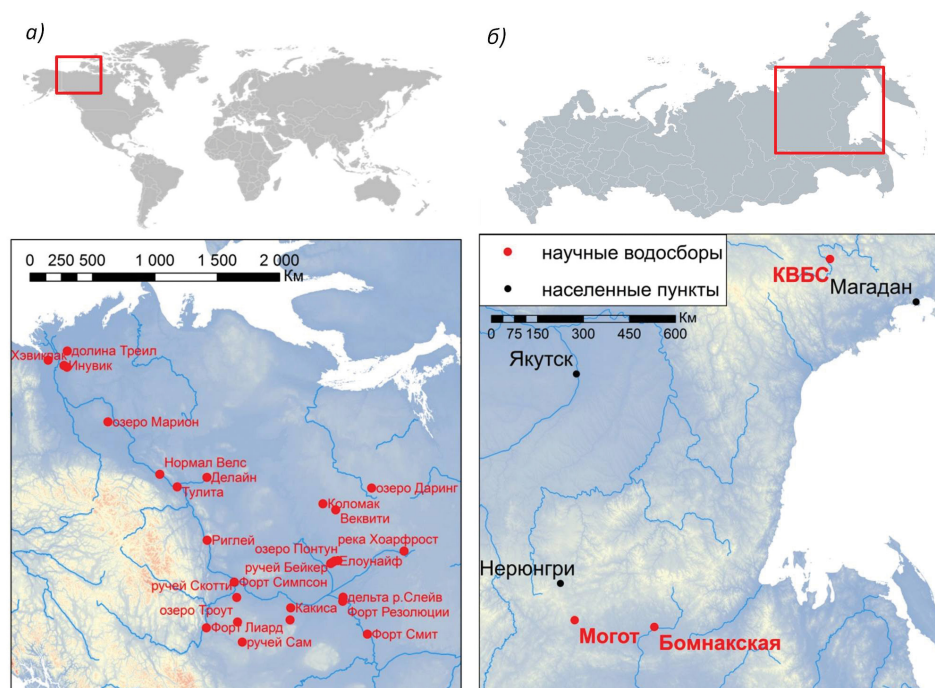


Рис. 2. Научно-исследовательские гидрологические стационары в криолитозоне Канады и России: а) — канадские действующие [41] научно-исследовательские водосборы в зоне распространения мерзлоты; б) — исторические отечественные научно-исследовательские водосборы в зоне распространения мерзлоты

Fig. 2. Research watersheds in Canada and Russia: а) — Canadian current [41] research watersheds in permafrost zone; б) — historical research watersheds in permafrost zone of Russia

двух канадских моделей. Проект Improving Processes & Parameterization for Prediction in Cold Regions Hydrology (IP3) объединял 10 научно-исследовательских водосборов и четыре гидрологические модели.

Глобальный масштаб проблемы изучения гидрологического режима арктических территорий отражается в программах исследований развитых стран. В Канаде в 2017 г. началась 7-летняя программа по изучению гидрологического цикла в холодном климате «Глобальное будущее воды» [42]. В рамках программы ведущие университеты Канады получили финансирование в размере более пяти миллиардов рублей (в пересчете на российские деньги) на научные исследования гидрологических процессов с привлечением на постоянной основе 750 новых научных сотрудников и технического персонала.

В инструментальных исследованиях процессов гидрологического цикла за последние 30 лет Россия значительно отстала от других арктических стран, хотя именно в СССР была организована первая в мире система комплексных научных гидрологических стационаров в различных климатических условиях.

В 1925 г. М.А. Великанов впервые предложил организовать специальные гидрологические стационары в различных физико-географических условиях, а в 1933 г. Д.Л. Соколовским был составлен план размещения 45 полевых лабораторий по

территории СССР. С 1928 по 1940 г. уже существовало 11 таких станций, однако во время Великой Отечественной войны большинство из них были полностью закрыты.

В 1954 г. вышла книга с первым обобщением опыта комплекса основных наблюдений гидрологических стационаров, именуемых стоковыми станциями [43]. Стоковые станции производили комплексные наблюдения над всеми элементами водного баланса и факторами, обуславливающими их изменения. Объектами изучения являлись характерные для региона малые водосборы и стоковые площадки.

В 1973 г. Государственный гидрологический институт под научным руководством А.И. Чеботарева выпустил «Руководство водно-балансовым станциям» [44]. К 1981 г. на территории СССР действовало 16 водно-балансовых станций (ВБС) на естественных водосборах (не подверженных мелиорации) и 9 болотных водно-балансовых станций.

