

Учредитель и издатель: Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова»

Научный рецензируемый журнал

Издаётся с 2001 года (до 1 января 2012 года –
"Вестник Поморского университета"; до 1 января 2017 –
"Вестник Северного (Арктического) федерального университета")
Выходит 4 раза в год

Arctic Environmental Research

Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС77–67711
выдано 10 ноября 2016 года
Федеральной службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий
и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)
Подписной индекс журнала – 38565

Главный редактор Б.Ю. Филиппов

Зам. глав. редактора М.В. Никитина

Отв. секретарь Е.В. Угрюмова

Редакционный совет:

Ж. Биндер (Франция),
К.Г. Боголицын (Россия), В.А. Болотов (Россия),
П.В. Боярский (Россия),
Л. Брайэм (США), И. Брок (Норвегия),
Л.А. Вербицкая (Россия),
В.И. Голдин (Россия), А.В. Головнёв (Россия),
Д.С. Дюррант (Канада),
А.Л. Кудрин (Россия), О.Л. Кузнецов (Россия),
Л. Лаунен (Финляндия), В.И. Павленко (Россия),
В.А. Садовничий (Россия), С.И. Сороко (Россия),
И.Е. Фролов (Россия),
А.Н. Чилингаров (Россия),
О.А. Шпигун (Россия),
Х.-Д. Энгельманн (Германия)

Редакционная коллегия:

В.С. Асланов (Россия),
И.Н. Болотов (Россия), В.П. Гергель (Россия),
С. Гроздев (Болгария),
М.Г. Губайдуллин (Россия),
А.И. Зейфман (Россия), А.И. Малов (Россия),
Е.Н. Наквасина (Россия),
Я. Ниемеля (Финляндия),
А.П. Новоселов (Россия),
В.Н. Попов (Россия), Л.Б. Соколинский (Россия),
Л. Урбаньяк (Польша),
И.В. Хмелинский (Португалия),
О.А. Шпигун (Россия)

**Т. 17, № 3
2017**

СОДЕРЖАНИЕ

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

Булавина А.С. Особенности формирования речного стока в озерно-речных системах водосбора западной части Белого моря..... 161

Краев Г.Н., Ривкина Е.М. Накопление метана в промерзающих и мерзлых почвах криолитозоны..... 173

Панченко Е.Г., Станиловская Ю.В. Спектральный и морфометрический анализ полигонально-жилных структур в Чарской котловине..... 185

Прахова М.Ю., Краснов А.Н., Хорошавина Е.А. Автоматическая система раннего обнаружения гидратообразования в газовых шлейфах на основе когнитивных моделей 195

БИОЛОГИЯ

Гордеев И.И., Микряков Д.В., Силкина Н.И., Микряков В.Р., Бусарова О.Ю. Содержание иммунных комплексов и уровень окислительных процессов в крови и органах гольцов оз. Кроноцкое (п-ов Камчатка)..... 204

Косова А.Л., Денисов Д.Б. Диатомовые комплексы донных отложений оз. Щучье (Хибинский горный массив, Кольский п-ов)..... 212

Кравченко А.В., Пирайнен М.А., Тимофеева В.В. Флора острова Хедостров в Онежской губе Белого моря (Архангельская область)..... 222

СОДЕРЖАНИЕ

Индексируется в: Размещается в:

НАУЧНАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ
БИБЛИОТЕКА
eLIBRARY.RU

РУКОНТ

INFOBASE INDEX

CYBERLENINKA

Crossref

Издательский
дом
ЛАНЬ
www.e.lanbook.com
электронно - библиотечная система

Редактор
А.В. Крюкова

Ведущий редактор
И.В. Кузнецова

Переводчик
Е.Г. Кузнецова

Документовед
Т.Г. Тагаева

Верстка
Е.Б. Красновой

Журнал включен Высшей аттестационной комиссией Министерства образования и науки РФ в Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук

Адрес редакции:

163002, г. Архангельск, наб. Сев. Двины, д. 17
Тел.: +7(8182) 21-61-21
E-mail: vestnik_est@narfu.ru; vestnik@narfu.ru

Подписано в печать 17.10.2017.
Бумага писчая. Формат 84×108 1/16.
Усл. печ. л. 11,55. Уч.-изд. л. 8,44.
Тираж 1000 экз. Заказ № 5546.

Издательский дом имени В.Н. Булатова САФУ
163060, г. Архангельск, ул. Урицкого, д. 56

© САФУ имени М.В. Ломоносова, 2017

Новоселов А.П., Студёнов И.И., Козьмин А.К., Дворян-кин Г.А., Завиша А.Г., Студёнова М.А., Левицкий А.Л. Видовое разнообразие и динамика показателей кормовой базы рыб оз. Лача. Часть 2. Зообентос.....	233
Соболев А.Н., Феклистов П.А. Изменчивость микроклимата в лесных насаждениях Соловецкого архипелага.....	245
Пугачев А.А., Тихменев Е.А. Консервация растительного органического вещества и почвообразование в экосистемах зональных тундр Крайнего Северо-Востока Азии.....	255
К сведению авторов.....	265

Founder: Federal State Autonomous Educational Institution
of Higher Education "Northern (Arctic) Federal University
named after M.V. Lomonosov"



Registration certificate ПИ no. ФС 77-67711
issued on November 10, 2016 by the Federal
Service for Supervision in the Sphere
of Communications, Information Technology and
Mass Communications (Roskomnadzor)
Subscriptional index of the journal – 38565

Vol. 17, no. 3
2017

CONTENTS

Editor in Chief **B.Yu. Filippov**

Deputy Chief Editor **M.V. Nikitina**

Executive Secretary **E.V. Ugryumova**

Editorial Board:

G. Binder (France), K.G. Bogolitsyn (Russia),
V.A. Bolotov (Russia), P.V. Boyarskiy (Russia),
L. Brigham (USA), I. Broch (Norway),
L.A. Verbitskaya (Russia),
V.I. Goldin (Russia), A.V. Golovnev (Russia),
J.S. Durrant (Canada),
A.L. Kudrin (Russia), O.L. Kuznetsov (Russia),
L. Lajunen (Finland),
V.I. Pavlenko (Russia), V.A. Sadovnichiy (Russia),
S.I. Soroko (Russia), I.E. Frolov (Russia),
A.N. Chilingarov (Russia), O.A. Shpigun (Russia),
H.-D. Engelmann (Germany)

Editorial Panel:

V.S. Aslanov (Russia),
I.N. Bolotov (Russia), V.P. Gergel' (Russia),
S. Grozdev (Bulgaria),
M.G. Gubaidullin (Russia), A.I. Zeyfman (Russia),
A.I. Malov (Russia),
E.N. Nakvasina (Russia), J. Niemela (Finland),
A.P. Novoselov (Russia),
V.N. Popov (Russia), L.B. Sokolinskiy (Russia),
L. Urbaniak (Poland),
I.V. Khmelinsky (Portugal),
O.A. Shpigun (Russia)

GEOSCIENCES

Bulavina A.S. Features of River Runoff Formation in the Lake-
River Water Collection Systems in the Western Part of the White
Sea..... 161

Kraev G.N., Rivkina E.M. Accumulation of Methane in
Permafrost-Affected Soils of Cryolithozone..... 173

Panchenko E.G., Stanilovskaya Yu.V. Spectral and Morphometric
Analysis of Polygonal Wedge Structures in the Chara Basin..... 185

Prakhova M.Yu., Krasnov A.N., Khoroshavina E.A. Automatic
Early Detection System of Hydrate Formation in Gas Plumes Based
on Cognitive Models..... 195

BIOLOGY

**Gordeev I.I., Mikryakov D.V., Silkina N.I., Mikryakov V.R.,
Busarova O.Yu.** Content of Immune Complexes and the Level
of Oxidative Processes in Blood and Organs of Chars in the
Kronotskoe Lake (Kamchatka Peninsula)..... 204

Kosova A.L., Denisov D.B. Diatom Assemblages of the Lake
Shchuchye Bottom Sediments (Khibini Mountain Group, Kola
Peninsula)..... 212

Kravchenko A.V., Piirainen M.A., Timofeeva V.V. Flora of
Khedostrov Island in Onega Bay of the White Sea (Arkhangelsk
Region)..... 222

CONTENTS

Indexed in:

НАУЧНАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ
БИБЛИОТЕКА
eLIBRARY.RU

INFOBASE INDEX

Crossref

Included in:

РУКОИТ

CYBERLENINKA

www.e.lanbook.com
ЛАНБ
электронно-библиотечная система

Editor

A.V. Kryukova

Managing Editor

I.V. Kuznetsova

Translator

E.G. Kuznetsova

Document Manager

T.G. Tagaeva

Make-up by

E.B. Krasnova

The journal is included by the Higher Attestation Commission of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation in the list of Russian reviewed scientific journals, in which major scientific results of theses for academic degrees of doctor and candidate of science have to be published

Editorial office address:

Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17,
Arkhangelsk, 163002, Russian Federation
Phone: +7 (8182) 21-61-21

E-mail: vestnik_est@narfu.ru; vestnik@narfu.ru

Signed in print 17.10.2017.

Writing paper. Format 84x108 ¹/₁₆.

Conv. printer's sh. 11.55.

Acad. publ. sh. 8.44.

Circulation 1000 copies. Order № 5546.

NArFU Publishing House

named after V.N. Bulatov

56, ul. Uritskogo, Arkhangelsk, 163060,
Russian Federation

© NArFU named after M.V. Lomonosov, 2017

Novoselov A.P., Studenov I.I., Koz'min A.K., Dvoryankin G.A., Zavisha A.G., Studenova M.A., Levitskiy A.L. Species Diversity and Dynamics of the Fish Fodder Base Indicators of the Lacha Lake. Part 2. Zoobenthos.....	233
Sobolev A.N., Feklistov P.A. Microclimate Variability in Forest Stands of the Solovetsky Archipelago.....	245
Pugachev A.A., Tikhmenev E.A. Conservation of Plant Organic Matter and Soil Formation in Ecosystems of Zonal Tundra of Extreme Northeast Asia.....	255
Note to Authors.....	265

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ РЕЧНОГО СТОКА В ОЗЕРНО-РЕЧНЫХ СИСТЕМАХ ВОДОСБОРА ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ БЕЛОГО МОРЯ

*А.С. Булавина**

*Мурманский морской биологический институт Кольского научного центра РАН
(г. Мурманск)

Рассмотрен гидрологический режим озерно-речных систем водосбора западной части Белого моря. Исследовано влияние искусственного регулирования и изменений климата на гидрологический режим рек региона на основе анализа длительных рядов наблюдений (1931–1996 годы) за основными гидрологическими характеристиками. Гидроэнергетическое освоение рек региона привело к увеличению меженного стока и сокращению доли стока за половодье в среднегодовом стоке воды. Этому также способствовали изменения климата, происходившие в регионе. На территории водосбора западной части Белого моря в исследуемый период наблюдалось повышение среднегодовых температур и увеличение годового количества осадков. При этом наиболее значительное повышение температур и увеличение количества осадков происходило в холодное полугодие, способствуя частичной «сработке» снежного покрова в зимний период. На территории водосбора Белого моря в исследуемом периоде отмечалась фаза повышенной водности и общей увлажненности. Положительные тренды среднегодовых расходов воды были отмечены на всех реках рассматриваемого региона. Согласно оценкам Государственного гидрологического института, рост средних годовых температур и увеличение количества осадков продолжают и в настоящее время. Учитывая сохранение отмеченных климатических тенденций, можно предположить дальнейшее сглаживание сезонных колебаний стоковых характеристик. Вычислены коэффициенты условного водообмена для крупных озер и водохранилищ региона. Большинство водоемов характеризуются слабым внешним водообменом, а значит, способны ассимилировать значительное количество загрязняющих веществ, в т. ч. антропогенного происхождения. Большое количество таких озер, расположенных на водосборах рек, может значительно снизить поступление твердого стока и растворенных химических веществ в море.

Ключевые слова: гидрологический режим, бассейн Белого моря, внутригодовое распределение стока, изменчивость речного стока, условный водообмен, проточность озер.

Контактное лицо: Булавина Александра Сергеевна, адрес: 183010, г. Мурманск, ул. Владимирская, д. 17;
e-mail: bulavina@mmbi.info

Для цитирования: Булавина А.С. Особенности формирования речного стока в озерно-речных системах водосбора западной части Белого моря // Arctic Environmental Research. 2017. Т. 17, № 3. С. 161–172. DOI: 10.17238/issn2541-8416.2017.17.3.161

Пространственно-временная изменчивость речного стока – один из важнейших факторов воздействия на гидрологические и гидроэкологические условия Белого моря. Для Белого моря характерны значительные различия между отдельными частями акватории, обусловленные большой протяженностью с севера на юг (более 500 км), расчлененностью моря, морфометрическими особенностями его частей, неравномерностью распределения речного стока, местными особенностями климата и циркуляции вод. К.М. Дерюгин писал: «...гидрологический режим Белого моря настолько многогранен, что почти для каждого небольшого района надо устанавливать его особо»¹.

В настоящей работе рассматривается водосбор западной части Белого моря, включающей в себя Кандалакшский и Онежский заливы, а также часть акватории Бассейна, ограниченную на востоке линией мыс Горболукский – мыс Лудошный (рис. 1). Для подтверждения необходимости отдельного рассмотрения во-



Рис. 1. Белое море и его водосбор: 1 – Кандалакшский залив; 2 – Онежский залив; 3 – западная часть акватории Бассейна

досборов западной и восточной частей моря и демонстрации различий в условиях формирования речного стока приводятся некоторые характеристики рек водосбора восточной части моря. Цель исследования – определение особенностей формирования речного стока в озерно-речных системах водосбора западной части Белого моря для последующего анализа воздействия стока на водную среду и экосистему Белого моря.

Водосбор западной части моря выделен и рассмотрен в качестве самостоятельного объекта на основании ряда признаков:

1. Особенности гидрографической сети региона. Если на водосборе восточной части моря сток сосредоточен в крупных реках (Северной Двине, Мезени) и озерность незначительна, то в бассейне западной части реки в той или иной степени зарегулированы озерами и водохранилищами, что сказывается на распределении водных запасов, распространении загрязняющих веществ и самоочищении вод [1]. В данной работе поставлена задача оценки влияния большого количества проточных озер, расположенных на реках исследуемого водосбора, на формирование и внутригодовое распределение стока. Различия в объеме стока в западную и восточную части моря и в его внутригодовом распределении существенны, и их следует учитывать при изучении влияния речного стока на экосистему Белого моря.

2. Относительная изолированность водных масс западной части Белого моря в связи с направлением морских течений. В Горле Белого моря смешиваются воды, поступающие из Баренцева и Белого морей. В результате в Горле температура и соленость вод от поверхности до дна почти одинаковы, а на границе Горла с Бассейном формируется гидрологический фронт [2].

Годовой объем речного стока с водосбора достигает 4 % от общего объема Белого моря [3]. Большой объем речного стока существенно влияет на гидрологические процессы, происхо-

¹Дерюгин К.М. К гидрологии Белого моря // Зап. по гидрографии. 1923. Т. 47. С. 35–80.

дящие в западной части моря. Летом сточное течение, имеющее северо-восточное направление, довольно интенсивно и препятствует проникновению вод из Горла в Бассейн. Зимой же сток рек уменьшается и, как результат, несколько ослабевает сточное и активизируется питающее юго-западное течение, водные массы из Горла попадают в Бассейн.

3. Особенности геологического строения водосбора западной части моря. Водосбор Белого моря лежит в пределах двух крупных геологических структур: Фенноскандинавского щита, в составе которого доминируют кристаллические породы архейского возраста, и Русской плиты, сложенной преимущественно осадочными образованиями карбона, перми и мезозоя. Причем западная часть водосбора практически целиком приурочена к Фенноскандинавскому щиту, что обуславливает характер и определяет густоту озерно-речной сети, а также влияет на состав и геохимические особенности донных отложений [4].

Исходя из вышесказанного, к водосбору западной части Белого моря были отнесены реки, для которых соблюдаются следующие условия: 1) озерное регулирование; 2) принадлежность к водосбору Бассейна, Кандалакшского или Онежского заливов; 3) приуроченность к Фенноскандинавскому щиту.

Границы водосбора западной части Белого моря по суше были проведены по границам водосборов самых восточных из рассматриваемых рек – Умбы и Онеги. Принадлежность р. Умбы к водосбору западной части моря не вызывает сомнений: является озерно-речной системой, располагается полностью в пределах Фенноскандинавского щита, впадает в Кандалакшский залив. Река Онега совмещает в себе характеристики рек западной и восточной частей водосбора: сток реки находится под воздействием озер только в верхнем течении,

частично формируется в пределах Фенноскандинавского щита; река впадает в Онежский залив, отличающийся ограниченным водообменом. Несмотря на то, что первые два условия соблюдены для р. Онеги лишь частично, принадлежность к бассейну Онежского залива имеет в данном случае решающее значение. Между Бассейном и Онежским заливом происходит постоянный водообмен, тогда как проникновение в залив вод из Двинского залива и Горла сильно затруднено [5].

Материалы и методы. Для оценки гидрологического режима озерно-речных систем бассейна западной части Белого моря использовали материалы Государственного водного кадастра, российские и международные базы гидрометрических данных², а также сведения из [6]. К анализу принимали материалы по водосборам рек: Онега, Выг, Кереть, Кемь, Ковда, Нива и Умба, выбранным в качестве репрезентативных, и питающих их озер. Рассматривали данные по изменению характеристик годового и месячного стока указанных рек за период продолжительностью 65 лет (1931–1996 годы), а также морфометрические данные и характеристики водного баланса озер и их водосборных бассейнов³.

По данным наблюдений гидрологической сети рассчитывали годовые и месячные нормы стока для указанных рек, а также средние годовые и месячные значения расходов воды. Для выявления тенденций к увеличению или снижению среднего годового и месячного стока проводили оценку линейных трендов.

Полученные результаты по изменению характеристик стока сопоставляли с особенностями климатического режима. Для статистического анализа климатического режима водосбора западной части Белого моря использовали данные наблюдений, проведенных на метеорологических станциях Северо-Западного, Северного и Мурманского управлений по

²Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Арктический и антарктический научно-исследовательский институт. URL: <http://www.aari.ru/dept/science/hydrology/Hydro.htm> (дата обращения: 15.09.2017).

³Озера Карелии: справ. / под ред. Н.Н. Филагова, В.И. Кухарева. Петрозаводск, 2013. 464 с.

гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, которые расположены на исследуемом водосборе, за период 1931–2005 годов. Для расчета средних годовых значений температуры и осадков по водосбору применяли метод тяготеющих площадей (полигонов Тиссена). В качестве входных точек были выбраны метеостанции Кандалакша, Кемь, Реболы, Калева-ла, Онега и Умба.

Результаты и обсуждение. Общая площадь водосбора Белого моря составляет 720 тыс. км², его протяженность – свыше 1000 км с севера на юг и около 900 км с запада на восток [2]. Площадь водосбора западной части Белого моря (в указанных границах) равна 191 тыс. км².

Территория водосбора расположена в пределах атлантико-арктической зоны умеренного пояса. Большое влияние на климат региона оказывают циркуляционные процессы атмосферы над Атлантико-Европейским сектором Северного полушария. В середине 1970-х годов наблюдалось усиление циклонических процессов над Северной Атлантикой, в связи с чем со второй половины 1970-х годов отмечено некоторое повышение среднегодовой температуры [7]. Интенсивное и статистически значимое повышение среднегодовой температуры приземного воздуха произошло на территории питания озерно-речных систем западной части бассейна Белого моря. Рост температуры (средней по водосбору западной части Белого моря) составил 0,53 °C/10 лет. При этом увеличение средних температур воздуха за холодный период несколько выше (0,45–0,60 °C/10 лет). Средние температуры воздуха за теплый период также имеют тенденцию к увеличению (0,38–0,58 °C/10 лет). Полученные результаты близки к данным, характерным для всего водосбора Белого моря [8].

За 1976–1996 годы установлено также и некоторое увеличение годовых сумм осадков над водосбором Белого моря (0,24 мм/мес. · 10 лет). Незначительные отрицательные тренды можно

отметить в теплое полугодие (часто тренд вообще отсутствует), а положительные – в холодное полугодие (0,73 мм/мес. · 10 лет). Увеличение количества осадков в холодное полугодие статистически более значимо⁴. Таким образом, на территории водосбора западной части Белого моря отмечается фаза повышенной водности и общей увлажненности. Согласно оценкам Государственного гидрологического института, можно ожидать дальнейшего роста количества осадков на территории питания рек бассейна Белого моря [9, 10].

Рассмотрим специфику гидрологического режима озерно-речных систем водосбора западной части Белого моря.

Главными озерно-речными системами рассматриваемого региона являются системы рек Ковда (длина 233 км, площадь водосбора 26 100 км², озерность 16 %), Кемь (194 км, 27 700 км², 10 %) и Выг (Беломоро-Балтийский канал) (237 км, 27 100 км², 14 %). Длина озер, входящих в эти системы, достигает 67 % от общей длины озерно-речных систем. Среди рек рассматриваемого региона выделяется р. Онега, имеющая малую озерность (2 %).

Размещение крупных озер на водосборе обуславливает водность рек. Можно выделить три основных типа размещения крупных озер на водосборе и по долине главной реки [6]: 1) верховой – главные крупные озера лежат в верхней части водосбора, замыкая собой от 1/3 до 1/2 всего бассейна; 2) каскадный – озера равномерно распределены по длине главной реки; 3) низовой – главное озеро лежит в нижней части бассейна, и река, вытекая из него, представляет собой короткий сточный канал.

В самом общем виде, без учета иных особенностей, кроме размещения озер на водосборе реки, должна наблюдаться следующая картина. При верховом расположении озер их регулирующее влияние в нижнем течении не ощущается, и в замыкающем створе наблюдается ярко выраженная сезонность расходов

⁴Государственный доклад «О состоянии и использовании водных ресурсов Российской Федерации в 2009 году». М., 2010. 288 с.

воды. Обратная ситуация складывается при низовом расположении озер, когда в верхнем и среднем течении ярко выражена сезонность стока, а в замыкающем створе распределение стока в течение года более равномерно. При каскадном расположении озер сток распределен в течение года практически равномерно на всем протяжении реки. Исследуемые реки были разделены по типам размещения озер на водосборе (табл. 1).

Так как большинство крупных рек водосбора западной части Белого моря в той или иной степени искусственно зарегулированы, особое значение для понимания характера изменений стока в связи с климатическими процессами имеют более мелкие, но не подвергшиеся искусственной регуляции озерно-речные системы. Одной из таких систем является система р. Керети. По данным наблюдений 1931–1965 годов самыми многоводными месяцами

Таблица 1

**ТИПЫ РАЗМЕЩЕНИЯ ОЗЕР НА ВОДОСБОРАХ РЕК БАССЕЙНА
ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ БЕЛОГО МОРЯ**

Речной бассейн	Крупные озера и водохранилища	Тип озерно-речной системы
Умба	Умбозеро, Канозеро	Каскадный
Нива	Имандра, Пинозеро, Плесозеро	Низовой
Кемь	Юшкозерское, Кривопорожское, Подужемское, Путкинское	Верховой
Ковда	Кумское, Иовское, Княжегубское	Каскадный
Кереть	Кереть	Верховой
Онега	Лача, Воже	Верховой
Выг	Выгозеро, Сегозеро, Ондозеро, Линдозеро	Верховой

На режим рек влияет также ряд других факторов, наиболее существенными являются различия в климате истока и устья. Река Умба имеет субмеридиональное направление течения. Длина р. Умбы составляет 123 км. В верхнем течении реки самыми многоводными являются летние месяцы. На три летних месяца приходится 33 % от годового стока, при этом самый многоводный месяц – июль (16 % от годового). Это связано с установлением стабильных температур выше 0 °С лишь в июне и поздним началом таяния снежного покрова. В мае кратковременные оттепели слегка увеличивают сток (7 % от годового). Устье реки находится значительно южнее ее истока, здесь раньше устанавливаются положительные температуры воздуха, и половодье сдвигается на более ранние месяцы. Максимальные расходы воды наблюдаются с мая по июль. Майский сток составляет 16 % от годового.

для р. Керети были май, июнь и июль (22, 14 и 10 % от годового стока соответственно), самыми маловодными – январь, февраль, март. В период наблюдений с 1966 по 1988 годы заметно увеличение стока р. Керети в холодное полугодие, что соответствует установленному повышению количества осадков в это время. Уменьшился сток за половодье. Майский сток составил всего 18 % от годового по сравнению с 22 % в предыдущий период наблюдений (1931–1965 годы), что связано с частичной «сработкой» снежного покрова во время зимних оттепелей. Июльский сток увеличился на 7 % благодаря обильным летним ливневым осадкам, наблюдавшимся в эти годы.

Существуют также различия в распределении стока р. Керети внутри года в маловодные и многоводные годы. Различия в месячном стоке в процентах от годового в годы с различной водностью по данным [6] показав-

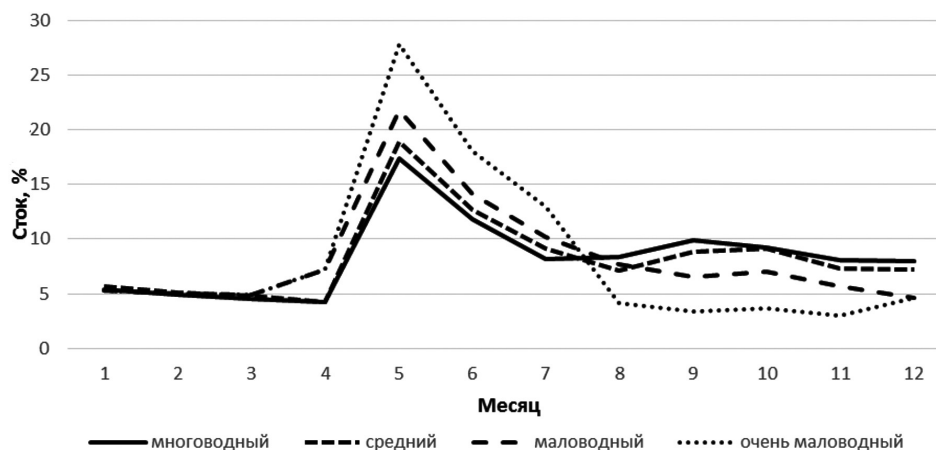


Рис. 2. Распределение стока р. Керети по месяцам в процентах от годового в годы с различной водностью (за период 1931–1996 годов)

ны на рис. 2. В очень маловодные годы сильнее выражены весеннее половодье и межень. С увеличением водности года сглаживается годовой ход распределения стока. Это связано с тем, что многоводные годы в регионе в период с 1931 по 1996 годы были также наиболее теплыми в череде лет из-за интенсификации циркуляционных процессов в Северной Атлантике. Господствующие атлантические воздушные массы приносят как влагу, так и тепло. Все это способствует таянию снежного покрова в зимний период, т. е. увеличению меженного стока и уменьшению стока в половодье.

На реках Нива, Ковда, Кемь и Выг построены и функционируют каскады ГЭС. Облик этих рек сильно изменен человеком, а сток жестко контролируется на каждом отрезке реки. Это приводит к более равномерному распределению стока в течение года, менее выраженным периодам половодья и межени, появлению экстремально высоких или экстремально низких показателей расхода воды, нетипичных для сезона года.

Например, сток р. Ковды за период наблюдений (1931–1996 годы) имел тенденцию к росту, что объясняется общим увеличением водности

на водосборе Белого моря. Однако обращают на себя внимание экстремально низкие или экстремально высокие показатели среднего расхода воды в некоторые месяцы, сильно отличающиеся от нормальных и не имеющие корреляционных зависимостей с климатическими показателями, такими как количество осадков и температура. Наиболее существенное отличие внутригодового распределения стока от нормальных показателей наблюдалось в 1961 и 1982 годах. В 1961 году аномально низкий расход воды отмечался с января по июль. Это не может быть объяснено малым количеством осадков или аномально высокими температурами. Весь 1961 год был годом повышенной водности. Среднее месячное количество осадков на территории водосбора реки во все месяцы 1961 года было несколько выше многолетних норм. Температуры воздуха в период аномально низких расходов воды также не превышали средних многолетних. Столь значительное снижение расходов воды может быть объяснено лишь искусственным удержанием воды в водохранилище. В 1982 году создалась обратная ситуация, когда наблюдалось аномальное увеличение стока реки в мае и июне. Средний расход

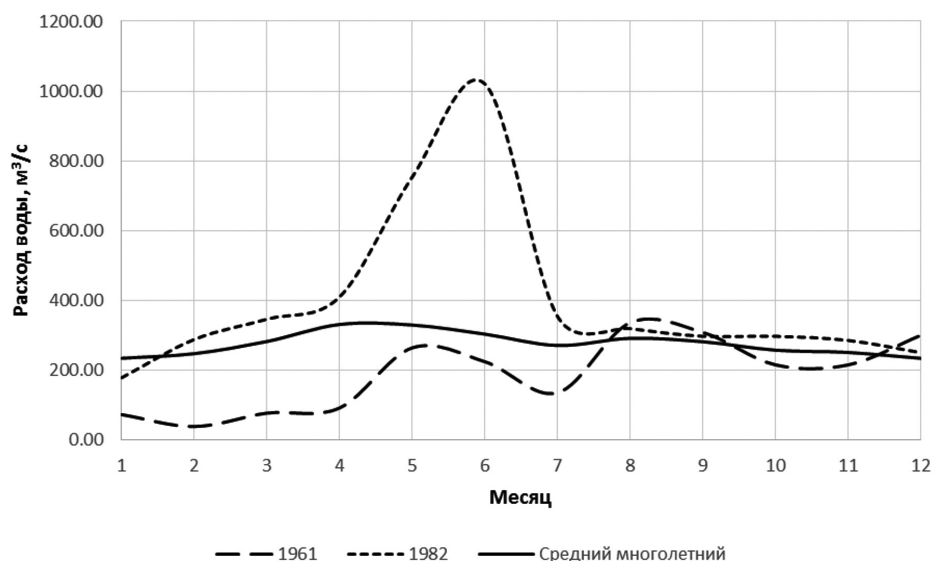


Рис. 3. Распределение внутригодовых расходов воды р. Ковды в районе Князегубской ГЭС в 1961 и 1982 годах в сравнении со среднемноголетним распределением

воды в июне 1982 года составил $1020 \text{ м}^3/\text{с}$ при норме $303 \text{ м}^3/\text{с}$ (рис. 3). При этом в 1982 году аномально высокого количества осадков или низких температур, существенно снижающих потери воды на испарение, в летние месяцы не наблюдалось.

В отличие от экстремальных значений расхода воды в отдельные месяцы, искусственность которых не вызывает сомнения, незначительное перераспределение стока внутри годовых интервалов трудно поддается оценке. Воздействия на сток искусственной регуляции и различных климатических колебаний могут иметь как схожий, так и разнонаправленный характер, что затрудняет определение причин изменений стока.

Наряду с искусственной регуляцией рек увеличению зимнего и уменьшению весеннего стока также способствуют современные климатические тенденции (повышение среднегодовой температуры, участвовавшие зимние оттепели, увеличение количества жидких осадков в холодное полугодие).

С начала 1990-х годов на водосборе Белого моря несколько возрос объем среднегодовых осадков, что привело к увеличению водности рек. Положительные тренды среднегодовых расходов воды в период с 1931 по 1996 годы отмечаются на всех реках рассматриваемого региона.

Для оценки пресноводного стока с территории бассейнов западной и восточной частей Белого моря был оценен суммарный сток наиболее крупных рек. Считая условия формирования речного стока в западной и восточной частях водосбора Белого моря однородными, в их границах произвели осреднение стоковых характеристик. Это позволило определить объем стока с неучтенных территорий, расположенных между бассейнами крупных рек. Средний по бассейну расход воды был найден как произведение модуля стока и площади неизученной территории. Из полученного среднего расхода воды был вычислен и переведен в кубические километры годовой сток. Модуль стока для рек с искусственным регулирова-

нием рассчитывали по стандартной методике, принимая, что в многолетнем цикле искусственное регулирование не оказывает влияния на его значение.

Суммарный сток с неучтенных территорий бассейна западной части Белого моря по расчетным данным составляет 7,69 км³, восточной части – 20,14 км³ (табл. 2).

По данным работы [2], суммарный сток рек в Белое море 240 км³/год, что несколько выше рассчитанного нами – 227,25 км³/год. Это различие можно объяснить использованием нами более ранних данных о стоке рек и увеличением водности региона в текущем климатическом периоде. В более ранней работе, посвященной

Белому морю [3], суммарный годовой сток в Белое море с территории его водосбора был оценен в 225 км³.

Около 60 % (35,61 км³/год) речного стока с западной части водосбора Белого моря приходится на мелководный Онежский залив, 34 % (19,83 км³/год) выносится в Кандалакшский залив и лишь 6 % (3,57 км³/год) попадает напрямую в Бассейн.

На западную часть Белого моря приходится 26 % от всего речного стока в Белое море, на восточную – 74 %, что полностью соответствует соотношению площадей водосборов западной и восточной частей моря. Но если в восточной части моря сток имеет

Таблица 2

**ПЛОЩАДИ ВОДОСБОРОВ РЕК БАСЕЙНА БЕЛОГО МОРЯ
И ИХ ВКЛАД В ВЕЛИЧИНУ ГОДОВОГО СТОКА**

Река	Площадь водосбора, км ²	Годовой сток в море, км ³	Доля от общего объема стока в море, %
<i>Водосбор западной части Белого моря</i>			
Умба	6 250	2,47	1,09
Нива	12 800	5,17	2,28
Ковда	26 100	8,69	3,82
Кемь	27 700	8,82	3,88
Кереть	3 660	0,94	0,41
Калга	1 590	0,32	0,14
Воньга	2 580	0,69	0,30
Шуя	938	0,26	0,11
Выг	27 100	8,27	3,64
Онега	56 900	15,69	6,90
Другие	25 382	7,69	3,38
<i>Итого</i>	191 000	59,01	25,97
<i>Водосбор восточной части Белого моря</i>			
Северная Двина	357 000	108,15	47,59
Мезень	78 000	28,00	12,32
Поной	15 500	5,32	2,34
Кулой	19 000	6,63	2,92
Другие	59 500	20,14	8,86
<i>Итого</i>	529 000	168,24	74,03

большие сезонные различия, то в его западной части сток распределяется более равномерно в течение года, т. к. большой объем вод сосредоточен в озерах. Для крупных озер и водохранилищ, расположенных на во-

досборе западной части Белого моря, были рассчитаны коэффициенты условного водообмена (с использованием данных справочника «Озера Карелии»⁵), результаты вычислений представлены в табл. 3.

Таблица 3

**ХАРАКТЕР ВОДООБМЕНА В КРУПНЫХ ОЗЕРАХ И ВОДОХРАНИЛИЩАХ
ВОДОСБОРА ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ БЕЛОГО МОРЯ**

Озеро/водохранилище	Площадь зеркала, км ²	Коэффициент условного водообмена	Класс (по [11])
<i>Бассейн р. Умбы</i>			
Умбозеро	313	0,53	Слабопроточное (аккумулятивное)
Канозеро	84,3	4,18	Слабопроточное (аккумулятивно-транзитное)
<i>Бассейн р. Нивы</i>			
Имандра	876	0,47	Слабопроточное (аккумулятивное)
Пинозеро	13,6	–	–
Плесозеро	–	–	–
<i>Бассейн р. Ковды</i>			
Кумское	1910	0,65	Слабопроточное (аккумулятивное)
Иовское	294	4,22	Слабопроточное (аккумулятивно-транзитное)
Князегубское	608	2,53	Слабопроточное (аккумулятивно-транзитное)
<i>Бассейн р. Кемы</i>			
Нижнее Куйто	141	3,10	Слабопроточное (аккумулятивно-транзитное)
Среднее Куйто	257	1,32	Слабопроточное (аккумулятивно-транзитное)
Верхнее Куйто	240	1,28	Слабопроточное (аккумулятивно-транзитное)
Кривопорожское	69,9	–	–
Подужемское	12	406,50	Сильнопроточное (транзитное)
<i>Бассейн р. Керети</i>			
Кереть	223	0,38	Слабопроточное (аккумулятивное)
<i>Бассейн р. Выг</i>			
Выгозеро	1251	0,79	Слабопроточное (аккумулятивное)
Сегозеро	815	0,10	Слабопроточное (аккумулятивное)
Ондозеро	182	1,32	Слабопроточное (аккумулятивно-транзитное)
Линдозеро	45,3	20,70	Умеренно-проточное (транзитно-аккумулятивное)
<i>Бассейн р. Онеги</i>			
Лача	356	7,40	Слабопроточное (аккумулятивно-транзитное)
Воже	422	3,50	Слабопроточное (аккумулятивно-транзитное)

⁵Озера Карелии: справ.

Выводы

1. Обосновано выделение западной части водосбора Белого моря по совокупности гидрологических, океанологических и геологических признаков.

2. Основная особенность изменений режима озерно-речных систем западной части бассейна Белого моря за период с 1931 по 1996 годы заключается в изменении распределения стока внутри года. Сокращение доли стока за половодье в среднегодовом стоке воды является как следствием климатических тенденций, так и результатом искусственной регуляции рек. При сохранении отмеченных климатических тенденций можно ожидать дальнейшего увеличения объемов меженного стока и снижения объемов стока за половодье.

3. Анализ условий водообмена в озерно-речных системах бассейна западной части Белого моря показал, что на водосборах исследуемых рек преобладают слабопроточные (аккумулятивно-транзитные и аккумулятивные) озера. Слабый внешний водообмен является одним из факторов, способствующих накоплению и преобразованию в озерах различных растворенных и взвешенных веществ, в т. ч. антропогенного происхождения. Большое количество таких озер, расположенных на водосборах рек, может значительно снизить поступление твердого стока и растворенных химических веществ в море [11, 12]. Полученные данные могут быть использованы для оценки уязвимости экосистемы Белого моря.

Список литературы

1. *Дмитриева В.А.* Географо-гидрологическая оценка водных ресурсов субъекта Российской Федерации в условиях меняющегося климата и хозяйственной деятельности (на примере Воронежской области): автореф. дис. ... д-ра геогр. наук. Воронеж, 2012. 47 с.
2. Белое море и его водосбор под влиянием климатических и антропогенных факторов / под ред. Н.Н. Филатова, А.Ю. Тержевика. Петрозаводск, 2007. 335 с.
3. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 2. Белое море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия / под ред. Б.Х. Глуховского. Л., 1991. 240 с.
4. *Маслов А.* Морской вектор геологических исследований // Наука Урала: газ. Урал. отд-ния РАН. 2011. № 29–30 (декабрь).
5. *Бабков А.И.* Гидрология Белого моря. СПб., 1998. 94 с.
6. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 3. Северный край / под ред. И.М. Жила, Н.М. Алюшинской. Л., 1972. 302 с.
7. *Назарова Л.Е., Толстиков А.В., Филатов Н.Н.* Климатические особенности водосбора Белого моря // Климат Карелии: изменчивость и влияние на водные объекты и водосборы. Петрозаводск, 2004. С. 114–129.
8. *Смирнова А.И., Терзиев Ф.С., Яковлева Н.П., Арсенчук М.О.* Закономерности разномасштабной изменчивости элементов гидрометеорологического режима Белого моря, фоновые оценки их колебаний на современном этапе // Проблемы изучения, рационального использования и охраны природных ресурсов Белого моря: материалы VIII регион. науч.-практ. конф. Беломорск, 2001. С. 22–29.
9. Водные ресурсы России и их использование / под ред. И.А. Шикломанова. СПб., 2008. 598 с.
10. *Шикломанов И.А., Георгиевский В.Ю.* Влияние климатических изменений на водные ресурсы и водный режим рек России // Тез. докл. Всемир. конф. по изменению климата (Москва, 29 сент. – 3 окт. 2003 г.). М., 2004. С. 250.
11. *Богословский Б.Б., Филь С.А.* Классификация водоемов по внешнему водообмену // Географо-гидрологический метод исследования вод суши. М., 1984. С. 54–60.
12. *Богословский Б.Б.* О водообмене и водных массах водных объектов // Круговорот вещества и энергии в озерных водоемах. Новосибирск, 1975. С. 270–275.

References

1. Dmitrieva V.A. *Geografo-gidrologicheskaya otsenka vodnykh resursov sub"ekta Rossiyskoy Federatsii v usloviyakh menyayushchegosya klimata i khozyaystvennoy deyatel'nosti (na primere Voronezhskoy oblasti): avtoref. dis. ... d-ra geogr. nauk* [Geographical and Hydrological Assessment of Water Resources of a Subject of the Russian Federation in the Conditions of a Changing Climate and Economic Activity (the Case of the Voronezh Region): Dr. Geogr. Sci. Diss. Abs.]. Voronezh, 2012. 47 p.
2. *Beloe more i ego vodosbor pod vliyaniem klimaticheskikh i antropogennykh faktorov* [The White Sea and Its Watershed under the Influence of Climatic and Anthropogenic Factors]. Ed. by N.N. Filatov, A.Yu. Terzhevnik. Petrozavodsk, 2007. 335 p. (In Russ.)
3. *Gidrometeorologiya i gidrokhimiya morey SSSR. T. 2. Beloe more. Vyp. 1. Hidrometeorologicheskie usloviya* [Hydrometeorology and Hydrochemistry of the USSR Seas. Vol. 2. The White Sea. Iss. 1. Hydrometeorological Conditions]. Ed. by B.Kh. Glukhovskiy. Leningrad, 1991. 240 p. (In Russ.)
4. Maslov A. Morskoy vektor geologicheskikh issledovaniy [Marine Vector of Geological Research]. *Nauka Urala: gaz. Ural. otd-niya RAN* [Science of the Urals: Newspaper of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences], 2011, no. 29–30 (December).
5. Babkov A.I. *Gidrologiya Belogo morya* [Hydrology of the White Sea]. Saint Petersburg, 1998. 94 p. (In Russ.)
6. *Resursy poverkhnostnykh vod SSSR. T. 3. Severnyy kray* [Resources of Surface Waters of the USSR. Vol. 3. The Northern Territory]. Ed. by I.M. Zhil, N.M. Alyushinskaya. Leningrad, 1972. 302 p. (In Russ.)
7. Nazarova L.E., Tolstikov A.V., Filatov N.N. Klimaticheskie osobennosti vodosbora Belogo morya [Climatic Features of Catchment of the White Sea]. *Klimat Karelii: izmenchivost' i vliyanie na vodnye ob"ekty i vodosbory* [Climate of Karelia: Variability and Impact on Water Bodies and Catchments]. Petrozavodsk, 2004, pp. 114–129. (In Russ.)
8. Smirnova A.I., Terziev F.S., Yakovleva N.P., Arsenchuk M.O. Zakonomernosti raznomasshtabnoy izmenchivosti elementov gidrometeorologicheskogo rezhima Belogo morya, fonovye otsenki ikh kolebaniy na sovremennom etape [Patterns of the Various-Scale Variability of Hydrometeorological Regime Elements of the White Sea, Background Estimates of Their Fluctuations at the Present Stage]. *Problemy izucheniya, ratsional'nogo ispol'zovaniya i okhrany prirodnykh resursov Belogo morya: materialy VIII region. nauch.-prakt. konf.* [Problems of Studying, Rational Use and Protection of Natural Resources of the White Sea: Proc. 8th Reg. Sci. Pract. Conf.]. Belomorsk, 2001, pp. 22–29. (In Russ.)
9. *Vodnye resursy Rossii i ikh ispol'zovanie* [Water Resources of Russia and Their Use]. Ed. by I.A. Shiklomanov. Saint Petersburg, 2008. 598 p. (In Russ.)
10. Shiklomanov I.A., Georgievskiy V.Yu. Vliyanie klimaticheskikh izmeneniy na vodnye resursy i vodnyy rezhim rek Rossii [The Impact of Climate Changes on Water Resources and the Water Regime of the Russian Rivers]. *Tez. dokl. Vsemir. konf. po izmeneniyu klimata (Moskva, 29 sent. – 3 okt. 2003 g.)* [Proc. World Conf. on Climate Change (Moscow, September 29 – October 3, 2003)]. Moscow, 2004, p. 250. (In Russ.)
11. Bogoslovskiy B.B., Fil' S.A. Klassifikatsiya vodoemov po vneshnemu vodoobmenu [Classification of Reservoirs by External Water Exchange]. *Geografo-gidrologicheskyy metod issledovaniya vod sushi* [Geographical and Hydrological Research Method of Land Water]. Moscow, 1984, pp. 54–60. (In Russ.)
12. Bogoslovskiy B.B. O vodoobmene i vodnykh massakh vodnykh ob"ektov [On the Water Exchange and Water Masses of Water Objects]. *Krugovorot veshchestva i energii v ozernykh vodoemakh* [Circulation of Matter and Energy in Lake Water Bodies]. Novosibirsk, 1975, pp. 270–275. (In Russ.)

*Aleksandra S. Bulavina**

*Murmansk Marine Biological Institute,
Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences (Murmansk, Russian Federation)

**FEATURES OF RIVER RUNOFF FORMATION
IN THE LAKE-RIVER WATER COLLECTION SYSTEMS
IN THE WESTERN PART OF THE WHITE SEA**

The paper studies the hydrological regime of the lake-river water collection systems of the western part of the White Sea and the influence of artificial regulation and climate changes on the hydrological regime of rivers of the region based on the analysis of long series of observations (1931–1996) for main hydrological characteristics. The hydropower development of the rivers in the region contributes to an increase in low-flows and a reduction of flow during the flood in the mid-annual runoff. The climate change occurring in the region also contributes to this change. The average temperatures and annual precipitation in the western part of the White Sea catchment area increase during the study period. The most significant increase of these parameters are observed in the cold half-year, contributing to a partial melting of snow cover in the winter period. The phase of increased water and moisture content is marked in the catchment area of the White Sea during the studied period. Positive trends in average annual water expenditure are noted in all rivers of the region. According to the State Hydrological Institute estimations, the increase in average annual temperatures and amount of precipitation continues at present time. Considering the preservation of the observed climate trends, we can assume further smoothing of seasonal fluctuations in the runoff characteristics. The coefficients of conditional water exchange for large lakes and reservoirs in the region are calculated. Most water bodies are characterized by weak external water exchange and, therefore, are able to absorb a significant amount of pollutants, including anthropogenic origin. A large number of lakes in the catchment areas of rivers can significantly reduce the flow of solid runoff and dissolved chemicals into the sea.

Keywords: *hydrological regime, White Sea basin, annual distribution of stream flow, variability of river runoff, conditional water exchange, lake flowage.*

Поступила 21.04.2017
Received on April 21, 2017

Corresponding author: Aleksandra Bulavina, *address:* ul. Vladimirskaia, 17, Murmansk, 183010, Russian Federation; *e-mail:* bulavina@mmbi.info

For citation: Bulavina A.S. Features of River Runoff Formation in the Lake-River Water Collection Systems in the Western Part of the White Sea. *Arctic Environmental Research*, 2017, vol. 17, no. 3, pp. 161–172. DOI: 10.17238/issn2541-8416.2017.17.3.161

**НАКОПЛЕНИЕ МЕТАНА
В ПРОМЕРЗАЮЩИХ И МЕРЗЛЫХ ПОЧВАХ КРИОЛИТОЗОНЫ¹**

*Г.Н. Краев**, *Е.М. Ривкина***

*Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН
(Москва)

**Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН
(Московская обл., Серпуховский район, г. Пушкино)

Несмотря на увеличение качества и количества исследований, разброс оценок эмиссии метана заболоченными землями Арктики остается и изменяется в пределах $30 \cdot 10^{12}$ г. Это связано с высокой пространственно-временной изменчивостью условий, благоприятных для биологической продукции и окисления метана, а также с факторами, определяющими диффузионный обмен между почвой и атмосферой. Так, зимний поток метана, формирующийся при промерзании почв, до недавнего времени считали пренебрежимо малым. Данные единичных измерений позволяют оценивать его вклад в годовой обмен метана между почвой и атмосферой величиной до 25 %. В настоящем исследовании показано, что часть метана задерживается в промерзшей почве. Установлены количество и продолжительность сохранения метана в промерзающих и мерзлых почвах Северо-Востока Сибири. Содержание метана в нижней части сезонноталого слоя составляло в среднем $1,4 \text{ см}^3/\text{кг}$. Концентрация метана в переходном слое многолетней мерзлоты, протаивающем в отдельные теплые годы, достигала $15 \text{ см}^3/\text{кг}$. Чтобы определить источники повышенного содержания метана в почвах, проанализирован вклад биологических и физических процессов: потенциальной продукции метана в промерзающей и мерзлой почве и криогенного отжима метана во время промерзания к кровле мерзлых пород. В формировании горизонтов с повышенным содержанием метана принимают участие как биологические, так и криогенные процессы. Метан накапливается при промерзании почвы, формируя разобщенные локализованные максимумы концентраций на участках, где условия благоприятствуют его продукции и захоронению на подошве деятельного слоя, а не распределяется равномерно. Метан может сохраняться в почве до ее оттаивания. Поток метана, образованного в сезонноталых и периодически оттаивающих горизонтах мерзлоты в условиях наблюдаемых участков, может достигать $3 \text{ г}/\text{м}^2$ в год.

Ключевые слова: многолетняя мерзлота, сезонное промерзание, мощность сезонноталого слоя, криолитозона, продукция метана, газообмен почвы, зимняя температура почвы.

¹Авторы выражают признательность А.Л. Холодову и Д.Г. Федорову-Давыдову за содействие в отборе образцов, а также рецензенту за конструктивные конкретизирующие замечания, позволившие сделать работу более понятной. Публикация работы поддержана оргкомитетом конференции «Папанинские чтения». Работа выполнена в рамках госзадания Центра по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН (№ 01201355191), программы Президиума РАН № 15 при поддержке гранта Президента РФ для молодых ученых МК-9417.2016.5.

Контактное лицо: Краев Глеб Николаевич, *адрес:* 117997, Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32; *e-mail:* kraevg@gmail.com

Для цитирования: Краев Г.Н., Ривкина Е.М. Накопление метана в промерзающих и мерзлых почвах криолитозоны // Arctic Environmental Research. 2017. Т. 17, № 3. С. 173–184. DOI: 10.17238/issn2541-8416.2017.17.3.173

Заболоченные земли являются одним из крупнейших материковых природных источников атмосферного метана [1]. Широкое распространение заболоченных земель и переувлажненных почв в высоких широтах обуславливается гумидным климатом и неглубоким залеганием многолетней мерзлоты, играющей роль водоупора. Застойные условия избыточного увлажнения и обилие органического вещества, препятствуя проникновению кислорода к подошве сезонноталого слоя (СТС), создают благоприятную бескислородную среду для функционирования метаногенных бактерий.

Измерениям потоков метана в наземных экосистемах Арктики посвящено множество работ [2–4]. Они свидетельствуют о высокой изменчивости потоков в пространстве и во времени, что обуславливает широкий разброс оценок пан-Арктической эмиссии – от 0 до $30 \cdot 10^{12}$ г $\text{CH}_4/\text{м}^2$ в год [4]. На пространственно-временную изменчивость потоков метана влияют биогеохимические факторы. Поток метана с поверхности почвы – продукт разнонаправленных процессов метанового цикла, осуществляемых как строго анаэробными метаногенными археями, так и аэробными метанотрофными бактериями. Существуют и физико-химические факторы, определяющие характер поступления метана из почвы в атмосферу. Растворимость метана в воде составляет 22,7 мг/л [5]. При концентрациях, превышающих растворимость, поступление метана в атмосферу обеспечивает, наряду с диффузионным, пузырьковый поток. Его вклад в суммарную эмиссию оценивается в размере от 13 до 85 % [6]. Предсказать время формирования пузырьковой составляющей потока метана из почв на большой территории практически невозможно из-за неоднородностей почвенного строения [7]. Такие спорадически возникающие струи метана вносят значительную неопределенность в оценку суммарного поступления метана в атмосферу [8].

Преградой на пути метана в атмосферу может стать лед, заполняющий поры почвы при промерзании, т. к. коэффициент диффу-

зии метана в мерзлых породах не превышает 10^{-13} м²/с [9]. Увеличение концентрации метана в деятельном слое при его промерзании наблюдалось в степях Внутренней Монголии [10] и в тайге Аляски [11]. Впоследствии она резко сокращалась, формируя мощные потоки метана в атмосферу. В Гренландии промерзание деятельного слоя сопровождалось интенсивной эмиссией метана, в 3–4 раза превышающей летние значения в отдельные сроки измерений [12, 13]. Выделение метана происходит по ослабленным зонам, где поры не полностью заполнены льдом: он просачивается по корням и стеблям сосудистых растений [14] или высвобождается в процессе образования пятен-медальонов. Суммарно зимний поток метана из промерзающего деятельного слоя оценивается в 25 % от годового потока в умеренных и арктических широтах Северного полушария [15].

Нашими наблюдениями установлено, что помимо поступления в значительных объемах в атмосферу, метан может сохраняться в промерзших горизонтах почв криолитозоны в течение всей зимы, а в горизонтах, оттаивающих реже, и более длительное время. Он поступает в биогеохимический цикл вместе с новообразованным метаном в следующий период оттаивания и не учитывается в годовом балансе метана. Целью данной работы была оценка условий формирования, объемов и продолжительности существования этого временного резервуара в промерзающих и мерзлых почвах криолитозоны. Для ее достижения были проведены наблюдения за распределением метана в почвах Северо-Востока Сибири после промерзания; оценена роль метаногенеза и увеличения концентрации метана за счет криогенного отжима из промерзающих горизонтов по данным расчетов, основанных на эмпирической зависимости.

Материалы и методы. Объект исследования – концентрация метана в мерзлых горизонтах почв криолитозоны. В работе использованы данные 60 опробований горизонтов почв и мерзлых пород, выполненных в 1990–2008 годах в пределах Колымской и Яно-Индигирской

низменностей (рис. 1), на 8 участках (от 2 до 11 образцов с каждого участка) расположенных вблизи площадок циркумпольной сети мониторинга деятельного слоя (CALM)², в т. ч.:

- из нижних и самых верхних горизонтов деятельного слоя, протаивающего ежегодно;
- из переходного слоя, который протаивает периодически, лишь в отдельные экстремально теплые годы или в результате нарушений и восстановительных сукцессий и т. п. [16];
- из покровного слоя, образовавшегося в результате максимального оттаивания льдистых пород ледового комплекса в голоцене и его последующего промерзания.

Почвы располагались на водораздельных поверхностях, сложенных лессовидными супесями и суглинками ледового комплекса позднего неоплейстоцена [17], в термокарстовых котловинах, сформировавшихся в голоцене в

результате вытаявания подземных льдов [18], и в поймах рек³. Поскольку структура и положение в разрезе переходного и покровного слоев близки, на водоразделах переходный слой рассматривался в составе покровного.

Образцы мерзлых почв отбирали из керна, извлеченного колонковым снарядом диаметром 107 мм и длиной от 50 до 100 см. Вращательное бурение на глубину деятельного слоя осуществляли переносной буровой установкой УКБ-12/25 (Машиностроительный завод им. В.В. Воровского, г. Екатеринбург) без применения промывки и продувки скважины. Кроме того, мерзлые образцы почвы отбирали со дна шурфов и расчисток обнажений. Содержание метана определяли методом уравнивания фаз «Headspace» [19]. Образец мерзлой почвы из центральной части керна объемом около 50 см³ взвешивали (чувствительность весов 0,1 г) и



Рис. 1. Участки исследования концентрации метана в промерзшей почве и периодически оттаивающих горизонтах многолетней мерзлоты

²Circumpolar Active Layer Monitoring Summary Data Table. URL: <https://www2.gwu.edu/~calm/data/north.html> (дата обращения: 01.03.2017).

³Государственная геологическая карта Российской Федерации. Карта четвертичных образований. М. 1:1 000 000. Лист R-(55)-57 (Нижнеколымск). Объяснительная записка. СПб., 2000.

помещали в промывочный шприц объемом 150 мл и ценой деления 2 мл (МИМ, г. Тюмень), заполненный 30–50 мл насыщенного раствора хлорида натрия. Шприц наполняли известным объемом азота 99,999 %. После оттаивания, интенсивного встряхивания и разрушения образца почвенный газ в смеси с азотом через шприцевую иглу методом компенсации переносили в стеклянные флаконы объемом 30 или 50 мл, полностью заполненные рассолом и закрытые пробкой из изобутиловой резины. Концентрацию метана в газовой смеси измеряли в лабораторных условиях на хроматографе ХПМ-4 (ОАО «Хроматограф», Москва) с пламенно-ионизационным детектором и водородом в качестве газа-носителя.

Хроматографические данные – площадь и высоту пика – соотносили с площадью и высотой пика после введения стандарта с концентрацией 1 % CH_4 . Значения концентрации метана в газовой смеси с азотом пересчитывали на объем газовой фазы в шприце, тем самым определяли количество вещества и его массу в стандартных термобарических условиях. Его соотносили с объемом образца мерзлой породы, который был разрушен в шприце.

В работе приводятся значения концентрации метана в отложениях, рассчитанные по средним отношениям соответствующих величин хроматографических пиков в стандарте при однократном определении в образце. С учетом точности измерений и погрешности метода [19] ошибка определения концентрации в случае максимальной наблюдаемой концентрации метана ($15 \text{ см}^3/\text{кг}$) не превышала $0,05 \text{ см}^3/\text{кг}$.

Для сопоставления измеренных концентраций на разных участках, глубину опробования нормализовали по средней многолетней глубине оттаивания и представляли в процентах. Это позволило выявить основные тенденции распределения метана в промерзших горизонтах вне зависимости от локальных условий протаивания.

Анализ источников метана выполняли путем сравнения наблюдаемых и модельных значений концентрации метана в почве. Модель концептуально представляла собой однородный столбик суглинистой почвы с температурой замерзания⁴ $-0,2 \text{ }^\circ\text{C}$ с площадью сечения 100 см^2 и высотой, равной деятельному слою. Расчет продукции проводили для каждого из горизонтов толщиной 10 см. Используемое расчетное уравнение описывало продукцию метана при разной температуре охлажденных и мерзлых пород на основе лабораторного эксперимента с радиоактивно меченым субстратом $\text{H}^{14}\text{CO}_3^-$ [20]. Оценку продукции метана в формировании наблюдаемых концентраций в промерзшей почве на участках отбора проб проводили с использованием данных мониторинга температуры почвы по глубинам CALM. Роль отжима метана при промерзании почвы в талые горизонты оценивали по суммарным объемам продукции метана в талых горизонтах за период от начала промерзания поверхности до полного промерзания почвы. Предполагали, что мерзлые горизонты непроницаемы для метана [21]. Массовые концентрации метана в мерзлых породах ($\text{см}^3/\text{кг}$) через известный объемный вес мерзлой почвы пересчитывали в концентрации в 1 дм^3 почвы.

Результаты. Основные характеристики периода промерзания и пребывания исследованных почв в мерзлом состоянии приведены для трех участков, расположенных вблизи площадок CALM (табл. 1).

Исследованные почвы имели суглинистый состав и сходные характеристики промерзания и протаивания. Средняя многолетняя мощность деятельного слоя изменялась в пределах 50 см, однако в понижениях микрорельефа она была, как правило, ниже (15–26 см), а на повышениях – выше (60–80 см). Межгодовая изменчивость средних значений лежала в пределах 15 %. Максимальное протаивание почвы наблюдалось в конце августа – начале сентября,

⁴СП 25.13330.2012. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. Введ. 2013–01–01. Доступ из норматив. системы «NormaCS».

Таблица 1

**ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОМЕРЗАНИЯ И ПРОТАИВАНИЯ ПОЧВ
СЕВЕРО-ВОСТОКА СИБИРИ (средние данные за 1999–2013 годы)**

Показатель	Участок отбора почв		
	Аччагый-Аллаиха	Обнажение 27	Усть-Омолонский Яр
Координаты (с. ш. / в. д.)	70°34'/147°26'	69°29'/156°59'	68°43'/158°54'
Состав почв	Средний суглинок	Средний суглинок	Легкий суглинок
Максимальная за год глубина протаивания, см: средняя многолетняя / средняя минимальная – средняя максимальная	47±4 / 26–69	44±4 / 21–60	41±6 / 15–82
Дата максимального протаивания	18 авг. ± 8 сут	2 сент. ± 13 сут	12 сент. ± 7 сут
Дата начала промерзания	29 сент. ± 7 сут	25 авг. – 8 окт.	30 сент. ± 4 сут
Время промерзания почвы, сут	29±4	30	42±6
Срок пребывания почвы в мерзлом состоянии, сут	243±8	233–271	230±7
Средняя температура поверхности почвы в срок пребывания в мерзлом состоянии, °С	-18,3±1,6	-18,2...-16,2	-8,2±1,5

а к началу октября начиналось ее промерзание. Промерзание длилось в тундре около месяца, а в тайге (Усть-Омолонский Яр) – до полутора месяцев. Таким образом, 2/3 года почвы пребывали в мерзлом состоянии. Температура поверхности почвы в это время была -18 °С в тундре, и на 10 °С выше в тайге.

Концентрация метана в мерзлых почвах деятельного слоя в среднем составляла $(1,4 \pm 0,3) \text{ см}^3/\text{кг}$ (рис. 2), что в 10^6 раз выше концентрации метана в атмосфере. Характерно отсутствие метана в верхних горизонтах деятельного слоя до глубины 25 см, опробованных в начале периода промерзания.

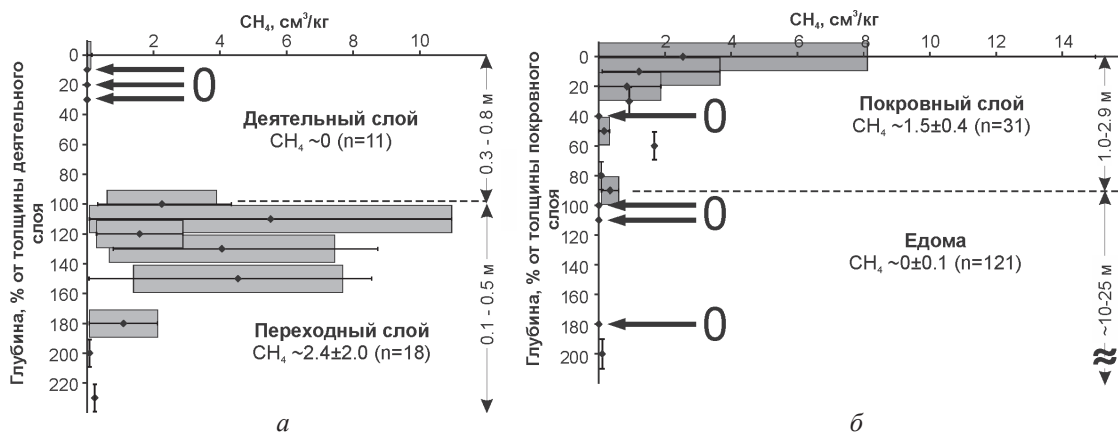


Рис. 2. Распределение средней концентрации метана по относительным глубинам в сводных разрезах почв Северо-Востока Сибири: а – в деятельном слое и периодически оттаивающем верхнем горизонте многолетней мерзлоты (переходном слое); б – в горизонте многолетнемерзлых пород, оттаивавшем в голоцене (покровном слое)

В переходном слое и в неоттаявшей части СТС наблюдались колебания концентрации метана от 0,1 до 11 см³/кг (рис. 2а). Пики концентрации характерны для горизонтов, залегающих непосредственно под подошвой СТС, в пределах 10–20 см. В слое 20–40 см, подстилающем СТС, средняя концентрация метана изменялась от 2 до 6 см³/кг. Глубже, в горизонтах переходного слоя, оттаивающих реже, она убывала.

Средняя концентрация метана в покровном слое составляла (1,5±0,4) см³/кг. Она постепенно снижалась с глубиной от (2,6±5,5) до (1,0±1,0) см³/кг, особенно заметно в верхних 40–100 см покровного слоя (рис. 2б). На больших глубинах горизонты, содержащие метан в концентрациях 0,3–1,7 см³/кг, переслаивались с горизонтами без метана.

Чтобы определить источники метана в периодически оттаивающих горизонтах почв, была рассчитана потенциальная биогенная продукция в промерзающих и мерзлых породах. Путем аппроксимации экспериментальных данных [20] были найдены два уравнения зависимости продукции метана от температуры (с коэффициентами детерминации $R^2 > 0,9$):

для талых, охлаждающихся почв

$$P = 0,0009T + 0,0104;$$

для мерзлых почв

$$P = 0,0061e^{0,3395T},$$

где P – продукция метана, см³/кг·сут; T – среднесуточная температура почвы, °С.

Результат моделирования – массив данных по изменениям концентрации метана в почвенном разрезе за счет продукции в промерзающей и мерзлой почве. В качестве примера рассмотрим динамику изменения концентрации метана на отдельно взятом участке в репрезентативный год (рис. 3). Метан с первого дня промерзания накапливался в талых горизонтах почвы, перекрытых промерзшим слоем, со скоростью порядка 0,015 см³/кг·сут почти равномерно по всему профилю. За месяц промерзания в талой почве продуцировалось 0,82 см³ метана. После промерзания, с понижением температуры почвы продукция резко сокращалась до 0,008 см³/кг, а при температуре ниже –6,5 °С она была менее 0,001 см³/кг. В нижних горизонтах промерзшей почвы на глубине 0,5–0,6 м она была закономерно (как и температура) выше, чем на 0,1–0,2 м. Чтобы оценить продукцию именно в промерзающей и мерзлой почве, в нашей модели с началом отта-

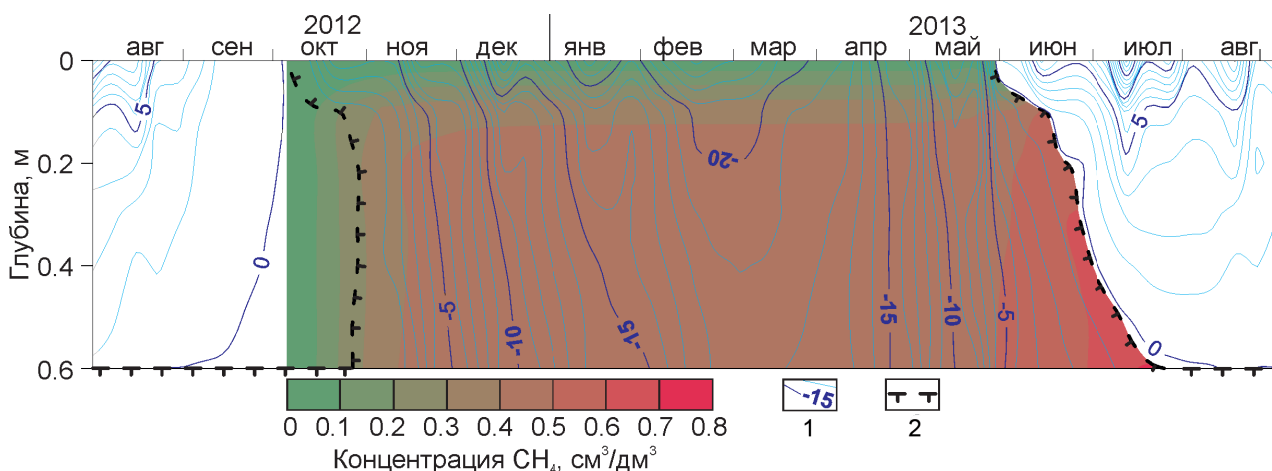


Рис. 3. Изменение температуры почвы и концентрации метана (по данным расчетов продукции метана) по глубинам в 2012–2013 годах на участке Аччагый-Аллаиха: 1 – изотермы; 2 – положение кровли мерзлых пород

ивания продуцирование метана прекращалось, а метан из протаявших горизонтов мигрировал в атмосферу. Таким образом, продуцирование метана продолжалось до полного оттаивания СТС, что является одной из причин существования у его подошвы максимума концентрации. Другим процессом, учтенным в нашей модели, являлось концентрирование у подошвы СТС метана, спродуцированного в талой почве при промерзании.

Аналогичные расчеты проведены для всех лет и площадок, где осуществлялись исследования концентрации метана и мониторинг температуры почвы по глубинам. Результаты представлены в *табл. 2*.

Согласно результатам моделирования, около 2/3 массы метана, накапливаемого за период промерзания и пребывания почв в мерзлом состоянии, продуцировалось при отрицательных температурах. Оставшиеся ~30 % массы метана продуцировались во время промерзания почв. В течение зимы в почвах Северо-

Востока Сибири формируется 2–3 г/м² метана при мощности СТС 50–60 см и около 1 г/м² в СТС мощностью 30 см. В рассмотренных почвах Северо-Востока Сибири значения расчетной продукции метана и средней наблюдаемой концентрации метана в периодически оттаивающих слоях почвы (см. *рис. 2*) были одного порядка. Однако наблюдаемая концентрация метана могла быть как существенно ниже расчетной, так и многократно выше. Расчетная продукция метана на подошве СТС была значимо ниже средней наблюдаемой концентрации метана в периодически оттаивающих горизонтах.

Обсуждение. Отсутствие метана в верхних горизонтах промерзшей почвы может объясняться лучшей аэрацией и благоприятными условиями для аэробного метаноокисления [22], выделением метана в атмосферу или отжимом метана при промерзании [23]. Последний механизм также объясняет существование максимума концентрации метана на подошве СТС.

Таблица 2

**РАСЧЕТ ВЕЛИЧИНЫ БИОГЕННОЙ ПРОДУКЦИИ МЕТАНА
В ПРОМЕРЗАЮЩИХ И МЕРЗЛЫХ ПОЧВАХ СЕВЕРО-ВОСТОКА СИБИРИ
(средние данные за 1998–2013 годы)**

Показатель	Участок отбора почв		
	Аччагый-Аллаиха	Обнажение 27	Усть-Омолонский Яр
Глубина СТС на момент отбора, см	80	70	50
Наблюдаемая концентрация метана ниже подошвы СТС на момент отбора, см ³ /кг	0,1	15,0	0
Объемный вес мерзлой почвы, г/см ³	1,44	1,6	1,73
Глубина СТС на участке мониторинга температуры, см	60	50	30
Суммарное расчетное содержание метана в СТС на момент полного промерзания, см ³	1,4±0,3*	1,3	0,5±0,1*
Максимальная расчетная концентрация на подошве СТС на момент оттаивания, см ³ /кг	0,5±0*	0,8±0,3*	0,4±0,1*
Суммарное расчетное содержание метана, образованного в промерзшем СТС, см ³	2,4	1,9±0,8*	1,2±0,2*
Расчетные запасы биогенного метана в мерзлой почве, г/м ²	2,7	2,3±0,6*	1,2±0,1*

Примечание: * – среднеквадратическое отклонение.

Оттаивание верхних слоев переходного слоя происходит не каждый сезон, в соответствии с естественной климатической цикличностью и закономерностями сукцессии [16]. С увеличением глубины частота протаивания уменьшается – от одного раза в год до одного раза за десятки-сотни лет в зависимости от повторяемости экстремально теплых сезонов или катастрофических изменений почвенных и растительных условий. Протаивание до подошвы покровного слоя происходило во время голоценового оптимума. Таким образом, метан сохраняется в промерзших слоях почвы на протяжении от сезона до тысяч лет. Максимумы концентрации метана наблюдаются вблизи современной подошвы деятельного слоя, т. е. в горизонтах, оттаивающих чаще.

Как показывают результаты моделирования (см. табл. 2), средние значения концентрации метана у подошвы СТС – около $2 \text{ см}^3/\text{кг}$ (см. рис. 2а) – не могут формироваться лишь за счет продукции в этом слое в мерзлом состоянии. Однако и с учетом процесса отжима метана из деятельного слоя не во всех случаях можно объяснить наблюдаемые концентрации на подошве СТС (например, на участке Обнажение 27). Такие локальные максимумы концентрации могут сформироваться в случае, когда метан продуцируется и накапливается в мерзлых слоях, не оттаивая в течение нескольких лет. Также это может происходить там, где при промерзании происходит отжим метана из почв в некоторой области вокруг участка наблюдаемого максимума.

Например, для формирования концентрации $15 \text{ см}^3/\text{кг}$ ($24 \text{ см}^3/\text{дм}^3$ в пределах 1 дм^2) на участке Обнажение 27 потребовался биогенный метан не только из промерзающего вышележащего модельного столбика почвы объемом 5 дм^3 , но еще из 11-12 соседних. Вероятно, в месте измерения концентрации существовали благоприятные условия для накопления газа – микропонижение кровли мерзлых пород или иная литологическая ловушка, затрудняющая выделение или окисление метана. Альтерна-

тивной версией может быть накопление наблюдаемого количества метана в течение 18 лет, пока этот мерзлый горизонт не оттаивал. Интересно, что лето 1987 года (за 18 лет до измерения) было действительно аномально теплым, и некоторое количество метана из деятельного слоя могло быть захоронено в переходном слое в случае его протаивания.

Стоит заметить, что оценки продукции метана, основанные на лабораторных экспериментах с радиоактивно мечеными субстратами [20], получены в исключительно благоприятных условиях для метаногенеза: при строгом анаэробии и доступности субстрата. Оценка продукции метана, основанная на этих данных, определена завышена.

В данной работе не приводятся данные о зависимости концентрации метана от химических свойств почв, содержания общего углерода, льдистости, гранулометрического состава. Такие зависимости при рассмотрении всех имеющихся в нашем распоряжении данных о концентрации метана в мерзлых породах (около 800 образцов) нами обнаружены не были [24]. Для определения влияния физических и химических свойств почв на концентрацию метана в СТС и других периодически оттаивающих горизонтах необходимо проведение дополнительных специальных исследований.

Выводы:

1. Средняя концентрация метана в СТС и периодически оттаивающих горизонтах в кровле многолетнемерзлых пород Северо-Востока Сибири составляет $1,4 \text{ см}^3/\text{кг}$. Локально, в условиях, благоприятных для биогенной продукции и сохранения метана в мерзлых почвах, формируются максимумы концентрации до $15 \text{ см}^3/\text{кг}$.

2. Метаногенез в промерзающей и мерзлой почве и криогенный отжим метана к подошве деятельного слоя объясняют 30–100 % концентрации метана в периодически оттаивающих горизонтах почв. Таким образом, вклад метана, сформированного в промерзающих и мерзлых почвах, в годовой поток составляет не более $1\text{--}3 \text{ г}/\text{м}^2$.

3. Такой порядок значений может объяснить выбросы метана зимой в период формирования морозобойных трещин или пятен-медальонов. Во время оттаивания деятельного слоя и более глубоких, реже оттаивающих слоев почв этот метан может поступать в регулярный газообмен между почвой и атмосферой или поглощаться метанотрофами, увеличивая неопределенность баланса парниковых газов.

Список литературы

1. Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Tignor M., Miller H.L. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, England: Cambridge University Press, 2007. 996 p.
2. Sachs T., Wille C., Boike J., Kutzbach L. Environmental Controls on Ecosystem-Scale CH₄ Emission from Polygonal Tundra in the Lena River Delta, Siberia // Journal of Geophysical Research: Biogeosciences. 2008. Vol. 113, iss. G3.
3. Кривенко Л.А., Глаголев М.В., Фастовец И.А., Смоленцев Б.А., Максютов Ш.Ш. Удельные потоки метана из экосистем южной тундры Западной Сибири // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. 2014. Т. 5, № 1(9). С. 1–17.
4. McGuire A.D., Christensen T.R., Hayes D., Heroult A., Euskirchen E., Kimball J.S., Koven C., Lafleur P., Miller P.A., Oechel W., Peylin P., Williams M., Yi Y. An Assessment of the Carbon Balance Of Arctic Tundra: Comparisons Among Observations, Process Models, and Atmospheric Inversions // Biogeosciences. 2012. Vol. 9, iss. 8. P. 3185–3204.
5. Clever H.L., Young C.L. Methane. Oxford, England: Pergamon Press, 1987. 783 p. (Solubility Data Series, vol. 27–28).
6. Глаголев М.В., Клепцова И.Е. К вопросу о механизме выхода пузырьков метана из торфяника // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. 2012. Т. 3, № 3. С. 54–63.
7. Ramirez J.A., Baird A.J., Coulthard T.J. The Effect of Pore Structure on Ebullition from Peat // Journal of Geophysical Research: Biogeosciences. 2016. Vol. 121, iss. 6. P. 1646–1656.
8. Liu L., Wilkinson J., Koca K., Buchmann C., Lorke A. The Role of Sediment Structure in Gas Bubble Storage and Release // Journal of Geophysical Research: Biogeosciences. 2016. Vol. 121, iss. 7. P. 1992–2005.
9. Rivkina E., Gilichinsky D., McKay C., Dallimore S. Methane Distribution in Permafrost: Evidence for an Interpore Pressure Methane Hydrate // Permafrost Response on Economic Development, Environmental Security and Natural Resources. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic, 2001. P. 487–496.
10. Wolf B., Chen W., Brüggemann N., Zheng X., Pumpanen J., Butterbach-Bahl K. Applicability of the Soil Gradient Method for Estimating Soil–Atmosphere CO₂, CH₄, and N₂O Fluxes for Steppe Soils in Inner Mongolia // Journal of Plant Nutrition and Soil Science. 2011. Vol. 174, № 3. P. 359–372.
11. Kim Y., Ueyama M., Nakagawa F., Tsunogai U., Harazono Y., Tanaka N. Assessment of Winter Fluxes of CO₂ and CH₄ in Boreal Forest Soils of Central Alaska Estimated by the Profile Method and the Chamber Method: A Diagnosis of Methane Emission and Implications for the Regional Carbon Budget // Tellus. Ser. B: Chemical and Physical Meteorology. 2007. Vol. 59, № 2. P. 223–233.
12. Mastepanov M., Christensen T.R. Bimembrane Diffusion Probe for Continuous Recording of Dissolved and Entrapped Bubble Gas Concentrations in Peat // Soil Biology and Biochemistry. 2008. Vol. 40, № 12. P. 2992–3003.
13. Tagesson T., Mölder M., Mastepanov M., Falk J.M., Lindroth A., Christensen T.R., Ström L., Sigsgaard C., Tamstorf M.P., Lund M. Land-Atmosphere Exchange of Methane from Soil Thawing to Soil Freezing in a High-Arctic Wet Tundra Ecosystem // Global Change Biology. 2012. Vol. 18, № 6. P. 1928–1940.
14. Kutzbach L., Wagner D., Pfeiffer E.-M. Effect of Microrelief and Vegetation on Methane Emission from Wet Polygonal Tundra, Lena Delta, Northern Siberia // Biogeochemistry. 2004. Vol. 69, № 3. P. 341–362.
15. Zona D., Gioli B., Commane R., Lindaas J., Wofsy S.C., Miller C.E., Dinardo S.J., Dengel S., Sweeney C., Karion A., Chang R.Y.-W., Henderson J.M., Murphy P.C., Goodrich J.P., Moreaux V., Liljedahl A., Watts J.D., Kimball J.S., Lipson D.A., Oechel W.C. Cold Season Emissions Dominate the Arctic Tundra Methane Budget // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 2016. Vol. 113, № 1. P. 40–45.

16. Shur Yu., Hinkel K.M., Nelson F.E. The Transient Layer: Implications for Geocryology and Climate-Change Science // *Permafrost and Periglacial Processes*. 2005. Vol. 16, iss. 1. P. 5–17.
17. Murton J.G., Goslar T., Edwards M.E., Bateman M.D., Danilov P.P., Savvinov G.N., Gubin S.V., Ghaleb B., Haile J., Kanevskiy M., Lozhkin A.V., Lupachev A.V., Murton D.K., Shur Yu., Tikhonov A., Vasil'chuk A.C., Vasil'chuk Yu.K., Wolfe S.A. Palaeoenvironmental Interpretation of Yedoma Silt (Ice Complex) Deposition as Cold-Climate Loess, Duvanny Yar, Northeast Siberia // *Permafrost and Periglacial Processes*. 2015. Vol. 26, iss. 3. P. 208–288.
18. Каплина Т.Н. Аласные комплексы Северной Якутии // *Криосфера Земли*. 2009. Т. XIII, № 4. С. 3–17.
19. McAuliffe C. GC Determination of Solutes by Multiple Phase Equilibration // *Chem. Tech.* 1971. № 1. P. 46–51.
20. Ривкина Е.М., Лауринавичюс К.С., Гуличинский Д.А., ЩербакOVA В.А. Метанообразование в вечномёрзлых отложениях // *Докл. Акад. наук*. 2002. Т. 383, № 6. С. 830–833.
21. Арэ Ф.Э. Проблема эмиссии глубинных газов в атмосферу // *Криосфера Земли*. 1998. Т. II, № 4. С. 42–50.
22. Samarkin V.A., Fedorov-Davydov D.G., Vecherskaya M.S., Rivkina E.M. CO₂ and CH₄ Emission on Cryosols and Subsoil Permafrost Possible Global Climate Change // *Soil Processes and Greenhouse Effect*. Lincoln, USA: US National Soil Survey Center, 1994. P. 55–71.
23. Краев Г.Н., Шульце Э.-Д., Ривкина Е.М. Криогенез как фактор распределения метана в горизонтах мерзлых пород // *Докл. Акад. наук*. 2013. Т. 451, № 6. С. 684–687.
24. Краев Г.Н. Закономерности распространения метана в многолетнемерзлых породах на Северо-Востоке России и прогноз его поступления в атмосферу: дис. ... канд. геогр. наук. М., 2010. 131 с.

References

1. Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Tignor M., Miller H.L. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, England, Cambridge University Press, 2007. 996 p.
2. Sachs T., Wille C., Boike J., Kutzbach L. Environmental Controls on Ecosystem-Scale CH₄ Emission from Polygonal Tundra in the Lena River Delta, Siberia. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2008, vol. 113, iss. G3.
3. Krivenok L.A., Glagolev M.V., Fastovets I.A., Smolentsev B.A., Maksyutov Sh.Sh. Udel'nye potoki metana iz ekosistem yuzhnoy tundry Zapadnoy Sibiri [Methane Fluxes from South Tundra Ecosystems of West Siberia]. *Dinamika okruzhayushchey sredy i global'nye izmeneniya klimata* [Environmental Dynamics and Global Climate Change], 2014, vol. 5, no. 1(9), pp. 1–17.
4. McGuire A.D., Christensen T.R., Hayes D., Heroult A., Euskirchen E., Kimball J.S., Koven C., Lafleur P., Miller P.A., Oechel W., Peylin P., Williams M., Yi Y. An Assessment of the Carbon Balance of Arctic Tundra: Comparisons Among Observations, Process Models, and Atmospheric Inversions. *Biogeosciences*, 2012, vol. 9, iss. 8, pp. 3185–3204.
5. Clever H.L., Young C.L. Methane. *Solubility Data Series, Vol. 27-28*. Oxford, England, Pergamon Press, 1987. 783 p.
6. Glagolev M.V., Kleptsova I.E. K voprosu o mekhanizme vykhoda puzyr'kov metana iz torfyanika [Mechanism of Methane Bubble Transport from Peat Layer]. *Dinamika okruzhayushchey sredy i global'nye izmeneniya klimata* [Environmental Dynamics and Global Climate Change], 2012, vol. 3, no. 3, pp. 54–63.
7. Ramirez J.A., Baird A.J., Coulthard T.J. The Effect of Pore Structure on Ebullition from Peat. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2016, vol. 121, iss. 6, pp. 1646–1656.
8. Liu L., Wilkinson J., Koca K., Buchmann C., Lorke A. The Role of Sediment Structure in Gas Bubble Storage and Release. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2016, vol. 121, iss. 7, pp. 1992–2005.
9. Rivkina E., Gilichinsky D., McKay C., Dallimore S. Methane Distribution in Permafrost: Evidence for an Enterpore Pressure Methane Hydrate. *Permafrost Response on Economic Development, Environmental Security and Natural Resources*. Ed. by R. Paepe, V. Melnikov. Dordrecht, Netherlands, Kluwer Academic Publ., 2001, pp. 487–496.
10. Wolf B., Chen W., Bruggemann N., Zheng X., Pumpanen J., Butterbach-Bahl K. Applicability of the Soil Gradient Method for Estimating Soil–Atmosphere CO₂, CH₄, and N₂O Fluxes for Steppe Soils in Inner Mongolia. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2011, vol. 174, no. 3, pp. 359–372.
11. Kim Y., Ueyama M., Harazono Y., Tanaka N., Nakagawa F., Tsunogai U. Assessment of Winter Fluxes of CO₂ and CH₄ in Boreal Forest Soils of Central Alaska Estimated by the Profile Method and the Chamber Method: a Diagnosis of Methane Emission and Implications for the Regional Carbon Budget. *Tellus. Ser. B: Chemical and Physical Meteorology*, 2007, vol. 59, no. 2, pp. 223–233.

12. Mastepanov M., Christensen T.R. Bimembrane Diffusion Probe for Continuous Recording of Dissolved and Entrapped Bubble Gas Concentrations in Peat. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, vol. 40, no. 12, pp. 2992–3003.
13. Tagesson T., Mölder M., Mastepanov M., Falk J.M., Lindroth A., Christensen T.R., Ström L., Sigsgaard C., Tamstorf M.P., Lund M. Land-Atmosphere Exchange of Methane from Soil Thawing to Soil Freezing in a High-Arctic Wet Tundra Ecosystem. *Global Change Biology*, 2012, vol. 18, no. 6, pp. 1928–1940.
14. Kutzbach L., Wagner D., Pfeiffer E.-M. Effect of Microrelief and Vegetation on Methane Emission from Wet Polygonal Tundra, Lena Delta, Northern Siberia. *Biogeochemistry*, 2004, vol. 69, no. 3, pp. 341–362.
15. Zona D., Gioli B., Commane R., Lindaas J., Wofsy S.C., Miller C.E., Dinardo S.J., Dengel S., Sweeney C., Karion A., Chang R.Y.-W., Henderson J.M., Murphy P.C., Goodrich J.P., Moreaux V., Liljedahl A., Watts J.D., Kimball J.S., Lipson D.A., Oechel W.C. Cold Season Emissions Dominate the Arctic Tundra Methane Budget. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, vol. 113, no. 1, pp. 40–45.
16. Shur Yu., Hinkel K.M., Nelson F.E. The Transient Layer: Implications for Geocryology and Climate-Change Science. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2005, vol. 16, iss. 1, pp. 5–17.
17. Murton J.G., Goslar T., Edwards M.E., Bateman M.D., Danilov P.P., Savvinov G.N., Gubin S.V., Ghaleb B., Haile J., Kanevskiy M., Lozhkin A.V., Lupachev A.V., Murton D.K., Shur Yu., Tikhonov A., Vasil'chuk A.C., Vasil'chuk Yu.K., Wolfe S.A. Palaeoenvironmental Interpretation of Yedoma Silt (Ice Complex) Deposition as Cold-Climate Loess, Duvanny Yar, Northeast Siberia. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2015, vol. 26, iss. 3, pp. 208–288.
18. Kaplina T.N. Alasnye komplekсы Severnoy Yakutii [Alas Complex of North Yakutia]. *Kriosfera Zemli* [Earth Cryosphere], 2009, vol. XIII, no. 4, pp. 3–17.
19. McAuliffe C. GC Determination of Solutes by Multiple Phase Equilibration. *Chem. Tech.*, 1971, no. 1, pp. 46–51.
20. Rivkina E.M., Laurinavichus K.S., Gilichinsky D.A., Shcherbakova V.A. Methane Generation in Permafrost Sediments. *Doklady Biological Sciences*, 2002, vol. 383, no. 1-6, pp. 179–181.
21. Are F.E. Problema emissii glubinnykh gazov v atmosferu [Emission Problem of Deep Gases into the Atmosphere]. *Kriosfera Zemli* [Earth Cryosphere], 1998, vol. II, no. 4, pp. 42–50.
22. Samarkin V.A., Fedorov-Davydov D.G., Vecherskaya M.S., Rivkina E.M. CO₂ and CH₄ Emission on Cryosols and Subsoil Permafrost Possible Global Climate Change. *Soil Processes and Greenhouse Effect*. Lincoln, USA, US National Soil Survey Center, 1994, pp. 55–71.
23. Kraev G.N., Schultze E.-D., Rivkina E.M. Cryogenesis as a Factor of Methane Distribution in Layers of Permafrost. *Doklady Earth Sciences*, 2013, vol. 451, iss. 2, pp. 882–885.
24. Kraev G.N. *Zakonomernosti rasprostraneniya metana v mnogoletnemerzlykh porodakh na Severo-Vostoke Rossii i prognoz ego postupleniya v atmosferu*: dis. ... kand. geogr. nauk [Regularities of Methane Distribution in Permafrost in the North-East of Russia and the Forecast of Its Release into the Atmosphere: Cand. Geogr. Sci. Diss.]. Moscow, 2010. 131 p.

DOI: 10.17238/issn2541-8416.2017.17.3.173

Gleb N. Kraev*, Elizaveta M. Rivkina**

*Centre of Forest Ecology and Productivity of the Russian Academy of Sciences
(Moscow, Russian Federation)

**Institute of Physicochemical and Biological Problems of Soil Science of the Russian Academy of Sciences
(Moscow Region, Serpukhov District, Pushchino, Russian Federation)

ACCUMULATION OF METHANE IN PERMAFROST-AFFECTED SOILS OF CRYOLITHOZONE

Estimates of methane emission from Arctic wetlands remain highly uncertain, despite the increase in the quality and quantity of research. It is associated with high spatio-temporal variability of conditions favorable for biological methane production and oxidation, as well as with factors that determine

diffusional transfer between soil and atmosphere. Thus, winter flux of methane, formed in conditions of soil freezing, is considered negligible. The data of single measurements make it possible to estimate its contribution to the annual methane exchange between the soil and the atmosphere of up to 25 %. We can confirm that part of methane is retained in the frozen soil. The amount and duration of methane conservation in permafrost-affected soils of northeastern Siberia are established. The methane content in the lower part of the seasonally thawed layer is on the average 1.4 cm³/kg. The concentration of methane in the transition layer of permafrost, thawing in certain warm years, reaches 15 cm³/kg. We have analyzed the contribution of biological and physical processes to identify possible sources of increased methane content: potential methane production in permafrost-affected soil and cryogenic squeezing of methane during freezing to the top of frozen soils. Both biological and cryogenic processes take part in the formation of horizons with a high content of methane. Methane accumulates during soil freezing, forming disjointed localized concentration maxima in areas where conditions favor its production and retention on the base of the active layer, rather than being distributed evenly. Methane can be stored in soil before its thawing. The flux of methane formed in seasonal and periodically thawed permafrost horizons under the conditions of the observed areas can reach 3 g/m² per year.

Keywords: *permafrost, soil seasonal freezing, seasonally thawed layer thickness, cryolithorone, methane production, soil gas exchange, winter soil temperature.*

Поступила 22.03.2017
Received on March 22, 2017

Corresponding author: Gleb Kraev, *address:* ul. Profsoyuznaya, 84/32, Moscow, 117997, Russian Federation; *e-mail:* kraevg@gmail.com

For citation: Kraev G.N., Rivkina E.M. Accumulation of Methane in Permafrost-Affected Soils of Cryolithozone. *Arctic Environmental Research*, 2017, vol. 17, no. 3, pp. 173–184. DOI: 10.17238/issn2541-8416.2017.17.3.173

**СПЕКТРАЛЬНЫЙ И МОРФОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ
ПОЛИГОНАЛЬНО-ЖИЛЬНЫХ СТРУКТУР В ЧАРСКОЙ КОТЛОВИНЕ¹**

Е.Г. Панченко, Ю.В. Станиловская**

*Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН
(Москва)

Разработана и опробована методика дистанционного исследования полигонально-жильных структур на основе данных космической съемки в рамках морфометрического анализа, спектрального анализа и типизации ландшафтных условий полигонально-жильных структур. Впервые используется количественная оценка спектрально-морфометрических характеристик полигональных объектов в связи с их структурными характеристиками и ландшафтным положением, имеющая значительный потенциал для дальнейшего развития и интеграции с геоботаническими, инженерно-геокриологическими и статистическими методами. Параметризация морфологии полигонально-жильных структур основывалась на вычислении базовых характеристик полигонов как геометрических фигур, а также конвенциональных параметров, используемых при морфологическом анализе полигонов как форм криогенного рельефа. Для анализа закономерностей формирования и динамического состояния полигональных структур в разных ландшафтных условиях произведено сопоставление выборок значений морфологических параметров по ключевым участкам, расположенным в таежной зоне Чарской котловины со сплошным распространением мерзлоты. Для четырех ключевых участков было определено 12 морфометрических параметров, для каждого из них также были вычислены базовые статистические показатели (минимальное, максимальное и среднее значения, стандартное отклонение). Показано, что с помощью спектрально-морфометрического анализа можно количественно оценивать разнообразие полигонально-жильных структур. В дальнейшем данный подход может быть усовершенствован за счет ландшафтной интерпретации выявленных количественных особенностей.

Ключевые слова: *полигонально-жильные структуры, дистанционное зондирование криолитозоны, мерзлотные ландшафты, морфометрический анализ, пространственный анализ, Чарская котловина.*

¹Работа выполнена при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 14-05-31510.

Контактное лицо: Панченко Евгений Геннадьевич, *адрес:* 101000, Москва, Уланский переулок, д. 13, строение 2; *e-mail:* geougee@gmail.com

Для цитирования: Панченко Е.Г., Станиловская Ю.В. Спектральный и морфометрический анализ полигонально-жильных структур в Чарской котловине // Arctic Environmental Research. 2017. Т. 17, № 3. С. 185–194. DOI: 10.17238/issn2541-8416.2017.17.3.185

Цель данной работы – сформировать методику количественного анализа полигонально-жильных структур (ПЖС) на основе их спектральных и морфометрических характеристик с учетом качественной типизации ландшафтных условий.

Разновидностью ПЖС в криолитозоне являются характерные для полярных регионов повторно-жильные льды (ПЖЛ), которые изучаются с 1915 года. Актуальность их исследования обусловлена выявлением отклика ПЖЛ на изменение климата и промышленным освоением криолитозоны. ПЖЛ хорошо изучены в России и за рубежом, однако исследования на основе их спектральных и морфометрических

характеристик пока не получили широкого распространения [1, 2]. Настоящее исследование направлено на расширение возможностей изучения ПЖС на основе данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ).

Район исследования – Чарская котловина, расположенная на севере Читинской области (рис. 1), характеризуется широким распространением ПЖС, а также их значительным ландшафтным и геокриологическим разнообразием [3, 4]. При многократном повторении морозобойного процесса образуются ПЖС, к числу которых относятся различные категории грунтовых жил, ПЖЛ и возникающие при их оттаивании псевдоморфозы [5]. Многие из них

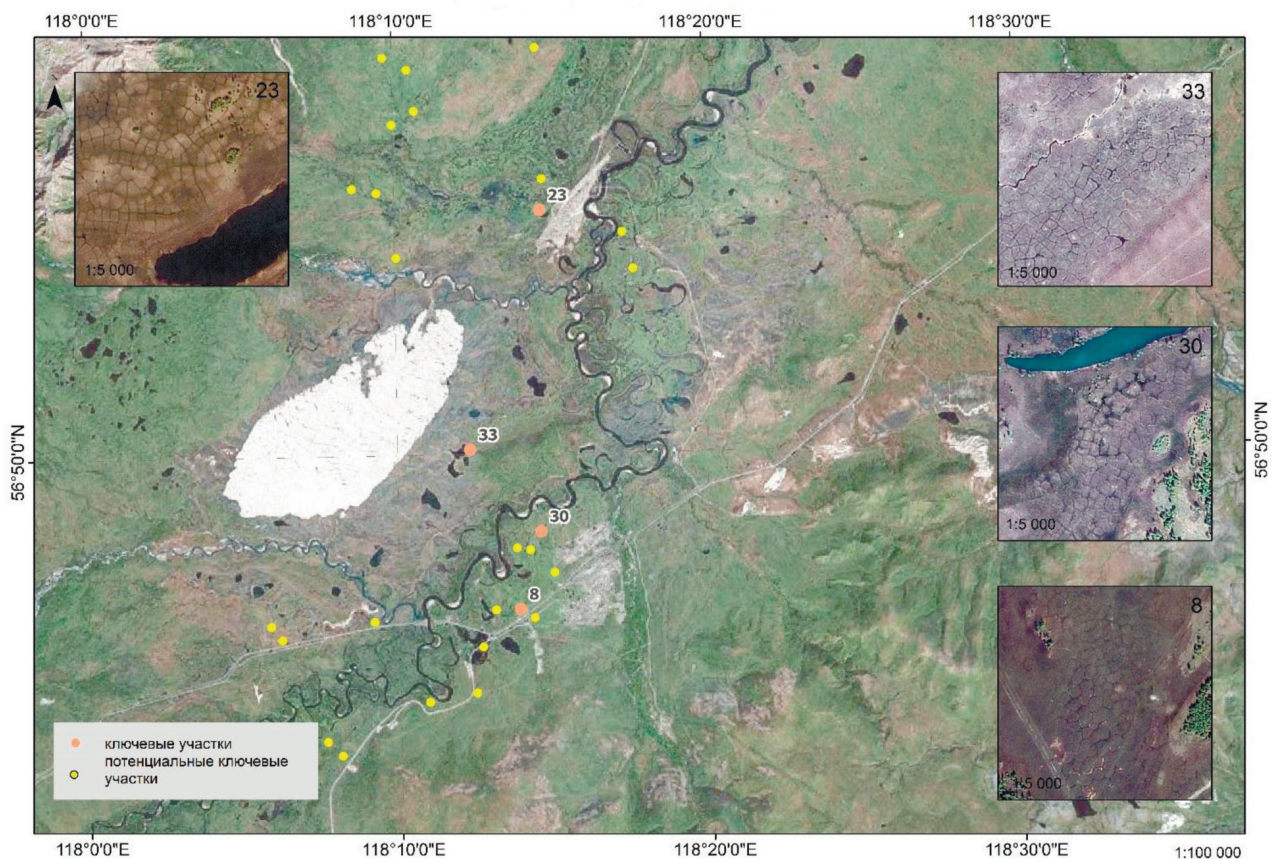


Рис. 1. Территория исследования полигонально-жильных структур и расположение ключевых участков в Чарской котловине

труднодоступны для наземного обследования в силу низкой проходимости большей части территории котловины, поэтому разработка методики дистанционного анализа ПЖС – актуальное и перспективное направление.

Материалы и методы. Для достижения цели исследования проводили сбор данных ДЗЗ (преимущественно из открытых источников) и их предварительную обработку. Далее на основании визуальной инспекции космических снимков выделяли участки распространения ПЖС на территории Чарской котловины (см. *рис. 1*). Обнаруженные ПЖС типизировали по приуроченности к определенным ландшафтным условиям с помощью сопоставления их пространственного расположения и ландшафтной схемы территории. Для количественного анализа ПЖС использовали следующие спектральные и морфометрические параметры: топографический индекс влажности, индекс шероховатости, нормализованный относительный вегетационный индекс (значения на июль и сентябрь), округлость, соотношение сторон, коэффициент формы, размер полигона. Указанные параметры извлекали для отобранных ключевых контуров ПЖС. По каждому количественному параметру формировали гистограммы распределения значений в пределах контура. Полученные количественные характеристики подвергали анализу на предмет возможности применения для инженерно-геокриологической оценки ПЖС, а также оценки их динамического состояния.

При изучении ПЖС Чарской котловины (Северное Забайкалье) использовали следующие материалы ДЗЗ:

1. Многоспектральные космические снимки Landsat 7 (30 м, 11 июля и 9 сентября 2000 года). Июль – месяц наиболее интенсивного вегетационного периода, что важно для определения спектральных параметров территории, связанных с растительностью. Сентябрь – месяц максимального протаивания многолетнемерзлых пород, что важно для оценки инженерно-геокриологических условий территории. Помимо

этого, использование пары разновременных снимков за один год дает дополнительную информацию при анализе различных спектральных характеристик территории.

2. Цифровая модель рельефа (ЦМР) ASTER GDEM v.2 (1 угл. с). Перед анализом ЦМР подвергали предварительной обработке с целью повышения геоморфологической достоверности [6]: удалению артефактов (террас и западин) и прожигу гидрографической сети 1 [7]. Таким образом, далее в анализе применяли ЦМР с повышенной относительной точностью. Значения абсолютных высот в данном случае не соответствуют реальным, поэтому далее в работе использовали только относительные характеристики высот.

3. Банк высокодетальных многоспектральных космоснимков Google Earth. На основе дешифрирования данных снимков выделяли контуры ПЖС. Отбор участков и оконтуривание ПЖС основывали на следующих формальных критериях: не содержат техногенных объектов; структура и текстура полигонального рисунка гомогенна; располагаются во внутренней части ландшафтного массива – как можно дальше от его маргинальных зон и, соответственно, от воздействия термодинамических процессов соседних ландшафтных типов. На основе обозначенных критериев по результатам дешифрирования было отобрано 24 векторных контура для последующего анализа.