Единственным комплексным научно-исследовательским стационаром в условиях арктического климата была Колымская водно-балансовая станция (КВБС), которой в 2017 г. исполнилось 70 лет [45]. Местоположение КВБС (верховья р. Колымы, Магаданская область) было выбрано так, что оно являлось репрезентативным для обширных горных территорий зоны распространения мерзлоты Восточной Сибири, Северо-Востока и Дальнего Востока России. Детальные наблюдения за формированием речного стока и процессами сезонного протаивания и промерзания грунтов производились на КВБС до 1997 г. [46]. На основе анализа данных наблюдений были изучены процессы формирования водного баланса, надмерзлотных вод и речного стока в различных ландшафтах КВБС, проанализировано распределение осадков, испарения и стока воды в условиях многолетнемерзлых пород и горного рельефа.

Дополнительно к сетевым стационарам в Советском Союзе организовывались и специальные экспедиции, целью которых была разработка методов гидрологического обоснования крупных проектов хозяйственного развития.

С середины 1960-х гг. по 1993 г. Западно-Сибирская экспедиция ГГИ проводила масштабные режимные исследования с целью изучения гидрометеорологического режима заболоченных территорий Западной Сибири [47].

Другим примером является гидрологический полигон «Могот» Байкало-Амурской экспедиции ГГИ (1976–1985 гг.), который был расположен в 60 км к северу от г. Тынды на водоразделе рек Амур и Алдан. Полигон «Могот» был создан для обеспечения проектных, строительных решений и любой другой хозяйственной деятельности методами гидрологических расчетов в зоне хозяйственного освоения Байкало-Амурской магистрали [48]. Результаты исследований процессов формирования стока и других элементов водного и теплового баланса были положены в основу совершенствования расчетных методик [49, 50].

Несмотря на правомерную критику ошибок организации и проведения наблюдений на ВБС [51], они внесли значительный вклад в развитие как прикладной, так и фундаментальной гидрологии. В современный период в России «влачат жалкое существование» три ВБС (Подмосковная, Каменная Степь, Нижнедевицкая) на европейской территории и одна (Приморская) на юге Дальнего Востока. В АЗ и на сопредельных территориях нет ни одного постоянно действующего государственного гидрологического стационара. Ограниченные по объему и продолжительности исследования проводятся отдельными научными коллективами на непостоянной основе грантового финансирования и без единых методик.

Дополнением к наблюдениям на научно-исследовательских стационарах может являться реализация концепции нестационарных репрезентативных водосборов и по-

лигонов [51], метода «мобильного стационара» [52]. Проведение кратковременных интенсивных наблюдений на специально подобранных репрезентативных водосборах, несмотря на свою отрывочность, позволяют составить общее представление об условиях формирования стока и гидрологических явлениях рассматриваемой территории и, главное, произвести приближенную количественную оценку параметров математических моделей гидрологических процессов [51]. Однако, не имея в своем основании задач создания, параметризации модели или уточнения существующих методов расчета характеристик стока, такие наблюдения теряют большую часть своей ценности и не оправдывают вложенных затрат. Реализация методов кратковременных исследований не может полностью компенсировать потерю сети научных стационаров, целью которых являлось комплексное изучение гидрологических процессов и всех элементов водного баланса, в том числе их долгосрочные изменения.

ВЫВОДЫ

Анализ обеспеченности АЗ сетевыми гидрологическими наблюдениями показал, что в средняя площадь, приходящаяся на один гидрологический расходный пост, замыкающий створ реки с площадью водосбора менее 2000 км², составляет около 130 тыс. км² (без учета Мурманской области, составляющей менее 10 % территории АЗ, содержащей 50 % всех постов на малых реках АЗ). Это означает, что большую часть АЗ можно отнести к категории гидрологически не изученных территорий. В настоящее время расчеты характеристик стока в АЗ ведутся на основе использования региональных параметров. Их уточнение было произведено более 30 лет назад, когда обобщение данных производилось наиболее полно, с применением единых методик, разработанных в Государственном гидрологическом институте (ГГИ).

Итак, стоят серьезные научно-практические проблемы — как в условиях крайней ограниченности и низкого качества данных наблюдений, а также отсутствия ресурсов для восстановления полноценной наблюдательной гидрометрической сети наблюдений Арктической территории России: 1) рассчитывать характеристики стока в задачах инженерно-изыскательских работ и проектирования; 2) оценивать величину и повторяемость катастрофических паводков, заблаговременно прогнозировать их прохождение; 3) прогнозировать приток воды в водохранилища для нужд гидроэнергетики и водного транспорта.

Решение поставленных задач может быть достигнуто только на государственном уровне и должно осуществляться в трех направлениях.