4. Многоспектральный космический снимок IKONOS (0,8 м, 23 июня 2010 года). На основе космических многозональных снимков сверхвысокого разрешения осуществляли оцифровку ПЖС в пределах ключевых участков. Предварительную обработку снимков – атмосферную коррекцию (фильтрацию атмосферного шума) изображений методом темных участков [8] – производили в специализированном программном пакете PANCROMA. Оцифровку осуществляли вручную в среде ArcGIS при чередовании комбинаций каналов снимка, поскольку на отдельных участках ПЖС находятся на различных стадиях развития,

что обуславливает отличия в распределении влажности между центрами полигонов и межполигональными понижениями. Соответственно, чередование комбинаций каналов, в каждой из которых присутствует инфракрасный канал, улучшает полноценность покрытия оцифрованной территории с развитием полигональных образований. Наиболее продуктивными комбинациями каналов оказались: 4-3-2, 4-3-1, 1-4-1. Для более точного отображения ПЖС производили балансировку гистограммы.

Непосредственное выделение полигонов выполняли в несколько стадий. Сначала на стыках межполигональных решеток проставляли точки. Затем эти точки соединяли полилиниями. Далее полилинии конвертировали в полигональный слой, а сами линии разбивали проставленными изначально точками. Таким образом в итоге получены полигональный слой и слой полилиний, где каждая линия соответствует одному уникальному ребру полигональной решетки.

Типизацию ландшафтной приуроченности контуров ПЖС проводили на основе данных полевых обследований территории [9] и дешифрирования космоснимков. Выделены следующие типы ландшафтов: озерно-аллювиальные равнины (участки 12, 21, 24); флювиогляциальные и моренные поверхности – озерные котловины (участки 3–6), ложбины стока (участки 2, 8–10), субгоризонтальные поверхности (участки 1, 7); подгорные шлейфы (участок 23); долины крупных рек – старично-мандровые комплексы (участки 13–16, 19, 20, 22); долины малых рек (участки 11, 17, 18).

Открытые данные ДЗЗ позволяют получать различные спектральные и морфометрические параметры для количественной оценки территории. Эти параметры могут быть как первичными деривативами, так и вторичными – индексами [10]. Набор количественных параметров оценки территории напрямую зависит от доступности данных, их спектрального, временного и пространственного разрешения. Так, для данной территории нам не удалось извлечь па-

раметры, которые могли бы быть использованы для дешифрирования и анализа скрытых (погребенных) ПЖС. Параметры для количественной оценки видимых ПЖС представлены в *табл. 1*. По каждому из них было сформировано растровое изображение на территорию исследования.

Параметризация морфологии ПЖС основывалась на вычислении базовых характеристик полигонов как геометрических фигур, а также конвенциональных параметров, используемых при морфологическом анализе полигонов как форм криогенного рельефа [1, 2]. Для анализа закономерностей формирования и динамического состояния ПЖС в разных ландшафтных условиях сопоставляли выборки значений морфологических параметров по ключевым участкам: составляли диаграммы рассеяния для отобранных пар параметров; для отобранных ключевых участков анализировали статистические значения по сходным параметрам с целью выявления отличий в их средних значениях и дисперсии.

Перед извлечением значений спектральных и морфометрических параметров каждое растровое изображение было нормализовано относительно шкалы 0-1 по линейной функции. Для каждого из векторных контуров ПЖС далее извлекали значения по каждому из количественных параметров.

Результаты и обсуждение. Для большинства участков распределение значений топографического индекса влажности (TWI) характеризуется двумя максимумами (*рис. 2*, см. с. 190). Судя по всему, один частотный максимум соответствует центральным частям полигонов, а второй – межполигональным понижениям. Данное предположение при его дальнейшей проверке может быть использовано для дистанционной оценки соотношения площадей полигонов и межполигональных понижений, оценки гидроморфности ПЖС, а также для оценки потенциального содержания льда в жилах. Также стоит отметить различия в виде гистограмм для ПЖС в зависимости от их ландшафтного положения.

Таблица 1

**НАБОР СПЕКТРАЛЬНЫХ И МОРФОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
ДЛЯ КОЛИЧЕСТВЕННОГО АНАЛИЗА ПОЛИГОНАЛЬНЫХ СТРУКТУР
НА ОСНОВЕ ДАННЫХ КОСМОСЪЕМКИ**

Параметр	Значение	Источник данных	Формула
Топографический индекс влажности (TWI)	Определяет топографически обусловленное распределение влажностных потоков	ASTER GDEM	$\ln(A / \operatorname{tg}(\beta))$, где A – удельная водосборная площадь, β – угол наклона земной поверхности
Индекс шероховатости (Melton ruggedness number)	Индекс, соотносящийся с накоплением влажностных потоков	ASTER GDEM	$(Z_{\max} - Z_{\min}) / \sqrt{S}$, где Z_{\max} , Z_{\min} – максимальная, минимальная высота и площадь полигональной структуры
Нормализованный относительный индекс растительности (NDVI), сентябрь и июль	Простой показатель количества фотосинтетически активной биомассы	Landsat 7	$(\text{NIR} - \text{RED}) / (\text{NIR} + \text{RED})$, где NIR, RED – отражение в ближней инфракрасной и красной областях спектра
Размер полигона, м	Диаметр окружности, эквивалентной по площади выделенному полигону	IKONOS	$\sqrt{4S/\pi}$, где S – площадь полигональной структуры
Коэффициент формы (или формфактор)	Конструктивная характеристика, определяющая геометрическую форму и габаритные размеры	IKONOS	$4\pi S / L^2$, где S , L – площадь и периметр полигональной структуры
Округлость	Степень округлости выделенного полигона	IKONOS	$4S / (\pi D_{\max}^2)$, где S , D_{\max} – площадь и максимальный диаметр полигональной структуры
Соотношение сторон	Эксцентриситет (отношение высоты к ширине) полигона	IKONOS	D_{\max} / D_{\min} , где D_{\max} , D_{\min} – максимальный и минимальный диаметр полигонов

Параметр шероховатости напрямую связан с микрорельефом ПЖС и его неоднородностью, т. е. с размерами полигональной сетки и самих полигонов. Наличие в распределении двух максимумов, судя по всему, можно интерпретировать как наличие сети трещин разного порядка (рис. 3, см. с. 190). Таким образом, распределение частот значений дан-

ного параметра при дальнейшей проверке может быть использовано для дистанционного определения размерности элементов ПЖС, а также выявления наличия трещин генерации разного порядка. Также стоит отметить различия в виде гистограмм для полигональных структур в зависимости от их ландшафтного положения.

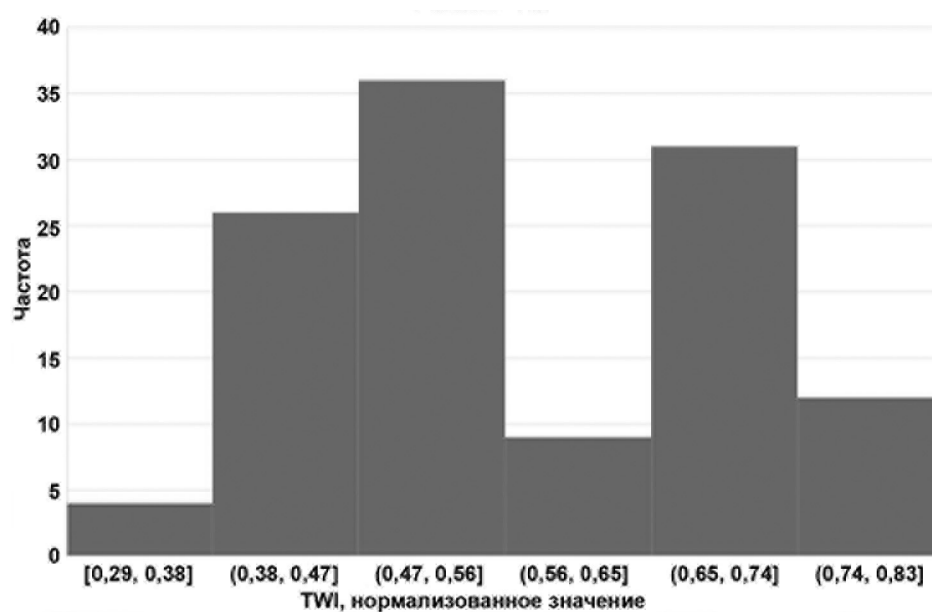


Рис. 2. Гистограмма распределения значений топографического индекса влажности (TWI) для субгоризонтальной поверхности (участок 1)

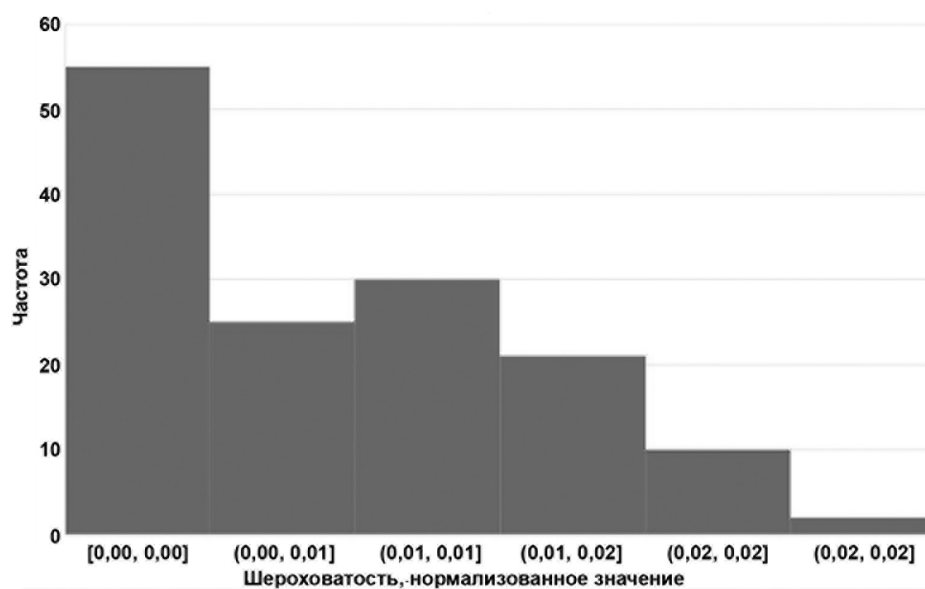


Рис. 3. Гистограмма распределения значений индекса шероховатости для озерной котловины (участок 6)

Нормализованный относительный индекс растительности (NDVI) отображает количество активной фитомассы и может быть косвенно использован для дистанционной характеристики ПЖС совместно с полевыми данными геоботанических наблюдений. Наличие на гистограмме двух частотных максимумов (рис. 4) говорит о доминировании на участке 4 двух различных типов растительных покровов, которые, судя по всему, соответствуют полигонам и межполигональным понижениям. Также стоит отметить различия в виде гистограмм для полигональных структур в зависимости от их ландшафтного положения. Сопоставление разновременных частотных распределений значений NDVI в совокупности с анализом результатов геоботанического обследования может способствовать созданию нового метода дистанционного изучения ПЖС.

Важно отметить, что отдельным направлением для развития данного исследования является непосредственно статистический анализ характера распределений – выявление принад-

лежности его к нормальному, логнормальному или же пуассоновскому типу, а также эмпирическая проверка на основании дальнейших полевых работ.

Морфометрический анализ дал следующие результаты. На всех участках выявляется устойчивая отрицательная зависимость между соотношением сторон и округлостью полигонов. На участках ПЖС флювиогляциальных и моренных поверхностей отмечается снижение значений соотношения сторон (эксцентриситета) при увеличении размера полигонов. На участках ПЖС в пределах подгорных шлейфов соотношение сторон практически не меняется в зависимости от размеров полигонов. Также на этих участках округлость полигонов практически не меняется при увеличении их размеров. На ПЖС в пределах подгорных шлейфов коэффициент формы постоянный вне зависимости от размеров полигонов, в то время как на других участках отмечается рост значений коэффициента при увеличении размеров полигонов. Для участков в пределах ложбин стока характе-

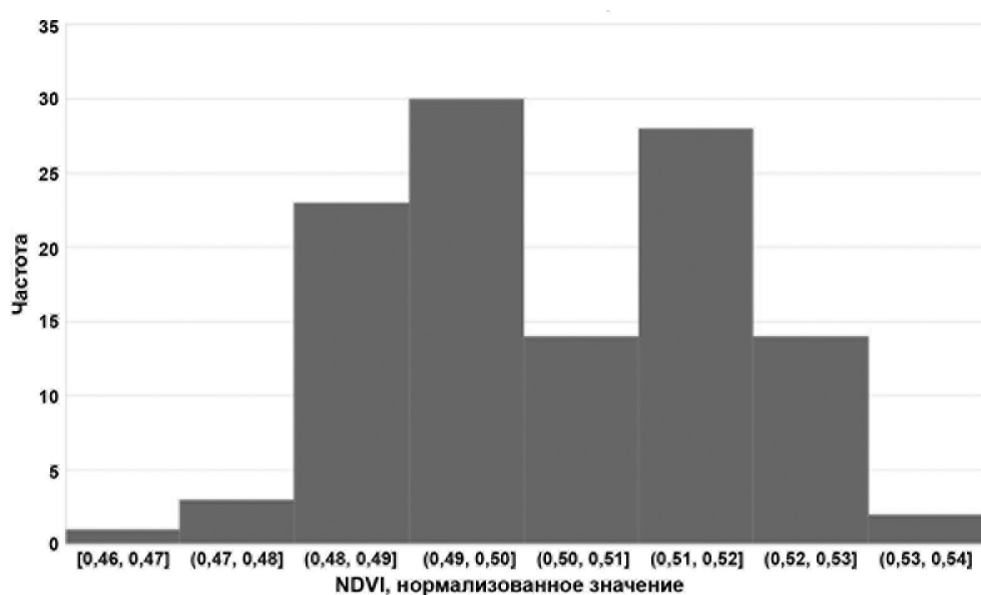


Рис. 4. Гистограмма распределения значений нормализованного относительного индекса растительности (NDVI) за сентябрь 2000 года для озерной котловины (участок 4)

рен заметный рост округлости полигонов при увеличении их размеров. Для ПЖС в пределах других ландшафтных типов выявленные закономерности требуют дальнейшего уточнения.

Существующие экспериментальные методики оцифровки и параметризации криогенных полигональных структур на основе данных ДЗЗ требуют дальнейшей проработки. Исследования по этой теме либо проведены в гомогенных ландшафтных условиях [2], либо фокусируются на межпланетарном сравнении полигональных образований [1]. Одной из задач нашего исследования являлось изучение закономерностей формирования земных полигонов в пределах различных таежных ландшафтных выделов одного региона (Чарской котловины), поэтому некоторые алгоритмы оцифровки полигональной сети, успешно опробованные в указанных выше исследованиях, не могут быть эквивалентно применены в нашей работе. В частности, это относится к оконтуриванию полигональной сетки посредством полигонов Вороного [2]: данный алгоритм успешно используется в однородных тундровых ландшафтных условиях и при незначительном растительном покрове.

Стоит также отметить, что в указанных выше работах в совокупности с данными ДЗЗ применяются данные наземных наблюдений. Цель, задачи и региональный масштаб настоящего исследования, а также его инженерно-геокриологический фокус требуют разработки более продвинутой методики оцифровки ПЖС на основе данных ДЗЗ с минимизацией необходимости дополнения ее данными наземных полевых наблюдений. Во-первых, основным ограничением здесь является параметризация ширины межполигональных понижений. Этот параметр – один из ключевых с точки зрения инженерной геокриологии. Однако значения ширины в условиях ручной оцифровки и визуальной экспертной инспекции снимка снимаются неэффективно, особенно при значительных площадях картирования и неоднородных ландшафтных условиях. Следовательно, разрабатываемая методика должна включать алгоритм автоматического и полуавтоматического дешифрирования линейных и полигональных

структур на основе космических снимков. Это – важнейшая задача следующего этапа реализации данного исследования.

Во-вторых, одним из наиболее значимых параметров пространственного распределения объектов (в данном случае – полигонов) является R-статистика (метод ближайшего соседа), отображающая степень, до которой распределение измеряемого точечного наблюдения отстоит от случайного. В данном случае вопрос, который предстоит выяснить на следующем этапе реализации исследования, – что именно использовать в качестве точечного наблюдения: центры полигонов или точки схождения межполигональных клиньев? Скорее всего, оба подхода измерения R-статистики могут быть полезны, и их выбор зависит от конкретных исследовательских целей.

В-третьих, важным вопросом является оценка динамики ПЖС. Необходимо знать, находятся они в активной, стабильной или же деградирующей фазе своего существования. К сожалению, применение дешифрирования разновременных снимков в данном случае не применимо, поскольку для анализа структуры ПЖС требуются снимки сверхвысокого разрешения, которые недоступны или не существуют для предыдущих десятилетий. Следовательно, нужно искать иной способ анализа динамического состояния ПЖС. Возможным выходом является анализ распределения влажности между полигонами и межполигональной сеткой. В частности, имеет смысл проанализировать распределение значений влажности поверхности, растительных индексов и спектральных сигнатур между разными формами нанорельефа полигональных образований.

Результатом следующего этапа реализации исследования будет являться составление эффективного алгоритма дешифрирования и параметризации полигональных образований, предоставляющего исчерпывающие морфометрические данные, необходимые для инженерно-геокриологической оценки территории развития полигонов. Данный алгоритм, с одной стороны, будет включать морфологический анализ, опробованный и представленный

в данной статье, с другой стороны – будет дополнен и расширен за счет методологической проработки обозначенных выше ограничений.

Заключение. Данное количественное обследование ПЖС на основании распределения частот значений спектральных и морфометрических характеристик отличается новизной. Приведен первичный анализ гистограмм распределения частот значений для следующих параметров: топографический индекс влажности, индекс шероховатости, нормализованный относительный индекс растительности

на июль и сентябрь. Предположения относительно интерпретации гистограмм частоты значений являются первичными и требуют дальнейшего развития методологии количественного анализа ПЖС на основе продолжения как дистанционных, так и наземных исследований.

Разработанная методика, верифицированная в полевых условиях, может быть применима для качественной и количественной оценки термокарстовой опасности по ПЖС для линейных объектов.

Список литературы

1. Yoshikawa K. Origin of the Polygons and the Thickness of Vastitas Borealis Formation in Western Utopia Planitia on Mars // *Geophys. Res. Lett.* 2003. Vol. 30, № 12. P. 5–1.
2. Ulrich M., Grosse G., Strauss J., Schirrmeister L. Quantifying Wedge-Ice Volumes in Yedoma and Thermokarst Basin Deposits // *Permafrost and Periglacial Processes*. 2014. Vol. 25, iss. 3. P. 151–161.
3. Лопатин Д.В. О некоторых особенностях развития полигональных форм рельефа в Чарской котловине // *Геокриологические условия Забайкалья и Прибайкалья*. М., 1967. С. 205–212.
4. Некрасов И.А., Голованова Г.В. Особенности распространения многолетнемерзлых пород в окрестностях Верхне-Чарского термального источника // *Геокриологические условия Забайкальского Севера*. М., 1966. С. 172–180.
5. Романовский Н.Н. Формирование полигонально-жильных структур. Новосибирск, 1977. 216 с.
6. Hengl T., Gruber S., Shrestha D.P. Reduction of Errors in Digital Terrain Parameters Used in Soil-Landscape Modelling // *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 2004. Vol. 5, iss. 2. P. 97–112.
7. Reuter H.I., Hengl T., Gessler P., Soille P. Preparation of DEMs for Geomorphometric Analysis // *Developments in Soil Science*. 2009. Vol. 33. P. 87–120.
8. Lu D., Moran E., Li G., Hetrick S. Remote Sensing Image Classification // *Advances in Environmental Remote Sensing: Sensors, Algorithms and Applications* / Ed. by Q. Weng. Boca Raton, USA: CRC Press, 2011. 610 p.
9. Сергеев Д.О., Станиловская Ю.В., Перльштейн Г.З., Романовский В.Е., Безделова А.П., Алексютина Д.М., Болотюк М.М., Хименков А.Н., Капралова В.Н., Мотенко Р.Г., Малеева А.Н. Фоновый геокриологический мониторинг в Северном Забайкалье // *Криосфера Земли*. 2016. Т. XX, № 3. С. 24–32.
10. Florinsky I.V. Combined Analysis of Digital Terrain Models and Remotely Sensed Data in Landscape Investigations // *Prog. Phys. Geogr.* 1998. Vol. 22, iss. 1. P. 33–60.

References

1. Yoshikawa K. Origin of the Polygons and the Thickness of Vastitas Borealis Formation in Western Utopia Planitia on Mars. *Geophys. Res. Lett.*, 2003, vol. 30, no. 12, pp. 5–1.
2. Ulrich M., Grosse G., Strauss J., Schirrmeister L. Quantifying Wedge-Ice Volumes in Yedoma and Thermokarst Basin Deposits. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2014, vol. 25, iss. 3, pp. 151–161.
3. Lopatin D.V. O nekotorykh osobennostyakh razvitiya poligonal'nykh form rel'efa v Charskoy kotlovine [On Some Features of Development of Polygonal Relief Forms in the Chara Basin]. *Geokriologicheskie usloviya Zabaykal'ya i Pribaykal'ya* [Geocryological Conditions of Transbaikalia and the Baikal Region]. Moscow, Nauka Publ., 1967, pp. 205–212. (In Russ.)
4. Nekrasov I.A., Golovanova G.V. Osobennosti rasprostraneniya mnogoletnemerzlykh porod v okrestnostyakh Verkhne-Charskogo termal'nogo istochnika [Features of the Permafrost Distribution in the Environs of the Verkhne-Chara Thermal Spring]. *Geokriologicheskie usloviya Zabaykal'skogo Severa* [Geocryological Conditions of the Trans-Baikal North]. Moscow, Nauka Publ., 1966, pp. 172–180. (In Russ.)

5. Romanovskiy N.N. *Formirovanie poligonal'no-zhil'nykh struktur* [Formation of Polygonal Wedge Structures]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1977. 216 p. (In Russ.)
6. Hengl T., Gruber S., Shrestha D.P. Reduction of Errors in Digital Terrain Parameters Used in Soil-Landscape Modelling. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.*, 2004, vol. 5, iss. 2, pp. 97–112.
7. Reuter H.I., Hengl T., Gessler P., Soille P. Preparation of DEMs for Geomorphometric Analysis. *Developments in Soil Science*, 2009, vol. 33, pp. 87–120.
8. Lu D., Moran E., Li G., Hetrick S. Remote Sensing Image Classification. *Advances in Environmental Remote Sensing: Sensors, Algorithms and Applications*. Ed. by Q. Weng. Boca Raton, USA, CRC Press, 2011. 610 p.
9. Sergeev D.O., Stanilovskaya Yu.V., Perl'shteyn G.Z., Romanovskiy V.E., Bezdelova A.P., Aleksyutina D.M., Bolotyuk M.M., Khimenkov A.N., Kapralova V.N., Motenko R.G., Maleeva A.N. Fonovyy geokriologicheskii monitoring v Severnom Zabaykal'e [Background Geocryological Monitoring in Northern Transbaikalia Region]. *Kriosfera Zemli* [Earth Cryosphere], 2016, vol. XX, no. 3, pp. 24–32.
10. Florinsky I.V. Combined Analysis of Digital Terrain Models and Remotely Sensed Data in Landscape Investigations. *Prog. Phys. Geogr.*, 1998, vol. 22, iss. 1, pp. 33–60.

DOI: 10.17238/issn2541-8416.2017.17.3.185

Evgeniy G. Panchenko*, **Yuliya V. Stanilovskaya***

*Sergeev Institute of Environmental Geoscience of the Russian Academy of Sciences
(Moscow, Russian Federation)

SPECTRAL AND MORPHOMETRIC ANALYSIS OF POLYGONAL WEDGE STRUCTURES IN THE CHARA BASIN

The paper presents a technique for remote sensing of polygonal wedge structures based on space survey data within the framework of morphometric analysis, spectral analysis and typification of landscape conditions of polygonal wedge structures. For the first time, we use the quantitative estimation of spectral-morphometric characteristics of polygonal objects relative to their structural features and landscape position. This factor has a significant potential for further development and integration with geobotanical, engineering-geocryological and statistical methods. Parametrization of morphology of polygonal wedge structures is based on the calculation of principal characteristics of polygons as geometric figures, as well as conventional parameters used in the morphological analysis of polygons as forms of cryogenic relief. We compare value samples of morphological parameters by index plots in the taiga zone of the Chara basin with continuous permafrost to analyze the patterns of formation and dynamic state of polygonal structures in different landscape conditions. The authors determine 12 morphometric parameters for four index plots and calculate basic statistical values for each of them (minimum, maximum and mean values, standard deviation). Spectral and morphometric analysis allows us to quantify the diversity of polygonal wedge structures. In the future, this approach can be improved due to the landscape interpretation of the revealed quantitative features.

Keywords: *polygonal wedge structure, remote sensing of cryolithozone, cryogenic landscape, morphometric analysis, spatial analysis, Chara basin.*

Поступила 25.04.2017
Received on April 25, 2017

Corresponding author: Evgeniy Panchenko, *address:* Ulanskiy per., 13, stroenie 2, Moscow, 101000, Russian Federation; *e-mail:* geougee@gmail.com

For citation: Panchenko E.G., Stanilovskaya Yu.V. Spectral and Morphometric Analysis of Polygonal Wedge Structures in the Chara Basin. *Arctic Environmental Research*, 2017, vol. 17, no. 3, pp. 184–194. DOI: 10.17238/issn2541-8416.2017.17.3.185

**АВТОМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА РАННЕГО ОБНАРУЖЕНИЯ
ГИДРАТООБРАЗОВАНИЯ В ГАЗОВЫХ ШЛЕЙФАХ
НА ОСНОВЕ КОГНИТИВНЫХ МОДЕЛЕЙ**

М.Ю. Прахова, А.Н. Краснов*, Е.А. Хорошавина**

*Уфимский государственный нефтяной технический университет
(Республика Башкортостан, г. Уфа)

При разработке газовых месторождений серьезной проблемой является гидратообразование в скважинах и газовых шлейфах. Эта проблема особенно остро стоит на месторождениях, расположенных в арктической зоне, в связи со специфическими условиями их эксплуатации: низкими температурами, прокладкой шлейфов в вечной мерзлоте и т. п. Образующиеся гидраты могут привести к аварийным ситуациям. Безгидратный режим эксплуатации на месторождениях арктической зоны практически невозможен, поэтому оперативное диагностирование возникновения гидратообразования – актуальная задача, которая может быть решена путем разработки автоматических систем раннего обнаружения в шлейфе условий гидратообразования и начала этого процесса. В статье рассмотрены основные факторы, влияющие на процесс гидратообразования. Показано, что взаимосвязь между ними не может быть описана аналитически, кроме того, отсутствует достаточная количественная информация об этих факторах. Предложено строить системы обнаружения с использованием когнитивных карт. Управляющие воздействия в разрабатываемой системе формируются на основе результатов онлайн-замеров термобарических условий в начале и конце шлейфа, температуры окружающей среды и температуры точки росы по воде, а также значений дебита скважины, состава и плотности газа, выдаваемых технологической службой промысла. В качестве базового критерия диагностирования начала процесса гидратообразования выбрана теоретическая температура гидратообразования, на которую существенно влияет изменение коэффициента теплопередачи газа в шлейфе в окружающую среду, а также ряд других факторов (наличие абразивных частиц и влаги в газе, состояние грунта и рельеф местности, наличие и состояние снежного покрова и т. д.). В качестве примера предложена детерминированная когнитивная модель для корректировки коэффициента теплопередачи, использование которой позволяет более точно рассчитать теоретическую температуру гидратообразования и, как следствие, повысить точность дозирования метанола.

Ключевые слова: *газовый шлейф, газовые гидраты, условия гидратообразования, подача ингибитора гидратообразования, метанол, когнитивная карта, коэффициент теплопередачи газа.*

Контактное лицо: Прахова Марина Юрьевна, адрес: 450062, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Космонавтов, д. 1; e-mail: prakhovamarina@ua.ru

Для цитирования: Прахова М.Ю., Краснов А.Н., Хорошавина Е.А. Автоматическая система раннего обнаружения гидратообразования в газовых шлейфах на основе когнитивных моделей // Arctic Environmental Research. 2017. Т. 17, № 3. С. 195–203. DOI: 10.17238/issn2541-8416.2017.17.3.195

В Арктической зоне Российской Федерации сосредоточено 90 % извлекаемых ресурсов углеводородов всего континентального шельфа, добывается 90 % природного газа и сконцентрировано 80 % общероссийских разведанных запасов газа промышленных категорий [1]. Эксплуатация газовых и газоконденсатных месторождений, расположенных в этой зоне, существенно осложняется многими факторами: суровые климатические условия, отсутствие развитой инфраструктуры, постоянного электроснабжения и т. п. К этим факторам можно также отнести такое специфическое явление, как гидратообразование. Любой гидрат – это химическое соединение, в состав которого входит вода. В газовой промышленности под гидратами принято понимать вещества, состоящие из молекул компонентов природного газа и воды [2]. Газовые гидраты, или водные клатраты, – это твердые кристаллические вещества, напоминающие по внешнему виду спрессованный снег. Их образование в газовом потоке обусловлено тем, что в газоносных пластах всегда присутствует вода, которая насыщает добываемый природный газ.

Гидратообразование является серьезной проблемой при добыче и транспорте газа. На газовых промыслах особенно сильно данная проблема проявляется на технологических участках, по которым проходит неосушенный газ, – это сами скважины, шельфы и коллекторы. Гидраты отлагаются на внутренних стенках труб, резко уменьшая их пропускную способность вплоть до полной закупорки; отложение гидратов внутри запорной арматуры приводит к потере ею работоспособности. Таким образом, гидратообразование не только снижает эффективность эксплуатации газового промысла, но и приводит к возникновению аварийных ситуаций, устранение которых вносит весомый вклад в себестоимость добычи газа [3, 4].

Для образования гидратов в газе необходимо одновременное наличие трех факторов [5]: благоприятные термобарические условия (особенно сочетание высокого давления и низких температур); наличие гидратообразующего

вещества (метана, этана, двуокиси углерода и т. д.); достаточное количество воды.

Ускоренному образованию гидратов способствуют такие явления, как турбулентность и наличие центров кристаллизации [6]. Наиболее активно образование гидратов происходит на участке с высокими скоростями потока. Это обстоятельство делает дроссельную арматуру особо уязвимой к образованию гидратов за счет одновременного действия двух неблагоприятных факторов – значительного понижения температуры природного газа вследствие эффекта Джоуля–Ленца и увеличения скорости потока в уменьшенном проходном сечении клапана.

Центрами кристаллизации для гидратов могут быть дефекты трубопроводов, сварные швы, арматура, а также частички шлама, окарины или песка.

Наличия гидратообразующего вещества избежать невозможно, фактически сам газовый поток является этим веществом, поэтому существующие методы предупреждения образования гидратов в потоке газа и ликвидации уже имеющихся гидратных пробок направлены на корректировку или устранение двух оставшихся факторов. Условно эти методы можно разделить на три группы – технологические, химические и физические. К технологическим методам относятся поддержание безгидратных режимов эксплуатации газопроводов (понижением давления и повышением температуры газа) и осушка газа. Химические методы – это ввод в газовый поток ингибиторов гидратообразования, в результате чего изменяются условия равновесия системы «газ – гидрат – вода» [7]. Физические методы заключаются в поддержании температуры потока газа выше температуры гидратообразования с помощью локальных подогревателей, теплоизоляции трубопроводов и подбора режима эксплуатации, обеспечивающего максимальную температуру газового потока [8, 9].

Все эти методы широко используются в газодобывающей промышленности, однако область применения каждого из них характеризуется специфическими условиями техно-

логического процесса добычи, сбора, промышленной обработки и транспортировки газа. Так, снижение давления ниже давления начала гидратообразования в стволах скважин, шлейфах и магистральных газопроводах обычно возможно только при продувке газа в атмосферу. Таким образом, это аварийный метод, который применим в ограниченных масштабах лишь для ликвидации уже образовавшихся гидратных пробок. Осушка газа до точки росы, исключаяющей выпадение влаги в конденсированной фазе (капельная влага или гидраты), используется при подготовке газа к дальнейшей транспортировке по магистральным газопроводам, но не применима для предупреждения гидратообразования в стволах скважин и промышленных коммуникациях (шлейфах). Повышение температуры газа путем подогрева, теплоизоляции трубопроводов и (или) поддержания оптимальных высокотемпературных режимов используется для предупреждения образования гидратов в скважинах и шлейфах, но практически не применимо при дальнейшей транспортировке газа по магистральным трубопроводам [10, 11].

Наиболее остро стоит проблема гидратообразования в шлейфах газовых скважин, в которых безгидратный режим практически невозможно обеспечить на всех стадиях разработки месторождения. На начальной стадии разработки в шлейфах присутствует высокое давление. По мере выработки месторождения давление снижается, но повышается обводненность добываемого газа. Из-за естественного характера течения газового потока отсутствует возможность регулирования в нужных пределах термобарических условий; сепарация содержащейся в газе пластовой воды также не производится.

В связи вышеизложенным разработка автоматических систем для раннего обнаружения гидратообразования в шлейфе является актуальной задачей.

Практически все существующие методы обнаружения гидратообразования базируются на измерении нескольких ключевых параметров, характеризующих работу шлейфа, и их последующей обработке. К таким параметрам

относятся давление в начале и в конце шлейфа, температура газа, его состав, влагосодержание и дебит скважины. Например, можно подавать в шлейф какой-либо ингибитор гидратообразования при изменении перепада давления по длине шлейфа [12]. Однако перепад давления по длине шлейфа зависит также от температуры и дебита скважин, подключенных к шлейфу, которые могут изменяться во времени и вызывать ложное «обнаружение» гидратов. Можно также рассчитать теоретическую температуру гидратообразования и постоянно сравнивать с ней фактическую температуру газа на выходе его из шлейфа [13].

Анализ температурной динамики в последнее время получил широкое распространение в автоматических системах обнаружения гидратообразования, хотя точность такой диагностики существенно ограничена по следующим причинам. Температура газа на выходе из шлейфа рассчитывается по достаточно сложной формуле. Входящие в нее величины делятся на две группы. В первую группу входят давление и температура газа в начале и в конце шлейфа, расход газа и температура воздуха окружающей среды. Эти параметры, как правило, измеряются в режиме реального времени. Ко второй группе относятся параметры, условно принятые за постоянные величины: геометрия шлейфа (внутренний и наружный диаметр, шероховатость внутренних стенок, длина шлейфа, разность высот начальной и конечной точек шлейфа); коэффициент теплообмена между газом и окружающей средой; плотность газа. Значения этих параметров (кроме плотности, которая периодически измеряется технологическими службами промысла) берутся на момент начала эксплуатации шлейфа, без учета изменений, которые либо неизбежно происходят в процессе эксплуатации, либо носят сезонный характер и т. п.

Цель исследования – разработка автоматической системы раннего обнаружения гидратообразования в шлейфах газовых промыслов на основе когнитивных моделей.

Материалы и методы. Разрабатываемая автоматическая система раннего диагностирования гидратообразования в газовых шлейфах (АСРД ГШ) может рассматриваться как слабо-структурированная система, для которой характерны: наличие большого количества влияющих факторов, взаимосвязь между которыми не может быть описана аналитически; отсутствие достаточной количественной информации о поведении системы и происходящих в ней изменениях.

Недостаток количественной информации в таких системах может быть восполнен построением когнитивной карты, позволяющей выявить наиболее существенные (базисные) факторы, характеризующие взаимодействие объекта и внешней среды, и установить качественные (а при необходимости – и количественные) связи между ними.

Когнитивная карта – это, по сути, математическая модель системы, представленная в виде ориентированного взвешенного графа и позволяющая описывать субъективное восприятие этой системы человеком или группой людей – экспертов в данной области [14, 15]. Она позволяет выявить причинные связи между отдельными элементами системы и оценить их последствия. Составными элементами когнитивной карты являются так называемые концепты (базисные факторы) и причинно-следственные связи между ними. При этом факторы (характеристики ситуации) будут вершинами графа, а связи определяются дугами.

Степень, или «интенсивность», причинно-следственных связей может задаваться либо конкретными численными весами, либо нечеткими отношениями, устанавливаемыми экспертами с помощью функций принадлежности. В этом случае эксперт оценивает силу каждой связи лингвистическими терминами «не влияет», «влияет незначительно», «влияет существенно» и т. п., т. е. когнитивная карта представляется в виде логико-лингвистических моделей [16]. Такие когнитивные карты называются нечеткими. Основное преимущество когнитивных карт в том, что они позво-

ляют при выработке системой управляющих воздействий учесть факторы, не поддающиеся непосредственному измерению. По сути, в нечеткой когнитивной карте (НКК) интуитивная оценка фактора экспертом приравнивается к оценке, полученной в результате измерений.

Построение когнитивной карты ситуации обычно включает опрос экспертов, проводимый в несколько этапов: сначала определяются базовые факторы (концепты), затем каждый эксперт указывает веса связей – так строятся локальные когнитивные карты. Далее с использованием методов экспертных оценок (например, метода парного сравнения) локальные карты сводятся в одну когнитивную карту ситуации. По мере накопления знаний о процессах, происходящих в исследуемой ситуации, становится возможным более детально раскрывать характер связей между факторами. Здесь существенную помощь может оказать использование процедур *data mining* (добычи знаний) [17].

Разрабатываемая АСРД ГШ должна оперативно диагностировать возникновение условий, при которых возможно гидратообразование. Если система подачи ингибитора (метанол) является подсистемой АСРД ГШ, то необходим также расчет оптимального количества метанола для закачки в шлейф.

Как уже упоминалось, процесс гидратообразования во многом определяется термобарическими условиями в шлейфе. Давление зависит от таких факторов, как дебит скважины, длина и диаметр шлейфа, и изменяется по длине шлейфа в нормальных условиях эксплуатации монотонно. Температура же практически полностью определяется локальными условиями теплообмена между газовым потоком и окружающей средой и может меняться по длине шлейфа без какой-либо закономерности.

Управляющие воздействия в разрабатываемой системе принимаются на основании результатов онлайн-замеров давления и температуры в начале и конце шлейфа, температуры окружающей среды и температуры точки росы по воде, измеряемых в конце шлейфа, а также значений дебита скважины, состава и плотности газа, вы-

даваемых технологической службой промысла. Базовым критерием диагностирования начала процесса гидратообразования является теоретическая температура гидратообразования, для расчета которой, кроме перечисленных параметров, используется коэффициент теплопередачи газа в шлейфе в окружающую среду. Его измерение в промышленных условиях не производится, а во всех расчетах используется значение этого коэффициента для шлейфа в момент начала его эксплуатации.

Коэффициент теплопередачи газа в шлейфе в окружающую среду представляет собой интегральную характеристику условий теплообмена системы «газ – труба – теплоизоляция – окружающая среда». Он учитывает: коэффициент теплоотдачи газа стенке шлейфа; теплопроводность стенки шлейфа; теплопроводность теплоизолирующего материала; коэффициент теплоотдачи теплоизолирующего материала шлейфа в окружающую среду.

Значение коэффициента теплопередачи газа в шлейфе зависит от многих факторов: внутреннего и наружного диаметра шлейфа, теплопроводности материала трубы и теплоизолирующего материала, скорости ветра, снеготаносности шлейфа и т. п. Для протяженных шлейфов (а их длина может достигать 10 км) значения этого коэффициента могут отличаться на разных участках в зависимости от рельефа местности.

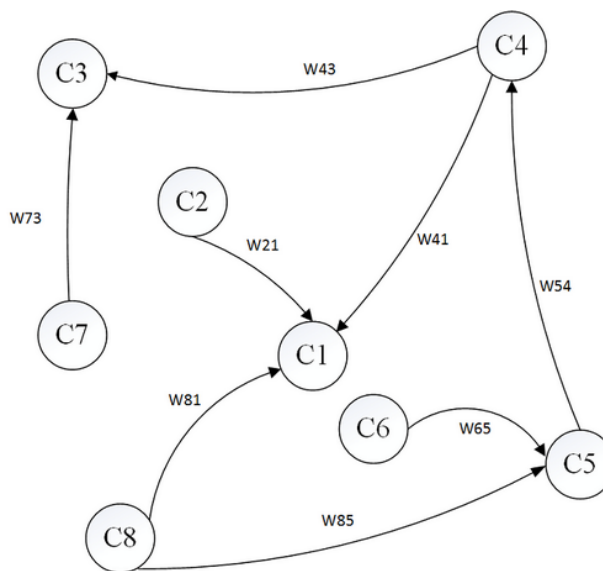
По мере эксплуатации шлейфа происходит износ самой трубы и теплоизоляции, состояние окружающего грунта изменяется в зависимости от сезонных факторов (наличие снега, талой воды, сухого грунта), поэтому значение коэффициента теплопередачи газа в шлейфе в окружающую среду требует периодической коррекции. Экспериментальные исследования, проведенные на Ямбургском газоконденсатном месторождении, показывают, что значения фактических коэффициентов теплопередачи K_p , полученные по промышленным замерам, изменяются в зависимости от времени года и погодных условий в диапазоне от 0,3 до 3–4 ккал/(м²·ч·°С), при расчетном проектном

значении для новой сухой и неповрежденной теплоизоляции 1 ккал/(м²·ч·°С) [16]. В [18] для расчета конкретного значения корректирующего коэффициента предложена недетерминированная вербальная НКК, в которой для оценки силы взаимовлияния факторов использованы лингвистические оценки (например, «существенно», «незначительно» и т. п.). Однако такой подход очень субъективен и затрудняет дальнейшее моделирование на основе НКК.

Результаты и обсуждение. На рисунке показана детерминированная когнитивная карта (ДКК), в которой все веса влияний (W) концептов друг на друга (связей между концептами), а также значения концептов (C) заданы в заранее определенной числовой (количественной) шкале, одинаковой для всех концептов и связей между ними. Карта соответствует текущим условиям эксплуатации Ямбургского газоконденсатного месторождения в зимний период.

ДКК включает следующие концепты:

- C1 – теплопередача газа в шлейфе в окружающую среду;
- C2 – тип и водоёмкость грунта;



Детерминированная когнитивная карта для условий Ямбургского газоконденсатного месторождения в зимний период

С3 – материал, толщина и состояние стенок трубопровода;

С4 – материал, толщина и состояние теплоизоляции;

С5 – наличие снежного покрова, его интенсивность, скорость и направление ветра;

С6 – рельеф местности, по которой проложен шлейф (наличие и протяженность пониженных и повышенных участков);

С7 – состав газа (наличие в газе влаги и механических примесей, например песка);

С8 – способ прокладки шлейфа (надземный или подземный).

На начальном этапе составления ДКК на основе эвристических знаний были определены значения концептов (отражают степень значимости факторов в когнитивной модели) и весов связей между ними (отражают силу взаимного влияния факторов) в нормированной от 0 до 1 шкале (см. *таблицу*). Направление связи отражено в ее индексе.

$$E = \sum_k (C_k^{i-1} - C_k^i)^2 \rightarrow 0.$$

Начальное значение E^0 составило 0,00642; после уточнения значений всех концептов и весов связей между ними значение E^1 уменьшилось до 0,00587, а затем, после дальнейшей итерации, опять стало возрастать. Это позволяет считать уточненные значения в *таблице* оптимальными на данной стадии ДКК.

Заключение. Данная модель может быть использована в качестве примера количественной оценки факторов, влияющих на коэффициент теплопередачи газа в шлейфе в окружающую среду, значения которых не могут быть непосредственно измерены. Аналогичные когнитивные модели могут быть составлены для определения требуемого расхода метанола, поскольку этот расчет также предполагает использование не измеряемых в настоящее время параметров, на-

**ЗНАЧЕНИЯ КОНЦЕПТОВ И ВЕСОВ СВЯЗЕЙ МЕЖДУ НИМИ
В ДЕТЕРМИНИРОВАННОЙ КОГНИТИВНОЙ КАРТЕ ДЛЯ УСЛОВИЙ
ЯМБУРГСКОГО ГАЗОКОНДЕНСАТНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ В ЗИМНИЙ ПЕРИОД**

Концепт	Значение		Вес связи	Значение	
	начальное	уточненное		начальное	уточненное
С1	0,70	0,643258	W21	0,4	0,402
С2	0,45	0,45	W41	0,4	0,402
С3	0,30	0,314765	W65	0,2	0,200
С4	0,50	0,450776	W81	0,4	0,402
С5	0,50	0,490417	W43	0,6	0,600
С6	0,50	0,5	W73	0,3	0,300
С7	0,05	0,05	W54	0,9	0,901
С8	0,65	0,65	W85	0,6	0,620

Проведенная проверка ДКК на согласованность (сбалансированность) концептов выявила необходимость коррекции первоначально назначенных значений. Так, например, для четвертого концепта уточненное значение (с учетом влияния на него пятого концепта) составило

$$C_4^1 = C_5^0 \cdot W_{54} = 0,5 \cdot 0,9 = 0,45 \neq 0,5 \neq C_4^0.$$

Согласование ДКК было проведено методом градиентного спуска [19], цель которого – минимизация ошибки E :

пример остаточного количества метанола в газовом потоке.

Использование в составе АСРД ГШ нечетких и (или) детерминированных когнитивных моделей позволит своевременно уточнять значения базовых критериев для диагностирования начала процесса гидратообразования, избежать ложных заключений о его возникновении и в конечном итоге обеспечить безгидратный режим эксплуатации газосборной сети.

Список литературы

1. Чилингаров А. Войны за Арктику не будет // Известия. 2017. 27 марта.
2. Макогон Ю.Ф. Газовые гидраты, предупреждение их образования и использование. М., 1985. 232 с.
3. Прахова М.Ю., Краснов А.Н., Хорошавина Е.А., Шаловников Э.А. Методы и средства предотвращения гидратообразования на объектах газодобычи // Нефтегазовое дело: электрон. науч. журн. 2016. № 1. С. 101–118. URL: http://ogbus.ru/issues/1_2016/ogbus_1_2016_p101-118_PrakhovaMU_ru.pdf (дата обращения: 05.04.2017).
4. Hydrate Formation in Gas Systems. URL: https://neutrium.net/general_engineering/hydrate-formation-in-gas-systems (accessed 25.04.2017).
5. Naseer M., Brandstatter W. Hydrate Formation in Natural Gas Pipelines // WIT Transactions on Engineering Sciences. 2011. Vol. 70. P. 261–270.
6. Мухаммадиев Р.Т., Обьедков А.В. Научно-техническая оценка влияния содержания сероводорода при образовании гидратных пробок на различных месторождениях // Kimya problemleri. 2014. № 2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/v/nauchno-tehnicheskaya-otsenka-vliyaniya-soderzhaniya-serovodoroda-pri-obrazovanii-gidratnyh-probok-na-razlichnyh-mestorozhdeniyah> (дата обращения: 21.09.2017).
7. Erfani A., Varaminian F., Muhammadi M. Gas Hydrate Formation Inhibition Using Low Dosage Hydrate Inhibitors // 2nd National Iranian Conference on Gas Hydrate (NICGH). Semnan, Iran: Semnan University Publ., 2013. URL: <http://www.semnan.ac.ir/uploads/nicgh1392/articles/7252.pdf> (accessed 01.05.2017).
8. Прахова М.Ю., Мьмрин И.Н., Савельев Д.А. Локальная автоматическая система электроподогрева для предотвращения гидратообразования на сбросном трубопроводе // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2014. № 2. С. 3–6.
9. Di Lorenzo M., Aman Z.M., Soto G.S., Johns M., Kozielski K.A., May E.F. Hydrate Formation in Gas-Dominant Systems Using a Single-Pass Flowloop // Energy & Fuels. 2014. Vol. 28, № 5. P. 3043–3052.
10. Мурзагулов В.Р. Предупреждение гидратообразования в системах промышленного сбора газа залежей Ямбургского газоконденсатного месторождения // Актуальные вопросы нефтегазовой отрасли в области добычи и трубопроводного транспорта углеводородного сырья: материалы науч.-практ. семинара, 19 января 2009 г., Уфа. Уфа, 2009. С. 12–13.
11. Prevent Hydrate Formation in Oil & Gas Pipelines. URL: <http://www.cotoz.com/2012/02/23/prevent-hydrate-formation-in-oil-gas-pipelines/> (accessed 21.04.2017).
12. Бешенцева С.А. Анализ методов предупреждения гидратообразования в трубопроводах // Вестн. кибернетики. 2012. № 11. С. 40–44.
13. Способ управления процессом предупреждения гидратообразования во внутрипромысловых шлейфах газовых и газоконденсатных месторождений Крайнего Севера: пат. 2329371 Рос. Федерация; МПК E21B43/00, F17D3/00 / О.П. Андреев, З.С. Салихов, Б.С. Ахметшин, А.К. Арабский, Г.Е. Вить, Э.Г. Талыбов; заявитель и патентообладатель ООО «Ямбурггаздобыча». Заявл. 26.10.2006, опубл. 20.07.2008.
14. Дмитриев В.М., Ганджа Т.В., Истигечева Е.В., Клепак И.Я. Интеллектуализация управления технологическими процессами на углеводородных месторождениях. Томск, 2012. 212 с.
15. Веревкин А.П. Когнитивные модели в системах искусственного интеллекта: цели и методы построения // Интеграция науки и образования в вузах нефтегазового профиля – 2016: сб. тр. междунар. науч.-метод. конф., посвященной 60-летию филиала Уфим. гос. нефтян. техн. ун-та в г. Салавате, 13–16 мая 2016 г. Салават, 2016. С. 167–170.
16. Жожикашвили В.А., Фархадов М.П., Рыков В.В., Талыбов Э.Г. Система управления процессом предупреждения гидратообразований в УКПГ месторождений Крайнего Севера на основе обработки экспертных знаний // Науч.-техн. сб. 1998. № 7-8. С. 15–27.
17. Вокуева Т.А. Решение задачи имитационного моделирования для когнитивных карт Силова // Информационные технологии в управлении и экономике. 2012. № 1(01). С. 9–15. URL: <http://itue.ru/?p=100/> (дата обращения: 05.04.2017).
18. Прахова М.Ю., Краснов А.Н., Хорошавина Е.А. Анализ методов диагностирования гидратообразования в шлейфах // Нефтегазовое дело: электрон. науч. журн. 2017. № 1. С. 77–94. URL: http://ogbus.ru/issues/1_2017/ogbus_1_2017_p77-94_PrakhovaMYu_ru.pdf (дата обращения: 05.04.2017).
19. Mehrotra S. Implementations of Affine Scaling Methods: Approximate Solutions of Systems of Linear Equations Using Preconditioned Conjugate Gradient Methods // ORSA Journal on Computing. 1992. Vol. 4, iss. 2. P. 103–118.