1. Создание государственной программы по организации (восстановлению) сети репрезентативных водосборов в различных климатических зонах страны для комплексного мониторинга основных компонентов водного баланса и гидрологических процессов с применением современного оборудования с высоким временным разрешением, внедрением новых методов исследований. На территории Арктики научные стационары должны быть организованы в каждой опорной зоне. Также необходимо рассмотреть целесообразность восстановления исторических стационаров с продолжительными рядами наблюдений на прилегающих территориях криолитозоны, например Колымской водно-балансовой станции [45, 46].

2. Государственный заказ на разработку методов определения основных гидрологических характеристик для решения задач инженерно-изыскательских работ и проектирования на основе методов математического моделирования. Создание и развитие комплексных гидрологических моделирующих систем и методов их параметризации для использования в основных ландшафтах, характерных для тер-

риторий Арктической зоны, позволит изучать, рассчитывать и прогнозировать процессы формирования стока и их изменения в будущем.

3. Совершенствование (в АЗ — расширение) стандартной гидрологической сети наблюдений, в том числе на основе современных методов моделирования и дистанционного зондирования [53].

На пути решения поставленных задач встанут многие проблемы, которые потребуют изменения сложившейся в российской гидрологии ситуации. Среди них — острый дефицит квалифицированных специалистов в области гидрометеорологии (от наблюдателей до научных сотрудников), потеря опыта организации и проведения комплексных гидрологических исследований, отставание в разработке современных гидрометеорологических приборов отечественного производства, финансирование отрасли по остаточному принципу и т.п. Будем надеяться на то, что задачи освоения АЗ поставят государство перед неизбежной необходимостью начать распутывать клубок накопившихся гидрологических проблем, которым в последние десятилетия практически не уделялось должного внимания.

Благодарности. Исследование выполнено в рамках усилий по восстановлению Колымской Водно-Балансовой станции, первого в мире комплексного гидрологического стационара в зоне мерзлоты. Авторы благодарны руководству Института мерзлотоведения им. П.А. Мельникова СО РАН за всестороннюю поддержку и понимание важности проведения гидрологических исследований в криолитозоне.

Acknowledgments. The study was carried out as the part of the efforts to restore the Kolyma Water-Balance Station, the first in the world hydrological research watershed in permafrost zone. The authors are grateful to the administration of Melnikov Permafrost Institute SB RAS for the comprehensive support and understanding of the importance of conducting hydrological studies in the permafrost zone.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Государственная программа Российской Федерации «Социально-экономическое развитие Арктической зоны Российской Федерации», утверждена постановлением Правительства Российской Федерации от 21 апреля 2014 г. № 366 (в редакции постановления Правительства Российской Федерации от 31 августа 2017 г. № 1064). URL: <http://static.government.ru/media/files/GGu3GTtv8bvV8gZxSEAS1R7XmzloK6ar.pdf> (дата обращения 19.04.2017).
2. Смирнова О.С., 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. doi: 10.17238/issn2221-2698.2016.25.148.
3. Проект «Белкомур». ОАО МК «Белкомур» URL: <http://www.belkomur.com/belkomur/3.php> (дата обращения 19.04.2018).

REFERENCES

1. Gosudarstvennaja programma Rossijskoj Federacii "Social'no-jekonomicheskoe razvitie Arkticheskoy zony Rossijskoj Federacii", utverzhdena postanovleniem Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 21 aprelya 2014 g. № 366 (v redakcii postanovlenija Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 31 avgusta 2017 g. № 1064). The state program of the Russian Federation "Socio-economic development of the Arctic zone of the Russian Federation". approved by the Government of the Russian Federation of April 21, 2014, No. 366 (as amended by Government Decree No. 1064 of August 31, 2017). Available at: <http://static.government.ru/media/files/GGu3GTtv8bvV8gZxSEAS1R7XmzloK6ar.pdf>. [In Russian]. (accessed 19.04.2018).
2. Smirnova O.S., Lipina S.A., Kudriashova E.V., Kreidenko T.F., Bogdanova Ju.N. Formation of support zones in the Arctic: methodology and practice. *Arktika i sever*: Arctic and North. 2016, 25. doi: 10.17238 / issn2221-2698.2016.25.148. [In Russian].