References

1. Chilingarov A. Voyny za Arktiku ne budet [There will be No War for the Arctic]. *Izvestiya*, March 27, 2017.
2. Makogon Yu.F. *Gazovye gidraty, preduprezhdenie ikh obrazovaniya i ispol'zovanie* [Gas Hydrates, Prevention of Their Formation and Use]. Moscow, Nedra Publ., 1985. 232 p. (In Russ.)
3. Prakhova M.Yu., Krasnov A.N., Khoroshavina E.A., Shalovnikov E.A. Metody i sredstva predotvrashcheniya gidratoobrazovaniya na ob"ektakh gazodobychi [Methods and Tools to Prevent Hydrate Formation in Gas Production]. *Neftegazovoe delo* [Oil and Gas Business], 2016, vol. 14, no. 1, pp. 101–118. Available at: http://ogbus.ru/issues/1_2016/ogbus_1_2016_p101-118_PrakhovaMU_ru.pdf (accessed 05.04.2017).
4. *Hydrate Formation in Gas Systems*. Available at: https://neutrium.net/general_engineering/hydrate-formation-in-gas-systems (accessed 25.04.2017).
5. Naseer M., Brandstatter W. Hydrate Formation in Natural Gas Pipelines. *WIT Transactions on Engineering Sciences*, 2011, vol. 70, pp. 261–270.
6. Muhamadiyev R.T., Obyedkov A.B. Nauchno-tehnicheskaya otsenka vliyaniya sodержaniya serovodoroda pri obrazovanii gidratnykh probok na razlichnykh mestorozhdeniyakh [Scientific and Technical Assessment of the Impact of Hydrogen Sulfide Content on the Formation of Hydrate Plugs on Various Fields]. *Kimya Problemlari* [Chemical Problems], 2014, no. 2. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/v/nauchno-tehnicheskaya-otsenka-vliyaniya-soderzhaniya-serovodoroda-pri-obrazovanii-gidratnykh-probok-na-razlichnykh-mestorozhdeniyakh> (accessed 21.09.2017).
7. Erfani A., Varaminian F., Muhammadi M. Gas Hydrate Formation Inhibition Using Low Dosage Hydrate Inhibitors. *2nd National Iranian Conference on Gas Hydrate (NICGH)*. Semnan, Iran, Semnan University Publ., 2013. Available at: <http://www.semnan.ac.ir/uploads/nicgh1392/articles/7252.pdf> (accessed 01.05.2017).
8. Prakhova M.Yu., Mymrin I.N., Saveliev D.A. Lokal'naya avtomaticheskaya sistema elektropodogreva dlya predotvrashcheniya gidratoobrazovaniya na sbrosnom truboprovode [Use of Local Automation System of Electric Heating to Prevent Formation of Hydrates on a Pipeline for Gas Relief]. *Avtomatizatsiya, telemekhanizatsiya i svyaz' v neftyanoy promyshlennosti* [Automation, Telemechanization and Communication in Oil Industry], 2014, no. 2, pp. 3–6.
9. Di Lorenzo M., Aman Z.M., Soto G.S., Johns M., Kozielski K.A., May E.F. Hydrate Formation in Gas-Dominant Systems Using a Single-Pass Flowloop. *Energy & Fuels*, 2014, vol. 28, no. 5, pp. 3043–3052.
10. Murzagulov V.R. Preduprezhdenie gidratoobrazovaniya v sistemakh promyslovogo sbora gaza zalezhey Yamburgskogo gazokondensatnogo mestorozhdeniya [Prevention of Hydrate Formation in the Systems of Field Gas Gathering in the Deposits of the Yamburg Gas-Condensate Field]. *Aktual'nye voprosy neftegazovoy otrasli v oblasti dobychi i truboprovodnogo transporta uglevodorodnogo syr'ya: materialy nauch.-prakt. seminara, 19 yanvarya 2009 g., Ufa* [Actual Issues of the Oil and Gas Industry in the Extraction and Pipeline Transport of Hydrocarbon Raw Materials: Proc. Sci. Pract. Seminar, January 19, 2009, Ufa]. Ufa, 2009, pp. 12–13. (In Russ.)
11. *Prevent Hydrate Formation in Oil & Gas Pipelines*. Available at: <http://www.cotoz.com/2012/02/23/prevent-hydrate-formation-in-oil-gas-pipelines> (accessed 21.04.2017).
12. Beshentseva S.A. Analiz metodov preduprezhdeniya gidratoobrazovaniya v truboprovodakh [Analysis of Prevention Methods against Formation of Hydrates in Pipelines]. *Vestnik kibernetiki* [Proceedings in Cybernetics], 2012, no. 11, pp. 40–44.
13. Andreev O.P., Salikhov Z.S., Akhmetshin B.S., Arabskiy A.K., Vit' G.E., Talybov E.G. *Sposob upravleniya protsessom preduprezhdeniya gidratoobrazovaniya vo vnutripromyslovykh shleyfakh gazovykh i gazokondensatnykh mestorozhdeniy Kraynego Severa* [A Method for Controlling the Hydrate Formation Prevention Process in the Infield Plumes of Gas and Gas-Condensate Fields of the Far North]. Patent RF, no. 2329371, 2006.
14. Dmitriev V.M., Gandzha T.V., Istigecheva E.V., Klepak I.Ya. *Intellektualizatsiya upravleniya tekhnologicheskimi protsessami na uglevodorodnykh mestorozhdeniyakh* [Intellectualization of Technological Processes Management on Hydrocarbon Deposits]. Tomsk, 2012. 212 p. (In Russ.)
15. Verevkin A.P. Kognitivnye modeli v sistemakh iskusstvennogo intellekta: tseli i metody postroeniya [Cognitive Models in Artificial Intelligence Systems: Goals and Methods of Construction]. *Integratsiya nauki i obrazovaniya v vuzakh neftegazovogo profilya – 2016: sb. tr. mezhdunar. nauch.-metod. konf., posvyashchennoy 60-letiyu filiala Ufim. gos. neftyan. tekhn. un-ta v g. Salavate, 13–16 maya 2016 g.* [Integration of Science and Education in Universities of Oil and Gas Industry – 2016: Collection of Research Papers of Intern. Sci. Method. Conf., Dedicated to the 60th Anniversary of the Salavat Branch of the Ufa State Petroleum Technological University, May 13–16, 2016]. Salavat, 2016, pp. 167–170. (In Russ.)

16. Zhzhikashvili V.A., Farkhadov M.P., Rykov V.V., Talybov E.G. Sistema upravleniya protsessom preduprezhdeniya gidratoobrazovaniy v UKPG mestorozhdeniy Kraynego Severa na osnove obrabotki ekspertnykh znaniy [The Control System for Hydrate Formation Prevention in the Gas Treatment Plant of the Far North Deposits on the Basis of Expert Knowledge Processing]. *Nauchno-tekhnicheskiy sbornik*, 1998, no. 7-8, pp. 15–27.

17. Vokueva T.A. Reshenie zadachi imitatsionnogo modelirovaniya dlya kognitivnykh kart Silova [Application of Cognitive Maps for Modeling of University's Admission Campaign]. *Informatsionnye tekhnologii v upravlenii i ekonomike* [Information Technology in Management and Economics], 2012, no. 1(1), pp. 35–41. Available at: <http://itue.ru/?p=100> (accessed 05.04.2017).

18. Prakhova M.Yu., Krasnov A.N., Khoroshavina E.A. Analiz metodov diagnostirovaniya gidratoobrazovaniya v shleyfakh [Analysis of Methods of Hydrating Diagnosis in Flowlines]. *Neftegazovoe delo* [Oil and Gas Business], 2017, vol. 15, no. 1, pp. 77–94. Available at: http://ogbus.ru/issues/1_2017/ogbus_1_2017_p77-94_PrakhovaMYu_ru.pdf (accessed 05.04.2017).

19. Mehrotra S. Implementations of Affine Scaling Methods: Approximate Solutions of Systems of Linear Equations Using Preconditioned Conjugate Gradient Methods. *ORSA Journal on Computing*, 1992, vol. 4, iss. 2, pp. 103–118.

DOI: 10.17238/issn2541-8416.2017.17.3.195

*Marina Yu. Prakhova**, *Andrey N. Krasnov**, *Elena A. Khoroshavina**

*Ufa State Petroleum Technological University
(Republic of Bashkortostan, Ufa, Russian Federation)

AUTOMATIC EARLY DETECTION SYSTEM OF HYDRATE FORMATION IN GAS PLUMES BASED ON COGNITIVE MODELS

The hydrate formation in wells and gas plumes in the development of gas fields is a serious problem. This problem is especially acute in the fields located in the Arctic zone, due to the specific conditions of their operation: low temperatures, laying of plumes in permafrost, etc. The resulting hydrates can lead to emergencies. The non-hydrate operation regime in the Arctic zone is practically impossible; therefore, operative diagnosis of the emergence of hydrate formation is an actual task that can be solved by developing automatic early detection systems. The article considers the main factors affecting the hydrate formation process. The relationship between them can not be described analytically; in addition, we have insufficient quantitative information about these factors. The authors propose to construct detection systems using cognitive maps. The control actions in the developed system are formed on the basis of the results of online measurements of the thermobaric conditions at the beginning and the end of the plume, ambient temperature and dew point temperature of the water, as well as the mass flow rate of the well, gas composition and density, presented by the oilfield technological service. We use the theoretical hydrate formation temperature as a basic criterion for diagnosing the beginning of the hydrate formation process. This parameter is significantly influenced by the change of the gas heat transfer coefficient in the plume to the environment, and a number of other factors (presence of abrasive particles and moisture in the gas, soil condition and terrain relief, availability and condition of snow cover, etc.). As an example, we propose a deterministic cognitive model for correcting the heat transfer coefficient, the use of which makes it possible to calculate the theoretical hydrate formation temperature more accurately and, consequently, to increase the accuracy of methanol dosing.

Keywords: *gas plume, gas hydrate, hydrate formation condition, hydrate inhibitor injectability, methanol, cognitive map, gas heat transfer coefficient.*

Поступила 10.05.2017

Received on May 10, 2017

Corresponding author: Marina Prakhova, address: ul. Kosmonavtov, 1, Ufa, 450062, Republic of Bashkortostan, Russian Federation; e-mail: prakhovamarina@ya.ru

For citation: Prakhova M.Yu., Krasnov A.N., Khoroshavina E.A. Automatic Early Detection System of Hydrate Formation in Gas Plumes Based on Cognitive Models. *Arctic Environmental Research*, 2017, vol. 17, no. 3, pp. 195–203. DOI: 10.17238/issn2541-8416.2017.17.3.195

СОДЕРЖАНИЕ ИММУННЫХ КОМПЛЕКСОВ И УРОВЕНЬ ОКИСЛИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ В КРОВИ И ОРГАНАХ ГОЛЬЦОВ оз. КРОНОЦКОЕ (п-ов Камчатка)¹

*И.И. Гордеев**, *Д.В. Микряков***, *Н.И. Силкина***, *В.Р. Микряков***, *О.Ю. Бусарова****

*Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии (Москва)

**Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН (Ярославская обл., Некоузский р-н, пос. Борок)

***Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет (Приморский край, г. Владивосток)

Исследованы содержание иммунных комплексов и уровень окислительных процессов в сыворотке крови, печени, почке и селезенке у трех видов гольцов из оз. Кроноцкое (п-ов Камчатка) – *Salvelinus albus*, *S. schmidti* и *S. kronocius*, выловленных в июле-августе 2012 года. Интерес к данному озеру обусловлен высокой степенью его экологической изоляции и, как следствие, уникальными процессами видообразования, которые в нем проходили. Установлены межтканевые и межвидовые отличия содержания иммунных комплексов, продуктов перекисного окисления липидов и уровня антиокислительной активности, связанные, предположительно, с видовыми особенностями, образом жизни гольцов и структурно-функциональной организацией исследуемых тканей и органов. Наибольшее содержание иммунных комплексов обнаружено в почке, а наименьшее – в селезенке; в данных органах зафиксированы достоверные межвидовые различия по этому показателю. При исследовании содержания реактивных продуктов тиобарбитуровой кислоты (ТБК) наиболее высокие значения и достоверные отклонения выявлены в почке гольцов, а наиболее низкие значения и незначительные колебания – в сыворотке крови. Межвидовое сравнение выявило максимальные значения содержания ТБК-реактивных продуктов в почке и сыворотке крови у белого гольца, а в селезенке и печени – у длинно-голового. Сравнение уровня антиокислительной активности показало высокое содержание антиоксидантов в сыворотке крови и селезенке, минимальное – в почке; наиболее низкие значения данного показателя во всех исследуемых тканях зафиксированы у длинноголового гольца. Полученные результаты могут быть использованы для мониторинга состояния здоровья популяции и сравнения с близкородственными видами.

Ключевые слова: *голец, иммунные комплексы, перекисное окисление липидов, антиокислительная активность, озеро Кроноцкое.*

¹ Авторский коллектив выражает благодарность инспекторам Кроноцкого государственного природного биосферного заповедника и лично директору Шпиленку Т.И., а также особую благодарность Маркевичу Г.Н. за организацию экспедиции.

Контактное лицо: Гордеев Илья Иванович, *адрес:* 107140, Москва, ул. В. Красносельская, д. 17; *e-mail:* gordeev@vniro.ru

Для цитирования: Гордеев И.И., Микряков Д.В., Силкина Н.И., Микряков В.Р., Бусарова О.Ю. Содержание иммунных комплексов и уровень окислительных процессов в крови и органах гольцов оз. Кроноцкое (п-ов Камчатка) // Arctic Environmental Research. 2017. Т. 17, № 3. С. 204–211. DOI: 10.17238/issn2541-8416.2017.17.3.204

Озеро Кроноцкое – относительно молодой водоем, геологическая история которого насчитывает примерно 12–14 тыс. лет [1]. Озеро расположено в юго-восточной части п-ова Камчатка и изолировано от заходов проходных рыб системой порогов и водопадов в верхнем течении р. Кроноцкой, что делает его уникальным местом для изучения эволюции изолированных популяций. В водоеме обитают две формы жилой нерки (*Oncorhynchus nerka*) – кокани и представители как минимум трех видов гольцов – белый (*Salvelinus albus* Glubokovsky, 1977), носатый (*S. schmidti* Viktorovsky, 1978) и длинноголовый (*S. kronocius* Viktorovsky, 1978)².

Согласно работе А.Л. Сенчуковой и соавторов [2], гольцы образуют в оз. Кроноцкое сложную популяционную структуру и представляют большой интерес для изучения процессов формообразования и механизмов микроэволюции. Данные генетического анализа свидетельствуют о том, что проходная форма мальмы является предковой по отношению к остальным озерным формам гольцов. При этом авторы делают заключение о том, что наиболее вероятно монофилетическое происхождение всех озерных видов гольцов от небольшой популяции, которая обитала в реке на момент образования озера. Данные виды отличаются друг от друга возрастной структурой, темпом роста и типом питания, а также степенью зараженности их паразитами [2–7]. Наличие в одном озере нескольких близкородственных и, по-видимому, недавно обособившихся видов гольцов делает интересным проведение у них сравнительного анализа различных биологических и иммунофизиологических показателей, отражающих состояние здоровья и адаптацию рыб к биотическим и абиотическим факторам в онто- и филогенезе.

Цель работы – сравнение количественных показателей уровня иммунных комплексов и окислительных процессов в крови и тканях иммунокомпетентных органов носатого, белого и длинноголового гольцов оз. Кроноцкое.

Материалы и методы. Половозрелых рыб отлавливали при помощи донного яруса в период с 27 июля по 15 августа 2012 года в центральной части оз. Кроноцкое и у истока р. Кроноцкой. Обследовали 19 особей носатого (средняя масса (393 ± 23) г, средняя длина (365 ± 9) мм), 16 – белого ((656 ± 79) г, (402 ± 22) мм) и 10 – длинноголового ((1511 ± 123) г, (563 ± 13) мм) гольцов. У отловленных рыб в стерильные пробирки отбирали образцы периферической крови из хвостовой вены и после вскрытия образцы иммунокомпетентных органов (почка, селезенка и печень). Кровь центрифугировали на мини-центрифуге «MiniSpin» («Eppendorf», Германия) для отделения сыворотки, которую далее переносили в чистые пробирки. Затем пробы замораживали и до времени обработки хранили в жидком азоте.

В лабораторных условиях пробирки с пробами размораживали для дальнейших исследований. Из тканей иммунокомпетентных органов готовили гомогенат при помощи гомогенизатора с физиологическим раствором в соотношении 1:1. Отбирали по 1 мл сыворотки крови и чистого гомогената (без осадка) на каждое из дальнейших исследований: содержания иммунных комплексов (ИК) и продуктов перекисного окисления липидов (ПОЛ), уровня антиокислительной защиты (АЗ). Выбор данных показателей обусловлен тем, что они отражают реакцию рыб на заражение паразитами, антропогенное загрязнение и изменение качества среды обитания [8–12].

Содержание ИК устанавливали спектрофотометрически при длине волны 280 нм методом селективной преципитации с 7 %-м полиэтиленгликолем по Ю.А. Гриневич и А.Н. Алферову [13].

Об интенсивности ПОЛ судили по накоплению реактивных продуктов тиобарбитуровой кислоты (ТБК). Их концентрацию определяли спектрофотометрически по интенсивности окрашивания продуктов ПОЛ, реагирующих с ТБК и дающих с ней окрашенный комплекс

²Атлас пресноводных рыб России / под ред. Ю.С. Решетникова. Т. 1. М., 2002. 379 с.

при длине волны 535 нм [14]. Содержание ТБК-реактивных продуктов вычисляли с учетом коэффициента молярной экстинкции ($1,56 \cdot 10^5 \text{ моль}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$) и выражали в наномолях на 1 г ткани.

Об общей антиокислительной активности судили по кинетике окисления субстрата восстановленной формы 2,6-дихлорфенолиндофенола кислородом воздуха по общепринятой методике [15]. Сущность метода заключается в том, что чем выше скорость окисления субстрата в присутствии биологического материала, тем ниже уровень АЗ в тканях. Константу ингибирования окисления субстрата (КОС) – показатель антиокислительной активности ткани – определяли относительно контроля по формуле: $K_i = (K_{\text{кон}} - K_{\text{оп}})/C$, где $K_{\text{кон}}$ и $K_{\text{оп}}$ – константы скорости окисления субстрата в контроле и опыте соответственно; C – концентрация биологического материала в кювете.

Статистическую обработку результатов исследования проводили по критерию Вилкоксона–Манна–Уитни ($p = 0,05$). Средние значения показателей и стандартные ошибки ($M \pm m$) рассчитаны в программе «Statistica 10.0».

Результаты и обсуждение. Сравнительный анализ содержания ИК, ТБК-реактивных продуктов и КОС в сыворотке крови, почке, селезенке и печени гольцов, обитающих в оз. Кроноцкое, выявил межтканевые и межвидовые различия (см. таблицу).

У исследуемых видов гольцов наибольшее содержание ИК обнаружено в почке, а наименьшее – в селезенке. В этих органах зафиксированы значимые ($p = 0,05$) межвидовые различия по данному показателю. Иммунные комплексы, состоящие из антигена, антител и связанных с ними компонентов системы комплемента, играют важную роль в процессах регуляции иммунных реакций, элиминации ксенобиотиков из организма и поддержания иммунофизиологического гомеостаза. Рецептор компонентов комплемента CR1 экспрессирован на макрофагах, нейтрофилах и эритроцитах. CR1 эритроцитов через компоненты комплемента C4b и C3b связывает растворимые ИК и доставляет их к макрофагам селезенки и печени, тем самым обеспечивая клиренс крови от ИК. При нарушении этого механизма ИК выпадают в осадок, прежде всего в базальных мембранах

ИММУНОФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ГОЛЬЦОВ оз. КРОНОЦКОЕ ($M \pm m$)

Показатель	Вид гольца	Материал исследования			
		Сыворотка крови	Почка	Селезенка	Печень
ИК, усл. ед.	1) Носатый ($n = 19$)	4,12±0,03	8,23±0,09	3,47±0,01	6,11±0,02
	2) Белый ($n = 16$)	4,07±0,03	7,68±0,25	3,30±0,02 ¹	6,04±0,03
	3) Длинноголовый ($n = 10$)	4,07±0,02	6,61±0,22	3,55±0,30	6,22±0,00
ТБК-реактивные продукты, нмоль/г	1) Носатый ($n = 19$)	5,03±0,08	12,05±0,06	5,34±0,06	8,17±0,02
	2) Белый ($n = 16$)	5,31±0,10 ¹	13,17±0,10 ¹	5,13±0,02 ¹	8,10±0,02
	3) Длинноголовый ($n = 10$)	5,14±0,28	10,65±0,38 ²	5,44±0,39	8,33±0,00
КОС, л/(мл·мин)	1) Носатый ($n = 19$)	2,04±0,02	5,81±0,07	2,23±0,01	4,06±0,02
	2) Белый ($n = 16$)	1,97±0,02	6,02±0,17	2,13±0,01 ¹	3,96±0,02 ¹
	3) Длинноголовый ($n = 10$)	1,91±0,01 ¹	5,54±0,21	2,10±0,01 ¹	3,95±0,00

Примечания: ¹ – значимые отличия от показателей носатого гольца ($U \leq U_{\text{нос}}$), ² – значимые отличия от показателей белого гольца ($U \leq U_{\text{бел}}$).

сосудов клубочков почек, что может приводить к развитию почечной патологии. Содержание ИК наиболее высокое у носатого гольца. Избыток ИК наблюдается при инфекционных, токсических и аутоиммунных болезнях, вызывает супрессию иммунных реакций, что является причиной развития неконтролируемых патологических процессов [16].

Известно, что в каждом биологическом организме существует баланс окислительно-восстановительных процессов, а изменение соотношения уровня ПОЛ и активности АЗ тканей считается одним из чувствительных индикаторов, отражающих влияние неблагоприятных стресс-факторов на метаболические процессы и состояние здоровья рыб. Проведенное исследование показало высокий уровень межтканевых различий липидопереокислительных и антиокислительных процессов, происходящих в организме гольцов оз. Кроноцкое.

При исследовании содержания ТБК-реактивных продуктов наиболее высокие значения и достоверные отклонения выявлены в почке гольцов, а наиболее низкие значения и незначительные колебания – в сыворотке крови. Максимальные значения содержания ТБК-реактивных продуктов отмечены: в почке и сыворотке крови – у белого гольца, в селезенке и печени – у длинноголового. Минимальные значения КОС характерны для сыворотки крови гольцов, а максимальные – для почки. Наиболее низкие значения КОС во всех исследуемых тканях зафиксированы у длинноголового гольца.

Полученные результаты указывают на зависимость происходящих окислительных процессов от особенностей структурно-функциональной организации исследуемых органов и содержания клеток, интенсивно образующих активные формы кислорода (супероксидный и гидроксильный радикалы, синглетный кислород, пероксиды и многие

другие соединения). Избыток активных форм кислорода становится причиной активации ПОЛ и инактивации структур АЗ [17–20]. В почке, богатой гранулоцитами, которые превосходят все другие типы лейкоцитов по способности нарабатывать активные формы кислорода, процессы ПОЛ происходят более интенсивно, чем в периферической крови, печени и селезенке с низкой долей содержания миелобластов, нейтрофилов и промиелоцитов [21–23]. Аналогичные результаты установлены и для других видов рыб [10, 24]. Полученные различия в содержании ТБК-реактивных продуктов и значениях КОС у исследуемых видов гольцов могут быть также обусловлены стрессирующим влиянием паразитов разных систематических групп [4]. Ранее нами установлено, что у зараженных паразитами рыб происходит нарушение баланса в системе «прооксидант–антиоксидант» в сторону активации перекисеобразовательных процессов, интенсивность которых зависит от уровня заражения [25, 26]. Однако для подтверждения нашего предположения необходимо проведение комплексных исследований, включающих изучение зараженности рыб паразитами.

Заключение. Анализ полученных данных показал как сходства, так и отличия в уровнях исследуемых показателей между различными формами гольца из оз. Кроноцкое. Установленные различия, по-видимому, связаны с видовыми и экологическими особенностями рыб: образом жизни, типом питания, зараженностью паразитами и т. д. [4].

Полученные результаты не дают однозначного ответа на изучаемый в некоторых работах [2, 26, 27] вопрос о степени различия рассматриваемых видов (форм) гольцов, но могут быть использованы для мониторинга состояния здоровья популяции и сравнения с близкородственными видами.

Список литературы

1. Шанцер А.Е., Мелекесцев И.В. Особенности древней и новейшей тектоники района Кроноцкого озера, состав и строение слагающих его молодых вулканогенных толщ // Арх. ИВ АН СССР ДВНЦ. 1967. Т. 37. С. 12.
2. Сенчукова А.Л., Павлов С.Д., Мельникова М.Н., Мюге Н.С. Генетическая дифференциация гольцов (род *Salvelinus*) из озера Кроноцкое на основе анализа митохондриальной ДНК // Вопр. ихтиологии. 2012. Т. 52, № 4. С. 489–499.
3. Викторовский Р.М. Механизмы видообразования у гольцов Кроноцкого озера. М., 1978. 106 с.
4. Савваитова К.А. Арктические гольцы (структура популяционных систем, перспективы хозяйственного использования). М., 1989. 223 с.
5. Буторина Т.Е. О фауне паразитов экологически эквивалентных видов и экотипов гольцов водоемов Камчатки // Сиб. экол. журн. 2003. № 3. С. 279–287.
6. Павлов С.Д., Ретин М.Ю., Пивоваров Е.А. Популяционное разнообразие гольцов (род *Salvelinus*) озера Кроноцкое. Морфобиологические особенности // Сохранение биоразнообразия Камчатки и прилегающих морей: материалы IV науч. конф. (18–19 ноября 2003 г.). Петропавловск-Камчатский, 2003. С. 257–261.
7. Буторина Т.Е., Шедько М.Б., Горовая О.Ю. Особенности экологии гольцов рода *Salvelinus* (Salmonidae) бассейна озера Кроноцкое (Камчатка) по паразитологическим данным // Вопр. ихтиологии. 2008. Т. 48, № 5. С. 652–667.
8. Микряков В.Р., Силкина Н.И., Микряков Д.В. Влияние антропогенного загрязнения на иммунологические и биохимические механизмы поддержания гомеостаза у рыб Черного моря // Биология моря. 2011. Т. 37, № 2. С. 142–148.
9. Микряков В.Р., Балабанова Л.В., Заботкина Е.А., Лапирова Т.Б., Попов А.В., Силкина Н.И. Реакция иммунной системы рыб на загрязнение воды токсикантами и закисление среды. М., 2001. 126 с.
10. Силкина Н.И., Микряков В.Р., Микряков Д.В. Особенности липидного обмена леща *Abramis brama*, обитающего в реках Южного Урала // Экология. 2010. № 6. С. 472–474.
11. Силкина Н.И., Микряков В.Р., Микряков Д.В. Характер изменения некоторых иммунофизиологических показателей зараженных плероцеркоидами *Ligula intestinalis* лещей *Abramis brama* на разных стадиях развития паразита // Изв. РАН. Сер. биологическая. 2012. № 5. С. 567–571.
12. Silkina N.I., Mikryakov D.V., Mikryakov V.R., Rudneva I.I. Effect of Anthropogenic Pollution on Immune Status and Oxidative Stress Parameters in Liver of the Scorpion Fish *Scorpaena porcus*, Inhabiting Coastal Waters of the Black Sea // Hydrobiological Journal. 2014. Vol. 50, № 4. P. 86–92.
13. Гриневич Ю.А., Алферов А.Н. Определение иммунных комплексов в крови онкологических больных // Лаб. дело. 1981. № 8. С. 493–496.
14. Андреева Л.И., Кожемякин Л.А., Кишкун А.А. Модификация метода определения перекисей липидов в тесте с тиобарбитуровой кислотой // Лаб. дело. 1988. № 11. С. 41–43.
15. Семенов В.Л., Ярош А.М. Метод определения антиокислительной активности биологического материала // Укр. биохим. журн. 1985. Т. 57, № 3. С. 50–52.
16. Ройт А., Бростофф Дж., Мейл Д. Иммунология. М., 2000. 592 с.
17. Грубинко В.В., Леус Ю.В., Арсан О.М. Перекисное окисление липидов и антиоксидантная защита у рыб (обзор) // Гидробиол. журн. 2001. Т. 37, № 1. С. 64–78.
18. Меньщикова Е.Б., Зенков Н.К., Ланкин В.З., Бондарь И.А., Труфакин В.А. Окислительный стресс: патологические состояния и заболевания. Новосибирск, 2008. 284 с.
19. Winston G.W. Oxidants and Antioxidants in Aquatic Animals // Comparative Biochemistry and Physiology. 1991. Vol. 100, № 1–2. P. 173–176.
20. Rudneva I.I., Kuz'minova N.S. Effect of Chronic Pollution on Hepatic Antioxidant System of Black Sea Fish Species // International Journal of Science and Nature. 2011. Vol. 2, iss. 2. P. 279–286.
21. Грушко М.П., Ложниченко О.В., Федорова Н.Н. Гемопоз у осетровых рыб. Астрахань, 2009. 190 с.
22. Zapata A.G., Chiba A., Varas A. Cells and Tissues of the Immune System of Fish // The Fish Immune System. Pathogen and Environment / Ed by G. Iwama, T. Nakanishi. London: Academic Press, 1996. P. 1–62.
23. Muiswinkel W.B. van, Vervoorn-Van Der Wal B. The Immune System of Fish // Fish Diseases and Disorders. Vol. 1. Protozoan and Metazoan Infections / Ed. by P.T.K. Woo. Canada: University of Guelph, 2006. P. 678–701.

24. Микряков Д.В., Микряков В.Р., Силкина Н.И. Влияние дексаметазона на окислительные процессы в иммунокомпетентных органах стерляди *Acipenser ruthenus* // Биология внутр. вод. 2014. № 4. С. 86–90.

25. Силкина Н.И., Микряков В.Р. Особенности показателей перекисного окисления липидов у *Ligula intestinalis* (Cestoda: Pseudophyllidea) и их хозяев – *Abramis brama* (L.) // Паразитология. 2005. Т. 39, вып. 2. С. 117–123.

26. Pavlov S.D., Kuzishchin K.V., Gruzdeva M.A., Senchukova A.L., Pivovarov E.A. Phenetic Diversity and Spatial Structure of Chars (*Salvelinus*) of Kronotskaya Lake-River System (Eastern Kamchatka) // Journal of Ichthyology. 2013. Vol. 53, № 6. P. 645–670.

27. Senchukova A.L., Mugue N.S., Pavlov S.D., Mel'nikova M.N. On the Origin of Chars of the Genus *Salvelinus* of the Kronotskoe Lake and Their Relationships with Other Chars Populations of the Kamchatka Peninsula // Journal of Ichthyology. 2013. Vol. 53, № 6. P. 840–848.

References

1. Shantser A.E., Melekestsev I.V. Osobennosti drevney i noveyshey tektoniki rayona Kronotskogo ozera, sostav i stroenie slagayushchikh ego molodykh vulkanogennykh tolshch [Features of Ancient and Modern Tectonics of the Kronotskoe Lake Region, Composition and Structure of Its Young Volcanogenic Strata]. *Arkhiv Dal'nevostochnogo nauchnogo tsentra Akademii Nauk SSSR* [Archive of the Far Eastern Scientific Center of the Academy of Sciences of the USSR], 1967, vol. 37. 12 p.

2. Senchukova A.L., Pavlov S.D., Mel'nikova M.N., Myuge N.S. Geneticheskaya differentsiatsiya gol'tsov (rod *Salvelinus*) iz ozera Kronotskoe na osnove analiza mitokhondrial'noy DNK [Genetic Differentiation of Chars (Genus *Salvelinus*) from the Kronotskoe Lake on the Basis of the Analysis of Mitochondrial DNA]. *Voprosy ikhtiologii* [Journal of Ichthyology], 2012, vol. 52, no. 4, pp. 489–499.

3. Viktorovskiy P.M. *Mekhanizmy vidoobrazovaniya u gol'tsov Kronotskogo ozera* [Mechanisms of Chars Speciation of the Kronotskoe Lake]. Moscow, Nauka Publ., 1978. 106 p. (In Russ.)

4. Savvaitova K.A. *Arkticheskie gol'tsy (struktura populyatsionnykh sistem, perspektivy khozyaystvennogo ispol'zovaniya)* [Arctic Chars (Structure of Population Systems, Prospects of Economic Use)]. Moscow, Agropromizdat, 1989. 233 p. (In Russ.)

5. Butorina T.E. O faune parazitov ekologicheski ekvivalentnykh vidov i ekotipov gol'tsov vodoemov Kamchatki [Parasite Fauna of Ecologically Equivalent Species and Ecotypes of Alpine Chars in Water Bodies of Kamchatka]. *Sibirskiy ekologicheskii zhurnal* [Contemporary Problems of Ecology], 2003, vol. 10, no. 3, pp. 279–287.

6. Pavlov S.D., Repin M.Yu., Pivovarov E.A. Populyatsionnoe raznoobrazie gol'tsov (rod *Salvelinus*) ozera Kronotskoe. Morfobiologicheskie osobennosti [Population Diversity of Chars (Genus *Salvelinus*) of the Kronotskoe Lake. Morphobiological Features]. *Sokhranenie bioraznoobraziya Kamchatki i prilegayushchikh morey: materialy IV nauch. konf. (18–19 noyabrya 2003 g.)* [Conservation of Kamchatka and Adjacent Seas Biodiversity: Proc. 4th Sci. Conf. (18–19 November 2003)]. Petropavlovsk-Kamchatsky, KamchatNIRO Publ., 2003, pp. 257–261. (In Russ.)

7. Butorina T.E., Shed'ko M.B., Gorovaya O.Yu. Osobennosti ekologii gol'tsov roda *Salvelinus* (Salmonidae) basseyna ozera Kronotskoe (Kamchatka) po parazitologicheskim dannym [Specific Features of Chars Ecology of the Genus *Salvelinus* (Salmonidae) in the Kronotskoe Lake Basin (Kamchatka) According to Parasitological Data]. *Voprosy ikhtiologii* [Journal of Ichthyology], 2008, vol. 48, no. 5, pp. 652–667.

8. Mikryakov V.R., Silkina N.I., Mikryakov D.V. Vliyanie antropogennoho zagryazneniya na immunologicheskie i biokhimicheskie mekhanizmy podderzhaniya gomeostaza u ryb Chernogo morya [Effect of Anthropogenic Pollution on the Immunological and Biochemical Mechanisms of Maintaining Homeostasis in Fish of the Black Sea]. *Biologiya morya* [Russian Journal of Marine Biology], 2011, vol. 37, no. 2, pp. 151–157.

9. Mikryakov V.R., Balabanova L.V., Zobotkina E.A., Lapirova T.B., Popov A.V., Silkina N.I. *Reaktsiya immunnoy sistemy ryb na zagryaznenie vody toksikantami i zakislenie sredy* [The Response of the Fish Immune System to Water Pollution by Toxicants and Acidification of the Environment]. Moscow, Nauka Publ., 2001. 126 p. (In Russ.)

10. Silkina N.I., Mikryakov V.R., Mikryakov D.V. Osobennosti lipidnogo obmena leshcha *Abramis brama*, obitayushchego v rekakh Yuzhnogo Urala [Characteristics of Lipid Metabolism in Bream, *Abramis brama*, from Southern Ural Rivers]. *Ekologiya* [Russian Journal of Ecology], 2010, no. 6, pp. 472–474.

11. Silkina N.I., Mikryakov V.R., Mikryakov D.V. Kharakter izmeneniya nekotorykh immunofiziologicheskikh pokazateley zarazhennykh plerotserkoidami *Ligula intestinalis* leshchey *Abramis brama* na raznykh stadiyakh razvitiya parazita [The Nature of Changes of Some Immunophysiological Characteristics in Bream (*Abramis brama*) Infected with Plerocercoids (*Ligula intestinalis*) at Various Stages of Parasite Development]. *Izvestiya RAN. Seriya biologicheskaya* [Biology Bulletin], 2012, vol. 39, no. 5, pp. 485–489.
12. Silkina N.I., Mikryakov D.V., Mikryakov V.R., Rudneva I.I. Effect of Anthropogenic Pollution on Immune Status and Oxidative Stress Parameters in Liver of the Scorpion Fish *Scorpaena porcus*, Inhabiting Coastal Waters of the Black Sea. *Hydrobiological Journal*, 2014, vol. 50, no. 4, pp. 86–96.
13. Grinevich Yu.A., Alferov A.N. Opredelenie immunnykh kompleksov v krovi onkologicheskikh bol'nykh [Determination of Immune Complexes in the Blood of Cancer Patients]. *Laboratornoe delo*, 1981, vol. 8, pp. 493–496.
14. Andreeva L.I., Kozhemyakin L.A., Kishkun A.A. Modifikatsiya metoda opredeleniya perekisey lipidov v teste s tiobarbiturovoy kislotoy [Modification of the Determining Method of Lipid Peroxidation in a Test with Thiobarbituric Acid]. *Laboratornoe delo*, 1988, vol. 11, pp. 41–43.
15. Semenov V.L., Yarosh A.M. Metod opredeleniya antiokislitel'noy aktivnosti biologicheskogo materiala [A Method for Determining the Antioxidant Activity of Biological Material]. *Ukrainskiy biokhimicheskiy zhurnal* [The Ukrainian Biochemical Journal], 1985, vol. 57, no. 3, pp. 50–52.
16. Male D., Brostoff J., Roth D., Roitt I. *Immunology*. Canada, Elsevier, 2013. 590 p.
17. Grubinko V.V., Leus Yu.V., Arsan O.M. Perekisnoe okislenie lipidov i antioksidantnaya zashchita u ryb (obzor) [Lipid Peroxidation and Antioxidant Defense in Fish (Review)]. *Gidrobiologicheskii zhurnal* [Hydrobiological Journal], 2001, vol. 37, no. 1, pp. 64–78.
18. Men'shchikova E.B., Zenkov N.K., Lankin V.Z., Bondar' I.A., Trufakin V.A. *Okislitel'nyy stress: patologicheskie sostoyaniya i zabolvaniya* [Oxidation Stress: Pathological States and Diseases]. Novosibirsk, ARTA Publ., 2008. 284 p. (In Russ.)
19. Winston G.W. Oxidants and Antioxidants in Aquatic Animals. *Comparative Biochemistry and Physiology*, 1991, vol. 100, no. 1-2, pp. 173–176.
20. Rudneva I.I., Kuz'minova N.S. Effect of Chronic Pollution on Hepatic Antioxidant System of Black Sea Fish Species. *International Journal of Science and Nature*, 2011, vol. 2, iss. 2, pp. 279–286.
21. Grushko M.P., Lozhnichenko O.V., Fedorova N.N. *Gemopoez u osetrovyykh ryb* [Hemopoiesis in Sturgeons]. Astrakhan, Triada Publ., 2009. 190 p. (In Russ.)
22. Zapata A.G., Chiba A., Varas A. Cells and Tissues of the Immune System of Fish. *The Fish Immune System. Pathogen and Environment*. Ed. by G. Iwama, T. Nakanishi. London, Academic Press, 1996, pp. 1–62.
23. Muiswinkel W.B. van, Vervoorn-Van Der Wal B. The Immune System of Fish. *Fish Diseases and Disorders. Vol. 1: Protozoan and Metazoan Infections*. Ed. by P.T.K. Woo. Canada, University of Guelph, 2006, pp. 678–701.
24. Mikryakov D.V., Mikryakov V.R., Silkina N.I. Vliyanie deksametazona na okislitelnyie protsessy v immunokompetentnykh organah sterlyadi *Acipenser ruthenus* [Effect of Dexamethasone on Oxidative Processes in the Immunocompetent Organs of Sterlet *Acipenser ruthenus* L.]. *Biologiya vnutrennikh vod* [Inland Water Biology], 2014, vol. 7, no. 4, pp. 397–400.
25. Silkina N.I., Mikryakov V.R. Osobennosti pokazateley perekisnogo okisleniya lipidov u *Ligula intestinalis* (Cestoda: Pseudophyllidea) i ikh khozyaev – *Abramis brama* (L.) [Peculiarities of Lipid Peroxidation Indices in *Ligula intestinalis* (Cestoda: Pseudophyllidea) and Its Host – *Abramis brama* (L.)]. *Parazitologiya*, 2005, vol. 39, no. 2, pp. 117–123.
26. Pavlov S.D., Kuzishchin K.V., Gruzdeva M.A., Senchukova A.L., Pivovarov E.A. Phenetic Diversity and Spatial Structure of Chars (*Salvelinus*) of Kronotskaya Lake-River System (Eastern Kamchatka). *Voprosy ikhtiologii* [Journal of Ichthyology], 2013, vol. 53, no. 6, pp. 645–670.
27. Senchukova A.L., Mugue N.S., Pavlov S.D., Mel'nikova M.N. On the Origin of Chars of the Genus *Salvelinus* of the Kronotskoe Lake and Their Relationships with Other Chars Populations of the Kamchatka Peninsula. *Voprosy ikhtiologii* [Journal of Ichthyology], 2013, vol. 53, no. 6, pp. 840–848.

DOI: 10.17238/issn2541-8416.2017.17.3.204

Il'ya I. Gordeev**, *Daniil V. Mikryakov, *Nina I. Silkina***,
*Veniamin R. Mikryakov***, *Olesya Yu. Busarova******

*Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography
(Moscow, Russian Federation)

**I.D. Papanin Institute for Biology of Inland Waters of the Russian Academy of Sciences
(Borok, Yaroslavl Region, Russian Federation)

***Far Eastern State Technical Fisheries University
(Vladivostok, Russian Federation)

CONTENT OF IMMUNE COMPLEXES AND THE LEVEL OF OXIDATIVE PROCESSES IN BLOOD AND ORGANS OF CHARS IN THE KRONOTSKOE LAKE (Kamchatka Peninsula)

The paper investigates the content of immune complexes and the level of oxidation processes in blood serum, liver, kidney and spleen for three species of char – *Salvelinus albus*, *S. schmidtii* and *S. kronocius* caught in the Kronotsky Lake (Kamchatka peninsula) in July-August 2012. Interest in this lake is due to a high degree of its ecological isolation and as a consequence, the processes of speciation. We found intertissue and interspecies differences in the content of immune complexes, products of lipid peroxidation and the antioxidant activity level. Presumably, they are associated with species features, way of life and structural and functional organization of studied tissues and organs. The greatest content of immune complexes was found in kidney, and the smallest – in spleen. Reliable interspecies differences in this indicator were recorded in these organs. When studying the content of reactive products of thiobarbituric acid (TBA) the authors marked the highest values and significant deviations in kidney of char, and the lowest values and slight fluctuations – in blood serum. Interspecies comparison revealed the maximum values of TBA-reactive products in kidney and blood serum of *S. albus*, and in spleen and liver – in *S. kronocius*. The level comparison of antioxidant activity demonstrated a high content of antioxidants in blood serum and spleen, the minimum – in kidney. The lowest values of this index in all studied tissues were recorded in *S. kronocius*. The obtained results can be used to monitor the health status of the population and compare with closely related species.

Keywords: *char, immune complex, lipid peroxidation, antioxidant activity, Kronotskoe Lake.*

Поступила 25.04.2017
Received on April 25, 2017

Corresponding author: Il'ya Gordeev, *address:* ul. Verkhnyaya Krasnosel'skaya, 17, Moscow, 107140, Russian Federation; *e-mail:* gordeev@vniro.ru

For citation: Gordeev I.I., Mikryakov D.V., Silkina N.I., Mikryakov V.R., Busarova O.Yu. Content of Immune Complexes and the Level of Oxidative Processes in Blood and Organs of Chars in the Kronotskoe Lake (Kamchatka Peninsula). *Arctic Environmental Research*, 2017, vol. 17, no. 3, pp. 204–211. DOI: 10.17238/issn2541-8416.2017.17.3.204

**ДИАТОМОВЫЕ КОМПЛЕКСЫ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ оз. ЩУЧЬЕ
(Хибинский горный массив, Кольский п-ов)**

А.Л. Косова*, Д.Б. Денисов*

*Институт проблем промышленной экологии Севера Карельского научного центра РАН
(Мурманская обл., г. Апатиты)

Представлены результаты исследования диатомовых комплексов современных донных отложений малого озера Щучье (Хибинский горный массив, Кольский п-ов). В исследованном интервале донных отложений оз. Щучье обнаружено 218 видов и разновидностей диатомовых водорослей, относящихся к 44 родам. Преобладающими таксонами являются *Aulacoseira valida* (Grun.) Kramm (до 25 %), *A. subarctica* (O. Müll.) Haworth (до 24 %), *Staurosira venter* (Ehrenberg) H. Kobayasi (до 17 %), *S. construens* Ehrenberg (до 16 %), *Pseudostaurosira brevistriata* (Grunow) D.M. Williams & Round (до 15 %), *A. alpigena* (Grunow) Krammer (до 13 %), *Brachysira brebissonii* R. Ross (до 10 %). Эколого-географический анализ диатомовых комплексов выявил в исследуемом озере среди таксонов с известным географическим распределением преобладание космополитов, по типу местообитания – бентосных форм. По отношению к рН доминируют обитатели слабощелочных вод (алкалифилы и алкалибионты), по отношению к солености воды – виды-индифференты. Обнаружены изменения в структуре диатомовых комплексов, отражающие процессы, происходящие на водосборной площади. Так, по отношению к местообитанию с горизонта 3-4 см отмечено значительное увеличение доли планктонных форм; в современном слое их доля достигает 51,2 %, что указывает на повышение уровня воды в озере. Выявлено упрощение структуры диатомовых комплексов, сопровождающееся резким снижением индекса Шеннона–Уивера. Доминирующий комплекс представлен алкалибионтными (*Aulacoseira subarctica* и *A. valida*) и алькалифильным (*Staurosira construens*) таксонами. Полностью исчез ацидофильный бентосный вид *Brachysira brebissonii*, представители рода *Eunotia* встречаются единично. Нелинейная динамика рН является, с одной стороны, косвенным свидетельством климатических изменений в сторону потепления и тренда на увеличение трофического статуса озера, с другой – свидетельством антропогенного влияния.

Ключевые слова: диатомовый анализ, поверхностные донные отложения, палеоэкологическая реконструкция, субарктический водоем.

Контактное лицо: Косова Анна Львовна, адрес: 184209, Мурманская область, г. Апатиты, микрорайон Академгородок, д. 14а; e-mail: annkosova1976@yandex.ru

Для цитирования: Косова А.Л., Денисов Д.Б. Диатомовые комплексы донных отложений оз. Щучье (Хибинский горный массив, Кольский п-ов) // Arctic Environmental Research. 2017. Т. 17, № 3. С. 212–221. DOI: 10.17238/issn2541-8416.2017.17.3.212

В современной науке одним из основных направлений по оценке динамики региональных и глобальных изменений среды является палеоэкологическая реконструкция исторического прошлого экосистем. Изменения диатомовых комплексов, их видового состава и структуры – надежный и чувствительный индикатор всех происходящих в озере изменений [1, с. 127]. Палеоэкологические реконструкции по составу диатомовых комплексов данных отложений (ДО), реагирующих на малейшие изменения среды, позволяют проследить эволюцию водоемов и их водосборных площадей, реакцию на изменения климата и окружающей среды, антропогенное загрязнение, реконструировать ряд гидрохимических параметров [2, с. 151].

Цель настоящей работы – выявление особенностей структуры диатомовых комплексов в поверхностных ДО субарктического малого горного озера и установление этапов и тенденций его развития за период накопления осадков.

Материалы и методы

Описание района исследования. Озеро Щучье расположено в северной части Хибинского горного массива (Кольский п-ов), принадлежит бассейну оз. Имандра (рис. 1). Это малое (площадь 0,30 км²), по форме близкое к округлому озеро ледникового происхождения. Наибольшая длина озера 0,76 км, наибольшая ширина – 0,55 км. Общая площадь водосбора озера составляет 1,9 км². Абсолютная отметка уровня воды 208,3 м. Территория водосборной площади по типу ландшафта относится к лесотундровой и тундровой зонам с высотами до 593,8 м. Берега озера невысокие, каменистые, местами встречаются заболоченные участки. В прибрежной зоне озера распространены песчаные пляжи и валунные отложения. Озеро Щучье соединено протокой с оз. Гольцовое [3, с. 32].

Район исследования подвержен значительному влиянию выбросов комбинатов «Северо-

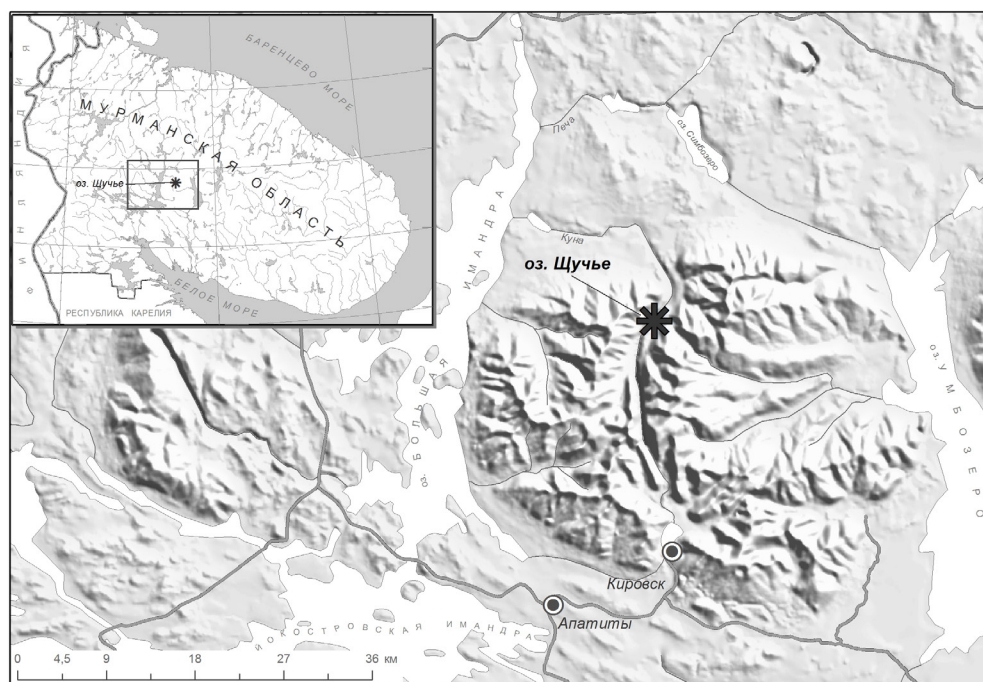


Рис. 1. Карта-схема расположения оз. Щучье

никель» и «Апатит», а также дальнему атмосферному переносу поллютантов.