4. Ляпичев Ю.П. Гидрологическая и техническая безопасность гидросооружений: Учебное пособие. М.: РУДН, 2008. 222 с.
5. РИА Новости. Россия сегодня. URL: <https://ria.ru/society/20170717/1498659385.html> (дата обращения 19.04.2017).
6. Шевнина Е.В. Долгосрочная оценка статистических характеристик максимального слоя на территории российской Арктики: Дис. ... д-ра техн. наук. СПб.: РГТУ, 2015. 358 с.
7. Madsen H., Lawrence D., Lang, M., Martin-kova M., Kjeldsen T.R. A review of applied methods in Europe for flood-frequency analysis in a changing environment: Floodfreq COST action ES0901: European procedures for flood frequency estimation // Centre for Ecology & Hydrology. Wallingford, U. K., 2013. 180 p.
8. Holmes R.M., Coe M.T., Fiske G.J., Gurtovaya T., McClelland J.W., Shiklomanov A.I., Spencer G. M., Tank S.E., Zhulidov A.V. Climate Change Impacts on the Hydrology and Biogeochemistry of Arctic Rivers, in Climatic Change and Global Warming of Inland Waters: Impacts and Mitigation for Ecosystems and Societies / Publisher John Wiley and Sons. Chichester, UK, 2012. doi: 10.1002/9781118470596.ch1.
9. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Т. 2. Последствия изменений климата. М.: Росгидромет, 2008. 290 с.
10. Walvoord M.A., Kurylyk B.L. Hydrologic Impacts of Thawing Permafrost — A Review // Vadose Zone Journal. 2016. Vol. 15. № 6. doi: 10.2136/vzj2016.01.0010.
11. Kattsov V.M., Kallen E., Cattle H., Christensen J., Drange H., Hanssen-Bauer I., Johannesen T., Karol I., Raisanen J., Svensson G., Vavulin S. Future climate change: modeling and scenarios for the Arctic // Arctic Climate Impact Assessment. Cambridge: Cambridge University Press, 2005. P. 99–150.
12. Rawlins M.A., Serreze M.C., Schroeder R., Zhang X., McDonald K.C. Diagnosis of the record discharge of Arctic-draining Eurasian Rivers in 2007 // Environmental Research Letters. 2009. V. 4, № 4. doi:10.1088/1748-9326/4/4/045011.
13. Алексеевский Н.И., Магрицкий Д.В., Михайлов В.Н. Антропогенные и естественные
3. Project "Belkomur". ОАО МК "Belkomur". Interregional Company Belkomur. Available at: <http://www.belkomur.com/belkomur/3.php>. [In Russian]. (accessed 19.04.2018)
4. Liapichev Iu.P. *Gidrologicheskaja i tehničeskaja bezopasnost' gidrosooruzhenij: Učebnoe posobie*. Hydrological and technical safety of hydraulic structures: Proc. allowance. Moscow: RUDN, 2008: 222 p. [In Russian].
5. RIA Novosti. *Rossija segodnja*. RIA News. Russia today. Available at: <https://ria.ru/society/20170717/1498659385.html> [In Russian]. (accessed 19.04.2018)
6. Shevnina E.V. *Dolgosrochnaja ocenka statističeskikh harakteristik maksimal'nogo sloja na territorii rossijskoj Arktiki*. Diss. doct. tehn. nauk. Long-term assessment of statistical characteristics of the maximum layer on the territory of the Russian Arctic. Dr. tech. sci. diss. Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, 2015: 358 p. [In Russian].
7. Madsen H., Lawrence D., Lang, M., Martin-kova M., Kjeldsen T.R. A review of applied methods in Europe for flood-frequency analysis in a changing environment: Floodfreq COST action ES0901: European procedures for flood frequency estimation. Centre for Ecology & Hydrology, 2013: 180 p.
8. Holmes R.M., Coe M.T., Fiske G.J., Gurtovaya T., McClelland J.W., Shiklomanov A.I., Spencer R.G.M., Tank S.E., Zhulidov A.V. Climate Change Impacts on the Hydrology and Biogeochemistry of Arctic Rivers, in Climatic Change and Global Warming of Inland Waters: Impacts and Mitigation for Ecosystems and Societies. Publisher John Wiley and Sons. Chichester. UK, 2012. doi: 10.1002/9781118470596.ch1.
9. *Ocenochnyj doklad ob izmenenijah klimata i ih posledstvijah na territorii Rossijskoj Federacii*. T. 2. *Posledstvija izmenenij klimata*. Evaluation report on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation. V. 2. Consequences of climate change. Moscow: Roshydromet, 2008: 290 p. [In Russian].
10. Walvoord M.A., Kurylyk B.L. Hydrologic Impacts of Thawing Permafrost – A Review. Vadose Zone Journal. 2016, 15, 6. doi:10.2136/vzj2016.01.0010.
11. Kattsov V.M., Kallen E., Cattle H., Christensen J., Drange H., Hanssen-Bauer I., Johannesen T., Karol I., Raisanen J., Svensson G., Vavulin S. Future climate change: modeling and scenarios for the Arctic. Arctic Climate Impact Assessment. Cambridge: Cambridge University Press, 2005: 99–150.
12. Rawlins M.A., Serreze M.C., Schroeder R., Zhang X., McDonald K.C. Diagnosis of the record discharge of Arctic-draining Eurasian Rivers in 2007. Environ. Res. Lett. 2009, 4 (4). doi:10.1088/1748-9326/4/4/045011.