Основные современные гидрологические и гидрохимические характеристики оз. Щучье: координаты – 67°50'18,8" с. ш., 33°40'24,5" в. д.; средняя глубина 1,5 м, максимальная – 3 м; средняя кислотность (рН) 7,18 (6,98–7,4); электропроводность при 20 °С – 38 мкСм/см; щелочность 282 мкэкв/л; содержание органического вещества 2,1 мг С/л; содержание общего фосфора – 17,3 мкг/л, общего азота – 292 мкг/л, кремния – 2,3 мг/л.

Отбор проб и их анализ. Материалом исследования послужили поверхностные ДО оз. Щучье, изученные с помощью диатомового анализа. Колонку ДО мощностью 20 см получали с помощью пробоотборника открытого гравитационного типа (внутренний диаметр трубки 44 мм) с автоматически закрывающейся диафрагмой [4] и ненарушенной транспортировали в лабораторию. Диатомовый анализ ДО проводили по стандартной общепринятой методике [1, 5], по схеме, используемой в Институте проблем промышленной экологии Севера Кольского научного центра РАН [6]. Колонку разделяли на слои мощностью 1 см. Все обнаруженные в препаратах створки водорослей определяли, по возможности, до внутривидовых таксономических категорий по определителям [7–10], номенклатуру приводили согласно международной альгологической базе данных¹. Подсчет и таксономическую идентификацию диатомей осуществляли с использованием светового микроскопа «Wild Leitz GMBH» (Type 020-507.010) при увеличении в 1000 раз, с применением иммерсионного объектива.

Методы диатомового анализа. Дальнейший анализ включал послойное исследование таксономической структуры диатомовых комплексов, выявление относительной численности (%) доминирующих видов и расчет общей

численности створок в отложениях. Видовое разнообразие оценивали с помощью индекса Шеннона–Уивера (H' , бит/экз.).

На основе изучения диатомовых комплексов методами биоиндикации реконструировали параметры среды: галобность, активную реакцию среды (рН) и колебания уровня воды в озере.

Проводили анализ толерантности обнаруженных таксонов по отношению к рН, вычисляли интегральное значение рН для каждого слоя отложений методом Т.И. Моисеенко, Л.В. Разумовского [11], по следующей формуле: $pH = \sum ph_i \cdot k / \sum k$, где ph_i – индивидуальное значение рН для каждого таксона-индикатора; k – показатель обилия (может быть выражено в баллах или значениями численности). В данной работе в качестве показателя k применяли значения численности каждого индикаторного таксона. Вычисляли суммарный индекс сапробности комплекса, как показатель присутствия биогенных элементов и косвенный индикатор трофического статуса озера на основе стандартных методов².

В анализе использовали данные об экологии отдельных таксонов водорослей: отношение к рН, солености, местообитанию, а также биогеографическая приуроченность [12, 13].

Результаты и обсуждение

Видовой состав и биоиндикация. Всего в колонке мощностью 20 см обнаружено 218 таксонов диатомовых водорослей рангом ниже рода. В 44 выявленных родах наибольшего таксономического разнообразия достигают представители родов *Eunotia* (22), *Pinnularia* (18), *Cymbella* (15). Преобладающими таксонами являются *Aulacoseira valida* (Grun.) Kramm (до 25 %), *A. subarctica* (O. Müll.) Haworth (до 24 %), *Staurosira venter* (Ehrenberg) H. Kobayasi (до 17 %), *S. construens* Ehrenberg (до 16 %), *Pseudostaurosira brevistriata* (Grunow)

¹International Algological Database Guiry & Guiry. URL: <http://www.algaebase.org/content/> (дата обращения: 15.04.2016).

²Барина С.С., Медведева Л.А. Атлас водорослей-индикаторов сапробности (российский Дальний Восток). Владивосток, 1996. С. 364.

D.M. Williams & Round (до 15 %), *A. alpigena* (Grunow) Krammer (до 13 %), *Brachysira brebissonii* R. Ross (до 10 %).

Отмечены перестройки в составе и структуре диатомовых комплексов по направлению от нижних слоев к верхним. В наиболее древнем слое колонки ДО (19–20 см) массовыми видами являются планктонные центрические формы *Aulacoseira distans* (Ehrenberg) Simonsen (12,1 %) и *A. subarctica* (8,3 %), а также планктонно-бентосные виды рода *Staurosira* – *S. construens*, *S. venter* (9,9 %), *Pseudostaurosira brevistriata* (5,7 %) и *Tabellaria flocculosa* (9,8 %). Выше по профилю колонки ДО относительная численность холодолюбивого вида *Aulacoseira distans* снижается до полного исчезновения в слое 6–7 см. Доля арктоальпийского вида *Aulacoseira subarctica* на протяжении колонки изменяется значительно (от 0,36 до 16,4 %), в интервале 0–4 см вид занимает позицию доминанта (24 %) наряду с *Aulacoseira valida*. Наблюдается изменение относительной численности вида *Pseudostaurosira brevistriata* вверх по профилю колонки: в слое 17–18 см он становится доминантным таксоном (до 15,6 %), выше его относительная численность снижается, а после слоя 8–9 см вид встречается единично. В интервале 6–16 см достигает значительной относительной численности олиготрофный вид *Aulacoseira alpigena* (13 %). На протяжении всей колонки массовым является вид *Brachysira brebissonii* – характерный представитель олиготрофных низкоминерализованных вод, предпочитающий значения рН менее 7,0. Максимального значения относительной численности вид достигает в слое 6–7 см (10,6 %), выше по колонке его относительная численность постепенно снижается, и в верхнем слое вид исчезает. Практически по всему профилю колонки единично встречается *Didymosphenia geminata* (Lyngbye) M. Schmidt – характерный вид-индикатор холодноводных ультраолиготрофных условий. В верхнем слое колонки обращает на себя внимание довольно высокая встречаемость уродливых форм створок диатомовых водорослей, характеризи-

рующихся деформацией формы панциря. Обнаружены тератологические изменения формы створок следующих родов диатомовых водорослей: *Fragilaria*, *Navicula*, *Pinnularia*.

Наблюдаются изменения общего обилия диатомей (N_0), выраженного числом экземпляров в граммах сухого вещества отложений. Значительное увеличение N_0 отмечено в средних слоях колонки ДО (15–16 и 12–13 см). Резкий рост N_0 выявлен в верхних молодых слоях ДО (0–2 см) – с 23 до 66 млн экз./г сухого вещества.

Анализ экологических групп диатомей по отношению к местообитанию показал, что за период накопления исследованной толщи ДО в озере доминировали бентосные и планктонно-бентосные формы диатомей (рис. 2а, см. с. 216), что характерно для мелководных водоемов. Доля планктонных форм варьирует в диапазоне от 6,9 до 51,2 %. Существенное изменение в соотношении групп диатомей отмечается начиная с горизонта 3–4 см: наблюдается значительное увеличение доли планктонных форм, в современном слое она достигает 51,2 %.

В водоеме на протяжении всего изученного периода развития господствовала олигогалобная диатомовая флора, причем основную массу составляли индифференты (58–86 %). Доля галофобов варьировала от 8,78 до 28,38 %, максимальные значения зафиксированы в слоях 3–7 см колонки ДО (рис. 2б). Озеро не претерпело выраженных изменений минерализации и соответствует фоновым ультрапресным водоемам Хибинского горного массива [5, с. 44]. Существующие незначительные изменения могут объясняться естественной динамикой.

По отношению к рН в ДО практически во всех слоях преобладают алкалофилы и алкалобионты (рис. 2в), кроме слоев 12–13 см, 4–6 см, где отмечалось увеличение доли ацидофилов и индифферентов. В верхнем слое доля алкалобионтов достигает 50 %. Следовательно, диатомовые водоросли развивались в условиях щелочной и слабощелочной среды.

По биогеографической приуроченности диатомовые комплексы исследованных ДО

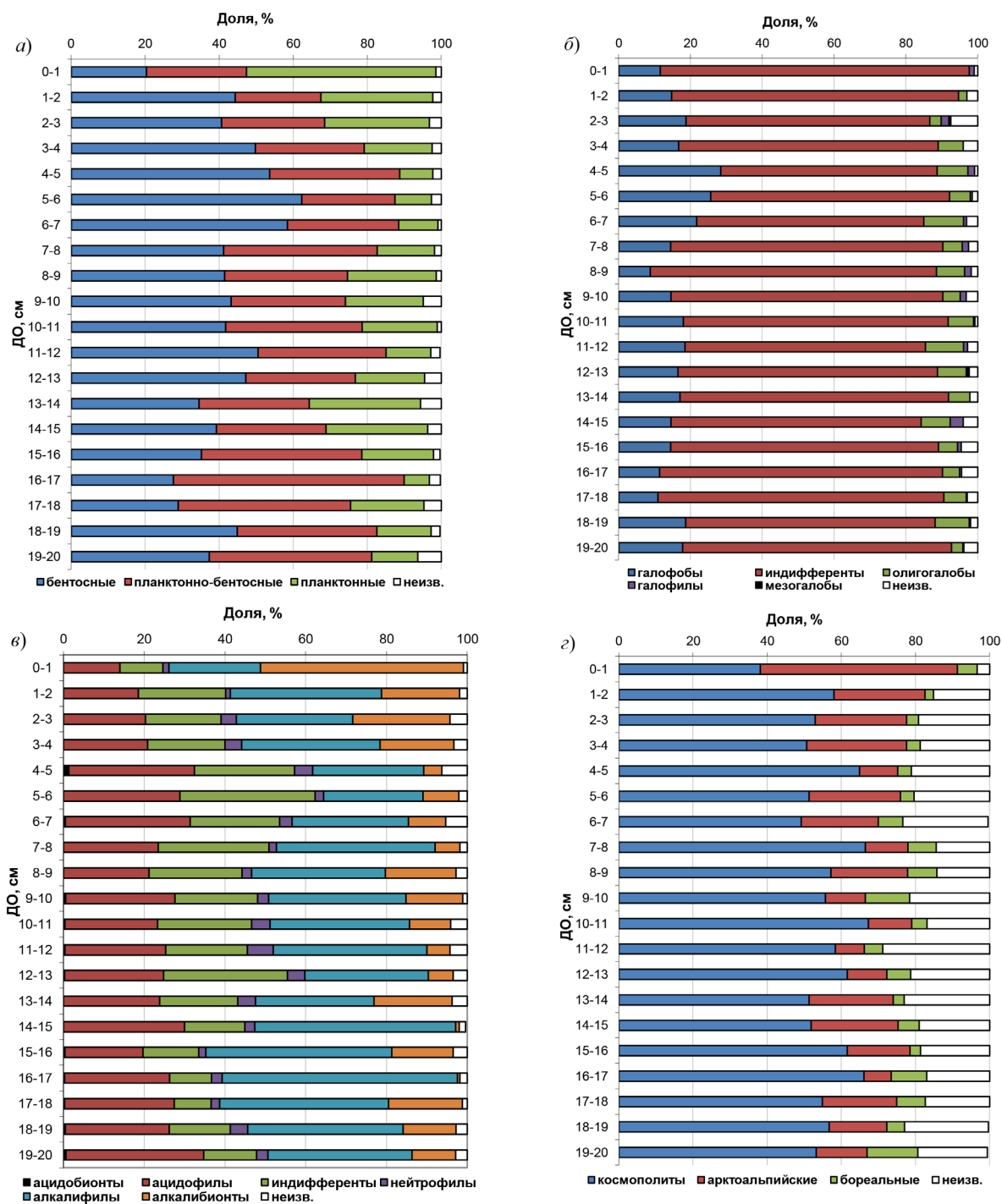


Рис. 2. Эколого-географическая характеристика диатомовых комплексов донных отложений оз. Щучье: а – приуроченность к местообитанию; б – отношение к солености; в – отношение к рН; г – биогеографическая приуроченность

характеризуются доминированием видов-космополитов. Доля арктоальпийских видов в интервале колонки 5–20 см изменяется от 7,43 до 24,6 %. Начиная с 4–5 см и выше по профилю ДО доля арктоальпийских видов увеличивается и в современном слое достигает 53 %. Доля бореальных видов варьирует от 2,27 до 13,69 %, достигая наибольшего значения в слоях 19–20 см и 9–10 см (рис. 2).

Индекс сапробности (S) был использован в качестве косвенного показателя изменения уровня трофии озера. В исследованном периоде развития водоема можно выделить два этапа. В интервале 3–20 см, кроме слоя 14–15 см, значения индекса (1,11–1,46) соответствуют олигосапробной зоне. Выше по колонке ДО индекс сапробности увеличивается и в современном слое достигает значения 1,87, что соответствует β -мезосапробной зоне (рис. 3).

Реконструированные по диатомовым комплексам значения рН изменяются в диапазоне

7,01–7,55 и демонстрируют тренд к повышению по направлению к поверхностным слоям отложений. В нижних слоях колонки (15–20 см) отмечен рост рН с 7,11 до 7,28; далее, по направлению к верхним слоям ДО, значения колеблются от 7,2 до 7,09, после чего в интервале 4–8 см происходит снижение рН, и на горизонте 4–5 см показатель достигает минимума за весь исследованный период (7,01). Возможно, это связано с процессами обмеления, заболачивания, увеличение доли ацидофильных донных форм и обрастателей в этот период является тому подтверждением. В поверхностных слоях выявлено резкое повышение рН, и в слое 0–1 см значение рН составляет 7,55.

По направлению от нижних слоев к верхним показатель видового разнообразия диатомей (H') в интервале 12–19 см изменяется от 2,99 до 3,56. В верхнем слое наблюдается резкое снижение H' до 2,3, что указывает на изменение гидрохимических условий в водоеме.

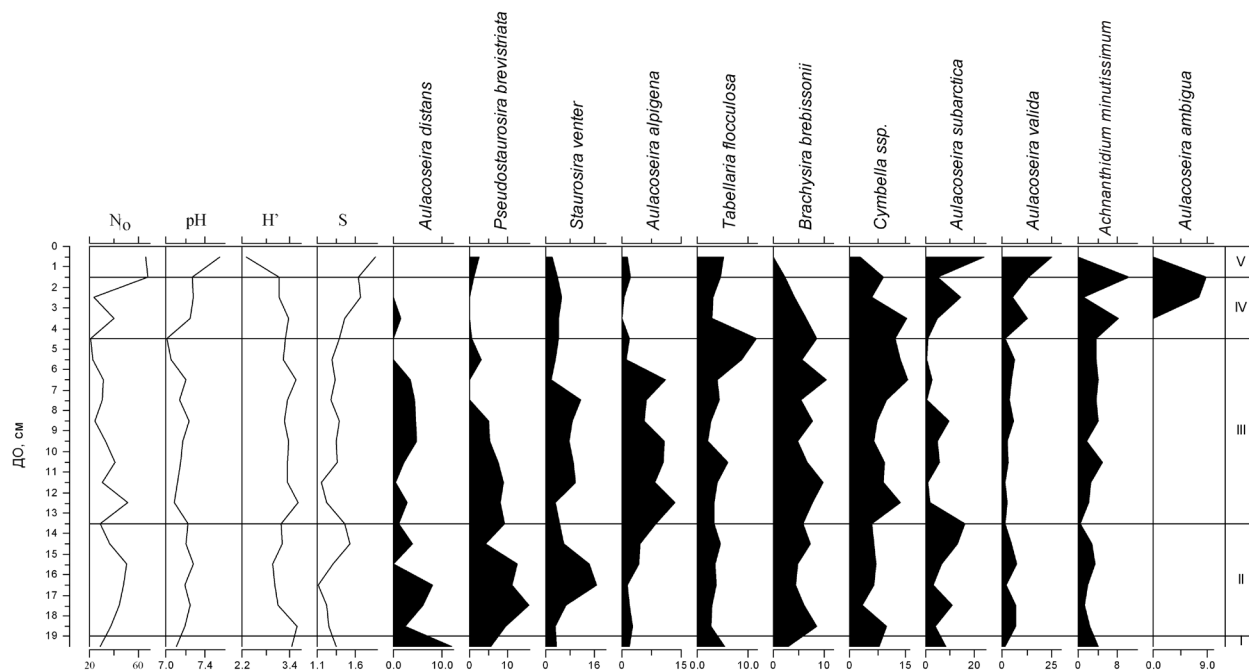


Рис. 3. Динамика некоторых показателей диатомовых комплексов в донных отложениях оз. Щучье: N_0 – численность створок диатомей, млн экз./г сухого вещества; рН – значения активной реакции воды, реконструированные по диатомовым комплексам; H' – индекс видового разнообразия Шеннона–Уивера, бит/экз. S – индекс сапробности; I–V – основные этапы развития экосистемы водоема по результатам кластерного анализа

Этапы изменений среды и диатомовых комплексов. Этапы наиболее значимых изменений в экосистеме водоема подтверждаются результатами кластерного анализа, выполненного на основе соотношения относительной численности диатомей. Было выделено 5 этапов в развитии озера.

I этап (19–20 см – самый древний слой ДО). На этой стадии развития экосистемы водоема отмечено самое большое количество видов. В озере развивались преимущественно бентосные и планктонно-бентосные формы. Можно предположить, что этот период был переходным от одних условий к другим, т. к. в следующем слое (18–19 см) установлено изменение доминантного комплекса, снижение количества видов, увеличение показателя обилия.

II этап (13–19 см). На этом этапе развития экосистемы водоема выявлено незначительное снижение видового разнообразия до 2,99 бит/экз. в слое 15–16 см и увеличение показателя до 3,62 бит/экз. к концу этапа. Динамика pH демонстрирует противоположную картину. В слое 15–16 см водородный показатель достигает максимального значения на этом этапе формирования экосистемы водоема (7,28), выше по срезу колонки pH уменьшается до 7,09. Увеличивается доля планктонных форм в интервале 13–16 см. Слой 16–17 см отличается от других, что подтверждается результатами кластерного анализа: максимального развития достигают виды, характерные для эвтрофных, хорошо прогреваемых водоемов, – *Staurosira construens* и *S. venter*. Возможно, это связано с увеличением концентрации биогенных элементов в данный период, а также с некоторым изменением температурного режима в сторону более высоких температур за счет уменьшения глубины озера, т. к. одновременно отмечено снижение доли планктонных центральных видов рода *Aulacoseira*.

III этап (4–13 см). Характеризуется доминированием на горизонтах 6–13 см *Aulacoseira alpigena*, 7–12 см – *Staurosira venter*. Наименьшее на этом промежутке значение pH (7,01) установлено для горизонта 4–6 см. Положе-

ние доминанта занимает ацидофильный вид *Tabellaria flocculosa*, выявлено увеличение доли таксонов рода *Cymbella*, большинство представителей которых – ацидофильные виды. Одновременно отмечено максимальное увеличение доли галофобов до 28,4 %, что свидетельствует о снижении общей минерализации в водоеме, происходящем одновременно с падением pH.

IV этап (1–4 см). Для этой зоны характерно увеличение значения pH в щелочную сторону – от 7,01 до 7,27, что подтверждается повышением доли алкалибионтов в этот период. Наблюдается рост доли планктонных и арктоальпийских видов, массовое развитие которых обеспечило резкое увеличение общего обилия до 68,05 млн экз./г сухого вещества. Но при этом отмечено уменьшение количества видов. Выявлены рост относительной численности видов *Achnanthydium minutissimum* (Kützing) Czarnecki, *Gomphonema parvulum* (Kützing) Kützing и появление нового для отложений вида – *Aulacoseira ambigua* (Grunow) Simonsen, что свидетельствует об изменении температурных условий в водоеме в сторону потепления.

V этап (0–1 см). Отражает современный этап развития водоема, который отличается наименьшим сходством с предыдущими этапами. Происходит упрощение структуры диатомовых комплексов, сопровождающееся резким снижением H' , который достигает минимального значения на протяжении всего среза колонки ДО – 2,3 бит/экз. Доминирующий комплекс представлен алкалибионтными (*Aulacoseira subarctica* и *A. valida*) и алькалофильным (*Staurosira construens*) таксонами. Полностью исчезает ацидофильный бентосный вид *Brachisira brebissonii*, представители рода *Eunotia* встречаются единично. Водородный показатель увеличивается в щелочную сторону и достигает 7,55, что является максимальным значением для колонки. По отношению к местообитанию преобладают планктонные формы (51 %). Такие структурные перестройки могли произойти из-за поднятия уровня водоема за счет таяния снежников и попадания грунтовой воды из близлежащей скважины, с

одной стороны, а с другой – в результате хорошей прогреваемости водной толщи.

Заключение. Анализ диатомовых комплексов ДО оз. Щучье установил, что одним из основных факторов, определивших видовой состав и структуру диатомовой флоры, явилось ландшафтно-географическое положение водоема. Сложность спектра горных микроландшафтов определила комплекс индивидуальных природных условий исторического формирования качества вод. Во всем исследованном периоде формирования ДО озера существовали условия, благоприятные для развития различных диатомей перифитона и бентоса. Выявлены изменения видового состава, связанные с периодическим защелачиванием водоема. Обнаружены тератологические изменения формы створок родов диатомовых водорослей в современный период. В оз. Щучье можно отметить низкую концентрацию

кремния в воде, недостаток которого приводит к появлению клеток уродливой формы. Резкий рост численности отдельных видов, снижение значения индекса Шеннона–Уивера свидетельствуют об увеличении трофического статуса водоема, что подтверждается повышением рассчитанного по диатомовым комплексам индекса сапробности. Нелинейная динамика pH также связана с ростом глубины и водности озера за счет эрозионных процессов на водосборе, увеличивающих контакт со щелочными породами, и является, с одной стороны, косвенным свидетельством климатических изменений в сторону потепления и тренда на повышение трофического статуса озера, с другой – свидетельством антропогенного влияния (бурение скважин, строительство автодорог, аэротехногенное загрязнение, периодическая интенсификация атмосферного переноса азотистых соединений).

Список литературы

1. Давыдова Н.Н. Диатомовые водоросли – индикаторы природных условий водоемов в голоцене. Л., 1985. 244 с.
2. Шелехова Т.С., Субетто Д.А., Тихонова Ю.С., Потахин М.С. Диатомовые водоросли современных отложений озер Заонежья: палеоэкологические и палеоклиматические реконструкции // Общество. Среда. Развитие. 2015. № 2(35). С. 151–160.
3. Кашулин Н.А., Денисов Д.Б., Сандимиров С.С., Даувальтер В.А., Кашулина Т.Г., Малиновский Д.Н., Вандыш О.И., Ильяшук Б.П., Кудрявцева Л.П. Антропогенные изменения водных систем Хибинского горного массива (Мурманская область). Апатиты, 2008. Т. 1. 250 с.
4. Skogheim O.K. Rapport fra Arungenprosjektet. Oslo, 1979. № 2. 7 p.
5. Диатомовый анализ / под ред. А.И. Прошкиной-Лавренко. Л., 1946. Т. 1. 240 с.
6. Косова А.Л., Малышева М.Б., Денисов Д.Б. К методике камеральной обработки проб для диатомового анализа донных отложений // Квартер во всем его многообразии. Фундаментальные проблемы, итоги изучения и основные направления дальнейших исследований: материалы VII Всерос. совещания по изучению четвертич. периода (г. Апатиты, 12–17 сентября 2011 г.): в 2 т. Апатиты; СПб., 2011. Т. 1. С. 294–295.
7. Krammer K., Lange-Bertalot H. Bacillariophyceae. Subwasserflora von Mitteleuropa, Band 2 (1-4) / Ed. by H. Ettl, J. Gerloff, H. Heynig, D. Mollenhauer. Stuttgart; Jena: Gustav Fisher Verlag, 1988–1991.
8. Krammer K. The Genus Pinnularia. Diatoms of Europe, Diatoms of the European Inland Waters and Comparable Habitats. Vol. 1 / Ed. by H. Lange-Bertalot. Ruggell, Liechtenstein: A.R.G. Gantner Verlag K.G., 2000. 703 p.
9. Krammer K. Cymbopleura, Delicata, Navicymbula, Gomphocymbellopsis, Afrocybella. Diatoms of Europe, Diatoms of the European Inland Waters and Comparable Habitats. Vol. 4 / Ed. by H. Lange-Bertalot. Ruggell, Liechtenstein: A.R.G. Gantner Verlag K.G., 2003. 530 p.
10. Krammer K. Cymbella. Diatoms of Europe, Diatoms of the European Inland Waters and Comparable Habitats. Vol. 3 / Ed. by H. Lange-Bertalot. Ruggell, Liechtenstein: A.R.G. Gantner Verlag K.G., 2002. 584 p.
11. Моисеенко Т.И., Разумовский Л.В. Новая методика реконструкции катионно-анионного баланса в озерах (диатомовый анализ) // Докл. Акад. наук. 2009. Т. 427, № 1. С. 132–135.

12. Барина С.С., Медведева Л.А., Анисимова О.В. Биоразнообразие водорослей-индикаторов окружающей среды. Тель-Авив, 2006. 498 с.

13. Кэган Л.Я. Диатомовые водоросли Евро-Арктического региона. Аннотированная коллекция (древние и современные морские и пресноводные). Апатиты, 2012. 209 с.

References

1. Davydova N.N. *Diatomovyye vodorosli – indikatory prirodnykh usloviy vodoemov v golotsene* [Diatom Algae are Indicators of the Natural Conditions of Water Bodies in the Holocene]. Leningrad, Nauka Publ., 1985. 244 p. (In Russ.)

2. Shelekhova T.S., Subetto D.A., Tikhonova Yu.S., Potakhin M.S. Diatomovyye vodorosli sovremennykh otlozheniy ozer Zaonezh'ya: paleoekologicheskie i paleoklimaticheskie rekonstruktsii [Diatoms in Trans-Onega Modern Lake Sediments: Paleocological and Paleoclimatic Reconstructions]. *Obshchestvo. Sreda. Razvitie* [Society. Environment. Development], 2015, no. 2, pp. 151–160.

3. Kashulin N.A., Denisov D.B., Sandimirov S.S., Dauval'ter V.A., Kashulina T.G., Malinovskiy D.N., Vandysh O.I., Il'yashuk B.P., Kudryavtseva L.P. *Antropogennyye izmeneniya vodnykh sistem Khibinskogo gornogo massiva (Murmanskaya oblast')* [Anthropogenic Changes in the Water Systems of the Khibiny Mountain Group (Murmansk Region)]. Apatity, Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences Publ., 2008, vol. 1. 244 p. (In Russ.)

4. Skogheim O.K. *Rapport fra Arungenprosjektet*. Oslo, Norway, As-NLN, 1979, no. 2. 7 p.

5. Zhuze A.P., Proshkina-Lavrenko A.I., Sheshukova V.S. *Diatomovyy analiz. Kniga 1* [Diatom Analysis. Vol. 1]. Ed. by A.I. Proshkina-Lavrenko. Moscow; Leningrad, State Publishing House of Geological Literature, 1949. 240 p. (In Russ.)

6. Kosova A.L., Malysheva M.B., Denisov D.B. K metodike kameral'noy obrabotki prob dlya diatomovogo analiza donnykh otlozheniy [To the Technique of Office Processing of Samples for Diatom Analysis of Bottom Sediments]. *Kvartery vo vsem ego mnogoobrazii. Fundamental'nye problemy, itogi izucheniya i osnovnye napravleniya dal'neyshikh issledovaniy: materialy VII Vseros. soveshchaniya po izucheniyu chetvertich. perioda (g. Apatity, 12–17 sentyabrya 2011 g.): v 2 t.* [Quaternary System in All Its Multiplicity. Fundamental Problems, Study Results and the Main Directions of Follow up: Proc. 7th All-Russ. Meeting on the Quaternary Period Study (Apatity, September 12–17, 2011): in 2 Vol.]. Apatity; Saint Petersburg, 2011, vol. 1, pp. 294–295. (In Russ.)

7. Krammer K., Lange-Bertalot H. Bacillariophyceae. *Subwasserflora von Mitteleuropa, Band 2 (1-4)*. Ed. by H. Ettl, J. Gerloff, H. Heynig, D. Mollenhauer. Stuttgart; Jena, Gustav Fisher Verlag, 1988–1991.

8. Krammer K. The Genus *Pinnularia*. *Diatoms of Europe, Diatoms of the European Inland Waters and Comparable Habitats. Vol. 1*. Ed. by H. Lange-Bertalot. Ruggell, Liechtenstein, A.R.G. Gantner Verlag K.G., 2000. 703 p.

9. Krammer K. *Cymbopleura, Delicata, Navicymbula, Gomphocymbellopsis, Afrocymbella. Diatoms of Europe, Diatoms of the European Inland Waters and Comparable Habitats. Vol. 4*. Ed. by H. Lange-Bertalot. Ruggell, Liechtenstein, A.R.G. Gantner Verlag K.G., 2003. 530 p.

10. Krammer K. *Cymbella. Diatoms of Europe, Diatoms of the European Inland Waters and Comparable Habitats. Vol. 3*. Ed. by H. Lange-Bertalot. Ruggell, Liechtenstein, A.R.G. Gantner Verlag K.G., 2002. 584 p.

11. Moiseenko T.I., Razumovskiy L.V. Novaya metodika rekonstruktsii kationno-anionnogo balansa v ozerakh (diatomovyy analiz) [A New Technique for Reconstructing the Cation-Anion Balance in Lakes by Diatom Analysis]. *Doklady Akademii nauk* [Proceedings of the Russian Academy of Sciences], 2009, vol. 427, no. 1, pp. 132–135.

12. Barinova S.S., Medvedeva L.A., Anisimova O.V. *Bioraznoobrazie vodorosley-indikatorov okruzhayushchey sredy* [Biodiversity of Algae – Indicators of the Environment]. Tel'-Aviv, Israel, PiliesStudio, 2006. 498 p. (In Russ.)

13. Kэган Л.Я. *Diatomovyye vodorosli Evro-Arkticheskogo regiona. Annotirovannaya kolleksiya (drevnie i sovremennyye morskyye i presnovodnyye)* [Diatoms of the Euro-Arctic Region. Annotated Collection (Ancient and Modern Marine and Freshwater)]. Apatity, Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences Publ., 2012. 209 p. (In Russ.)

*Anna L. Kosova**, *Dmitriy B. Denisov**

*Institute of the Industrial Ecology Problems of the North
of the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences
(Murmansk Region, Apatity, Russian Federation)

DIATOM ASSEMBLAGES OF THE LAKE SHCHUCHYE BOTTOM SEDIMENTS (Khibiny Mountain Group, Kola Peninsula)

The paper presents the results of the diatom complexes investigation of modern bottom sediments of the small lake Shchuchye (Khibiny Mountain Group, Kola Peninsula). We found 218 species of diatoms belonging to 44 genera. The predominant taxa are *Aulacoseira valida* (Grun.) Kramm (up to 25 %), *A. subarctica* (O. Müll.) Haworth (up to 24 %), *Staurosira venter* (Ehrenberg) H. Kobayasi (up to 17 %), *S. construens* Ehrenberg (up to 16 %), *Pseudostaurosira brevistriata* (Grunow) D.M. Williams & Round (up to 15 %), *Aulacoseira alpigena* (Grunow) Krammer (up to 13 %), *Brachysira brebissonii* R. Ross (up to 10 %). Ecological and geographical analysis of diatom complexes in the studied lake revealed the predominance of cosmopolitan organisms among taxa with a known geographical distribution, and benthic forms according to the type of habitat. With respect to pH, the first place was occupied by the inhabitants of slightly alkaline waters (alkaliphiles and alkalibionts), in relation to the salinity of water – the indifferent species. We revealed the changes in the diatom complexes structure, reflecting the processes occurring in the catchment area. We marked a significant increase in the proportion of plankton forms in the 3–4 cm horizon (their share reached 51.2 % in the contemporary layer), which indicated an increase in the lake water level. The authors noted a simplification of the structure of diatom complexes, accompanied by a sharp decrease in the Shannon-Weaver index. The dominant complex was represented by alkalibiontic (*Aulacoseira subarctica* and *A. valida*) and alkaliphilic (*Staurosira construens*) taxa. The acidophilic benthic species of *Brachysira brebissonii* completely disappeared; representatives of the genus *Eunotia* were encountered singly. Nonlinear dynamics of pH was, on the one hand, an indirect evidence of climatic changes towards warming and the trend to increase the trophic status of the lake, and on the other – the evidence of anthropogenic influence.

Keywords: diatom analysis, surface bottom sediments, paleoecological reconstruction, subarctic water body.

Поступила 07.03.2017
Received on March 07, 2017

Corresponding author: Anna Kosova, address: Akademgorodok, 14a, Apatity, Murmansk Region, 184209, Russian Federation; e-mail: annkosova1976@yandex.ru

For citation: Kosova A.L., Denisov D.B. Diatom Assemblages of the Lake Shchuchye Bottom Sediments (Khibiny Mountain Group, Kola Peninsula). *Arctic Environmental Research*, 2017, vol. 17, no. 3, pp. 212–221. DOI: 10.17238/issn2541-8416.2017.17.3.212

ФЛОРА ОСТРОВА ХЕДОСТРОВ В ОНЕЖСКОЙ ГУБЕ БЕЛОГО МОРЯ (Архангельская область)¹

*А.В. Кравченко**, *М.А. Пиирайнен***, *В.В. Тимофеева**

*Институт леса Карельского научного центра РАН
(Республика Карелия, г. Петрозаводск)

**Университет г. Хельсинки
(Финляндия)

Хедостров является одним из самых крупных в Белом море, его площадь составляет 3,9 км². Остров сложен рыхлыми четвертичными отложениями, отличается от всех остальных островов Белого моря ровной береговой линией без заливов. Абсолютно преобладает песчаная литораль. Большая часть острова покрыта старовозрастными лишайниковыми сосновыми лесами. Водоемы, водотоки, болота отсутствуют. На острове зарегистрировано 113 видов сосудистых растений, из которых 111 – аборигенные. По сравнению с другими близкими по размеру беломорскими островами, как преимущественно скальными, так и сложенными только рыхлыми отложениями, богатство флоры Хедострова меньше в 1,5–2,0 раза. Анализ систематической и географической структуры флоры Хедострова выявил некоторые ее отличия от флоры остальных островов Белого моря. Наиболее богаты видами семейства *Рoaceae* и *Asteraceae*, что характерно для бореальных флор. На 5-6 рангов снижена позиция одного семейства из ведущей триады – *Сурерaceae*, а также семейства *Junсaceae*. Уменьшена доля видов «северной» фракции флоры, при одновременном увеличении доли видов преимущественно «южного» распространения. И низкое видовое богатство, и отличия в структуре флоры связаны прежде всего с ограниченным набором представленных на острове биотопов. На Хедострове нет многих арктических, арктоальпийских и плюризональных видов, обычных на беломорских островах, в т. ч. галофитов (*Carex* spp., *Puccinellia* spp., *Ruppia* spp., *Salicornia* spp. и т. п.), облигатных или факультативных петрофитов (*Huperzia* spp., *Rhodiola* spp., *Sedum acre* и т. п.), гигро-, гидрофитов и гелофитов (*Carex* spp., *Eriophorum* spp., *Juncus* spp. и др.). Приведен аннотированный список видов Хедострова с указанием встречаемости и экопической приуроченности.

Ключевые слова: *сосудистые растения, флора островов Белого моря, систематическая структура флоры, географическая структура флоры, Хедостров, Онежская губа Белого моря.*

¹Работа выполнена в рамках государственного задания Института леса Карельского научного центра РАН (№ 0220-2015-00014). Выражаем благодарность М.С. Богдановой за содействие в оформлении рисунка.

Контактное лицо: Кравченко Алексей Васильевич, адрес: 185910, Россия, Республика Карелия, г. Петрозаводск, ул. Пушкинская, д. 11; e-mail: alex.kravchen@mail.ru

Для цитирования: Кравченко А.В., Пиирайнен М.А., Тимофеева В.В. Флора острова Хедостров в Онежской губе Белого моря (Архангельская область) // Arctic Environmental Research. 2017. Т. 17, № 3. С. 222–232. DOI: 10.17238/issn2541-8416.2017.17.3.222

В Белом море находится свыше 3000 островов, которые образовались после дегляциации территории в результате гляциотектонических, абразионно-аккумулятивных и морских процессов [1]. Подавляющее большинство удаленных более чем на 1 км от материнского берега островов являются преимущественно скальными, сложены породами архейско-протерозойского времени [2]. Только острова расположенных недалеко друг от друга архипелагов – Соловецкого и Жужмуи и значительно удаленный от них Хедостров сложены (по крайней мере с поверхности) рыхлыми осадочными отложениями четвертичного времени. Хедостров отличается от всех островов Белого моря необычной формой в виде полумесяца, полным отсутствием неровностей береговой линии – заливов и полуостровов. Цель работы заключалась в выяснении того, насколько уникальные морфологические черты острова отразились на составе и параметрах флоры.

Материалы и методы. Хедостров расположен в южной части Онежской губы Белого

моря, в границах Онежского района Архангельской области (см. рисунок).

По размерам Хедостров входит в 20 самых больших островов Белого моря. Он вытянут в меридиональном направлении, его длина с севера на юг примерно 5,5 км, максимальная ширина – около 1,2 км; высота над уровнем моря – 13,4 м [3]. Современный облик острова сформировался при участии гляциотектонических, морских волновых и приливно-отливных процессов. По происхождению остров является частично размытой перигляциальной дельтой, образовавшейся, скорее всего, в лужскую стадию деградации ледника, когда по прадолине р. Сумы происходил сток талых ледниковых вод в северо-восточном направлении (Т.С. Шелехова, устное сообщение). Впоследствии, в связи с трансгрессивно-регрессивной деятельностью Белого моря в течение нескольких тысячелетий, рыхлый покров четвертичных отложений подвергался воздействию вод приледниковых водоемов; остров надолго погружался под воду. Вероятно, во время субборе-

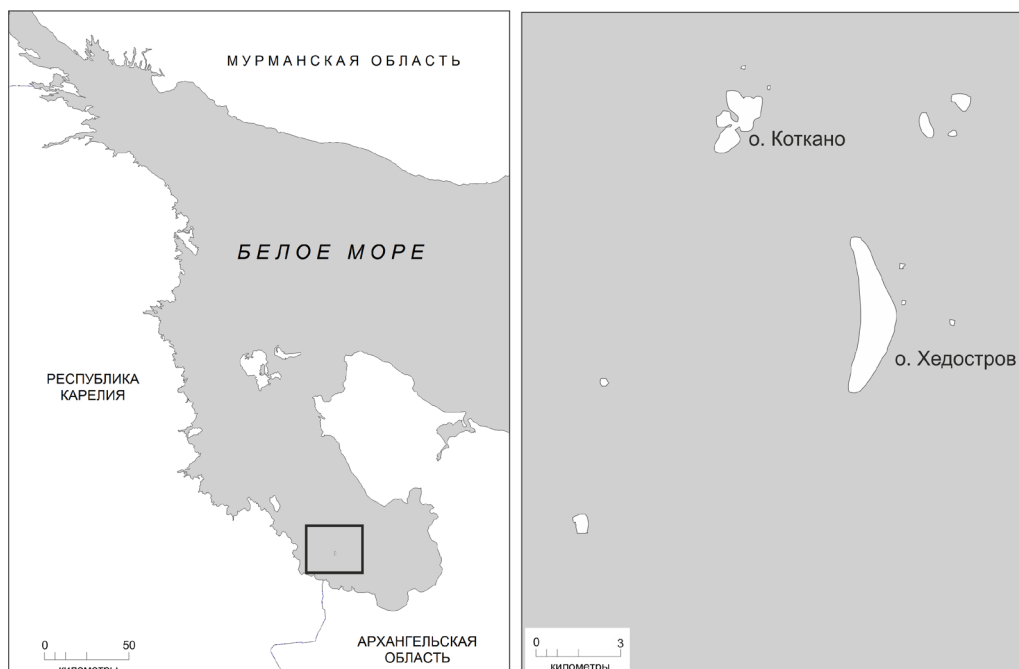


Рис. 1. Карта-схема расположения о. Хедостров

альной регрессии около 4000 лет назад [4], во время которой абсолютные отметки уровня моря существенно снизились и составляли 13,5–19,0 м [5], остров начал выходить из-под воды, и окончательно это произошло в субатлантический период около 2000–1800 лет назад, когда максимальные абсолютные отметки береговой линии достигли 13,0–12,5 м [6, 7].

Северная часть острова – возвышенная и обрывистая, к югу рельеф постепенно понижается [3]. Большая часть острова сложена сортированным крупнозернистым песком и является современной морской аккумулятивной террасой. В северной оконечности острова находится моренный цоколь, частично разрушенный абразией, в результате чего крутые склоны представляют собой шtrand, сложенный хорошо окатанными валунами. Западный берег является абразионным уступом, высота которого увеличивается с 0,5–1,0 м в южной оконечности до 13,4 м в северной; восточный берег – пологий.

Анализируя космические снимки, можно предположить, что когда-то остров занимал большую площадь – до 13–15 км²; со временем его северная часть длиной около 2 км была размыва волнами и сейчас представляет собой мелководье с песчаным дном и единичными валунами. Завалуненные берег и склоны северного мыса, несомненно, препятствуют дальнейшему размыванию острова. Вероятно, когда-то максимальная высотная отметка острова была значительно больше, и современный северный мыс был нижней частью склона южной экспозиции некогда более высокого берега, сложенного мореной. Свидетельством такой возможности является произрастание здесь таких термофильных видов, относимых к неморальному флористическому комплексу [8, 9], как *Actaea spicata*, *Daphne mezereum*, *Lathyrus vernus* и др., отсутствующих в остальной части острова. Эти виды в бассейне Белого моря приурочены к наиболее прогреваемым и защищенным от холодных ветров местообитаниям, к которым нельзя отнести рассматриваемый мыс, полностью открытый северным ветрам.

К востоку от острова на расстоянии 0,5–2,0 км расположены четыре лишенных древесной растительности невысоких скальных островка длиной до 70 м. Два из островков имеют название – Баклан (ранее здесь располагался маяк) и Крестовая луда (здесь до сих пор находится рыбацкая изба). В связи с этим нельзя исключить того, что цоколь Хедострова состоит не только из морены, но также из перекрытого ею кристаллического фундамента, который в данном районе представлен мезоархейскими гнейсами и гранитоидами [2].

Около 3/4 острова заняты старовозрастными (до 200–300 лет) сосняками лишайниковыми, в напочвенном покрове которых доминирует *Cladonia stellaris* (Opiz) Pouzar & Vezda (М.А. Фадеева, устное сообщение). В северной четверти острова по направлению к северному мысу в сложении лесных сообществ все большее участие принимают брусника и вороника, и сосняки лишайниковые постепенно сменяются сосняками бруснично-вороничными и брусничными. Северная оконечность острова покрыта сосняками черничными и чернично-травяными, которые занимают очень небольшую площадь, но являются местом произрастания большого числа лесных видов растений, встречающихся только здесь.

По всему периметру остров окаймлен песчаными пляжами шириной до 10–20 м и осушкой шириной до 2 км. Литораль практически полностью лишена растительного покрова, на супралиторали встречаются единичные экземпляры различных видов растений, которые, скорее всего, не живут более года. Абразионный уступ по периметру всего острова и морская терраса в южной низменной части заняты сообществами псаммофитов – *Festuca richardsonii*, *Lathyrus aleuticus*, *Leymus arenarius* и т. п. Водоемы, водотоки, болота, любые иные источники пресной воды отсутствуют. Антропогенный пресс на остров незначителен: отмечено несколько кострищ на берегах и плохо оборудованная стоянка в лесу на северном мысу.

Флористические исследования проводили в августе 2004 года. Собранные образцы (около

100) хранятся в Гербариях Карельского научно-го центра РАН, г. Петрозаводск (PTZ) и Университета г. Хельсинки (H).

Для выяснения вероятной специфики флоры Хедострова сравнивали с флорой 5 островов в Онежской губе, наиболее близких по размеру и некоторым другим параметрам (табл. 1), а также с другими островами Белого моря [10–14]. Острова Хедостров, Большой Заяцкий и Малый Жужмуй сложены только рыхлыми отложениями («моренные»), острова Коткано, Разостров и Русский Кузов – преимущественно скальные.

видов сопоставима с островами и безлесными лудами, площадь которых на порядок меньше [10–14]. Это объясняется ограниченным распространением или полным отсутствием целого спектра характерных для большинства прочих беломорских островов местообитаний, приуроченных к выходам на дневную поверхность кристаллического фундамента, пресноводным водоемам и водотокам, болотам, разнообразной литорали при изрезанности береговой линии.

Так, на Хедострове не встречаются многие типичные для всего беломорского побережья

Таблица 1

ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ КООРДИНАТЫ И НЕКОТОРЫЕ ПАРАМЕТРЫ ОСТРОВОВ БЕЛОГО МОРЯ

Остров	Координаты центра острова (с. ш./в. д.)	Площадь, км ²	Длина береговой линии, км	Всего видов	Аборигенная фракция	
					Число видов	%
Хедостров	64°2'25" / 36°46'40"	3,9	11,90	113	111	98,2
Большой Заяцкий*	64°58'15" / 35°40'26"	1,35	7,85	190	171	90,0
Малый Жужмуй**	64°37'24" / 35°39'48"	4,40	12,65	180	162	90,0
Коткано***	64°5'58" / 36°40'41"	1,60	9,50	141	138	97,8
Разостров***	64°23'50" / 35°27'13"	1,43	7,10	226	210	92,9
Русский Кузов****	64°55'60" / 35°7'35"	5,55	13,36	231	226	97,8

Примечания: * – по [12]; ** – по [13] (с дополнениями); *** – собственные неопубликованные данные; **** – по [14] (с дополнениями).

Название и объем таксонов приняты согласно сводке С.К. Черепанова [15] с некоторыми изменениями [16], географические элементы – в объеме, предложенном М.Л. Раменской [8].

Результаты и обсуждение. Всего на Хедострове выявлено 113 видов сосудистых растений, относящихся к 87 родам и 38 семействам. Подавляющее большинство зарегистрированных видов сосудистых растений – аборигенные (см. табл. 1).

По сравнению с близкими по размеру скальными островами (Вачев, Русский Кузов, Средний), флора Хедострова отличается обедненным в 1,5–2,0 раза составом и по числу

галофиты, например: *Carex* spp., *Cochlearia arctica* Schlecht. ex DC., *Glaux maritima* L., *Puccinellia* spp., *Ruppia* spp., *Salicornia* spp., *Triglochin maritima* L. и т. п. Ввиду отсутствия на острове скальных выходов нет таких широко распространенных облигатных или факультативных петрофитов, как *Polypodium vulgare* L., *Rhodiola rosea* L., *Sagina nodosa* (L.) Fenzl, *Sedum acre* L. и т. п. Из-за отсутствия переувлажненных местообитаний крайне обеднен состав гидро-, гигро- и гелофитов (особенно родов *Carex*, *Eriophorum*, *Juncus* и т. п.).

Выраженная обедненность флоры предопределила заметные отличия систематической

структуры Хедострова по сравнению с другими островами (табл. 2): снизились на 3–6 рангов позиции гигрофильных семейств Сурегасеае и Juncaceae и, за счет этого, повысились ранги некоторых других семейств. Систематическая структура флоры двух других изученных «моренных» островов, биотопическое разнообразие которых существенно выше, и скальных островов весьма сходна.

Среди широтных групп на всех рассмотренных островах Белого моря абсолютно преобладает бореальная, в которую входит около половины всех аборигенных видов (табл. 3). По сравнению с островами северной части Онежской губы и Кандалакшского

залива [10–12], во флоре Хедострова снижена доля «северной» группы за счет отсутствия некоторых широко распространенных на других островах арктических литоральных и арктоальпийских скальных видов. Одновременно несколько увеличивается доля «южных» видов, что отмечено и для других островов южной части Онежского залива [13, 14]. При продвижении с юга на север наблюдается постепенное обеднение «южной» фракции с 8–10 видов на островах Онежской губы до 1–5 видов на островах Кандалакшского залива [10, 11, 14].

Среди долготных групп на изученных островах преобладают евразийская и цир-

Таблица 2

**РАНГИ 15 ВЕДУЩИХ ПО ЧИСЛУ ВИДОВ СЕМЕЙСТВ РАСТЕНИЙ
(АБОРИГЕННАЯ ФРАКЦИЯ) НА ОСТРОВАХ БЕЛОГО МОРЯ**

Семейство	«Моренные» острова			Скальные острова		
	Хедостров	Большой Заяцкий	Малый Жужмуй	Коткано	Разостров	Русский Кузов
Роасеае	1	1	1	1	1	1
Asteraceae	2	3	3	2	3	4
Caryophyllaceae	3–5	7–10	6–7	3–5	5–6	6
Ericaceae	3–5	4	4–5	3–5	5–6	5
Fabaceae	3–5	7–10	11–13	10–12	10–14	8–9
Rosaceae	6–7	7–10	4–5	6	4	7
Apiaceae	6–7	6	9–10	7–9	7–8	8–9
Cyperaceae	8–10	2	2	3–5	2	2
Scrophulariaceae	8–10	5	6–7	7–9	7–8	11
Betulaceae	8–10	7–10	-	10–12	-	12–14
Ranunculaceae	11–12	13–16	14–18	-	10–14	12–14
Salicaceae	11–12	11–12	9–10	7–9	10–14	10
Juncaceae	13–15	11–12	8	10–12	10–14	3
Orchidaceae	13–15	13–16	14–18	13–16	9	15–16
Polygonaceae	13–15	13–16	11–13	-	10–14	12–14
Число видов в 10 ведущих семействах (%)	71 (64,0)	105 (61,4)	97 (60,2)	83 (60,1)	125 (59,5)	135 (59,7)

Примечание. Знаком «-» отмечены семейства, не входящие в список 15 ведущих по числу видов семейств.

Таблица 3

ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА АБОРИГЕННОЙ ФЛОРЫ ОСТРОВОВ БЕЛОГО МОРЯ,
число видов (% от общего числа аборигенных видов)

Группа видов	«Моренные» острова			Скальные острова		
	Хедостров	Большой Заяцкий	Малый Жужмуй	Коткано	Разостров	Русский Кузов
<i>Широтные группы</i>						
«Северная», в т. ч. виды:	19 (17,1)	39 (22,8)	36 (22,2)	28 (20,3)	39 (18,6)	62 (27,1)
арктические	2 (1,8)	5 (2,9)	4 (2,5)	4 (2,9)	7 (3,3)	12 (5,3)
арктоальпийские	2 (1,8)	3 (1,8)	3 (1,9)	4 (2,9)	4 (1,9)	11 (4,9)
арктобореальные	1 (0,9)	3 (1,8)	4 (2,5)	2 (1,4)	4 (1,9)	6 (2,7)
гипоарктические	14 (12,6)	23 (13,5)	22 (13,6)	16 (11,6)	22 (10,5)	28 (12,4)
гипоаркто-альпийские	–	5 (2,9)	3 (1,9)	2 (1,4)	2 (1,0)	5 (2,2)
Бореальная	55 (49,5)	86 (50,3)	78 (48,1)	65 (47,1)	108 (51,4)	104 (46,0)
«Южная», в т. ч. виды:	8 (7,2)	9 (5,3)	9 (5,6)	8 (5,8)	10 (4,8)	10 (4,4)
бореально-неморальные	6 (5,4)	6 (3,5)	7 (4,3)	7 (5,1)	8 (3,8)	8 (3,5)
неморальные	2 (1,8)	3 (1,8)	2 (1,2)	1 (0,7)	2 (1,0)	2 (0,9)
Плюризональная	26 (23,4)	34 (19,9)	33 (20,4)	31 (22,5)	49 (23,3)	45 (19,9)
<i>Долготные группы</i>						
Амфиатлантическая	4 (3,6)	8 (4,7)	7 (4,3)	7 (5,1)	9 (4,3)	16 (7,1)
Евразийская	46 (41,4)	58 (33,9)	52 (32,1)	48 (34,8)	75 (35,7)	69 (30,5)
Европейская	16 (14,4)	22 (12,9)	17 (10,5)	14 (10,1)	23 (11,0)	28 (12,4)
Европейско-сибирская	4 (3,6)	4 (2,3)	4 (2,5)	3 (2,2)	6 (2,9)	4 (1,8)
Почти космополиты	3 (2,7)	2 (1,2)	3 (1,9)	4 (2,9)	5 (2,4)	3 (1,3)
Циркумполярная	35 (31,5)	74 (43,3)	73 (45,1)	56 (40,6)	88 (41,9)	101 (44,7)
Эндемики и субэндемики Северной Европы	3 (2,7)	3 (1,8)	6 (3,7)	6 (4,3)	4 (1,9)	5 (2,2)

кумполярная, которые в сумме составляют более 70 %. Во флоре Хедострова существенно ниже доля видов самого широкого распространения – циркумполярных, что связано с ограниченным набором биотопов и отсутствием многих банальных литоральных, скальных, прибрежно-водных и болотных видов. За счет этого возрастает доля евразийских видов (см. табл. 3).

По типу ареала преобладают бореальные евразийские – 25 видов (22,5 %) и бореаль-

ные циркумполярные – 19 видов (17,1 %), заметно меньше плюризональных евразийских – 12 видов (10,8 %) и плюризональных циркумполярных – 8 видов (7,2 %); на остальные 22 типа ареала приходится менее чем по 5,5 % видов.

Выявлено только два адвентивных вида – *Epilobium adenocaulon* и *Schedonorus pratensis*, относящихся к аколотофитам, т. е. расселяющимся самостоятельно, вне связи с пребыванием человека на острове.

Ниже приводится список сосудистых растений Хедострова с минимальными аннотациями²:

- Сем. Lycopodiaceae P. Beauv. ex Mirb.:**
1) *Lycopodium annotinum* L. (P; 4);
- Сем. Equisetaceae Rich. ex DC.:**
2) *Equisetum arvense* L. (H; 2, 3);
- Сем. Dryopteridaceae Herter:**
3) *Dryopteris carthusiana* (Vill.) H.P. Fuchs (H; 2, 4);
- Сем. Athyriaceae Alston:**
4) *Gymnocarpium dryopteris* (L.) Newm. (P; 3, 4);
- Сем. Pinaceae Spreng. ex F. Rudolphi:**
5) *Picea abies* (L.) H. Karst. s. l. (H; 4);
6) *Pinus sylvestris* L. s. l. (Ч; 3, 4);
- Сем. Cupressaceae S.F. Gray:**
7) *Juniperus communis* L. (H; 2, 4);
- Сем. Ranunculaceae Juss.:**
8) *Actaea spicata* L. (P; 4);
9) *Ranunculus repens* L. (P; 3);
10) *R. sceleratus* L. (P; 2);
- Сем. Betulaceae S.F. Gray:**
11) *Alnus glutinosa* (L.) Gaertn. (P; 3);
12) *A. incana* (L.) Moench (H; 3);
13) *Betula pendula* Roth (P; 2);
14) *B. pubescens* Ehrh. (P; 2, 4);
- Сем. Caryophyllaceae Juss.:**
15) *Cerastium holosteoides* Fr. (P; 2);
16) *Dianthus superbus* L. (P; 2);
17) *Honckenya diffusa* (Hornem.) Á. Löve (*H. peploides* (L.) Ehrh. subsp. *diffusa* (Hornem.) Hult.) (H; 2);
18) *Sagina procumbens* L. (P; 3);
19) *Stellaria crassifolia* Ehrh. (P; 3);
20) *S. graminea* L. (H; 2);
- Сем. Chenopodiaceae Vent.:**
21) *Atriplex lapponica* Pojark. (H; 2, 3);
22) *A. nudicaulis* Bogusl. (H; 2);
23) *A. praecox* Hülpf. (P; 2);
- Сем. Polygonaceae Juss.:**
24) *Rumex pseudonatronatus* Borb. (P; 2);
25) *R. thyrsiflorus* Fingerh. (P; 3);
- Сем. Brassicaceae Burnett:**
26) *Erysimum hieraciifolium* L. (H; 3);
- Сем. Salicaceae Mirbel:**
27) *Populus tremula* L. (P; 4);
28) *Salix caprea* L. (H; 2, 4);
29) *S. phylicifolia* L. (H; 2, 4);
- Сем. Ericaceae Juss.:**
30) *Arctostaphylos uva-ursi* (L.) Spreng. (P; 3, 4);
31) *Calluna vulgaris* (L.) Hull (H; 4);
32) *Ledum palustre* L. (P; 4);
33) *Vaccinium myrtillus* L. (H; 4);
34) *V. uliginosum* L. (P; 4);
35) *V. vitis-idaea* L. (H; 4);
- Сем. Empetraceae Hook. & Lindl.:**
36) *Empetrum nigrum* L. (Ч; 3, 4);
- Сем. Primulaceae Batsch ex Borkh.:**
37) *Trientalis europaea* L. (H; 3);
- Сем. Thymelaeaceae Juss.:**
38) *Daphne mezereum* L. (P; 4);
- Сем. Grossulariaceae DC.:**
39) *Ribes spicatum* E. Robson (P; 4);
- Сем. Rosaceae Juss.:**
40) *Fragaria vesca* L. (P; 4);
41) *Potentilla egedei* Wormsk. (H; 2);
42) *Rosa cinnamomea* L. (*R. majalis* Herrm.) (P; 4);
43) *Rubus saxatilis* L. (P; 3);
44) *Sorbus aucuparia* L. (H; 2, 3, 4);
- Сем. Fabaceae Lindl.:**
45) *Lathyrus aleuticus* (Greene) Pobed. (H; 3);
46) *L. palustris* L. (P; 2);
47) *L. pratensis* L. (H; 3);
48) *L. vernus* (L.) Bernh. (P; 4);
49) *Vicia cracca* L. (P; 3);
50) *V. sylvatica* L. (P; 3, 4);
- Сем. Onagraceae Juss.:**
51) *Chamaerion angustifolium* (L.) Holub (H; 2, 4);
52) *Epilobium adenocaulon* Hausskn. (H; 2, 3);
53) *E. palustre* L. (P; 3);
- Сем. Oxalidaceae R. Br.:**
54) *Oxalis acetosella* L. (P; 4);

²Встречаемость указана по упрощенной шкале: очень редко или редко (P), нередко/нечасто (H), часто или обыкновенно (Ч). Обобщенные типы местообитаний обозначены цифрами: 1 – литораль; 2 – супралитораль; 3 – абразионный уступ; 4 – лес.

- Сем. Geraniaceae Juss.:**
55) *Geranium sylvaticum* L. (P; 4);
- Сем. Cornaceae Bercht. & J. Presl:**
56) *Chamaepericlymenum suecicum* (L.)
Aschers. & Graebn. (P; 3, 4);
- Сем. Apiaceae Lindl.:**
57) *Angelica sylvestris* L. (P; 3);
58) *Cenolophium denudatum* (Hornem.) Tutin
(P; 2);
59) *Heracleum sibiricum* L. (H; 2);
60) *Ligusticum scoticum* L. (H; 2);
61) *Thyselium palustre* (L.) Raf. (P; 2, 3);
- Сем. Rubiaceae Juss.:**
62) *Galium palustre* L. (P; 2, 3);
- Сем. Caprifoliaceae Juss.:**
63) *Linnaea borealis* L. (H; 2, 4);
64) *Lonicera pallasii* Ledeb. (P; 4);
- Сем. Lamiaceae Martinov:**
65) *Galeopsis bifida* Boenn. (P; 2);
- Сем. Scrophulariaceae Juss.:**
66) *Euphrasia wettsteinii* G.L. Gusarova
(*E. frigida* auct.) (H; 2);
67) *Linaria vulgaris* Mill. (H; 2);
68) *Melampyrum pratense* L. (H; 4);
69) *Rhinanthus minor* L. (H; 2);
- Сем. Plantaginaceae Juss.:**
70) *Plantago maritima* L. (H; 1, 2);
- Сем. Campanulaceae Juss.:**
71) *Campanula rotundifolia* L. (H; 3);
- Сем. Asteraceae Bercht. & J. Presl:**
72) *Achillea millefolium* L. (P; 3);
73) *Artemisia coarctata* Forsell. (P; 2);
74) *Bidens radiata* Thuill. (H; 2, 3);
75) *Hieracium umbellatum* L. (H; 2, 3);
76) *Mulgedium tataricum* (L.) DC. (*Lactuca tatarica* (L.) C.A. Mey.) (P; 2);
77) *Solidago lapponica* With. (*S. minuta* L.)
(H; 2, 3, 4);
78) *S. virgaurea* L. (P; 2, 3);
79) *Sonchus humilis* N.I. Orlova (P; 2);
80) *Tanacetum vulgare* L. (H; 2);
81) *Tripleurospermum subpolare* Pobed.
(H; 2);
82) *Tussilago farfara* L. (H; 2);
- Сем. Trilliaceae Lindl.:**
83) *Paris quadrifolia* L. (P; 4);
- Сем. Convallariaceae Horan.:**
84) *Maianthemum bifolium* (L.) F.W. Schmidt
(P; 3, 4);
- Сем. Orchidaceae Juss.:**
85) *Goodyera repens* (L.) R. Br. (P; 4);
86) *Platanthera bifolia* (L.) Rich. (P; 4);
- Сем. Juncaceae Juss.:**
87) *Juncus atrofuscus* Rupr. (*J. gerardii* Loisel. subsp. *atrofuscus* (Rupr.) Printz) (H; 2, 3);
88) *Luzula pilosa* (L.) Willd. (P; 4);
- Сем. Cyperaceae Juss.:**
89) *Bolboschoenus maritimus* (L.) Palla (P; 3);
90) *Carex acuta* L. (P; 3);
91) *C. brunnescens* (Pers.) Poir. (P; 3);
92) *C. canescens* L. (P; 2, 3);
- Сем. Poaceae Barnhart:**
93) *Agrostis gigantea* Roth (H; 2);
94) *Anthoxanthum alpinum* Á. Löve & D. Löve
(P; 2);
95) *Avenella flexuosa* (L.) Drej. (Ч; 3, 4);
96) *Calamagrostis canescens* (Web.) Roth
(P; 2, 4);
97) *C. meinshausenii* (Tzvelev) Viljasoo (P; 2);
98) *C. phragmitoides* Hartm. (P; 4);
99) *Elytrigia repens* (L.) Nevski (H; 2);
100) *Festuca arenaria* Osbeck (H; 2);
101) *F. ovina* L. (P; 3, 4);
102) *F. richardsonii* Hook. (P; 2, 3);
103) *F. rubra* L. (H; 2, 3);
104) *Hierochloë arctica* C. Presl (P; 3);
105) × *Leymotrigia bergrothii* (H. Lindb.)
Tzvelev (P; 2);
106) *Leymus arenarius* (L.) Hochst. (Ч; 2, 3);
107) *Milium effusum* L. (P; 4);
108) *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex
Steud. (H; 2);
109) *Poa alpigena* (Blytt) Lindm. (H; 2, 3);
110) *P. angustifolia* L. (P; 2, 3);
111) *P. lapponica* Prokud. (P; 3);
112) *P. pratensis* L. (P; 3);
113) *Schedonorus pratensis* (Huds.) P. Beauv.
(*Festuca pratensis* Huds.) (P; 2).

Заключение. Флора о. Хедостров, обладающего уникальными морфологическими и морфометрическими характеристиками, отличается от флоры других островов Белого

моря (как преимущественно скальных, так и сложенных рыхлыми отложениями) существенно сниженным (в 1,5–2,0 раза) видовым богатством, что связано с отсутствием здесь большого числа широко распространенных на беломорском побережье облигатных и факультативных галофитов, петрофитов, ги-

дро- и гигрофитов, гелофитов. Таксономическая бедность флоры Хедострова отразилась на некоторых типологических параметрах – снизились ранги «гидрофильных» семейств Сурегасеае и Лунсасеае, уменьшилась доля «северной» фракции при увеличении доли «южных» видов.

Список литературы

1. Невесский К.И., Медведев В.С., Калинин В.В. Белое море. Седиментогенез и история развития в голоцене. М., 1977. 236 с.
2. Куликов В.С., Светов С.А., Слабунов А.И., Куликова В.В., Полин А.К., Голубев А.И., Горьковец В.Я., Иващенко В.И., Гоголев М.А. Геологическая карта Юго-Восточной Фенноскандии масштаба 1:750 000: новые подходы к составлению // Тр. Карел. науч. центра РАН. Сер.: Геология Докембрия. 2017. № 2. С. 3–41.
3. Лочия Белого моря / Гл. Упр. навигации и океанографии Мин-ва обороны РФ. СПб., 1995. № 1110. 336 с.
4. Елина Г.А., Лукашов А.Д., Юрковская Т.К. Позднеледниковье и голоцен Восточной Фенноскандии (палеорастиельность и палеография). Петрозаводск, 2000. 242 с.
5. Девятова Э.И. Геология и палинология голоцена и хронология памятников первобытной эпохи в Юго-Западном Беломорье. Л., 1976. 121 с.
6. Шелехова Т.С., Лаврова Н.Б. Палеоэкологические условия развития юго-западного Беломорья в голоцене // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 11. Петрозаводск, 2008. С. 255–266.
7. Шелехова Т.С., Лаврова Н.Б. Новые данные о миграции береговой линии Белого моря // Уч. зап. Петрозав. гос. ун-та. Сер.: Естеств. и техн. науки. 2011. № 2(115). С. 24–32.
8. Раменская М.Л. Анализ флоры Мурманской области и Карелии. Л., 1983. 216 с.
9. Камелин Р.В., Овеснов С.А., Шилова С.И. Неморальные элементы во флорах Урала и Сибири. Пермь, 1999. 83 с.
10. Богданова Н.Е., Вехов В.Н. Флора сосудистых растений Кемь-Лудского архипелага // Тр. Кандалакш. гос. заповед. Вып. VII. Ботан. исслед. Мурманск, 1969. С. 3–59.
11. Воробьева Е.Г. Анализ флоры островов Кандалакшского залива // Флора и растительность островов Белого и Баренцева морей. Мурманск, 1996. С. 89–100.
12. Кравченко А.В., Тимофеева В.В., Гнатюк Е.П. О своеобразии систематической и географической структуры флоры островов Онежского залива Белого моря // Тр. Карел. науч. центра РАН. 2005. Вып. 7. Биogeография Карелии. С. 87–102.
13. Кравченко А.В., Тимофеева В.В. О флоре сосудистых растений архипелага Жужмуи в Белом море // Тр. Карел. науч. центра РАН. Сер.: Биogeография. 2008. Вып. 12. С. 64–73.
14. Кравченко А.В., Тимофеева В.В., Фадеева М.А. О флоре островов в южной части Онежской губы Белого моря (Республика Карелия) // Тр. Карел. науч. центра РАН. Сер.: Биogeография. 2015. № 4. С. 65–78.
15. Черепанов С.К. Сосудистые растения России и сопредельных государств (в пределах бывшего СССР). СПб., 1995. 992 с.
16. Цвелев Н.Н. Определитель сосудистых растений Северо-Западной России (Ленинградская, Псковская и Новгородская области). СПб., 2000. 781 с.

References

1. Neveskiy K.I., Medvedev V.S., Kalinenko V.V. *Beloe more. Sedimentogenez i istoriya razvitiya v golotsene* [White Sea. Sedimentogenesis and the History of Development in the Holocene]. Moscow, Nauka publ., 1977. 236 p. (In Russ.)

2. Kulikov V.S., Svetov S.A., Slabunov A.I., Kulikova V.V., Polin A.K., Golubev A.I., Gor'kovets V.Ya., Ivashchenko V.I., Gogolev M.A. Geologicheskaya karta Yugo-Vostochnoy Fennoskandii masshtaba 1:750 000: novye podkhody k sostavleniyu [Geological Map of Southeastern Fennoscandia (Scale 1:750 000): a New Approach to Map Compilation]. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN. Ser.: Geologiya Dokembriya* [Transactions of Karelian Research Centre of Russian Academy of Science. Ser.: Precambrian Geology], 2017, no. 2, pp. 3–41.
3. Lotsiya Belogo morya [The Pilot Chart of the White Sea]. *Glavnoe Upravlenie navigatsii i okeanografii Ministerstva oborony RF* [Chief Directorate for Navigation and Oceanography of the RF Ministry of Defense]. Saint Petersburg, 1995, no. 1110. 336 p. (In Russ.)
4. Elina G.A., Lukashov A.D., Yurkovskaya T.K. *Pozdnelednikov'e i golotsen Vostochnoy Fennoskandii (paleorastitel'nost' i paleografiya)* [Late Glacial and the Holocene of Eastern Fennoscandia (Paleoflora and Paleogeography)]. Petrozavodsk, Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences Publ., 2000. 242 p. (In Russ.)
5. Devyatova E.I. *Geologiya i palinologiya golotsena i khronologiya pamyatnikov pervobytnoy epokhi v Yugo-Zapadnom Belomor'e* [Geology and Palynology of the Holocene and Chronology of the Monuments of the Primitive Epoch in the South-Western White Sea]. Leningrad, Nauka Publ., 1976. 121 p. (In Russ.)
6. Shelekhova T.S., Lavrova N.B. Paleoekologicheskie usloviya razvitiya yugo-zapadnogo Belomor'ya v golotsene [Paleoecological Conditions for the Development of the Southwestern White Sea Coast in the Holocene]. *Geologiya i poleznye iskopaemye Karelii* [Geology and Useful Minerals of Karelia], 2008, iss. 11, pp. 254–265.
7. Shelekhova T.S., Lavrova N.B. Novye dannye o migratsii beregovoy linii Belogo morya [New Data on Migration of the White Sea Coastline]. *Uchenye Zapiski Petrozavodskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Ser.: Estestvennye i tekhnicheskie nauki* [Proceedings of Petrozavodsk State University. Ser.: Natural and Engineering Sciences], 2011, no. 2(115), pp. 24–32.
8. Ramenskaya M.L. *Analiz flory Murmanskoy oblasti i Karelii* [Analysis of the Flora of the Murmansk Region and Karelia]. Leningrad, Nauka Publ., 1983. 216 p. (In Russ.)
9. Kamelin R.V., Ovesnov S.A., Shilova S.I. *Nemoral'nye elementy vo florakh Urala i Sibiri* [Nemoral Elements in the Flora of the Urals and Siberia]. Perm, Perm University Publ., 1999. 83 p. (In Russ.)
10. Bogdanova N.E., Vekhov V.N. Flora sosudistyykh rasteniy Kem'-Ludskogo arhipelaga [Flora of Vascular Plants of the Kem-Ludsk Archipelago]. *Trudy Kandalakshskogo gosudarstvennogo zapovednika. Vyp. VII. Botanicheskie issledovaniya* [Proceedings of the Kandalaksha State Reserve. Iss. 7. Botanical Research]. Murmansk, 1969, pp. 3–59. (In Russ.)
11. Vorob'eva E.G. Analiz flory ostrovov Kandalakshskogo zaliva [Flora Analysis of the Islands of the Kandalaksha Gulf]. *Flora i rastitel'nost' ostrovov Belogo i Barentseva morey* [Flora and Vegetation of the Islands of the White and Barents Seas]. Murmansk, MONMTsSO Publ., 1996, pp. 89–100. (In Russ.)
12. Kravchenko A.V., Timofeeva V.V., Gnatyuk E.P. O svoebrazii sistematicheskoy i geograficheskoy struktury flory ostrovov Onezhskogo zaliva Belogo morya [On the Peculiarities of the Taxonomic and Geographical Structure of the Flora on Islands on the Gulf of Onega, White Sea]. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN. Biogeografiya Karelii* [Transactions of Karelian Research Centre of Russian Academy of Science. Biogeography of Karelia], 2005, no. 7, pp. 87–102.
13. Kravchenko A.V., Timofeeva V.V. O flore sosudistyykh rasteniy arhipelaga Zhuzhmuji v Belom more [On the Vascular Flora of the Zhuzhmuji Archipelago, White Sea]. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN. Ser.: Biogeografiya* [Transactions of Karelian Research Centre of Russian Academy of Science. Ser.: Biogeography], 2008, no. 12, pp. 64–73.
14. Kravchenko A.V., Timofeeva V.V., Fadeeva M.A. O flore ostrovov v yuzhnoy chasti Onezhskoy guby Belogo morya (Respublika Kareliya) [Flora of the Islands in the Southern Onega Bay of the White Sea]. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN. Ser.: Biogeografiya* [Transactions of Karelian Research Centre of Russian Academy of Science. Ser.: Biogeography], 2015, no. 4, pp. 65–78.
15. Cherepanov S.K. *Sosudistye rasteniya Rossii i sopredel'nykh gosudarstv (v predelakh byvshego SSSR)* [Vascular Plants of Russia and Neighboring Countries (within the Former USSR)]. Saint Petersburg, Mir i sem'ya Publ., 1995. 992 p. (In Russ.)
16. Tselev N.N. *Opredelitel' sosudistyykh rasteniy Severo-Zapadnoy Rossii (Leningradskaya, Pskovskaya i Novgorodskaya oblasti)* [The Key to Vascular Plants of North-West Russia (Leningrad, Pskov and Novgorod Regions)]. Saint Petersburg, SPCPA Publ., 2000. 781 p. (In Russ.)

*Aleksey V. Kravchenko**, *Mikko A. Piirainen***, *Vera V. Timofeeva**

*Forest Research Institute of Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences
(Petrozavodsk, Russian Federation)

**University of Helsinki
(Finland)

FLORA OF KHEDOSTROV ISLAND IN ONEGA BAY OF THE WHITE SEA (Arkhangelsk Region)

Khedostrov Island is one of the largest islands in the White Sea, its area is 3.9 km². It is composed of unconsolidated quaternary deposits, and differs from all other islands of the White Sea by a plain coastline, without bays. The littoral zone is predominantly sandy. Most of the surface area is covered with old-growth lichen pine forests. There are no water bodies, watercourses or bogs in the island. 113 vascular plant species are recorded, 111 of which are native. Compared to the other White Sea islands of similar size, both predominantly rocky, or composed only of unconsolidated deposits, the species richness of Khedostrov Island flora is 1.5–2.0 times lower. An analysis of the systematic and geographical structure of flora of the island reveals some differences from the flora of the other islands of the White Sea. The families Poaceae and Asteraceae are the most abundant species, which is typical of boreal floras. At the same time, the position of another family of the leading triad – Cyperaceae is 5–6 ranks down, as well as the position of the Juncaceae family. The proportion of species belonging to the northern fraction decreases, while the proportion of species of predominantly southern distribution increases. Both low abundance of species, and the different structure of flora are associated primarily with a limited set of biotopes in the island. Many of arctic, arctoalpine, multizonal species, common in the White Sea islands, including halophytes (*Carex* spp., *Puccinellia* spp., *Ruppia* spp., *Salicornia* spp., etc.), obligate or facultative petrophytes (*Huperzia* spp., *Rhodiola* spp., *Sedum acre*, etc.), and hygro-, hydrophytes, helophytes (*Carex* spp., *Eriophorum* spp., *Juncus* spp., etc.) are totally absent. An annotated list of species of Khedostrov Island regarding frequency of occurrence and ecotopic confinement is provided.

Keywords: *vascular plant, flora of the White Sea islands, systematic structure of flora, geographical structure of flora, Khedostrov Island, Onega Bay of the White Sea.*

Поступила 07.03.2017
Received on March 07, 2017

Corresponding author: Aleksey Kravchenko, *address:* ul. Pushkinskaya, 11, Petrozavodsk, Republic of Karelia, 185910, Russian Federation; *e-mail:* alex.kravchen@mail.ru

For citation: Kravchenko A.V., Piirainen M.A., Timofeeva V.V. Flora of Khedostrov Island in Onega Bay of the White Sea (Arkhangelsk Region). *Arctic Environmental Research*, 2017, vol. 17, no. 3, pp. 222–232. DOI: 10.17238/issn2541-8416.2017.17.3.222

**ВИДОВОЕ РАЗНООБРАЗИЕ И ДИНАМИКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ
КОРМОВОЙ БАЗЫ РЫБ оз. ЛАЧА. Часть 2. Зообентос**

*А.П. Новоселов**, *И.И. Студёнов**, *А.К. Козьмин**,
*Г.А. Дворянкин**, *А.Г. Завиша**, *М.А. Студёнова**, *А.Л. Левицкий**

*Северный филиал Полярного научно-исследовательского института
морского рыбного хозяйства и океанографии им. Н.М. Книповича
(Архангельск)

Озеро Лача, крупнейшее в Архангельской области, подвержено сукцессионным изменениям как абиотических, так и биотических компонентов водной экосистемы. В статье представлена характеристика кормовой базы озера. Показано значительное видовое разнообразие (163 вида, 16 систематических групп) донных беспозвоночных, обычных для северо-западной зоны и широко распространенных в северной части Палеарктики, определен их таксономический статус. Единично отмечены пресноводные губки – Porifera и кишечнополостные – Coelenterata (по 1 виду). Большим количеством видов характеризовались кольчатые черви – Annelida (24 вида) и моллюски – Mollusca (43 вида). Более половины всех обнаруженных видов (94) относились к типу членистоногих – Arthropoda. Выявлено, что среди них как по численности, так и по биомассе доминируют водные личинки хирономид. Кроме этого, высокую численность имеют олигохеты, нематоды и двустворчатые моллюски. Значительную роль в формировании биомассы играют брюхоногие моллюски и олигохеты. Распределение зообентоса по акватории озера характеризуется почти одинаковым (и по численности, и по биомассе) соотношением представителей доминантной группы – водных личинок хирономид. В начале XXI века численность бентоса формировалась за счет малочисленных двукрылых, олигохет и двустворчатых моллюсков, в последующие годы был отмечен рост численности олигохет. В целом по озеру среднесезонные показатели развития донной фауны составляют: численность – 3 620 экз./м², биомасса – 10,6 г/м². По рыбохозяйственной классификации оз. Лача может быть отнесено к водоемам средней кормности для рыб-бентофагов. Приведенные сведения могут быть использованы при разработке путей рационального промыслового использования внутренних водоемов Северного рыбохозяйственного бассейна.

Ключевые слова: бентосное сообщество озера Лача, видовое разнообразие зообентоса, численность зообентоса, биомасса зообентоса, пространственное распределение зообентоса, трофический статус озера Лача.

Контактное лицо: Новоселов Александр Павлович, адрес: 163002, г. Архангельск, ул. Урицкого, д. 17, e-mail: novoselov@pinro.ru

Для цитирования: Новоселов А.П., Студёнов И.И., Козьмин А.К., Дворянкин Г.А., Завиша А.Г., Студёнова М.А., Левицкий А.Л. Видовое разнообразие и динамика показателей кормовой базы рыб оз. Лача. Часть 2. Зообентос // Arctic Environmental Research. 2017. Т. 17, № 3. С. 233–244. DOI: 10.17238/issn 2541-8416.2017.17.3.233

В водных экосистемах зообентос – важнейшая составляющая кормовой базы бентосоядных рыб, а по уровню его развития можно судить о потенциальной рыбопродуктивности водоемов, зависящей от количества доступного корма для рыб-бентофагов [1, с. 99]. Кроме того, зообентос является одной из основных групп организмов – биологических индикаторов, используемых при оценке качества воды при эвтрофировании водоемов. Известно, что представители донной фауны характеризуются широким спектром экологических особенностей, достаточно крупными размерами, приуроченностью к конкретным местообитаниям, а также значительной продолжительностью жизни, позволяющей им аккумулировать загрязняющие вещества. Все это делает их очень удобным объектом для мониторинга пресноводных экосистем [2, с. 279].

С начала 2000-х годов работы по изучению кормовой базы рыб оз. Лача – часть государственного мониторинга, проводимого Северным филиалом Полярного научно-исследовательского института морского рыбного хозяйства и океанографии им. Н.М. Книповича. Цель настоящего исследования – изучение видового и таксономического разнообразия, а также годовой и пространственной динамики количественных показателей зообентосного сообщества оз. Лача.

Материалы и методы. В основу настоящей статьи положены материалы, собранные в период с 2003 по 2015 годы в ходе выполнения работ по государственному мониторингу, а также данные других авторов. Гидробиологические материалы отбирали по сетке из 12 станций, расположенных равномерно по акватории озера.

Пробы зообентоса отбирали дночерпателем Петерсена с площадью захвата 1/40 м² в двукратной повторности. Для промывки грунта использовали сачок из мельничного газа № 23-35.

Фиксацию проб проводили 4 %-м раствором формалина, предварительно нейтрализованного насыщенным раствором соды (NaHCO₃) для предотвращения растворения помещенных в него известковых раковин моллюсков. Камеральную обработку собранного материала осуществляли общепринятыми в практике гидробиологических исследований методами¹. Таксономическую принадлежность организмов устанавливали при помощи соответствующих определителей по ручейникам [3, 4], личинкам и куколкам комаров [5, 6], мошкам [7] и пресноводным беспозвоночным Европейской части СССР [8].

В работе применены методы вариационно-статистической оценки собранного материала², а именно такие статистические показатели, как средняя арифметическая, ошибка средней арифметической, среднее квадратичное отклонение и коэффициент вариации. Для оценки рядов данных использовали программу «Excel 2013».

Результаты и обсуждение. В ходе анализа собранного материала были рассмотрены видовое разнообразие и таксономический статус зообентосного сообщества, современное состояние качественных и количественных показателей зообентоса (по данным 2015 года), а также временная динамика численности и биомассы зообентоса за полувековой период.

Видовое разнообразие и таксономический статус зообентоса. Для проведения гидробиологических исследований необходимо представление о видовом составе сообществ в водных экосистемах, что позволяет более полно отражать их современное состояние и объективно оценить происходящие в них изменения.

По данным Г.В. Трениной и Г.Е. Новосельцева [9, с. 85; 10, с. 72; 11, с. 6; 12, с. 83; 13, с. 14], в оз. Лача отмечено 163 таксона донных беспозвоночных:

¹Руководство по гидробиологическому мониторингу пресноводных экосистем / под ред. В.А. Абакумова. СПб., 1992. 318 с; Жадин В.И. Методы гидробиологического исследования. М., 1960. 191 с.

²Плохинский Н.А. Биометрия. Новосибирск, 1971. 364 с; Ивантер Э.В., Коросов А.В. Введение в количественную биологию. Петрозаводск, 2003. 302 с.

1. Porifera – пресноводные губки:

1) *Spongilla* sp.;

2. Coelenterata – кишечнополостные:

Hydrozoa – гидроидные полипы:

2) *Hydra* sp.;

3. Annelida – кольчатые черви, в т. ч.:

Oligochaeta – круглые черви:

3) *Stylaria lacustris* (L.);

4) *Arctonais lomondi* (Martin);

5) *Ripistes parasita* (Schmidt);

6) *Nais pseudobtusa* Piguët;

7) *N. barbata* Mull.;

8) *N. simplex* Piguët;

9) *Ophidonais serpentina* (Mull.);

10) *Uncinaiis uncinata* (Oersted);

11) *Chaetogaster diaphanous* (Gruith);

12) *Limnodrilus udekemianus* Claparede;

13) *L. hoffmeisteri* Claparede;

14) *Potamothrix hammoniensis* (Mich.);

15) *Isochaetides newaensis* (Mich.);

16) *Psammoryctides albicola* (Mich.);

17) *P. barbatus* (Grube);

18) *Tubificidae* gen. sp. juv.;

19) *Pelosclex ferox* (Eisen);

20) *Enchytreidae* gen. sp.;

21) *Lumbriculus variegatus* (Muller);

Hirudinea – пиявки:

22) *Glossiphonia complanata* L.;

23) *Helobdella stagnalis* Blanch;

24) *Piscicola geometra* L.;

25) *Herpobdella octoculata* (L.);

26) *H. testacea* Savigny;

4. Mollusca – моллюски, в т. ч.:

Gastropoda – брюхоногие:

27) *Limnaea stagnalis* (L.);

28) *Radix auricularia* (L.);

29) *R. lagotis* (Schrank);

30) *R. ovata* (Draparnaud);

31) *R. pereger* (Muller);

32) *Galba glabra* (Muller);

33) *Amphipeplea glutinosa* (Muller);

34) *Physa fontinalis* (L.);

35) *Planorbis carinatus* Muller;

36) *P. planorbis* (L.);

37) *Coretus corneus* (L.);

38) *Anisus vorticulus* (Troschel);

39) *A. contortus* (L.);

40) *Guraulus albus* (Muller);

41) *G. gredleri* (Bielz) Gredler;

42) *G. laevis* (Alder);

43) *Armiger crista* (L.);

44) *Acroloxus lacustris* (L.);

45) *Valvata piscinalis* (Muller);

46) *V. pulchella* Studer;

47) *V. cristata* Muller;

48) *Viviparus viviparus* (L.);

49) *Bithynia tentaculata* (L.);

50) *B. leachi* (Sheppard);

Bivalvia – двустворчатые:

51) *Unio pictorum* (L.);

52) *Anodonta anatina* (L.);

53) *Sphaerium solidum* (Normand);

54) *Sph. subsolidum* Clessin;

55) *Sph. corneum* (L.);

56) *Sph. nitidum* Clessin;

57) *Sph. lacustre* (Muller);

58) *Pisidium amnicum* (Muller);

59) *P. supinum* A. Schmidt;

60) *P. henslowanum* (Sheppard);

61) *P. casertanum* (Poli);

62) *P. ponderosum* Stelfox;

63) *P. nitidum* Jenyns;

64) *P. subtruncatum* Malm;

65) *P. pusillum* (Gmelin) Jenyns;

66) *P. pulchellum* Jenyns;

67) *P. obtusale* (Lam.);

68) *P. milium* Held.;

69) *P. moitessierianum* Paladilhe;

5. Arthropoda – членистоногие, в т. ч.:

Crustacea – ракообразные, в т. ч.:

Отр. Isopoda – равноногие:

70) *Asellus aquaticus* L.;

Отр. Amphipoda – бокоплавцы:

71) *Gammarus lacustris* Sars;

72) *Pallasea quadrispinosa* Sars;

Отр. Ostracoda – ракушковые:

73) *Nyocypris decipiens* Masi;

74) *Cypridopsis vidum* O.F. Muller;

75) *Cyclocypris ovum* (J.);

76) *C. serena* (Koch);

- 77) *Cypria ophthalmica* (J.);
 78) *Candona candida*;
 79) *C. protzi* Hartwig;
 80) *C. caudata* Kaufmann;
 81) *C. pratensis* Hartwig;
 82) *Darvinula stevensoni* Br. et Rob.;
 83) *Cytherissa lacustris* G.O. Sars;
 84) *Limnocythere sancti paficii* Br. et Rob;
- Insecta – насекомые, в т. ч.:
Отр. Trichoptera – ручейники:
 85) *Rhayacophila* sp.;
 86) *Agapetus comatus* Piet.;
 87) *Agraylea multipunctata* Curt.;
 88) *Hydroptila femoralis* Eaton;
 89) *Hydroptila* sp.;
 90) *Orthotrichia tetensii* Kolbe;
 91) *Oxyethira flavicornis* Pictet;
 92) *Oxyethira* sp.;
 93) *Holocentropus picicornis* Steph.;
 94) *Cyrnus flavidus* Mc. L.;
 95) *Phryganea bipunctata* Retz.;
 96) *Ph. grandis* L.;
 97) *Phryganea* sp.;
 98) *Molanna angustata* Curt;
 99) *M. albicans* Zett.;
 100) *Molanna* sp.;
 101) *A. cinereus* Curt.;
 102) *Mystacides nigra* L.;
 103) *Oecetis ochracea* Curt.;
 104) *Oecetis* sp.;
 105) *Limnephilus* sp.;
- Отр. Diptera – двукрылые:
 106) *Micropsectra gr. praecox* Mg.;
 107) *Stempelina gr. bausei* Kieff.;
 108) *Tanytarsus gr. lobatifrons* Kieff.;
 109) *T. gr. gregarius* Kieff.;
 110) *T. gr. mancus* v.d. Wulp;
 111) *T. pediciferus* Birula;
 112) *Cryptochironomus gr. fuscimanus* Kieff.;
 113) *C. gr. defektus* Kieff.;
 114) *C. gr. vulneratus* Zett.;
 115) *C. gr. conjugens* Kieff.;
 116) *C. gr. camptolabis* Kieff.;
 117) *C. gr. viridulus* P.;
 118) *C. gr. anomalus* Kieff.;
- 119) *C. gr. pararostratus* Lenz;
 120) *Cryptochironomus* sp. Lipina;
 121) *Einfeldla gr. carbonaria* Mg.;
 122) *Pseudochironomus gr. prasinatus* Staeg.;
 123) *Endochironomus gr. dispar* Mg.;
 124) *E. albipennis* Mg.;
 125) *Glyptotendipes gr. ipekoveni* Kieff.;
 126) *Lauterborniella brachylabis* Edw.;
 127) *Limnochironomus gr. nervosus* Staeg.;
 128) *L. gr. tritonus* Kieff.;
 129) *Microtendipes gr. chloris* Mg.;
 130) *Paratendipes gr. albimanus* Mg.;
 131) *P. intermedius* Tschern.;
 132) *Pentapedilum execturn* Kieff.;
 133) *Polypedilum brevantennatum* Tschern.;
 134) *P. gr. convictum* Walk.;
 135) *P. gr. nubeculosum* Mg.;
 136) *P. gr. scalaenum* Schr.;
 137) *Stictochironomus gr. histrio* P.;
 138) *S. psammophilus* Tschern.;
 139) *Stictochironomus* sp.;
 140) *Chironomus f.l. bathophilus* Kieff.;
 141) *Ch. f.l. plumosus* (L.);
 142) *Ch. f.l. thummi* Kieff.;
 143) *Tendipedini gen. macrophthalma* Tschern.;
 144) *Pagastiella orophilla* Edw.;
 145) *Allochlanomus* Kieff.;
 146) *Cricotopus gr. silvestris* (Fabr.);
 147) *C. algarum* Kieff.;
 148) *C. versidentatus* Tschern.;
 149) *C. biformis* Edw.;
 150) *Psectrocladius gr. psilopterus* Kieff.;
 151) *P. medius* Tschern.;
 152) *Microcricotopus bicolor* Zett.;
 153) *Trichocladius gr. lucidus* Staeg.;
 154) *Diamesa campestris* Edw.;
 155) *D. gaedi* Mg.;
 156) *Prodiamesa oltvacea* Mg.;
 157) *Syndiamesa gr. nivosa* Geotgh.;
 158) *Corynoneura* sp.;
 159) *Thienemaniella* sp.;
 160) *Ablabesmyia gr. lentiginosa* Pries.;
 161) *A. gr. monilis* L.;
 162) *Clinotanypus nervosus* Mg.;
 163) *Procladius* Skuze.

В целом донная фауна оз. Лача включает представителей 5 крупных таксономических единиц (типов). Единично отмечены пресноводные губки – Porifera и кишечнополостные – Coelenterata (по 1 виду, или по 0,6 % от всего фаунистического состава бентоса). Несколько большим количеством видов характеризовались кольчатые черви – Annelida (24 вида, или 14,7 %) и моллюски – Mollusca (43 вида, или 26,4 %). Более половины всех обнаруженных видов (94, или 57,7 %) относились к типу членистоногих – Arthropoda (рис. 1а). Среди них менее 10 % (15 видов) приходилось на ракообразных – Crustacea, более 80 % (79 видов) рассматриваемой группы составляли личинки насекомых – Insecta (рис. 1б). Основная часть насекомых (58 видов, или 73,4 %) была представлена личинками двукрылых – Diptera (рис. 1в), а именно исключительно представителями семейства хирономид – Chironomidae.

Качественные и количественные показатели зообентоса. Гидробиологические материалы в течение вегетационного сезона (август 2015 года) собирали на всей акватории озера на 12 станциях, главным образом на илистых биотопах. Анализ распределения численности и биомассы зообентоса по акватории водоема выявил следующее. Практически по всем станциям наблюдалось примерно одинаковое соотношение (как по численности, так и по биомассе) насекомых, а именно доминирование водных личинок хирономид, в проанализированных пробах (рис. 2, см. с. 238).

Наибольшие их значения по численности (от 600 до 900 экз./м²) наблюдались в юго-западной части озера (ст. № 9–11); по биомассе (от 2,4 до 3,7 г/м²) – в южной (ст. № 7) и западной (ст. № 11) частях водоема. Наименьшие показатели (численности – от 1 до 300 экз./м³, биомассы – от 0,001 до 1,2 г/м²) были отмечены на всех остальных станциях по северному (ст. № 1 и 12), восточному (ст. № 2–6) и южному (ст. № 8) побережьям оз. Лача. Станция № 7, располагающаяся в

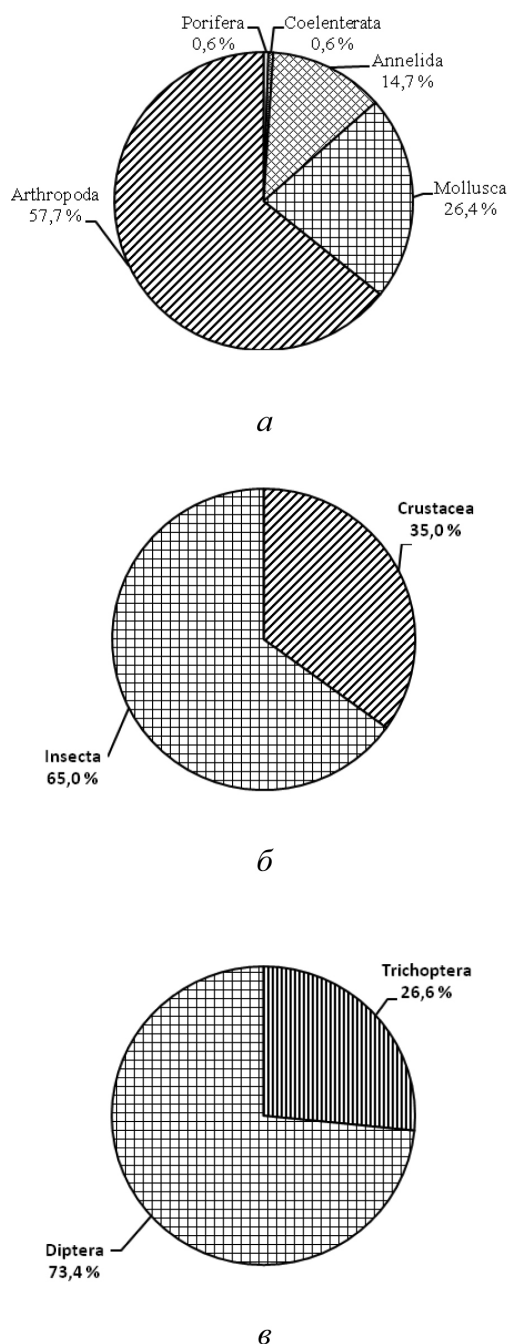


Рис. 1. Доля в составе донной фауны оз. Лача крупных таксонов-типов (а) и представителей доминирующих групп – членистоногих (б) и насекомых (в)

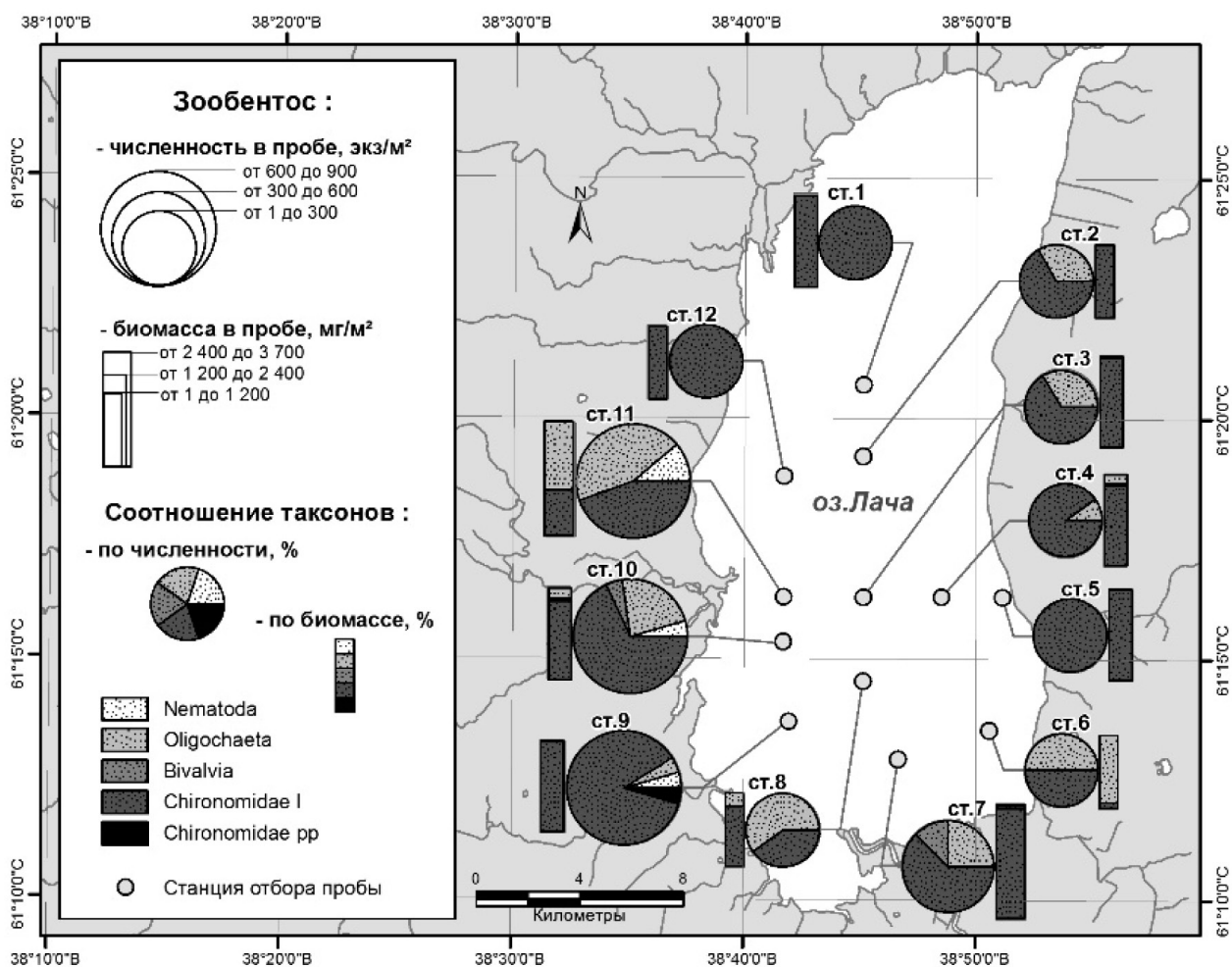


Рис. 2. Распределение численности и биомассы донной фауны оз. Лача в августе 2015 года

юго-восточной части озера, имела промежуточные значения численности (от 300 до 600 экз./м²) и биомассы (от 1,2 до 2,4 г/м²) зообентосных организмов.

Донная фауна в период отбора проб (2015 год) по количественным параметрам оказалась значительно ниже среднеемноголетних значений. Было отмечено только 4 группы донных гидробионтов, из которых доминирующее положение занимали личинки хирономид – 49,5 % от общей численности и 77,3 % от общей

биомассы (рис. 3); в качестве субдоминантной группы выступили олигохеты – 28,4 % и 18,5 % соответственно.

Временная динамика численности и биомассы зообентоса. Данные за период с начала регулярных наблюдений в 2003 году по 2015 год позволяют оценить оз. Лача как водоем со средним уровнем развития донной фауны, которая продолжает характеризоваться достаточно большим видовым разнообразием [14, с. 146; 15, с. 14]. Всего в бентофауне озера в этот период было отмечено 16 систематиче-

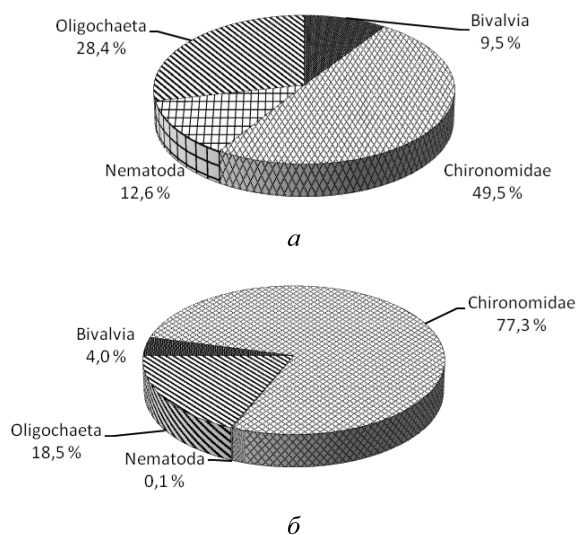


Рис. 3. Соотношение групп донной фауны оз. Лача по численности (а) и биомассе (б) в августе 2015 года

ских групп бентоса (см. таблицу): представители червей (Nematoda, Oligochaeta, Hirudinea), водных рачков (Isopoda, Phyllopora, Ostracoda), моллюсков (Bivalvia, Gastropoda), водных клещей (Acari) и водных личинок и куколок насекомых (Ephemeroptera, Trichoptera, Heleidae, Chironomidae, Simuliidae и пр.).

В озере как по численности, так и по биомассе доминировали присутствовавшие во всех пробах личинки хирономид (*Chironomidae* L.) – 35,4 и 42,0 % соответственно. Кроме них многочисленными оказались олигохеты (17,5 %), нематоды (11,9 %) и двустворчатые моллюски (11,7 %). Значительную роль в формировании биомассы бентоса кроме личинок хирономид играли брюхоногие моллюски (28,0 %) и олигохеты (15,7 %). В целом по озеру среднегодовалые показатели развития донной фауны составляют: численность – 3 620 экз./м², биомасса – 10,6 г/м². В различные годы периода исследований количественные показатели донной фауны значительно колебались (рис. 4, см. с. 240).