- изменения гидрологических ограничений для природопользования в дельтах рек Российской Арктики // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2015. № 1. С. 14–31.
14. Tan C.S., Zhang T.Q. Surface runoff and subsurface drainage phosphorus losses under regular free drainage and controlled drainage with sub-irrigation systems in southern Ontario // Canadian Journal of Soil Science. 2011. V. 91 (3). P. 349–359.
15. Yang D., Kane D. L., Hinzman L., Zhang X., Zhang T., Ye H. Siberian Lena River hydrologic regime and recent change // Journal of geophysical research. 2002. V. 107 (D23). doi:10.1029/2002JD002542.
16. Smith L.C., Pavelsky T.M., MacDonald G.M., Shiklomanov A.I., Lammers R.B. Rising minimum daily flows in northern Eurasian rivers: A growing influence of groundwater in the high-latitude hydrologic cycle // Journal of geophysical research. 2007. V. 112. doi:10.1029/2006JG000327.
17. Shiklomanov N.I., Anisimov O.A., Zhang T., Marchenko S., Nelson F.E., Oelke C. Comparison of model produced active layer fields: Results for northern Alaska // Journal of geophysical research. 2007. V. 112. doi:10.1029/2006JF000571.
18. Tananaev N.I., Makarieva O.M., Lebedeva L.S. Trends in annual and extreme flows in the Lena River basin, Northern Eurasia // Geophys. Res. Lett. 2016. V. 43. doi:10.1002/2016GL070796.
19. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2016 год. М.: Росгидромет, 2017. 70 с.
20. Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО). URL: <https://gmvo.skniivh.ru> (дата обращения 19.04.2018)
21. Государственный водный кадастр. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши, 1976–1980: Вып. 1–17, Л.: Гидрометеоиздат.
22. Норвежское управление водных ресурсов и энергетики (NVE). URL: <https://www.nve.no> (дата обращения 16.03.2018)
23. СП 33-101-2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. М.: Госстрой России, 2004. 73 с.
13. Alekseevskii N.I., Magritskii D.V., Mikhailov V.N. Anthropogenic and natural changes in hydrological restrictions for the use of natural resources in the deltas of the Russian Arctic. *Vodnoe hozjajstvo Rossii: problemy, tehnologii, upravlenie*. Water management in Russia: problems, technologies, management. 2015, 1: 14–31.
14. Tan C.S., Zhang T.Q. Surface runoff and subsurface drainage phosphorus losses under regular free drainage and controlled drainage with sub-irrigation systems in southern Ontario. *Can. J. Soil Sci.* 2011, 91 (3): 349–359.
15. Yang D., Kane D. L., Hinzman L., Zhang X., Zhang T., Ye H. Siberian Lena River hydrologic regime and recent change. *Journal of geophysical research*. 2002, 107 (D23). doi:10.1029/2002JD002542.
16. Smith L.C., Pavelsky T.M., MacDonald G.M., Shiklomanov A.I., Lammers R.B. Rising minimum daily flows in northern Eurasian rivers: A growing influence of groundwater in the high-latitude hydrologic cycle. *Journal of geophysical research*. 2007, 112. doi:10.1029/2006JG000327.
17. Shiklomanov N.I., Anisimov O.A., Zhang T., Marchenko S., Nelson F.E., Oelke C. Comparison of model produced active layer fields: Results for northern Alaska. *Journal of geophysical research*. 2007, 112. doi:10.1029/2006JF000571.
18. Tananaev N.I., Makarieva O.M., Lebedeva L.S. Trends in annual and extreme flows in the Lena River basin, Northern Eurasia. *Geophys. Res. Lett.* 2016, 43. doi:10.1002/2016GL070796.
19. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2016 год. Report on the peculiarities of climate on the territory of the Russian Federation for 2016. Moscow: Roshydromet, 2017: 70 p. [In Russian].
20. Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО). Automated information system of state monitoring of water objects (AIS GMVO). Available at: <https://gmvo.skniivh.ru>. [In Russian]. (accessed 16.03.2018)
21. Государственный водный кадастр. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши, 1976–1980: Вып. 1–17. State water cadastre. Long-term data on the regime and resources of surface waters of the land, 1976–1980: 1–17. Leningrad: Gidrometeoizdat. [In Russian].
22. Норвежское управление водных ресурсов и энергетики. Norwegian Water Resources and Energy Administration (NVE). Available at: <https://www.nve.no>. (accessed 16.03.2018).
23. СП 33-101-2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. SP 33-101-2003. Determination of basic calculated