Средняя численность бентоса изменялась от 423 экз./м² (2015 г.) до 3538 экз./м² (2005 г.) при колебаниях средней биомассы от 1,48 г/м² (2003 г.) до 4,53 г/м² (2014 г.). Начало периода исследований (2003–2004 годы) характеризовалось невысокой численностью, как и в отдельные сезоны в последующем (2013, 2015 годы). Она формировалась за счет малочисленных двукрылых, олигохет и двустворчатых моллюсков. Из двукрылых отмечены единичные личинки хирономид, чья доля в биомассе незначительна. Ее в основном формировали также малые по численности моллюски рода *Pisidium*. В отдельные годы (2005, 2007, 2010) численность двукрылых, олигохет и моллюсков была значительно выше. Кроме того, качественно расширился состав бентоса за счет

СООТНОШЕНИЕ ГРУПП ДОННОЙ ФАУНЫ ОЗ. ЛАЧА ПО МАТЕРИАЛАМ МНОГОЛЕТНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ (2003–2015 ГОДЫ)

Группа гидробионтов	Численность		Биомасса	
	экз./м ²	%	мг/м ²	%
Nematoda	430	11,9	25,4	0,2
Oligochaeta	635	17,5	1661,0	15,7
Hirudinea	30	0,8	182,3	1,7
Acary	111	3,1	48,8	0,5
Ostracoda	233	6,5	6,4	0,1
Phyllopora	9	0,2	32,9	0,3
Isopoda	9	0,2	8,5	0,1
Bivalvia	422	11,7	665,7	6,3
Gastropoda	130	3,6	2965,9	28,0
Ephemeroptera	139	3,8	27,6	0,3
Coleoptera	9	0,2	6,4	0,1
Heteroptera	17	0,5	1,1	0,01
Trichoptera	139	3,8	106,0	1,0
Diptera	17	0,5	372,1	3,5
Chironomidae	1282	35,4	4452,0	42,0
Heleidae	9	0,2	6,4	0,1
<i>Итого</i>	3620	100	10 568,2	100

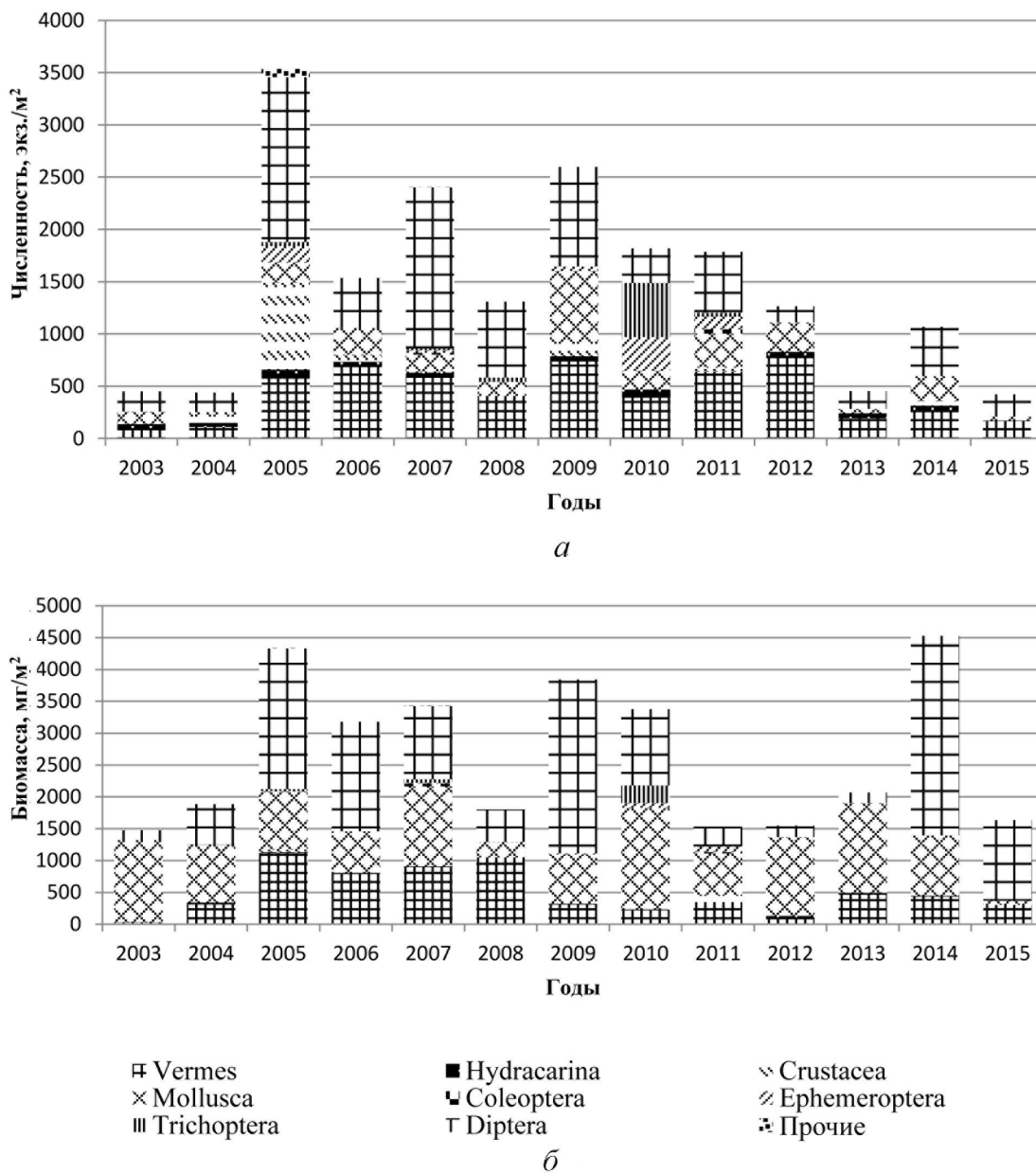


Рис. 4. Динамика количественных показателей основных групп бентоса оз. Лача в 2003–2015 годах: а – численность; б – биомасса

представителей ручейников, поденок, водных клещей и жуков, а также придонных планктонных рачков. Однако биомасса донной фауны формируется главным образом за счет дву-

створчатых моллюсков и личинок хирономид. С 2005 года отмечен рост численности олигохет, которая была стабильно высокой вплоть до 2012 года. Малоцетинковые черви также в этот

период формировали значительные биомассы. Но позднее их количественные показатели снизились. Колебания численности донной фауны, по всей видимости, связаны с гидрологическими условиями конкретных лет. В целом по рыбохозяйственной классификации [16, с. 212; 17, с. 85] оз. Лача можно отнести к водоемам средней кормности для рыб-бентофагов.

Заключение. Донная фауна оз. Лача включает представителей 163 таксонов донных и фитофильных беспозвоночных, объединенных в 16 систематических групп зообентоса, обычных для северо-западной зоны и широко распространенных в северной части Палеарктики. Единично отмечены пресноводные губки – Porifera и кишечнополостные – Coelenterata (по 1 виду). Большим количеством видов характеризовались кольчатые черви – Annelida (24 вида) и моллюски – Mollusca (43 вида). Более половины всех обнаруженных видов (94) относились к типу членистоногих – Arthropoda. Выявлено, что среди них как по численности, так и по биомассе доминируют водные личинки хирономид. Кроме того, высокую численность

имеют олигохеты, нематоды и двустворчатые моллюски. Значительную роль в формировании биомассы играют брюхоногие моллюски и олигохеты.

Распределение зообентоса по акватории озера характеризуется почти одинаковым (как по численности, так и по биомассе) соотношением представителей доминантной группы – водных личинок хирономид. В начале XXI века численность бентоса формировалась за счет малочисленных двукрылых, олигохет и двустворчатых моллюсков, в последующие годы был отмечен рост численности олигохет. В целом по озеру среднесезонные показатели развития донной фауны составляют: по численности – 3 620 экз./ м², по биомассе – 10,6 г/ м². По рыбохозяйственной классификации оз. Лача может быть отнесено к водоемам средней кормности для рыб-бентофагов.

Приведенные сведения могут быть использованы при разработке путей рационального промыслового использования внутренних водоемов Северного рыбохозяйственного бассейна.

Список литературы

1. Перова С.Н., Щербина Г.Х. Макрозообентос Рыбинского и Горьковского водохранилищ – как кормовая база рыб-бентофагов // Трофические связи в водных сообществах и экосистемах: материалы Междунар. конф. 28–31 октября 2003 г. Борок, 2003. С. 99–100.
2. Баканов А.И. Использование характеристик разнообразия зообентоса для мониторинга состояния пресноводных экосистем // Мониторинг биоразнообразия. М., 1997. С. 278–282.
3. Лепнева С.Г. Фауна СССР. Ручейники. Т. 2, вып. 1. М.; Л., 1964. 562 с. (Новая серия, № 88).
4. Мартынов А.В. Ручейники (Trichoptera Annulipalpia). Ч. 1. Л., 1934. 343 с. (Определители по фауне СССР, издаваемые Зоологическим институтом Академии наук СССР, № 13).
5. Черновский А.А. Определитель личинок комаров семейства Tendipedidae. М.; Л., 1949. 187 с. (Определители по фауне СССР, издаваемые Зоологическим институтом Академии наук СССР, № 31).
6. Панкратова В.Я. Личинки и куколки комаров подсемейства Orthoclaadiinae фауны СССР (Diptera, Chironomidae=Tendipedidae). Л., 1970. 343 с. (Определители по фауне СССР, издаваемые Зоологическим институтом АН СССР, № 102).
7. Усова З.В. Фауна мошек Карелии и Мурманской области (Diptera, Simuliidae). М.; Л., 1961. 287 с.
8. Определитель пресноводных беспозвоночных Европейской части СССР. Л., 1977. 510 с.
9. Тренина Г.В. Характеристика бентософауны оз. Лача // V сессия Ученого совета по проблеме «Теоретические основы рационального использования, воспроизводства и повышения рыбных и нерыбных ресурсов Белого моря и внутренних водоемов Карелии»: тез. докл. Петрозаводск, 1965. С. 84–86.

10. Тренина Г.В. Бентос озера Лача (по материалам 1965 г.) // VII сессия Ученого совета по проблеме «Биологические ресурсы Белого моря и внутренних водоемов Карелии»: тез. докл. Петрозаводск, 1968. С. 72–73.
11. Новосельцев Г.Е. Донная фауна оз. Лача // Конференция молодых биологов Карелии: тез. докл. Петрозаводск, 1968. С. 5–6.
12. Новосельцев Г.Е. Донная фауна оз. Лача. Бентос больших озер Архангельской области (Лача, Лекшмозеро и Кенозерская группа) // Биологические исследования на внутренних водоемах Прибалтики: тр. XV науч. конф. по изучению внутр. водоемов Прибалтики. Минск, 1973. С. 82–84.
13. Новосельцев Г.Е. Макрозообентос озер западной части Архангельской области и использование его рыбами: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Л., 1974. 20 с.
14. Слепухина Т.Д., Фадеева Г.В. Зообентос и фитофильная фауна озер Воже и Лача // Гидробиология озер Воже и Лача (в связи с прогнозом качества вод, перебрасываемых на юг). Л., 1978. С. 131–178.
15. Фадеева Г.В. Зообентос крупных озер Европейского Севера и его использование рыбами: на примере оз. Лача: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Л., 1981. 21 с.
16. Пидгайко М.Л., Александров Б.М., Иоффе Ц.И., Максимова Л.П., Петров В.В., Саватеева Е.Б., Салазкин А.А. Краткая биолого-продукционная характеристика водоемов Северо-Запада СССР // Изв. ГосНИОРХ. 1968. Т. 67. С. 205–225.
17. Новосельцев Г.Е. Продукция зообентоса трех крупных озер западной части Архангельской области // IX сессия Ученого совета по проблеме «Биологические ресурсы Белого моря и внутренних водоемов Европейского Севера»: тез. докл. Петрозаводск, 1974. С. 84–86.

References

1. Perova S.N., Shcherbina G.Kh. Makrozoobentos Rybinskogo i Gor'kovskogo vodokhranilishch – kak kormovaya baza ryb-bentofagov [Macrozoobenthos of the Rybinsk and Gorky Reservoirs as a Fodder Base for Bottom-Feeding Fish]. *Troficheskie svyazi v vodnykh soobshchestvakh i ekosistemakh: materialy Mezhdunar. konf. 28–31 oktyabrya 2003 g.* [Food Chains in Aquatic Communities and Ecosystems: Proc. Intern. Conf. October 28–31, 2003]. Borok, 2003, pp. 99–100. (In Russ.)
2. Bakanov A.I. Ispol'zovanie kharakteristik raznoobraziya zoobentosa dlya monitoringa sostoyaniya presnovodnykh ekosistem [Use of Characteristics of Zoobenthos Diversity for Monitoring the State of Freshwater Ecosystems]. *Monitoring bioraznoobraziya* [Biodiversity Monitoring]. Moscow, Nauka Publ., 1997, pp. 278–282. (In Russ.)
3. Lepneva S.G. *Fauna SSSR. Rucheyniki. Lichinki i kukolki Podotryada Kol'chatoshchupikovykh (Annulipalpia)* [Fauna of the USSR. Caddis Flies. Larvae and Pupae of Annulipalpia]. Moscow; Leningrad, Nauka Publ., 1964, vol. 2, iss. 1. 562 p. (In Russ.)
4. Martynov A.V. Rucheyniki (Trichoptera Annulipalpia). Ch. 1 [Caddis Flies (Trichoptera Annulipalpia). Part 1]. *Opredeliteli po faune SSSR, izdavaemye Zoologicheskim institutom Akademii nauk SSSR, № 13* [Identification Guide of the USSR Fauna Published by the Zoological Institute of the USSR Academy of Sciences, No. 13]. Leningrad, 1934. 343 p. (In Russ.)
5. Chernovskiy A.A. Opredelitel' lichinok komarov semeystva Tendipedidae [The Determinant of Wigglers of the Family Tendipedidae]. *Opredeliteli po faune SSSR, izdavaemye Zoologicheskim institutom Akademii nauk SSSR, № 31* [Identification Guide of the USSR Fauna Published by the Zoological Institute of the USSR Academy of Sciences, No. 31]. Moscow; Leningrad, 1949. 187 p. (In Russ.)
6. Pankratova V.Ya. Lichinki i kukolki komarov podsemeystva Orthoclaadiinae fauny SSSR (Diptera, Chironomidae=Tendipedidae) [Larvae and Wigglers of the Subfamily Orthoclaadiinae of the USSR Fauna (Diptera, Chironomidae=Tendipedidae)]. *Opredeliteli po faune SSSR, izdavaemye Zoologicheskim institutom Akademii nauk SSSR, № 102* [Identification Guide of the USSR Fauna Published by the Zoological Institute of the USSR Academy of Sciences, No. 102]. Leningrad, 1970. 343 p. (In Russ.)
7. Usova Z.V. *Fauna moshek Karelii i Murmanskoy oblasti (Diptera, Simuliidae)* [Fauna of Blackflies of Karelia and Murmansk Region (Diptera, Simuliidae)]. Moscow; Leningrad, USSR Academy of Sciences Publ., 1961. 287 p. (In Russ.)
8. Kutikova L.A., Starobogatov Ya.I., eds. *Opredelitel' presnovodnykh bespozvonochnykh Evropeyskoy chasti SSSR (plankton i bentos)* [Identification Guide of Freshwater Invertebrates of the European Part of the USSR (Plankton and Benthos)]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1977. 510 p. (In Russ.)

9. Trenina G.V. Kharakteristika bentosofauny oz. Lacha [Characteristics of the Benthos Fauna of the Lacha Lake]. *V sessiya Uchenogo soveta po probleme «Teoreticheskie osnovy ratsional'nogo ispol'zovaniya, vosproizvodstva i povysheniya rybnykh i nerybnykh resursov Belogo morya i vnutrennikh vodoemov Karelii»: tez. dokl.* [Proc. 5th Sess. Academic Council on the Problem "Theoretical Basis of Rational Use, Reproduction and Enhancement of Fish and Non-Fish Resources of the White Sea and Inland Reservoirs of Karelia"]. Petrozavodsk, 1965, pp. 84–86. (In Russ.)
10. Trenina G.V. Bentos ozera Lacha (po materialam 1965 g.) [Benthos of the Lacha Lake (Based on Data of 1965)]. *VII sessiya Uchenogo soveta po probleme «Biologicheskie resursy Belogo morya i vnutrennikh vodoemov Karelii»: tez. dokl.* [Proc. 7th Sess. Academic Council on the Problem "Biological Resources of the White Sea and Inland Water Bodies of Karelia"]. Petrozavodsk, 1968, pp. 72–73. (In Russ.)
11. Novosel'tsev G.E. Donnaya fauna oz. Lacha [Benthic Fauna of the Lacha Lake]. *Konferentsiya molodykh biologov Karelii: tez. dokl.* [Proc. Conf. Young Biologists of Karelia]. Petrozavodsk, 1968, pp. 5–6. (In Russ.)
12. Novosel'tsev G.E. Donnaya fauna oz. Lacha. Bentos bol'shikh ozer Arkhangel'skoy oblasti (Lacha, Lekshmozero i Kenozerskaya gruppa) [Benthic Fauna of the Lacha Lake. Bentos of the Large Lakes of the Arkhangelsk Region (Lacha, Lekshmozero and the Kenozersk Group)]. *Biologicheskoe issledovaniya na vnutrennikh vodoemakh Pribaltiki: tr. XV nauch. konf. po izucheniyu vnutr. vodoemov Pribaltiki* [Biological Research of Inland Waters of the Baltic States: Proc. 15th Sci. Conf. Study Inland Waters of the Baltic States]. Minsk, 1973, pp. 82–84. (In Russ.)
13. Novosel'tsev G.E. *Makrozoobentos ozer zapadnoy chasti Arkhangel'skoy oblasti i ispol'zovanie ego rybami: avtoref. dis. ... kand. biol. nauk* [Macrozoobenthos of Lakes in the Western Part of the Arkhangelsk Region and Its Use by Fishes: Cand. Biol. Sci. Diss. Abs.]. Leningrad, 1974. 20 p.
14. Slepukhina T.D., Fadeeva G.V. Zoobentos i fitofil'naya fauna ozer Vozhe i Lacha [Zoobenthos and Phytophilic Fauna of the Vozhe and Lacha Lakes]. *Gidrobiologiya ozer Vozhe i Lacha (v svyazi s prognozom kachestva vod, perebrasyvaemykh na yug)* [Hydrobiology of the Vozhe and Lacha Lakes (in Connection with the Forecast of Waters Quality Thrown to the South)]. Leningrad, Nauka Publ., 1978, pp. 131–178. (In Russ.)
15. Fadeeva G.V. *Zoobentos krupnykh ozer Evropeyskogo Severa i ego ispol'zovanie rybami: na primere oz. Lacha: avtoref. dis. ... kand. biol. nauk* [Zoobenthos of Large Lakes of the European North and Its Use by Fish: the Case of the Lacha Lake: Cand. Biol. Sci. Diss. Abs.]. Leningrad, 1981. 21 p.
16. Pidgayko M.L., Aleksandrov B.M., Ioffe Ts.I., Maksimova L.P., Petrov V.V., Savateeva E.B., Salazkin A.A. *Kratkaya biologo-produktsionnaya kharakteristika vodoemov Severo-Zapada SSSR* [Brief Biologo-Production Characteristics of the North-West Reservoirs of the USSR]. *Izvestiya Gosudarstvennogo nauchno-issledovatel'skogo instituta ozernogo i rechnogo rybnogo khozyaystva*, 1968, vol. 67, pp. 205–225.
17. Novosel'tsev G.E. *Produktsiya zoobentosa trekh krupnykh ozer zapadnoy chasti Arkhangel'skoy oblasti* [Products of Zoobenthos of Three Large Lakes in the Western Part of the Arkhangelsk Region]. *IX sessiya Uchenogo soveta po probleme «Biologicheskie resursy Belogo morya i vnutrennikh vodoemov Evropeyskogo Severa»: tez. dokl.* [Proc. 9th Sess. Academic Council on the Problem "Biological Resources of the White Sea and Inland Water Bodies of the European North"]. Petrozavodsk, 1974, pp. 84–86. (In Russ.)

DOI: 10.17238/issn2541-8416.2017.17.3.233

*Aleksandr P. Novoselov**, *Igor' I. Studenov**, *Aleksey K. Koz'min**,
*Gennadiy A. Dvoryankin**, *Aleksandr G. Zavisha**, *Marina A. Studenova**, *Aleksandr L. Levitskiy**

*Northern branch of the Knipovich Polar Research Institute of Marine Fisheries and Oceanography
(Arkhangelsk, Russian Federation)

SPECIES DIVERSITY AND DYNAMICS OF THE FISH FODDER BASE INDICATORS OF THE LACHA LAKE. Part 2. Zoobenthos

The Lacha Lake – the largest lake in the Arkhangelsk region is subject to successional changes in abiotic and biotic components of the aquatic ecosystem. The article presents the characteristics of the lake forage base. The paper demonstrates a rich species diversity (163 species, 16 systematic groups) of benthic invertebrates common to the northwestern zone and widespread in the Palaeartic northern

part; their taxonomic status is also determined. Freshwater sponges of Porifera and Coelenterata coelenterata (1 species) are isolated. Annelid worms (24 species) and Mollusca mollusks (43 species) are characterized by a large number of species. More than half of all found species (94) belong to the Arthropoda type. Both in abundance and biomass, the water larvae of chironomids dominate. Oligochaetes, nematodes and bivalves are highly abundant. Gastropods and oligochaetes play a significant role in the formation of biomass. The distribution of zoobenthos along the lake's water area is characterized by an almost identical (both in abundance and in terms of biomass) ratio of the representatives of the dominant group – the aquatic larvae of chironomids. At the beginning of the 21st century, the benthos population was formed due to the small number of dipterans, oligochaetes and bivalves; in the following years, the number of oligochaetes increased. The lake's average long-term indicators of benthos fauna development are the abundance – 3,620 specimen/m² and biomass – 10.6 g/m². According to the fishery classification, the Lacha Lake can be attributed to the reservoirs of medium food capacity for bottom-feeding fishes. The information can be used in the methods development of rational commercial use of inland waters in the Northern Fishery Basin.

Keywords: *benthos community of the Lacha Lake, species diversity of zoobenthos, abundance of zoobenthos, zoobenthos biomass, spatial distribution of zoobenthos, trophic status of the Lacha Lake.*

Поступила 06.02.2017
Received on February 06, 2017

Corresponding author: Aleksandr Novoselov, *address:* ul. Uritskogo, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; *e-mail:* novoselov@pinro.ru

For citation: Novoselov A.P., Studenov I.I., Koz'min A.K., Dvoryankin G.A., Zavisha A.G., Studenova M.A., Levitskiy A.L. Species Diversity and Dynamics of the Fish Fodder Base Indicators of the Lacha Lake. Part 2. Zoobenthos. *Arctic Environmental Research*, 2017, vol. 17, no. 3, pp. 233–244. DOI: 10.17238/issn2541-8416.2017.17.3.233

**ИЗМЕНЧИВОСТЬ МИКРОКЛИМАТА В ЛЕСНЫХ НАСАЖДЕНИЯХ
СОЛОВЕЦКОГО АРХИПЕЛАГА**

*А.Н. Соболев**, *П.А. Феклистов***

*Соловецкий музей-заповедник
(Архангельская область, Приморский район, пос. Соловецкий)

**Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова
(г. Архангельск)

В сосновом и еловом насаждениях Соловецкого архипелага измерены значения освещенности и температуры поверхности растений. Оценено различие этих показателей на нескольких ярусах (на высоте 1,3 м, в травяно-кустарничковом и мохово-лишайниковом ярусах) в количественном отношении (в абсолютных и относительных величинах, вычислена изменчивость). Измерения проводили по мере удаления от ствола деревьев в северном и южном направлениях. Отмечены более высокая изменчивость освещенности в ельнике, ее наиболее равномерное распределение по вертикали на уровне травяно-кустарничкового яруса и максимальная изменчивость на уровне мохово-лишайникового яруса. Выявлено, что важную роль в терморегуляции на нижних ярусах в ельнике играет древесный ярус, а в сосняке – мохово-лишайниковый ярус. Для еловых насаждений характерно незначительное уменьшение температуры от полога кроны к «окну» и в травяно-кустарничковом, и в мохово-лишайниковом ярусе. В сосняке в мохово-лишайниковом ярусе наблюдается рост температур как по отношению к травяно-кустарничковому ярусу, так и от полога к «окну». Анализ изменчивости скорости ветра выполняли в криволесье из березы извилистой с примесью других пород. Эти лесные насаждения формируются при интенсивном ветровом воздействии, доминируют вдоль морского побережья и играют важную защитную роль. Измерения проводили на разном расстоянии от берега моря – до 100 м от опушки леса. Выяснено, что скорость ветра на этом расстоянии уменьшалась более чем в 3 раза – в среднем от 1,72 до 0,48 м/с, а амплитуда – в 2–7 раз.

Ключевые слова: *леса Соловецкого архипелага, травяно-кустарничковый ярус, мохово-лишайниковый ярус, микроклимат лесных насаждений, освещенность, температура поверхности растений, скорость ветра на побережье.*

Контактное лицо: Феклистов Павел Александрович, *адрес:* 163002, г. Архангельск, наб. Северной Двины, д. 17; *e-mail:* feclistov@narfu.ru

Для цитирования: Соболев А.Н., Феклистов П.А. Изменчивость микроклимата в лесных насаждениях Соловецкого архипелага // Arctic Environmental Research. 2017. Т. 17, № 3. С. 245–254. DOI: 10.17238/issn2541-8416.2017.17.3.245

Арктический регион представлен протяженной береговой линией и многочисленными островами, в его пределах находится северная граница леса. Лесные насаждения Арктики играют важную защитную роль, преобразуя негативное климатическое, погодное воздействия и формируя более благоприятный микроклимат.

Цель нашей работы – оценить изменчивость микроклимата в прибрежных и островных лесных насаждениях Арктики, их защитную функцию. Исследование проводили в островных фитоценозах, отличающихся характером роста и развития [1], что определяет его научную новизну. Соловецкие острова являются объектом Всемирного наследия ЮНЕСКО, леса отнесены к защитным, имеющим научное или историческое значение, что придает высокую значимость исследованию.

В настоящее время существует ряд работ, посвященных исследованию лесных насаждений Соловецкого архипелага, изучению микроклиматических условий и влияния климата на лесные сообщества [2–8]. В то же время, при определенной изученности природы Соловецких островов, многие важные вопросы по исследованию лесных насаждений: влияние на них различных факторов (климатических, геофизических и космических) и их изменчивость внутри растительных сообществ в зависимости от состава и структуры – остались малоизученными или только обозначенными.

Материалы и методы. В основу исследований положен метод временных пробных площадей, которые закладывали в соответствии с общепринятыми методиками и рекомендациями [9–10] с учетом требований ГОСТ 16128–70¹ и ОСТ 56-69–83².

Работу проводили в 2015–2016 годах на трех пробных площадях: квартал 153, выделы 13, 18, 24 (по данным лесоустройства 2003 года).

Освещенность и температуру исследовали в сосновом (7СЗЕ+Б, Ос, диаметр 17,2 см, высота 10,9 м, полнота 0,51, возраст – 92 года, бонитет – Va, запас 68 м³) и еловом (7Е2Б1Ос, диаметр 19,7 см, высота 12,9 м, полнота 0,49, возраст – 80 лет, бонитет – V, запас 83 м³) насаждениях (составляют более 3/4 лесов архипелага) черничного типа леса (62,1 % лесной территории). Изменение ветра изучали в фитоценозе березы извилистой (6Бср1Ив1Ос2Е+Р, диаметр 12,0 см, высота 8,0 м, полнота 0,70, возраст – 80 лет, бонитет – Va, запас 60 м³), формирующей защитный пояс вдоль побережья островов.

Освещенность и температуру поверхности в пределах лесных насаждений измеряли в северном и южном направлении от стволов деревьев главной породы (было отобрано по 28 деревьев пропорционально ступеням толщины). Замеры выполняли через каждый метр от ствола дерева до конца кроны и в «окне» (открытом пространстве между деревьями), в 3–7-кратной повторности на уровне груди (1,3 м)³, в травяно-кустарничковом и мохово-лишайниковом ярусах при помощи люксметра «ТКА-Люкс» (г. Санкт-Петербург) с точностью до 0,01 кЛк и дистанционного измерителя температуры (пирометра) «Testo 830-T4» (Германия) с точностью до 0,1 °С. Измерения проводили в ясную, облачную и пасмурную погоду (в ясную погоду – реже из-за неравномерности распределения освещенности в пределах лесных сообществ) в течение 15 дней. Всего было сделано около 9 тыс. замеров.

Анализ изменения скорости ветра проводили на 17 непроवेशенных ходовых линиях, проложенных перпендикулярно побережью. Измерения выполняли по мере удаления от берега моря: на границе суши и моря (открытое пространство); на опушке леса; на 10, 30, 50 и 100 м от опушки в глубь леса. Скорость ветра измеряли при помощи термоанемометра LV-110 («КИМО», Франция) с точностью до 0,01 м/с на

¹ГОСТ 16128–70. Площади пробные лесоустроительные. Методы закладки. М., 1971. 23 с.

²ОСТ 56-69–83. Площади пробные лесоустроительные. Метод закладки. Введ. 1984–01–01. М., 1984. 60 с.

³Измерение температуры поверхности на высоте 1,3 м проводилось только для стволов деревьев с южной и северной стороны.

высоте 2 м в неоднократной (до 40–60 раз) повторности в каждой точке. Всего было сделано почти 4 тыс. замеров.

Все математико-статистические расчеты выполняли на основе общепринятых методов и рекомендаций [11]. Обработку материала проводили с использованием пакета программ «Microsoft Office» и программы «Statistica 10».

Результаты и обсуждение

Освещенность. Анализ полученных данных выявил, что освещенность в сосняке колебалась: на открытом пространстве – от 11,35 до 92,95 кЛк (в среднем 28,93 кЛк), внутри сообщества – от 0,25 до 53,22 кЛк (в среднем 6,69 кЛк, что составило 23,1 % от значения на открытой местности). В ельнике она изменялась: на открытом пространстве – от 4,81 до 64,64 кЛк (в среднем 21,54 кЛк), внутри сообщества – от 0,04 до 65,64 кЛк (в среднем 3,30 кЛк, или 15,3 % от значения на открытой местности). Таким образом, освещенность под пологом елового леса сокращалась в большей степени, чем в сосновом сообществе. Это связано с особенностями темнохвойных еловых насаждений, которые создают большее затенение внутри сообщества.

Изменение освещенности в отношении горизонтальной проекции кроны деревьев (под пологом кроны, в т. ч. около ствола, на краю кроны, и в «окнах» древостоя) имело следующий характер (табл. 1, см. с. 248). Минимальные средние значения освещенности наблюдались под пологом кроны: в сосняке они составляли от 3,70 до 6,07 кЛк (на северной стороне от стволов они были незначительно больше или сопоставимы по отношению к южной), в ельнике – от 1,06 до 2,97 кЛк (здесь они были выше на южной стороне или сопоставимы по отношению к северной). В пределах кроны наименьшие значения были зафиксированы около стволов деревьев (3,51–5,54 кЛк в сосняке и 0,97–2,51 кЛк в ельнике). От ствола дерева к концу кроны происходило увеличение освещенности: в сосняке – на 34,5–61,0 % в южном направлении от ствола и на 20,9–39,3 % в северном направлении; в ельнике – на 16,0–

92,2 % в южном направлении и на 81,6–112,2 % в северном. В «окне» древесного полога отмечен еще более значительный рост освещенности по отношению к кроне деревьев: в сосняке – на 82,1–118,9 % в южном направлении и на 36,7–50,1 % в северном направлении; в ельнике – на 31,1–217,7 % в южном направлении и на 142,8–264,2 % в северном направлении. В сосняке освещенность изменялась в большей степени в южном направлении (как по ярусам, так и в целом), в ельнике – в северном. В результате в сосняке освещенность на границе кроны и в «окне» была значимо выше на юге, чем на севере; в ельнике – наоборот. В целом освещенность была выше в сосняке.

В сосновом насаждении под пологом кроны (в т. ч. около ствола) освещенность в травяно-кустарничковом ярусе была незначительно выше, чем на высоте 1,3 м (на 2,3–3,5 %). В конце кроны и в «окне», наоборот, она была выше на высоте 1,3 м на 3,7–14,5 % по отношению к травяно-кустарничковому ярусу. В ельнике под пологом кроны (в т. ч. около ствола) освещенность была также больше в травяно-кустарничковом ярусе (превышение здесь достигало уже 10,9–49,0 %). В конце кроны и в «окне», как и в сосняке, освещенность была выше на высоте 1,3 м (на 5,2–16,8 %). Причина подобного распределения освещенности – расположение ярусов по отношению к кронам деревьев (около ствола и под кроной большее затенение создается на уровне 1,3 м, в «окне» – наоборот). Более высокая разница в освещенности между травяно-кустарничковым ярусом и высотой 1,3 м в ельнике обусловлена большим затенением крон ели. По средним значениям освещенность незначительно выше на высоте 1,3 м, чем в травяно-кустарничковом ярусе. Изменчивость освещенности в травяно-кустарничковом ярусе (в среднем 68,6 % для сосняка и 86,4 % для ельника) ниже, чем на высоте 1,3 м (в среднем 72,3 % для сосняка и 110,2 % для ельника); здесь она достигает минимума по отношению к другим ярусам, из чего следует, что освещенность в этом ярусе наиболее равномерна.

Таблица 1

**ИЗМЕНЧИВОСТЬ ОСВЕЩЕННОСТИ В СОСНОВО-ЕЛОВЫХ НАСАЖДЕНИЯХ
СОЛОВЕЦКОГО АРХИПЕЛАГА**

Расположение точки измерения по отношению к стволу и кроне дерева	На высоте 1,3 м		Травяно-кустарничковый ярус		Мохово-лишайниковый ярус	
	М, кЛк	С, %	М, кЛк	С, %	М, кЛк	С, %
<i>Сосняк черничного типа</i>						
В южном направлении от ствола: под пологом кроны, в т. ч.:						
около ствола	5,90	61,5	6,07	60,1	3,70	79,1
в конце кроны	5,36	72,0	5,54	72,1	3,51	93,3
в «окне»	9,50	87,8	8,16	64,0	5,39	90,1
<i>Среднее на юг</i>	12,92	88,8	11,05	91,0	7,04	116,0
<i>Среднее на юг</i>	9,44	79,4	8,43	71,7	5,38	95,0
В северном направлении от ствола: под пологом кроны, в т. ч.:						
около ствола	5,92	82,9	6,06	79,5	3,86	81,1
в конце кроны	5,35	91,2	5,53	87,0	3,79	80,0
в «окне»	8,25	56,1	7,57	61,8	4,67	81,7
<i>Среднее на север</i>	8,89	56,6	8,56	55,1	5,28	74,2
<i>Среднее на север</i>	7,69	65,2	7,40	65,5	4,61	79,0
<i>Ельник черничного типа</i>						
В южном направлении от ствола: под пологом кроны, в т. ч.:						
около ствола	2,11	107,5	2,97	125,9	1,28	82,2
в конце кроны	1,69	86,3	2,51	57,4	1,19	89,0
в «окне»	4,06	69,7	3,85	62,8	1,48	60,1
<i>Среднее на юг</i>	6,72	83,0	5,74	44,3	1,68	57,9
<i>Среднее на юг</i>	4,30	86,7	4,19	77,7	1,48	66,7
В северном направлении от ствола: под пологом кроны, в т. ч.:						
около ствола	2,20	130,3	2,16	57,4	1,06	55,0
в конце кроны	1,79	154,5	1,98	67,7	0,97	63,6
в «окне»	4,00	116,0	4,58	120,8	2,18	153,1
<i>Среднее на север</i>	8,02	154,8	6,67	107,0	2,58	94,9
<i>Среднее на север</i>	4,74	133,7	4,47	95,1	1,94	101,0

Примечание: М – среднее значение освещенности; С – изменчивость.

В мохово-лишайниковом ярусе освещенность существенно понижалась по отношению к травяно-кустарничковому ярусу: в сосняке она была ниже на 31,5–39,0 %, в ельнике – на 50,8–70,8 %. В среднем она уменьшилась с 7,91

до 4,99 кЛк в сосняке и с 4,33 до 1,71 кЛк в ельнике. По направлению от ствола к «окну» освещенность понижалась более значительно: в сосняке она уменьшилась около ствола на 1,74–2,03 кЛк, а в «окне» – на 3,28–4,01 кЛк;

в ельнике – на 1,01–1,32 кЛк и 4,06–4,09 кЛк соответственно. Более значительное понижение освещенности от ствола к «окну» в мохово-лишайниковом ярусе связано с более активным развитием травяно-кустарничкового яруса (за счет увеличения его освещенности). Изменчивость освещенности на уровне мохово-лишайникового яруса больше (в среднем 87,0 % в сосняке и 83,9 % в ельнике), чем на вышележащих ярусах; здесь она достигает максимальных значений, что связано со сложной структурой напочвенного покрова, высоким разнообразием его проективного покрытия.

В сосновом насаждении изменчивость освещенности под пологом кроны была ниже в южном направлении (60,1–79,1 % при среднем 66,9 %), чем в северном (79,5–82,9 % при среднем 81,2 %). В ельнике, наоборот, в южном направлении (82,2–125,9 % при среднем 105,2 %) она в большинстве случаев была больше, чем в северном (55,0–130,3 % при среднем 80,9 %). Далее, к концу кроны и «окну» в сосняке в южном направлении изменчивость росла (до 88,8–116,0 % в «окне» при среднем 98,6 %), а в северном – снижалась (до 55,1–74,2 % в «окне» при среднем 62,0 %). В ельнике наблюдалось обратное явление: в южном направлении изменчивость уменьшалась (до 44,3–83,0 % в «окне» при среднем 61,7 %), а в северном – увеличивалась (до 94,9–154,8 % в «окне» при среднем 118,9 %). В результате в сосновом насаждении на краю кроны и в «окне» изменчивость освещенности была значительно выше в южном направлении, чем в северном; в еловом насаждении – наоборот. Подобная динамика изменчивости, скорее всего, связана со структурой этих лесных насаждений. Конкретные причины еще предстоит выяснить. В целом изменчивость освещенности выше в ельнике, что обусловлено его более сложной структурой. Изменчивость освещенности, по А.В. Тюрину [12], во всех случаях большая.

Температура. Температура поверхности стволов деревьев на высоте 1,3 м как в сосновых, так и в еловых насаждениях была выше на южной стороне. В сосняках на южной сто-

роне она изменялась от 7,6 до 24,0 °С (в среднем 14,2 °С), на северной – в пределах 7,3–18,9 °С (в среднем 13,1 °С). В ельниках на южной стороне она изменялась от 13,1 до 19,6 °С (в среднем 16,6 °С), на северной – в пределах 11,6–18,4 °С (в среднем 16,0 °С). Более высокая изменчивость температур в сосняке и ельнике зарегистрирована также на южной стороне стволов (23,9 и 10,9 % соответственно); на северной стороне она была равна 20,3 и 9,8 % соответственно. Для ельника была характерна более высокая температура и более низкая изменчивость, чем в сосняке.

Температура поверхности в травяно-кустарничковом и мохово-лишайниковом ярусах в сосновом насаждении в среднем изменялась от 12,66 до 14,18 °С, в еловом насаждении – от 15,49 до 16,25 °С (табл. 2, см. с. 250). Изменчивость – средняя и составляет 22,1–27,8 % в сосняке и 10,2–13,7 % в ельнике, что свидетельствует об относительной стабильности температуры. Изменчивость была в 2 раза ниже в ельнике, что обусловлено его более сомкнутым пологом и более сложной структурой.

В сосняке под пологом кроны температура поверхности в южном направлении от ствола (13,20–13,93 °С) была выше, чем в северном (12,95–13,40 °С). В ельнике температуры под пологом крон имели сопоставимые значения в южном (15,83–16,03 °С) и северном (15,94–16,25 °С) направлениях. Для елового насаждения характерно незначительное уменьшение температуры от полога кроны к «окну» как в травяно-кустарничковом ярусе (на 1,0–2,9 % в южном направлении и на 0,4–1,6 % в северном), так и в мохово-лишайниковом (на 2,0–3,1 % в южном направлении и на 0,8–1,8 % в северном). Данное явление связано с защитной функцией кроны елей. В сосновом насаждении понижение температуры характерно только для травяно-кустарничкового яруса (на 0,6–1,7 % в южном направлении и на 0,8–2,2 % в северном); в мохово-лишайниковом ярусе, наоборот, наблюдался рост температур от полога к «окну» (на 0,3–1,8 % в южном направлении и на 1,4 % в северном). Подобные распределе-

Таблица 2

**ИЗМЕНЧИВОСТЬ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ДЕРЕВЬЕВ
В СОСНОВО-ЕЛОВЫХ НАСАЖДЕНИЯХ СОЛОВЕЦКОГО АРХИПЕЛАГА**

Расположение точки измерений по отношению к стволу и кроне дерева	Травяно-кустарничковый ярус		Мохово-лишайниковый ярус	
	<i>M</i> , °С	<i>C</i> , %	<i>M</i> , °С	<i>C</i> , %
<i>Сосняк черничного типа</i>				
В южном направлении от ствола: под пологом кроны, в т. ч.:				
около ствола	13,20	22,1	13,93	22,1
в конце кроны	13,24	22,3	13,95	23,0
в «окне»	12,98	23,8	13,97	22,5
<i>Среднее на юг</i>	13,11	24,7	14,18	23,3
<i>Среднее на юг</i>	13,10	23,5	14,02	22,6
В северном направлении от ствола: под пологом кроны, в т. ч.:				
около ствола	12,95	24,2	13,40	24,2
в конце кроны	12,99	24,0	13,41	24,8
в «окне»	12,66	25,5	13,58	24,3
<i>Среднее на север</i>	12,84	24,8	13,39	27,8
<i>Среднее на север</i>	12,82	24,8	13,46	25,4
<i>Ельник черничного типа</i>				
В южном направлении от ствола: под пологом кроны, в т. ч.:				
около ствола	15,95	12,1	16,03	12,4
в конце кроны	15,83	11,4	16,00	11,3
в «окне»	15,80	13,1	15,71	13,7
<i>Среднее на юг</i>	15,49	13,1	15,53	11,6
<i>Среднее на юг</i>	15,74	12,8	15,76	12,5
В северном направлении от ствола: под пологом кроны, в т. ч.:				
около ствола	15,98	10,2	15,94	10,6
в конце кроны	16,25	10,2	15,94	11,1
в «окне»	15,72	10,2	15,66	11,1
<i>Среднее на север</i>	15,92	11,2	15,81	10,6
<i>Среднее на север</i>	15,87	10,5	15,80	10,8

Примечание: *M* – среднее значение температуры; *C* – изменчивость.

ния температур связаны с активным развитием мохово-лишайникового яруса в условиях сухих светлых сосняков (в особенности на краю кроны и в «окне») и, соответственно, ростом защитных и регулирующих функций этого яруса (при снижении этих функций у сосново-древостоя в сообществе). В ельнике измене-

ние температур было более выражено в южном направлении, в итоге в «окне» на южной стороне температуры были ниже, чем на северной. В сосняке в южном направлении спад температур в травяно-кустарничковом ярусе был меньше, чем в северном, а рост температур в мохово-лишайниковом ярусе, наоборот, больше.

В результате сохранились более высокие температуры на южной стороне от ствола. В целом температуры были выше в ельнике.

В вертикальном направлении в сосновом насаждении происходил небольшой рост температуры в мохово-лишайниковом ярусе (12,7–13,2 °С, в среднем 13,0 °С) по отношению к травяно-кустарничковому (13,4–14,2 °С, в среднем 13,7 °С) на 0,4–1,1 °С. Подобное явление отмечалось в 81 % случаев в южном направлении (в 10 % наблюдалось обратное) и в 71 % случаев в северном (в 22 % – обратное); в остальных случаях разница не была выявлена. Это свидетельствует об активном развитии мохово-лишайникового яруса в сосняке и его важной роли в тепловом балансе сообщества (об этом уже упоминалось выше). В ельнике средняя разница температур между травяно-кустарничковым и мохово-лишайниковым ярусами незначительна (до 0,1–0,3 °С), что указывает на существенную роль древесного яруса в терморегуляции. В южном направлении в 45 % случаев температура была выше в травяно-кустарничковом ярусе, в 53 % – в мохово-лишайниковом. В северном направлении наблюдалось обратное явление: в 61 % случаев температура была выше в травяно-кустарничковом ярусе, в 36 % – в мохово-лишайниковом. В остальных случаях разница не была выявлена.

Согласно корреляционному анализу в сосновом насаждении температура поверхности имеет прямую связь с освещенностью: для мохово-лишайникового яруса она значительная (коэффициент корреляции составляет 0,55–0,57), для травяно-кустарничкового – умеренная (коэффициент корреляции равен 0,33–0,36). Коэффициент синхронности [13] достаточно высок: для мохово-лишайникового яруса достигает 75–79 %, для травяно-кустарничкового – 60–67 %. Характер связи с наибольшей величиной достоверности аппроксимации отображается полиномиальной кривой второй степени (квадратным уравнением), близкой к прямой линии.

В еловом насаждении коэффициент корреляции между освещенностью и температурой как в целом для сообщества, так и для отдельных ярусов был крайне низок (колебался 0,04 до 0,18). Взаимосвязь между этими показателями на нижних ярусах установить не удалось.

Скорость ветра. Анализ изменения скорости ветра по мере удаления от берега моря выявил несколько закономерностей (табл. 3). Скорость ветра на берегу моря в разные дни (средняя по ходам) колебалась от 0,57 до 4,50 м/с, среднее значение за все дни составило 1,72 м/с, максимальные порывы достигали 7,50 м/с. По мере удаления от моря, на опушке

Таблица 3

**ИЗМЕНЕНИЕ СКОРОСТИ ВЕТРА НА ТЕРРИТОРИИ ОСТРОВОВ
ПО МЕРЕ УДАЛЕНИЯ ОТ БЕРЕГА МОРЯ (Соловецкий архипелаг)**

Показатель	Берег моря	Опушка (0 м)	Расстояние от опушки (лес), м			
			10	30	50	100
Средняя скорость ветра (по ходовым линиям/за все дни), м/с	0,57–4,50/ 1,72	0,49–3,47/ 1,19	0,34–2,89/ 0,87	0,27–2,41/ 0,85	0,33–1,36/ 0,70	0,25–0,96/ 0,48
Относительная (к берегу моря) скорость ветра, %	100,0	69,3	50,5	49,5	40,9	28,2
Стандартное отклонение	1,22	1,07	0,83	0,67	0,39	0,18
Коэффициент изменчивости, %	71,0	89,9	95,6	79,1	55,8	36,6
Максимальная скорость ветра (порывы), м/с	7,50	6,20	4,10	3,40	3,80	2,68

лесного насаждения произошло первое значительное снижение скорости ветра – на 30,7 % по сравнению с берегом. На расстоянии 10 м от опушки в лесном сообществе было отмечено второе существенное снижение скорости ветра – уже на 49,5 % по отношению к берегу моря (разница с предыдущим случаем составила 18,8 %). На 30 м от опушки леса изменений скорости ветра практически не наблюдалось, разница с предыдущим случаем составила всего 1 %. На 50 м от опушки отмечено небольшое снижение скорости ветра – на 59,1 % по отношению к берегу моря (разница с предыдущим случаем 8,6 %). На 100 м произошло третье значительное сокращение скорости ветра – на 71,8 % по отношению к берегу моря (разница с предыдущим случаем 12,7 %).

Амплитуда колебания скорости ветра, выраженная через абсолютные показатели стандартного (квадратичного) отклонения, также непрерывно уменьшалась по направлению от берега моря (1,22 м/с) к опушке (1,07 м/с) и дальше в глубь леса (0,18 м/с на 100 м). При этом произошло почти семикратное снижение данной величины. В свою очередь, изменчивость силы ветра (относительный показатель амплитуды) сначала росла при переходе от берега моря к расстоянию 10 м от опушки (здесь она достигла максимального значения в 95,6 %), а затем уменьшалась (минимального значения в 36,6 % она достигла на 100 м от опушки, где произошло почти двукратное ее снижение по отношению к берегу моря).

Заключение. Освещенность сокращалась под пологом соснового насаждения более чем в 4 раза по сравнению с открытым местом, елового – в 6,5 раза. Значения освещенности увеличивались от ствола дерева к «окну» в сосняке на

37–118 % и на 31–264 % в ельнике в зависимости от стороны света и яруса. В целом освещенность была выше в сосняке, а ее изменчивость – в ельнике, что обусловлено более сложной структурой ельника. Освещенность на высоте травяно-кустарничкового яруса наиболее равномерна, изменчивость здесь достигает минимума по отношению к другим ярусам. Освещенность на уровне мохово-лишайникового яруса минимальна, а изменчивость из-за сложной структуры напочвенного покрова максимальна.

Температура поверхности стволов деревьев и ее изменчивость на высоте 1,3 м как в сосновом, так и в еловом насаждении была выше на южной стороне. Более низкая изменчивость температуры поверхности стволов была свойственна ельнику.

Для елового насаждения характерно незначительное уменьшение температуры поверхности по ярусам от полога кроны к «окну», что связано с защитной функцией кроны елей. В связи с активным развитием мохово-лишайникового яруса в светлохвойных сосняках (ростом его роли в регулировании температур) в пределах этого яруса происходит увеличение температуры поверхности от ствола к «окну» и по отношению к другим ярусам. В ельнике средняя разница температур поверхности между травяно-кустарничковым и мохово-лишайниковым ярусами незначительна (до 0,1–0,3 °С), а их изменчивость ниже в 2 раза, чем в сосняке. Это говорит о более значимой роли древесного яруса в терморегуляции в ельнике.

По мере удаления от берега моря происходило неравномерное снижение скорости ветра и ее амплитуды колебания: на расстоянии 100 м от берега скорость ветра уменьшилась более чем в 3 раза – от 1,72 до 0,48 м/с, а амплитуда – в 2–7 раз.

Список литературы

1. Феклистов П.А., Соболев А.Н. Лесные насаждения Соловецкого архипелага (структура, состояние, рост). Архангельск, 2010. 201 с.
2. Ловеллус Н.В., Соболев А.Н., Феклистов П.А. Черты единства в приросте сосны и ели на Соловецком архипелаге и факторы среды // Общество. Среда. Развитие. 2012. № 4. С. 262–267.

3. Ипатов Л.Ф., Косарев В.П., Проурзин Л.И., Торхов С.В. Леса Соловецкого архипелага. Архангельск, 2009. 244 с.
4. Природная среда Соловецкого архипелага в условиях меняющегося климата / под ред. Ю.Г. Шварцмана, И.Н. Болотова. Екатеринбург, 2007. 184 с.
5. Принцев А. Влияние ветра на Соловецкий лес // Соловецкие острова. 1926. № 1. С. 56–63.
6. Телицына Т.В. Климатические условия и лесная растительность Соловков // Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов: сб. науч. тр. Архангельск, 2002. Вып. 8. С. 161–167.
7. Феклистов П.А., Соболев А.Н. Световой режим в древостоях разного породного состава на Соловецких островах // Вестн. Сев. (Арктич.) федер. ун-та. Сер.: Естеств. науки. 2013. № 3. С. 93–100.
8. Шварцман Ю.Г., Болотов И.Н. Механизмы формирования экстразональных биоценозов Соловецкого архипелага // Экология. 2005. № 5. С. 344–352.
9. Программа и методика биогеоценологических исследований / под ред. В.Н. Сукачева, Н.В. Дылиса. М., 1966. 332 с.
10. Сукачев В.Н., Зонн С.В. Методические указания к изучению типов леса. М., 1961. 144 с.
11. Гусев И.И. Моделирование экосистем. Архангельск, 2002. 112 с.
12. Тюрин А.В. Основы вариационной статистики в применении к лесоводству. М.; Л., 1961. 103 с.
13. Феклистов П.А. Экологические закономерности роста северотаежных сосняков как теоретическая основа повышения их продуктивности и рационального использования: автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. Екатеринбург, 1997. 40 с.

References

1. Feklistov P.A., Sobolev A.N. *Lesnye nasazhdeniya Solovetskogo arhipelaga (struktura, sostoyanie, rost)* [Forest Plantations of the Solovetsky Archipelago (Structure, State, Growth)]. Arkhangelsk, NArFU Publ., 2010. 201 p. (In Russ.)
2. Lovelius N.V., Sobolev A.N., Feklistov P.A. Cherty edinstva v priroste sosny i eli na Solovetskom arhipelage i faktory sredy [Features Unity in the Growth of Pine and Spruce at Solovetsky Archipelago and the Environmental Factors]. *Obshchestvo. Sreda. Razvitie* [Society. Environment. Development], 2012, no. 4, pp. 262–267.
3. Ipatov L.F., Kosarev V.P., Prourzin L.I., Torkhov S.V. *Lesa Solovetskogo arhipelaga* [Forests of the Solovetsky Archipelago]. Arkhangelsk, SOLTI, 2009. 244 p. (In Russ.)
4. Shvartsman Yu.G., Bolotov I.N., eds. *Prirodnaya sreda Solovetskogo arhipelaga v usloviyakh menyayushchegosya klimata* [The Natural Environment of the Solovetsky Archipelago under the Conditions of a Changing Climate]. Yekaterinburg, Ural Branch RAN Publ., 2007. 184 p. (In Russ.)
5. Printsev A. Vliyanie vetra na Solovetskiy les [The Influence of Wind on the Solovetsky Forest]. *Solovetskie ostrova*, 1926, no. 1, pp. 56–63.
6. Telitsyna T.V. Klimaticheskie usloviya i lesnaya rastitel'nost' Solovkov [Climatic Conditions and Forest Vegetation of Solovki]. *Okhrana okruzhayushchey sredy i ratsional'noe ispol'zovanie prirodnnykh resursov: sb. nauch. tr.* [Protection of Environment and Rational Use of Natural Resources]. Arkhangelsk, ASTU Publ., 2002, iss. 8, pp. 161–167. (In Russ.)
7. Feklistov P.A., Sobolev A.N. Svetovoy rezhim v drevostoyakh raznogo porodnogo sostava na Solovetskiykh ostrovakh [Light Conditions in Stands of Different Species Composition on the Solovetsky Islands]. *Vestnik Severnogo (Arkticheskogo) federal'nogo universiteta. Ser.: Estestvennyye nauki*, 2013, no. 3, pp. 93–100.
8. Shvartsman Yu.G., Bolotov I.N. Mekhanizmy formirovaniya ekstrazonal'nykh biotsenozov Solovetskogo arhipelaga [Mechanisms of the Formation of Extrazonal Biocenoses on the Solovetskiye Islands]. *Ekologiya* [Russian Journal of Ecology], 2005, no. 5, pp. 344–352.
9. Sukachev V.N., Dylis N.V., eds. *Programma i metodika biogeotsenologicheskikh issledovaniy* [Program and Methodology of Biogeocenological Research]. Moscow, Nauka Publ., 1966. 332 p. (In Russ.)
10. Sukachev V.N., Zonn S.V. *Metodicheskie ukazaniya k izucheniyu tipov lesa* [Recommended Practices for the Forest Types Study]. Moscow, USSR Academy of Sciences Publ., 1961. 144 p. (In Russ.)
11. Gusev I.I. *Modelirovanie ekosistem* [Ecosystems Modeling]. Arkhangelsk, ASTU Publ., 2002. 112 p. (In Russ.)
12. Tyurin A.V. *Osnovy variatsionnoy statistiki v primenenii k lesovodstvu* [Fundamentals of Variation Statistics as Applied to Forestry]. Moscow; Leningrad, Goslesbumizdat Publ., 1961. 103 p. (In Russ.)

13. Feklistov P.A. *Ekologicheskie zakonomernosti rosta severotaezhnykh sosnyakov kak teoreticheskaya osnova povysheniya ikh produktivnosti i ratsional'nogo ispol'zovaniya*: avtoref. dis. ... d-ra s.-kh. nauk [Environmental Laws of Growth of North Taiga Pine Forests as a Theoretical Basis to Enhance Their Productivity and Rational Use: Dr. Agric. Sci. Diss. Abs.]. Yekaterinburg, 1997. 40 p.

DOI: 10.17238/issn2541-8416.2017.17.3.245

*Aleksandr N. Sobolev**, *Pavel A. Feklistov***

*Solovetsky State Historical, Architectural and Natural Museum-Reserve
(Solovetsky Village, Primorsky District, Arkhangelsk Oblast, Russian Federation)

**Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov
(Arkhangelsk, Russian Federation)

MICROCLIMATE VARIABILITY IN FOREST STANDS OF THE SOLOVETSKY ARCHIPELAGO

The paper presents the measurements of illumination and surface temperature of plants in the pine and spruce plantations of the Solovetsky Archipelago. The difference in these values is estimated in several layers (at a height of 1.3 m, in the grass and shrub and moss-and-lichen layers) numerically (in absolute and relative values, the variability is calculated). The measurements are carried out with distance from the tree stem northerly and southerly. The higher variability of illumination in the spruce forest, its uniform vertical distribution at the level of the grass and shrub layer and the maximum variability at the moss-and-lichen layer are noted. The tree level plays an important role in thermoregulation in the lower layers of the spruce forest, and the moss-and-lichen layer – in the pine forest. For spruce stands, a slight decrease in temperature from the canopy of the crown to the “window” both in grass and shrub and moss-and-lichen layers is representative. The authors observe a temperature rise in the pine forest in the moss-and-lichen layer both in relation to the grass and shrub layer and from the canopy to the “window”. An analysis of the wind speed variability is carried out in the crook-stem forest of *betula tortuosa* mixed with other species. These forest plantations are formed when intensive wind action, dominate along the seacoast, and play an important protective role. The measurements are carried out at different distances from the seashore – up to 100 m from the border of the forest. The wind speed at this distance decreases more than 3 times – on average from 1.72 to 0.48 m/s, and the amplitude – by 2–7 times.

Keywords: forest of the Solovetsky archipelago, grass and shrub layer, moss-and-lichen layer, microclimate of forest plantations, illumination, plant surface temperature, wind speed on the coast.

Поступила 28.04.2017
Received on April 28, 2017

Corresponding author: Pavel Feklistov, address: Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; e-mail: feclistov@narfu.ru

For citation: Sobolev A.N., Feklistov P.A. Microclimate Variability in Forest Stands of the Solovetsky Archipelago. *Arctic Environmental Research*, 2017, vol. 17, no. 3, pp. 245–254. DOI: 10.17238/issn2541-8416.2017.17.3.245

**КОНСЕРВАЦИЯ РАСТИТЕЛЬНОГО ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА
И ПОЧВООБРАЗОВАНИЕ В ЭКОСИСТЕМАХ ЗОНАЛЬНЫХ ТУНДР
КРАЙНЕГО СЕВЕРО-ВОСТОКА АЗИИ**

А.А. Пугачев, Е.А. Тихменев */***

*Институт биологических проблем Севера Дальневосточного отделения РАН
(г. Магадан)

**Северо-Восточный государственный университет
(г. Магадан)

Изучены особенности консервации органического вещества и функционирования почвенно-растительных комплексов в типичных тундровых фитоценозах Крайнего Северо-Востока Азии. Значительная заторможенность биологического круговорота веществ в условиях низких температур и слабой микробиологической активности почв тундровой зоны приводит к консервации химических элементов в отмерших частях растений. Ежегодный опад растений в равнинных тундрах составляет 0,78–1,87 т/га. В его составе доминируют фотосинтезирующие органы (49–65 % от массы опада) и корни (31–47 %), роль одревесневающих органов незначительна. Содержание зольных веществ и азота в опаде прошлых лет может в 49–60 раз превышать количество химических элементов, ежегодно поступающих с растительными остатками, что определяет специфику почвообразовательного процесса. В составе отмершей растительной массы тундровых сообществ оказываются законсервированными на неопределенное время 1,02–2,94 т/га химических элементов, при этом значительная их часть представлена азотом (0,33–0,95 т/га). Процессы разложения мертвых растительных остатков в исследованных тундровых сообществах сопровождаются интенсивным накоплением кремния, алюминия и железа, существенно меньшим – кальция и магния, а также потерями мобильных элементов – калия и фосфора. Обмен веществ между почвами и растительностью осуществляется, очевидно, по следующей схеме. Корневые системы растений извлекают из почвы мобилизованные биофильные элементы, накапливая их в синтезированном органическом веществе, основная масса которого сосредоточена в надземных органах растений и торфянистых подстилках. После отмирания, разложения и минерализации подавляющая часть зольных элементов и азота растительного опада остается в верхней части профиля. Основная их масса вовлекается в биологический круговорот, некоторое количество мигрирует в минеральную часть профиля или выносится за пределы ландшафта с поверхностными водами. Полученные данные позволяют рассматривать тундровые ландшафты в качестве естественных аккумуляторов преобразованной солнечной энергии и элементов-органогенов в общепланетарном масштабе.

Ключевые слова: *тундровый ландшафт, почвенно-биологические процессы, запасы фитомассы, растительный опад, консервация органического вещества.*

Контактное лицо: Тихменев Евгений Александрович, *адрес:* 685000, г. Магадан, ул. Портовая, д. 18; *e-mail:* etikhmenev@bk.ru

Для цитирования: Пугачев А.А., Тихменев Е.А. Консервация растительного органического вещества и почвообразование в экосистемах зональных тундр Крайнего Северо-Востока Азии // Arctic Environmental Research. 2017. Т. 17, № 3. С. 255–264. DOI: 10.17238/issn2541-8416.2017.17.3.255

Крайний Северо-Восток Азии характеризуется преимущественно горным рельефом, наличием многолетней мерзлоты и значительным дефицитом тепла, что предопределяет жесткость природной обстановки территории [1, 2]. В результате выполненных ресурсных исследований накоплен достаточно большой объем информации о запасах растительной массы в сообществах тундровой зоны Российской Арктики. Такие данные имеются в работах В.В. Вихиревой-Васильковой с соавторами – для кустарничковых тундр Корякии [3], И.В. Игнатенко и Ф.И. Хакимзяновой – для ерничково-дриадовой и ивнячковой тундр восточноевропейского Севера [4], Е.Б. Павловой – для тундр Западного Таймыра [5]. Сведения о динамике органического вещества и биологическом круговороте зольных элементов и азота содержатся в обзорной публикации Л.Е. Родина и Н.И. Базилевич [6]. Многие авторы отмечают в тундровых и лесотундровых сообществах значительное преобладание подземной биомассы над надземной, а также замедленные темпы деструкции опада и накопление запасов мертвого органического вещества [7, 8]. В процессе изучения типичных почвенно-растительных комплексов Чукотского полуострова получен значительный материал по функционированию биогеоценозов Чаунской и Анадырской тундр [9, 10] и острова Врангеля [11]. Цель нашего исследования – изучение особенностей консервации органического вещества и функционирования почвенно-растительных комплексов тундровой зоны в условиях повсеместного распространения многолетней мерзлоты.

Материалы и методы. Тундровая зона Северо-Восточной Азии включает Арктическую и Бореальную флористические области [12–14]. Подзона типичных и южных тундр охватывает на более чем 2/3 материковой части Чукотки, арктические тундры занимают узкую полосу вдоль северного побережья [15].

Районы исследований (Чаунская низменность и низовья р. Анадырь) характеризуются

суровым климатом арктической пустыни и арктической тундры [16], с особой жесткостью погоды.

Наиболее подробно охарактеризовано два типа формаций равнинной тундры: 1) кочкарная осоково-моховая, 2) крупнокустарничковая (ольхово-кедровниковая) осоково-мохово-кустарничковая. Первый тип широко распространен в подзоне типичной (мохово-лишайниковой) тундры, второй – в подзоне крупнокустарничковой.

Кочкарная осоково-моховая тундра широко развита в Чаунской низменности. Координаты района исследований (п. Полярный): N 69°9'44", E 178°42'43". Фрагментарность растительного покрова наиболее характерна для резко выступающих в рельефе участков с усиленной денудацией субстрата. Днища долин, шлейфы подножий гор, пологие части склонов заняты лишайниково-моховым покровом, которому свойственны бедность флористического состава и активное проявление микрокомплексности. Пятна голого грунта обычно лишены растительности. На бровках пятен доминируют *Eriophorum vaginatum* и *Carex lugens*; присутствуют гипоарктические виды кустарничков – *Betula exilis*, *Salix glauca*, *Ledum decumbens*, *Vaccinium vitis-idaea*, *V. uliginosum*, реже встречаются *Arctagrostis latifolia*, *Poligonum tripterocarpum* и *P. bistorta*, обильны зеленые мхи. Среди лишайников доминируют *Cetraria cucullata*, *C. crispa*, *C. islandica* и *Cladonia rangiferina*; отмечается присутствие *Dactilina arctica* и *Peltigera aptosa*. Осоково-пушицевые кочки на исследуемом участке занимают 3 % площади фитоценоза, бровки и зарастающие части пятен – 26 %, пятна – 9 % и понижения-трещины – 62 %. Почвенный покров представлен микрокомплексом глеевых, торфянисто-глеевых, трещинно-торфянистых и остаточно-глеевых почв.

Крупнокустарничковая (ольхово-кедровниковая) осоково-мохово-кустарничковая тундра изучалась в низовьях р. Анадырь (п. Красни-

но), координаты: N 64°37'46", E 174°46'40". Ландшафты представлены водораздельными равнинами с пологими склонами и высокими речными террасами. Им свойствен хорошо выраженный микрорельеф в виде бугорков, межбугорковых понижений и основных поверхностей. Встречаются отдельные кочки *Eriophorum vaginatum* и *Carex lugens*. Разобщенные куртины *Pinus pumila* расположены на расстоянии 3–5 м друг от друга, *Alnus fruticosa* – 2–4 м. На кедровостланиковых синузии приходится 9 % поверхности участка, заросшие пятна занимают 2 %, осоково-пушицевые кочки – 7 %, на межкочечное пространство приходится 75 % площади. Кустарниково-кустарничковый ярус образуют *Betula exilis*, *Ledum decumbens*, *Arctous alpina* и *Empetrum sibiricum*. Среди лишайников доминируют *Cladonia rangiferina*, *C. alpestris*, *C. amaurocraea*; среди мхов – *Drepanocladus uncinatus*, *Tomenthypnum nitens*, *Aulacomnium turgidum* и различные виды *Sphagnum*. Почвенный покров образован микрокомплексом тундровых глеевых торфянисто-перегнойных, торфянистых и элювиально-глеевых торфянистых почв.

Для каждого типа тундр закладывали по одной пробной площади размером 100 м². Учеты проводили на площадках 0,25 м² в 10-кратной повторности, при этом не менее чем в 3-кратной – для каждого элемента нанорельефа. Выполняли детальную разборку укусов биомассы и их взвешивание, при этом за границу раздела фитомассы на надземную и подземную принимали линию перехода «живых» частей мхов в бурые (отмершие). Полученные данные переводили из граммов на квадратный метр в тонны на гектар. Исследования основывали на методических указаниях Н.И. Базилевич и соавторов [17].

Физико-химические свойства почв определяли традиционно: рН – потенциометрически, Н и А1 – по А.В. Соколову, обменные Са²⁺ и Mg²⁺ – комплексометрически, гидролитическую кислотность – по методу Г. Каппена, К₂О (пламенно-фотометрически) и Р₂О₅ (фотокolorиметрически) – по А.Т. Кирсанову, общий

углерод – по методу А.В. Тюрина в модификации В.Н. Симакова, азот – по И.Г. Къельдалю, гранулометрический состав мелкозема – по А.А. Качинскому, групповой состав гумуса – по М.М. Кононовой и Н.П. Бельчиковой, валовой состав почв – методом количественного спектрального анализа [10]. Видовые названия сосудистых растений приведены по работе Б.А. Юрцева с соавторами [18].

Результаты и обсуждение. Низкий тепловой баланс и слабая микробиологическая активность почв определяют активное накопление растительного опада в природных сообществах тундровой зоны. Замедленность процесса разложения мертвых органических остатков способствует консервации заключенных в них химических элементов на длительный период. Несоответствие между темпами поступления опада на поверхность почвы и скоростью его разложения приводит к формированию хорошо выраженных подстилок и торфянистых горизонтов в почвенном покрове [8, 10].

Результаты исследований по определению запасов биомассы в типичных тундровых фитоценозах Крайнего Северо-Востока Азии приведены в *таблице* (см. с. 258). В первом типе равнинной тундры (Чаунская низменность) максимальные запасы фитомассы характерны для осоково-пушицевых кочек, минимальные – для пятен. Надземная фитомасса, формируемая преимущественно за счет осоковых и кустарничков, достигает 6,98 т/га сухого вещества, в то время как на подземную приходится 47,08 т/га сухого растительного вещества, т. е. доля подземной фитомассы более чем в 6,7 раза превышает надземную.

В крупнокустарниковой (ольхово-кедровниковой) осоково-мохово-кустарничковой тундре соотношение надземной и подземной фитомассы составляет близкую кочкарным тундрам Чаунской низменности величину – подземная в 5,8 раза превышает надземную.

В соответствии с классификацией Л.Е. Родина и Н.И. Базилевич [6] равнинные тундры

**СТРУКТУРА БИОМАССЫ ТУНДРОВЫХ ФИТОЦЕНОЗОВ КРАЙНЕГО СЕВЕРО-ВОСТОКА АЗИИ,
т/га сухого вещества**

Вид биомассы	Тундра	
	кочкарная осоково-моховая	крупнокустарниковая осоково-мохово-кустарничковая
Надземная биомасса	6,98	26,17
Фитомасса, в т. ч.:	3,74	24,57
кедрового стланика	–	20,60
ольхи	–	0,45
кустарников и кустарничков	1,47	1,81
трав	2,00	0,17
мхов, лишайников	0,27	1,54
Отмершие части растений, в т. ч.:	3,24	1,60
кедрового стланика	–	0,35
ольхи	–	0,21
кустарников и кустарничков	2,16	0,79
трав	1,08	0,25
Подземная биомасса, в т. ч.:	47,08	153,41
узлов кущения	2,13	0,82
мхов, лишайников	3,64	1,80
корней	25,42	91,10
детрита	15,89	59,69
Общая биомасса	54,06	179,58

Примечание. знак «–» означает отсутствие данного элемента в составе биомассы.

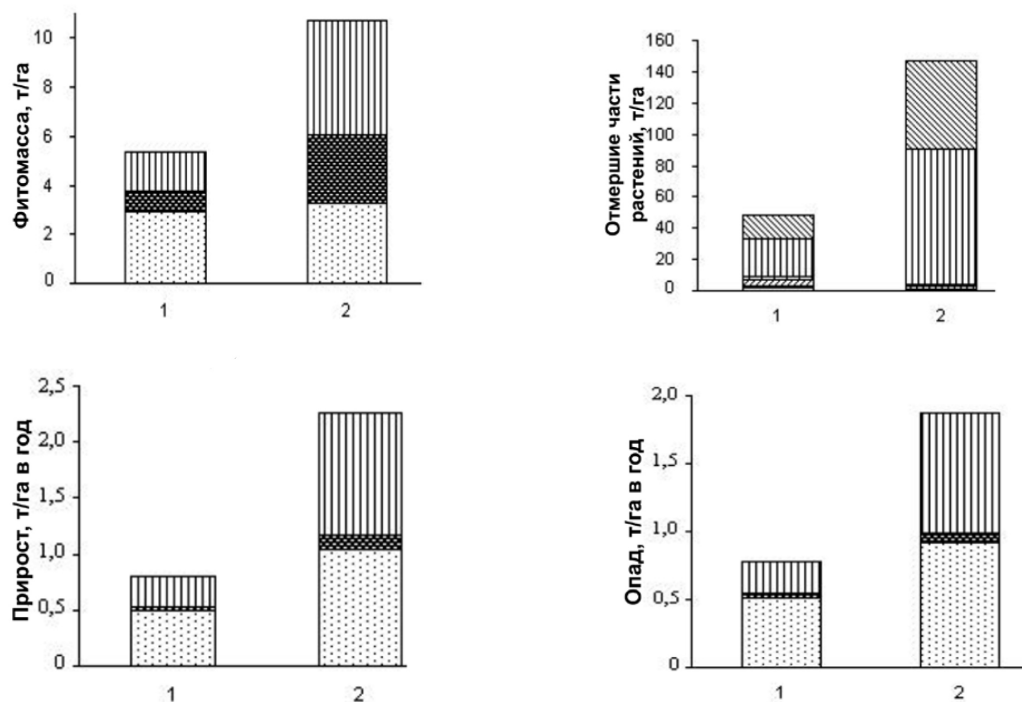
Северо-Востока Азии по величине годового прироста фитомассы (0,89–2,25 т/га) следует отнести к очень малопродуктивным сообществам.

На *рисунке* показаны изменения растительной массы и опада в изученных типах тундровых сообществ. В составе прироста кочкарной осоково-моховой тундры доминируют фотосинтезирующие органы (62 % от массы прироста) и корни (33 %); на долю одревесневающих частей растений приходится 5 %. В крупнокустарниковой осоково-мохово-кустарничковой тундре активное развитие кустарников обуславливает уменьшение доли фотосинтезирующих органов и увеличение доли корней в массе общего прироста.






Ежегодный опад растений в кочкарной тундре характеризуется низкими значениями –

0,78–1,87 т/га. В его составе преобладают фотосинтезирующие органы (49–65 % от массы опада) и корни (31–47 %), роль одревесневающих органов незначительна.

Отмершие части растений характеризуются низкими темпами разложения. Ежегодная потеря массы (в процентах от первоначальной) составляет у опада мхов и кассиопеи – 9 %, пушицы – 14 %, дриады – 16 %, разнотравья – 19 %, березы и горца – 20 %, ивы – 35 %. Несответствие между темпами поступления опада на поверхность почвы и скоростью его разложения определяет процесс формирования подстилок и торфянистых горизонтов. Отношение подстилки к опад фотосинтезирующих органов цветковых в кочкарной тундре равно 10, а в крупнокустарниковой – 2. В почвенном покрове тундровых ландшафтов темпы разложения



Условные обозначения:

 – корни;
  – фотосинтезирующие органы;
  – многолетние органы;
  – мхи и лишайники;
  – измельченный опад корней

Показатели изменения растительной массы и опада в ландшафтах зональных тундр Крайнего Северо-Востока Азии, т/га сухой массы: 1 – кочкарная осоково-моховая тундра; 2 – крупнокустарниковая (ольхово-кедровниковая) осоково-мохово-кустарничковая тундра

опада еще ниже, что обуславливает выпадение значительного количества зольных элементов и азота из биологического круговорота на неопределенно долгое время. В соответствии с классификацией Л.Е. Родина и Н.И. Базилевич [6] биологический круговорот в рассматриваемых типах тундр может быть охарактеризован как сильнозаторможенный и заторможенный.

В составе отмершей растительной массы тундровых сообществ законсервировано на неопределенное время 1,02–2,94 т/га химических элементов, при этом значительная их часть представлена азотом – от 0,33 до 0,95 т/га.

В зольном составе резко доминирует кремний, отмечено довольно высокое содержание

кальция, железа, алюминия, отчасти магния. Процессы разложения мертвых растительных остатков сопровождаются относительным накоплением кремния, алюминия и железа, значительно меньшим – кальция и магния и потерями мобильных элементов – калия и фосфора [7, 8]. При этом количество зольных веществ и азота в опаде прошлых лет в 49–60 раз превышает объемы химических элементов, поступающих ежегодно с отмершей растительной массой [10].

Краткость теплого периода, низкие суммы положительных температур, близкое к поверхности залегание льдистой многолетней мерзлоты, медленное оттаивание, переувлажнение

и оглеение всего деятельного слоя почвы, плотная упаковка минеральных частиц и преобладание в их составе глинистых минералов обуславливают низкую энергетику почвообразования в ландшафтах зональных тундр Северо-Востока Азии. Следствием этого является замедленное развитие процессов выветривания почвенных минералов и разложения растительных остатков, накопление последних как на поверхности почвы, так и в нижележащей части профиля.

Господствующие биогенные элементы кустарничков зональных тундр Северо-Востока Азии – азот, калий и кальций. Остальные элементы накапливаются в меньших количествах, более других – магний и фосфор, иногда кремний и сера. Кроме того, в тканях стеблей голубики отмечено накопление марганца [10].

Избыточная увлажненность и почти полное отсутствие крупных пор в минеральной толще тундровых глеевых почв способствуют активному развитию процессов криогенного влаго- и массообмена в периоды промерзания и оттаивания. Эти процессы вызывают перемешивание деятельного слоя почв: быстрое при солифлюкционных перемещениях и оплывании краев морозобойных трещин, медленное – при пятнообразовании, пучении и обогащении его органическим веществом. По-видимому, длительное разложение корневых опавов и погребение растительной дернины в трещинах при солифлюкционном перемешивании почвенной толщи – основные процессы, определяющие глубокую гумусированность тундровых глеевых почв.

Свойственная почвам Крайнего Северо-Востока Азии низкая водопроницаемость глеево-тиксотропных горизонтов, преобладание восходящих миграций почвенных растворов и активного криогенного массообмена препятствуют элювиально-иллювиальной дифференциации рассматриваемых почв, способствуют их гомогенизации. Основная часть элементов, мобилизованных при выветривании почвенных минералов и разложении растительных остатков, вновь вовлекается в биологический круговорот. Однако последний характеризует-

ся малой емкостью и интенсивностью, в связи с чем его влияние на минеральную часть почвенного профиля очень ограничено. Отмеченные элементарные почвенные процессы являются специфичными не только для тундровых глеевых почв, они характерны и для других суглинисто-глинистых почв холодных гумидных областей Земли.

В крупнокустарниковой (ольхово-кедровниковой) осоково-мохово-кустарничковой тундре низовьев р. Анадырь наряду с тундровыми глеевыми широко представлены тундровые элювиально-глеевые почвы. Их профиль имеет сложную полигенетическую историю, обусловленную изменением климата. В период среднеголоценового оптимума почвы современной крупнокустарниковой тундры развивались по подзолиному типу под темнохвойной тайгой. В это же время в них сформировались значительная элювиальная толща и хорошо выраженные подзолистые горизонты. Последующее похолодание вызвало вытеснение древесной растительности тундровой, активное развитие процессов дефляции и криогенного массообмена: морозобойное растрескивание почвогрунтов, пятнообразование, солифлюкция и другие криогенные процессы, интенсивно протекающие в настоящее время. Очевидно, что в этот период в подзолистых почвах произошла деградация верхних минеральных горизонтов. В песчано-супесчаных они формировались вследствие эолового переноса, а в суглинисто-глинистых – в результате интенсивного криогенного массообмена. Реликтами этого периода являются заплывшие морозобойные трещины в средней и нижней частях почвенного профиля, содержащие плохо разложившиеся растительные остатки.

Отмечаемое потепление и увеличение гумидности климата обусловило деградацию или опускание уровня многолетней мерзлоты, разрастание редколесий и кустарников, увеличение емкости и активности биологического круговорота, сопровождающегося процессами оглеения. При этом происходит формирование в верхней части профиля «висячих» гле-

евых и глееватых горизонтов. Формирование их обусловлено влагоемкостью подстилок и водопроницаемостью поверхностных глеево-тиксотропных горизонтов, препятствующих нисходящей миграции атмосферных осадков. При отсутствии поверхностного стока или при подтоке поверхностных вод в почвах формируются оглеенный профиль и развитые торфянистые горизонты.

Современные биоклиматические условия подзоны крупнокустарниковых тундр характеризуются коротким теплым периодом и низкими суммами положительных температур, вследствие чего энергетика элювиально-глеевого почвообразования в рассматриваемых почвах имеет низкую интенсивность и малую глубину проникновения в почвенную толщу. Важно также отметить, что современный элювиально-глеевый процесс действует не на «свежую» почву, а на уже длительно развивающееся образование с хорошо выраженным, дифференцированным профилем. Основная часть «работы» по формированию профиля элювиально-глеевых почв была выполнена в периоды среднеголоценового климатического оптимума и последовавшего позднеголоценового похолодания.

В современных природно-климатических условиях элювиально-глеевое почвообразование способствует усилению кислотного гидролиза первичных и вторичных силикатов под действием более кислого и агрессивного гумуса, активизирует мобилизацию и вынос алюминия и, особенно, железа. Исследования показывают, что характерной особенностью поверхностного оглеения является «расшатывание» минеральной основы почвенных горизонтов, вследствие чего оксиды R_2O_3 из устойчивых форм трансформируются в растворимые. Последние лишь частично выносятся за пределы горизонтов, основная же их масса образует органоминеральные соединения с гумусовыми веществами и осаждаются на месте образования. Миграция мобилизованных соединений ограничивается также низкой водопроницаемостью горизонтов, обусловленной слитным

сложением и тиксотропностью почвы. С другой стороны, наличие глеево-тиксотропных горизонтов и промерзание почв в осенне-зимний период определяют специфику биологического круговорота. Обмен веществ между рассматриваемыми почвами и растительностью осуществляется, очевидно, по следующей схеме. Корневые системы растений поглощают из почвы мобилизованные биофильные элементы, накапливая их в органическом веществе, основная масса которого сосредоточена в надземных органах растений и торфянистых подстилках. После отмирания, разложения и минерализации подавляющая часть зольных элементов и азота растительных опадов остается в верхней части профиля. Большая их часть в дальнейшем вовлекается в биологический круговорот, некоторое количество мигрирует в минеральную часть почвенного профиля или выносятся за пределы ландшафта с поверхностными водами.

Заключение. В условиях высоких широт с низкой теплообеспеченностью и слабой микробиологической активностью отмирающие части растений, поступая в почву, далеко не сразу подвергаются разложению. Они задерживаются на поверхности почвы или на стеблях растений на неопределенно долгое время в малоизмененном виде. Несоответствие между темпами поступления растительного опада на поверхность почвы и скоростью его разложения обуславливает формирование подстилок и торфянистых горизонтов. Содержание зольных веществ и азота в накапливаемом опаде прошлых лет значительно превышает количество химических элементов, поступающих с ежегодным опадом. В составе отмершей растительной массы тундровых ландшафтов оказываются законсервированными от 1,02 до 2,94 т/га химических элементов.

Полученные данные позволяют рассматривать растительные сообщества тундровой зоны в качестве естественных аккумуляторов преобразованной солнечной энергии и элементов-органогенов в общепланетарном масштабе.

Список литературы

1. Шило Н.А. Рельеф и геологическое строение // Север Дальнего Востока. М., 1970. С. 21–83.
2. Томирдиаро С.В. Природные процессы и освоение территорий зоны вечной мерзлоты. М., 1978. 145 с.
3. Вихирева-Василькова В.В., Гаврилюк В.А., Шамурин В.Ф. Надземная и подземная растительная масса некоторых кустарничковых сообществ Корякской земли // Проблемы Севера. М.; Л., 1964. Вып. 8. С. 130–147.
4. Игнатенко И.В., Хакимзянова Ф.И. Почвы и запасы общей фитомассы в ерниково-дриадовой и ивняковой тундрах // Экология. 1971. № 5. С. 17–24.
5. Павлова Е.Б. О растительной массе тундр Западного Таймыра // Вестн. Моск. гос. ун-та. Сер. 6: Биология. Почвоведение. 1965. № 5. С. 62–67.
6. Родин Л.Е., Базилевич Н.И. Динамика органического вещества и биологический круговорот зольных элементов и азота в основных типах растительности земного шара. М.; Л., 1965. 254 с.
7. Пугачев А.А., Тихменев Е.А. Консервация органического вещества в тундровых ландшафтах Северо-Востока Евразии // Природное наследие России: изучение, мониторинг, охрана: материалы междунар. конф. (Тольятти, 21–24 сентября 2004 г.). Тольятти, 2004. С. 220–221.
8. Пугачев А.А., Тихменев Е.А. Структурно-функциональная организация и динамика почвенно-растительного покрова Крайнего Северо-Востока России: моногр. Магадан, 2011. 197 с.
9. Богданов И.Е., Игнатенко И.В., Пугачев А.А. Почвы, запасы растительной массы и продуктивность крупнокустарничковых тундр юго-западной Чукотки // Биологическая продуктивность и ее увеличение в интересах народного хозяйства. М., 1979. С. 26–27.
10. Пугачев А.А. Биологический круговорот и почвообразование в ландшафтах Крайнего Северо-Востока России. Магадан, 2009. 116 с.
11. Смородникова Н.Ю. Запасы и структура растительной массы арктической тундры острова Врангеля // Биологические проблемы Севера: тез. докл. X Всесоюз. симп. Магадан, 1983. С. 210–211.
12. Юрцев Б.А. Проблемы ботанической географии Северо-Восточной Азии. Л., 1974. 160 с.
13. Александрова В.Д. Геоботаническое районирование Арктики и Антарктики. Л., 1977. 190 с. (Комаровские чтения, вып. 29).
14. Арктическая флористическая область / под ред. Б.А. Юрцева. Л., 1978. 166 с.
15. Беликович А.В., Галанин А.В., Трегубов О.Д. Подзона типичных и южных тундр // Природа и ресурсы Чукотки. Магадан, 2006. С. 93–95.
16. Ключин Н.К. Климат // Север Дальнего Востока. М., 1970. С. 101–132.
17. Базилевич Н.И., Титлянова А.А., Смирнов В.В., Родин Л.Е., Нечаева Н.Т., Левин Ф.И. Методы изучения биологического круговорота в различных природных зонах. М., 1978. 178 с.
18. Юрцев Б.А., Королева Т.М., Петровский В.В., Полозова Т.Г., Жукова П.Г., Катенин А.Е. Конспект флоры Чукотской тундры. СПб., 2010. 628 с.

References

1. Shilo N.A. Rel'ef i geologicheskoe stroenie [Relief and Geological Structure]. *Sever Dal'nego Vostoka* [North of the Far East]. Moscow, Nauka Publ., 1970, pp. 21–83. (In Russ.)
2. Tomirdiaro S.V. *Prirodnye protsessy i osvoenie territoriy zony vechnoy merzloty* [Natural Processes and Development of the Permafrost Zone]. Moscow, Nedra Publ., 1978. 145 p. (In Russ.)
3. Vikhireva-Vasil'kova V.V., Gavrilyuk V.A., Shamurin V.F. Nadzemnaya i podzemnaya rastitel'naya massa nekotorykh kustarnichkovykh soobshchestv Koryakskoy zemli [Top and Foot End Vegetation of Some Suffruticose Communities of Koryakskaya Zemlya]. *Problemy Severa* [Problems of the North]. Moscow; Leningrad, Nauka Publ., 1964, iss. 8, pp. 130–147. (In Russ.)
4. Ignatenko I.V., Khakimzyanova F.I. Pochvy i zapasy obshchey fitomassy v ernikovo-driadovoy i ivnyakovoy tundrakh [Soils and Stocks of Total Phytomass in Bushy-Dryad and Willow Tundra]. *Ekologiya* [Russian Journal of Ecology], 1971, no. 5, pp. 17–24.

5. Pavlova E.B. O rastitel'noy masse tundr Zapadnogo Taymyra [On the Plant Mass of Western Taimyr Tundra]. *Vestnik MGU. Ser. 6: Biologiya. Pochvovedenie* [Moscow University Biological Sciences Bulletin. Ser. 6: Biology. Soil Science], 1965, no. 5, pp. 62–67.
6. Rodin L.E., Bazilevich N.I. *Dinamika organicheskogo veshchestva i biologicheskij krugovorot zol'nykh elementov i azota v osnovnykh tipakh rastitel'nosti zemnogo shara* [Dynamics of Organic Matter and Biological Cycle of Ash Constituents and Nitrogen in the Main Types of Vegetation of the Globe]. Moscow; Leningrad, Nauka Publ., 1965. 254 p. (In Russ.)
7. Pugachev A.A., Tikhmenev E.A. Konservatsiya organicheskogo veshchestva v tundrovykh landshaftakh Severo-Vostoka Evrazii [Conservation of Organic Matter in Tundra Landscapes of the Northeast of Eurasia]. *Prirodnoe nasledie Rossii: izuchenie, monitoring, okhrana: materialy mezhdunar. konf. (Tol'yatti, 21–24 sentyabrya 2004 g.)* [Natural Heritage of Russia: Study, Monitoring, Protection: Proc. Intern. Conf. (Togliatti, September 21–24, 2004)]. Togliatti, 2004, pp. 220–221. (In Russ.)
8. Pugachev A.A., Tikhmenev E.A. *Strukturno-funktional'naya organizatsiya i dinamika pochvenno-rastitel'nogo pokrova Kraynego Severo-Vostoka Rossii: monogr.* [Structurally Functional Organization and Dynamics of Soil and Vegetation Cover of the Far Northeast of Russia]. Magadan, North-Eastern State Univ. Publ., 2011. 197 p. (In Russ.)
9. Bogdanov I.E., Ignatenko I.V., Pugachev A.A. Pochvy, zapasy rastitel'noy massy i produktivnost' krupnokustarnikovykh tundr yugo-zapadnoy Chukotki [Soils, Vegetable Stocks and Productivity of Large-Shrubby Tundra of Southwestern Chukotka]. *Biologicheskaya produktivnost' i ee uvelichenie v interesakh narodnogo khozyaystva* [Biological Productivity and Its Increase for the Benefit of the National Economy]. Moscow, Moscow State Univ. Publ., 1979, pp. 26–27. (In Russ.)
10. Pugachev A.A. *Biologicheskij krugovorot i pochvoobrazovanie v landshaftakh Kraynego Severo-Vostoka Rossii* [Biological Cycle and Soil Formation in the Landscapes of the Far North-East of Russia]. Magadan, North-East Sci. Center of the FEB RAS Publ., 2009. 116 p. (In Russ.)
11. Smorodnikova N.Yu. Zapasy i struktura rastitel'noy massy arkticheskoy tundry ostrova Vrangelya [Reserves and Structure of Plant Mass of Arctic Tundra of Wrangel Island]. *Biologicheskie problemy Severa: tez. dokl. X Vsesoyuz. simp.* [Biological Problems of the North: Proc. 10th All-Union Acad. Conf.]. Magadan, 1983, pp. 210–211. (In Russ.)
12. Yurtsev B.A. *Problemy botanicheskoy geografii Severo-Vostochnoy Azii* [Problems of Botanical Geography of Northeast Asia]. Leningrad, Nauka Publ., 1974. 160 p. (In Russ.)
13. Aleksandrova V.D. *Geobotanicheskoe rayonirovanie Arktiki i Antarktiki* [Geobotanical Zoning of the Arctic and Antarctic]. *Komarovskie chteniya, vyp. 29* [Komarov's Readings, Iss. 29]. Leningrad, Nauka Publ., 1977. 190 p. (In Russ.)
14. Yurtsev B.A., ed. *Arkticheskaya floristicheskaya oblast'* [The Arctic Floristic Region]. Leningrad, Nauka Publ., 1978. 166 p. (In Russ.)
15. Belikov A.V., Galanin A.V., Tregubov O.D. Podzona tipichnykh i yuzhnykh tundr [Subzone of Typical and Southern Tundra]. *Priroda i resursy Chukotki* [Nature and Resources of Chukotka]. Magadan, North-East Sci. Center of the FEB RAS Publ., 2006, pp. 93–95. (In Russ.)
16. Klyukin N.K. *Klimat* [Climate]. *Sever Dal'nego Vostoka* [North of the Far East]. Moscow, Nauka Publ., 1970, pp. 101–132. (In Russ.)
17. Bazilevich N.I., Titlyanova A.A., Smirnov V.V., Rodin L.E., Nechaeva N.T., Levin F.I. *Metody izucheniya biologicheskogo krugovorota v razlichnykh prirodnykh zonakh* [Methods of Biological Cycle Studying in Various Natural Zones]. Moscow, Mysl' Publ., 1978. 178 p. (In Russ.)
18. Yurtsev B.A., Koroleva T.M., Petrovskiy V.V., Polozova T.G., Zhukova P.G., Katenin A.E. *Konspekt flory Chukotskoy tundry* [Abstract of Flora of Chukotka Tundra]. Saint Petersburg, VVM Publ., 2010. 628 p. (In Russ.)

DOI: 10.17238/issn2541-8416.2017.17.3.255

*Aleksey A. Pugachev**, *Evgeniy A. Tikhmenev* */**

*Institute of Biological Problems of the North, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences
(Magadan, Russian Federation)

**North-Eastern State University (Magadan, Russian Federation)

CONSERVATION OF PLANT ORGANIC MATTER AND SOIL FORMATION IN ECOSYSTEMS OF ZONAL TUNDRA OF EXTREME NORTHEAST ASIA

The paper studies the features of conservation of organic matter and the functioning of soil-cover complexes in typical tundra phytocenoses of the Far Northeast of Asia. Significant inhibition of the biological cycle of substances in conditions of low temperatures and weak microbiological activity of soils in the tundra zone leads to the conservation of chemical elements in the dead parts of plants. Annual plant litter in the plain tundra is 0.78–1.87 t/ha. Photosynthesizing organs dominate in its structure (49–65 % of litter mass) and roots (31–47 %); the role of lignifying organs is insignificant. The ash and nitrogen content in the litter of previous years can exceed 49–60 times the amount of chemical elements annually transferred with plant residues, which defines the specificity of the soil-forming process. In the dead plant mass of tundra communities, 1.02–2.94 t/ha of chemical elements are preserved for an indefinite period of time, and a considerable part of them is represented by nitrogen (0.33–0.95 t/ha). The decomposition course of dead plant residues in the investigated tundra communities is accompanied by a significant accumulation of silicon, aluminum and iron, substantially less – by calcium, magnesium, as well as by a loss of mobile elements – potassium and phosphorus. The substance exchange between soils and vegetation apparently occurs according to the following scheme: root systems of plants extract mobilized biophilic elements from soil, accumulating them in a synthesized organic matter, the main part of which is concentrated in above-ground organs and peat litter. After the death, decomposition and mineralization, the great part of ashy elements and nitrogen of plant litter remains in the upper part of the profile. The bulk of them is involved into the biological cycle, a certain amount migrates into the mineral part of the profile or carried out beyond the landscape with surface waters. The obtained data allow considering tundra landscapes as natural accumulators of transformed solar energy and organogens at a global scale.

Keywords: *tundra landscape, soil-biological process, phytomass stock, plant litter, conservation of organic matter.*

Поступила 06.04.2017
Received on April 06, 2017

Corresponding author: Evgeniy Tikhmenev, *address:* ul. Portovaya, 18, Magadan, 685000, Russian Federation;
e-mail: etikhmenev@bk.ru

For citation: Pugachev A.A., Tikhmenev E.A. Conservation of Plant Organic Matter and Soil Formation in Ecosystems of Zonal Tundra of Extreme Northeast Asia. *Arctic Environmental Research*, 2017, vol. 17, no. 3, pp. 255–264. DOI: 10.17238/issn2541-8416.2017.17.3.255

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

Журнал «Arctic Environmental Research» содержит публикации по основным направлениям научно-исследовательской и учебно-методической работы в области биологических наук, наук о Земле, физико-математических наук.

<i>Общие требования</i>	Тексты принимаются в электронном виде. Файл со статьей может быть предоставлен на электронном носителе либо отправлен по электронной почте. Необходимо указать отрасль науки и специальность (шифр и название), по которым выполнено научное исследование. Электронный вариант статьи выполняется в текстовом редакторе «Microsoft Word» и сохраняется с расширением *.doc. В имени файла указываются фамилия, инициалы автора.
<i>Параметры страницы</i>	Формат А4. Поля: правое, левое – 25 мм, верхнее, нижнее – 20 мм.
<i>Форматирование основного текста</i>	Абзацный отступ – 10 мм. Межстрочный интервал – полуторный. Порядковые номера страниц проставляются посередине верхнего поля страницы арабскими цифрами.
<i>Шрифт</i>	Times New Roman. Размер кегля (символов) основного текста – 14 пт; резюме, аннотации, ключевых слов – 12 пт.
<i>Объем статьи</i>	Максимальный объем статей – 10–15 страниц, обзорных статей – до 20 страниц.
<i>Сведения об авторе</i>	Указываются на русском и английском языках фамилия, имя, отчество автора (полностью); ученая степень, звание, должность и место работы (кафедра, институт, университет); общее количество научных публикаций, в т. ч. отдельно указать количество монографий, учебных пособий; рабочий адрес с почтовым индексом; тел./факсы (служебный, домашний, мобильный), e-mail.
<i>Индекс УДК</i>	Располагается отдельной строкой слева перед заглавием статьи. Индекс УДК (универсальная десятичная классификация книг) должен соответствовать заявленной теме, проставляется научной библиотекой.
<i>Заглавие</i>	Помещается перед текстом статьи на русском и английском языках. Используется не более 11 слов.
<i>Резюме</i>	Предоставляется на русском и английском языках (кроме статей в разделах «Научная жизнь» и «Критика и библиография»). Резюме должно быть:

	<ul style="list-style-type: none"> – информативным (не содержать общих фраз); – оригинальным; – содержательным (отражать основное содержание статьи и результаты исследований); – структурированным (следовать логике описания результатов в статье); – компактным (укладываться в объем от 200 до 250 слов).
Аннотация	Авторы статей в разделах «Научная жизнь» и «Критика и библиография» предоставляют аннотацию (объем 50–100 слов).
Ключевые слова	После резюме (аннотации) указывается до 6–8 ключевых слов (словосочетаний), несущих в тексте основную смысловую нагрузку.
Примечания и комментарии	Примечания, комментарии, ссылки на нормативные акты, сайты и документальные источники даются в виде подстрочных сносок (внизу страницы). Маркер сноски – арабская цифра (нумерация сквозная). Примечания должны содержать лишь цитируемые в статье источники.
Библиографические ссылки	<p>Библиографические ссылки на использованную литературу оформляются в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.5–2008 (п. 7 «Затекстовая библиографическая ссылка»).</p> <p>– Подпункт 7.4.1 – ссылка на текст.</p> <p><i>Например</i>, в тексте: Общий список справочников по терминологии, охватывающий время не позднее середины XX века, дает работа библиографа И.М. Кауфмана [59].</p> <p>в списке литературы: 59. <i>Кауфман И.М.</i> Терминологические словари: библиография. М., 1961.</p> <p>– Подпункт 7.4.2 – ссылка на фрагмент текста.</p> <p><i>Например</i>, в тексте: [10, с. 81], [10, с. 106] и т. д.;</p> <p>в списке литературы: 10. <i>Бердяев Н.А.</i> Смысл истории. М., 1990. 175 с.</p>
Рисунки, схемы, диаграммы	Принимается не более 4 рисунков (черно-белых). Рисунки, схемы, диаграммы приводятся в тексте статьи и предоставляются отдельными файлами. Схемы выполняются с использованием штриховой заливки. Электронную версию рисунка следует сохранять в форматах *.tiff, *.tif (Grayscale – Оттенки серого, 300 dpi). Иллюстрации должны быть четкими. В тексте статьи следует дать ссылку на конкретный рисунок, например (<i>рис. 2</i>). На рисунках должно быть минимальное количество слов и обозначений. Каждый рисунок должен иметь порядковый номер, подпись и объяснение значений всех кривых, цифр, букв и прочих условных обозначений, размещенное под рисунком.

Таблицы

Таблиц должно быть не более 3. Каждую таблицу следует снабжать порядковым номером и заголовком. Все графы в таблицах должны также иметь тематические заголовки. Сокращение слов допускается только в соответствии с требованиями ГОСТ 7.12–93 (касается русских слов), 7.11–78 (касается слов на иностранных европейских языках). Таблицы должны быть предоставлены в текстовом редакторе «Microsoft Word» и пронумерованы по порядку. Одновременное использование таблиц и графиков (рисунков) для изложения одних и тех же результатов не допускается. Размерность всех физических величин следует указывать в системе единиц СИ.

Формулы

Математические и физические формулы (только формулы!) выполняются в редакторе «MS Equation 3.0». Переменные в тексте набираются в обычном текстовом режиме.

- Решение о публикации статьи принимается редколлегией журнала. Электронные варианты отредактированного текста авторам не высылаются, присланные материалы не возвращаются.

- Все статьи отправляются на независимую экспертизу и публикуются только в случае положительной рецензии. Редакция оставляет за собой право производить необходимые уточнения и сокращения.

- Статьи публикуются на бесплатной основе.

- Статьи принимаются в течение года по адресу: 163002, г. Архангельск, наб. Северной Двины, д. 17, каб. 1410а, Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, отдел научных изданий научно-исследовательского управления.

Тел.: (8182) 21-61-21; e-mail: vestnik_est@narfu.ru; vestnik_@narfu.ru.

- Редакция принимает предварительные заявки на приобретение номеров журнала.

Подписаться на журнал можно в отделениях почтовой связи.

Условия подписки опубликованы в бюллетене «Объединенный каталог. Пресса России. Газеты и журналы».