24. СНиП 2.01.14-83. Определение расчетных гидрологических характеристик. М.: Стройиздат, 1983. 97 с.
25. Георгиевский В.Ю., Шалыгин А.Л. Гидрологический режим и водные ресурсы // Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем. М.: Росгидромет, 2012. С. 53–86.
26. Алексеевский Н.И., Фролова Н.Л., Христофоров А.В. Мониторинг гидрологических процессов и повышение безопасности водопользования. М.: Географический факультет МГУ, 2011. 387 с.
27. Добровольский С.Г. Глобальные изменения речного стока. М.: Геос, 2011. 659 с.
28. Шикломанов И.А., Георгиевский В.Ю. Влияние изменений климата на гидрологический режим и водные ресурсы рек России // Гидрологические последствия изменения климата. Новосибирск, 2007. С. 192–204.
29. Мохов И.И., Семенов В.А., Хон В.Ч. Оценка возможных изменений гидрологического режима в XXI веке на основе глобальных климатических моделей // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2003. Т. 39. № 2. С. 150–165.
30. Методические рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при наличии данных гидрометрических наблюдений. Нижний Новгород: Вектор-ТиС, 2007. 134 с.
31. Методические рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при недостаточности данных гидрометрических наблюдений. СПб.: ААНИИ, 2008. 66 с.
32. Методические рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при отсутствии данных гидрометрических наблюдений. СПб.: Нестор-История, 2009. 193 с.
33. Методические рекомендации по оценке однородности гидрологических характеристик и определении их расчетных значений по неоднородным данным. СПб.: Нестор-История, 2010. 162 с.
34. Макарьева О.М., Бельдиман И.Н., Лебедева Л.С., Виноградова Т.А., Нестерова Н.В. К вопросу об обоснованности рекомендаций СП 33-101-2003 для расчетов характеристик максимального стока малых рек в зоне распространения многолетней мерзлоты (в порядке дискуссии) // Инженерные изыскания. 2017. № 6–7. С. 50–63.
- hydrological characteristics. Moscow: Gosstroy of Russia, 2004: 73 p. [In Russian].
24. *SNiP 2.01.14-83. Opredelenie raschetnykh gidrologicheskikh harakteristik*. SNiP 2.01.14-83. Determination of calculated hydrological characteristics. Moscow: Stroyizdat, 1983: 97 p. [In Russian].
25. *Georgievskii V.Iu., Shalygin A.L. Hydrological regime and water resources. Metody otsenki posledstviy izmeneniia klimata dlia fizicheskikh i biologicheskikh sistem*. Methods for assessing the effects of climate change on physical and biological systems. Moscow: Roshydromet, 2012: 53–86. [In Russian].
26. *Alekseevsky N.I., Frolova N.L. Khristoforov A.V. Monitoring gidrologicheskikh processov i povyshenie bezopasnosti vodopol'zovaniia*. Monitoring of hydrological processes and improving the safety of water use. Moscow: Geography Department of Moscow State University, 2011: 387 p. [In Russian].
27. *Dobrovol'skii S.G. Global'nye izmeneniia rechnogo stoka*. Global changes in river flow. Moscow: Geos, 2011: 659 p. [In Russian].
28. *Shiklomanov I.A., Georgievskii V.Iu. Vliianie izmenenii klimata na gidrologicheskii rezhim i vodnye resursy rek Rossii*. The impact of climate change on the hydrological regime and water resources of the Russian rivers. Hydrological consequences of climate change. Novosibirsk, 2007: 192–204. [In Russian].
29. *Mokhov I.I., Semenov V.A., Khon V.Ch. Assessment of possible changes in the hydrological regime in the 21st century based on global climate models*. *Izv. RAN. Fizika atmosfery i okeana*. *Izv. RAS. Physics of the atmosphere and ocean*. 2003, 39, 2: 150–165. [In Russian].
30. *Metodicheskie rekomendacii po opredeleniiu raschetnykh gidrologicheskikh harakteristik pri nalichii dannykh gidrometricheskikh nabljudenij*. Methodological recommendations for determining the calculated hydrological characteristics in the presence of hydrometric observations. Nizhny Novgorod: Vector-TiS, 2007: 134 p. [In Russian].
31. *Metodicheskie rekomendacii po opredeleniiu raschetnykh gidrologicheskikh harakteristik pri nedostatochnosti dannykh gidrometricheskikh nabljudenij*. Methodological recommendations for the determination of computed hydrological characteristics when hydrometric observations are inadequate. St. Petersburg: AARI, 2008: 66 p. [In Russian].
32. *Metodicheskie rekomendacii po opredeleniiu raschetnykh gidrologicheskikh harakteristik pri otsutstvii dannykh gidrometricheskikh nabljudenij*. Methodological recommendations for determining the calculated hydrological characteristics in the absence of hydrometric observations. St. Petersburg: Nestor-History, 2009: 193 p. [In Russian].

35. Виноградов Ю.Б., Виноградова Т.А. Математическое моделирование в гидрологии. М.: Издательский центр «Академия», 2010. 298 с.
36. Pomeroy J.W., Gray D.M., Brown T. The cold regions hydrological model: a platform for basing process representation and model structure on physical evidence // Hydrol. Process. 2007. V. 21. P. 2650–2667.
37. National Science Foundation Long-Term Ecological Research (LTER). URL: <https://lternet.edu> (дата обращения 01.04.2018)
38. NPR-A Hydrology, Water and Environmental Research Centre. URL: <http://ine.uaf.edu> (дата обращения 01.04.2018)
39. Arctic Observatory Network (AON). International Study of Carbon, Water, and Energy Balances in the Terrestrial Arctic. URL: <http://aon.iab.uaf.edu> (дата обращения 01.04.2018)
40. University of Saskatchewan. URL: <http://www.usask.ca> (дата обращения 01.04.2018)
41. CRRC Sites around Canada. URL: <http://www.scottycreek.com> (дата обращения 25.01.2018)
42. Global water futures. URL: <https://gwf.usask.ca/> (дата обращения 01.04.2018)
43. Руководство стоковым станциям. Л.: Гидрометеиздат, 1954. 287 с.
44. Руководство воднобалансовым станциям. Л.: Гидрометеиздат, 1973. 306 с.
45. Макарьева О.М., Лебедева Л.С., Сушанский С.И., Нестерова Н.В. 70 лет Колымской водно-балансовой станции // География и природные ресурсы. 2018. № 1. С. 215.
46. Makarieva O., Nesterova N., Lebedeva L., Sushansky S. Water-balance and hydrology research in a mountainous permafrost watershed in upland streams of the Kolyma River, Russia: a database from the Kolyma Water-Balance Station, 1948–1997 // Earth System Science Data. 2018. V. 10. № 2. P. 689–710.
47. Гидрология заболоченных территорий зоны многолетней мерзлоты Западной Сибири. СПб.: БВМ, 2009. 536 с.
48. Василенко Н.Г. Гидрология рек зоны БАМ: экспедиционные исследования. СПб.: Нестор-История. 2013. 672 с.
49. Практические рекомендации по расчету гидрологических характеристик в зоне хо-
33. Metodicheskie rekomendacii po ocenke odnorodnosti gidrologicheskikh harakteristik i opredelenii ih raschetnykh znachenij po neodnorodnym dannym. Methodical recommendations for assessing the uniformity of hydrological characteristics and determining their calculated values for heterogeneous data. St. Petersburg: Nestor-History, 2010: 162 p. [In Russian].
34. Makarieva O.M., Bel'diman I.N., Lebedeva L.S., Vinogradova T.A., Nesterova N.V. To the question of the validity of the recommendations of SP 33-101-2003 for calculating the characteristics of the maximum runoff of small rivers in the zone of permafrost area (in the order of discussion). Engineering Surveys. 2017, 6–7: 50–63. [In Russian].
35. Vinogradov Iu.B., Vinogradova T.A. Matematicheskoe modelirovanie v gidrologii. Mathematical modeling in hydrology. Moscow: Publishing Center “Akademiya”, 2010: 298 p. [In Russian].
36. Pomeroy J.W., Gray D.M., Brown T. The cold regions hydrological model: a platform for basing process representation and model structure on physical evidence. Hydrol. Process. 2007, 21: 2650–2667.
37. National Science Foundation Long-Term Ecological Research (LTER). Available at: <https://lternet.edu> (accessed 01.04.2018)
38. NPR-A Hydrology, Water and Environmental Research Centre. Available at: <http://ine.uaf.edu> (accessed 01.04.2018)
39. Arctic Observatory Network (AON). International Study of Carbon, Water, and Energy Balances in the Terrestrial Arctic. Available at: <http://aon.iab.uaf.edu> (accessed 01.04.2018)
40. University of Saskatchewan. Available at: <http://www.usask.ca> (accessed 01.04.2018)
41. CRRC Sites around Canada. Available at: <http://www.scottycreek.com> (accessed 25.01.2018)
42. Global water futures, Available at: <https://gwf.usask.ca/> (accessed 01.04.2018)
43. Rukovodstvo stokovym stancijam. Management of flow stations. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1954: 287 p. [In Russian].
44. Rukovodstvo vodnobilansovym stancijam. Management of water balance stations. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1973: 306 p. [In Russian].
45. Makarieva O.M., Lebedeva L.S., Sushchanskii S.I., Nesterova N.V. 70 years of the Kolyma water-balance station. *Geografiia i prirodnye resursy*. Geography and natural resources. 2018, 1: 215 p. [In Russian].
46. Makarieva O., Nesterova N., Lebedeva L., Sushansky S. Water-balance and hydrology research in a mountainous permafrost watershed in upland streams of the Kolyma River, Russia: a database from the Kolyma Water-Balance Station, 1948–1997, Earth System Science Data. 2018, 10 (2): 689–710.

зяйственного освоения БАМа. Л.: Гидрометеиздат. 1986. 180 с.

50. Василенко Н.Г., Херсонский Э.С. Расчет максимальных расходов дождевых паводков в районе трассы БАМ // Труды ГГИ. 1986. Вып. 312. С. 93–104.

51. Виноградов Ю.Б., Виноградова Т.А. Прикладная гидрология. СПб.: СПбГЛТУ, 2014. 196 с.

52. Гарцман Б.И., Шамов В.В. Натурные исследования стокоформирования в Дальневосточном регионе на основе современных средств наблюдений // Водные ресурсы. 2015. № 6. С. 589–599.

53. Фролова Н.Л., Алексеевский Н.И., Жук В.А. Мониторинг гидрологических процессов и обеспечение безопасности водопользования // Природообустройство. 2014. № 3. С. 66–68.

47. *Gidrologija zabolochennyh territorij zony mnogoletnej merzloty Zapadnoj Sibiri*. Hydrology of wetlands in the zone of permafrost in Western Siberia. St. Petersburg: BBM, 2009: 536 p. [In Russian].

48. *Vasilenko N.G. Gidrologija rek zony BAM: jekspedicionnye issledovanija*. Hydrology of the rivers of the BAM zone: expeditionary research. St. Petersburg: Nestor-History, 2013: 672 p. [In Russian].

49. *Prakticheskie rekomendacii po raschetu gidrologicheskikh harakteristik v zone hozjajstvennogo osvoenija BAMA*. Practical recommendations on the calculation of hydrological characteristics in the zone of economic development of the Baikal-Amur Mainline. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1986: 180 p. [In Russian].

50. *Vasilenko N.G., Khersonskii E.S.* Calculation of the maximum expenditure of rain floods in the area of the BAM trail. Trudy GGI. Proceedings of SHI. 1986, 312: 93–104. [In Russian].

51. *Vinogradov Ju.B., Vinogradova T.A. Prikladnaja gidrologija*. Applied hydrology. St. Petersburg: SPbGLTU, 2014: 196 p. [In Russian].

52. *Gartsman B.I., Shamov V.V.* Full-scale studies of stack formation in the Far East region on the basis of modern observational means. *Vodnye resursy*. Water resources. 2015, 6: 589–599. [In Russian].

53. *Frolova N.L., Alekseevskii N.I., Zhuk V.A.* Monitoring of hydrological processes and ensuring the safety of water use. *Prirodoobustroistvo*. Environmental management. 2014, 3: 66–68. [In Russian].

Уважаемые авторы!

Обращаем ваше внимание на то, что с января 2018 года изменились требования к статьям, направляемым в редакцию журнала для рассмотрения возможности их публикации. Это связано с тем, что перед журналом поставлена задача войти в международную базу цитирования данных *Scopus*. В связи с этим ужесточились требования к содержанию и структуре англоязычных аннотаций к статьям, подписям к рисункам, благодарностям. Очень важные изменения коснулись оформления библиографических описаний. Помимо основного списка литературы необходимо подготовить *References* — список литературы, оформленный по правилам международных баз цитирования. Обращаем Ваше внимание, что оба списка формируются не в алфавитном порядке в соответствии с отечественными нормативными документами, а по мере упоминаний в тексте статьи. Будьте внимательны, ссылки в списках оформляются по-разному. Ссылка на документ с подробным описанием требований к статьям приведена в конце настоящих правил.

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ ЖУРНАЛА «ПРОБЛЕМЫ АРКТИКИ И АНТАРКТИКИ»

В журнале публикуются статьи по тематике исследований полярных областей, а также научные сообщения теоретического, методического, экспериментального и прикладного характера, тематические обзоры (по заказу редакции), критические статьи и рецензии, библиографические сводки, хроника научной жизни. 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 подрисовочных 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 «Литература») 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».

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 28.04.2018
Формат 70×100 1/16
Тираж 200

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

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