

ENVIRONMENTAL DYNAMICS AND GLOBAL CLIMATE CHANGE

Volume 12
Issue 1

2021

<https://edgcccjournal.org>

EDITORIAL BOARD

EDITORS-IN-CHIEF

Elena D. Lapshina, Dr. habil. of Biol. Sci., Professor (Khanty-Mansiysk, Russia)
Mikhail V. Glagolev, PhD of Biol. Sci. (Moscow, Russia)

EDITORIAL BOARD

Executive Secretary

Olga M. Shaduyko (Tomsk, Russia)

Elena V. Agbalyan, Dr. habil. of Biol. Sci. (Salekhard, Russia)

Sergey A. Blagodatskiy, Dr. habil. of Biol. Sci. (Stuttgart, Germany)

Vasily A. Vavilin, Dr. habil. of Phys. and Math. Sci. (Moscow, Russia)

Egor A. Dyukarev, PhD in Phys. and Math. Sci. (Tomsk, Russia)

Mikhail V. Kabanov, Dr. habil. of Phys. and Math. Sci., Professor, Corresponding Member of the RAS (Tomsk, Russia)

Dmitriy V. Karelin, Dr. habil. of Biol. (Moscow, Russia)

Roman A. Kolesnikov, PhD in Geogr. Sci. (Salekhard, Russia)

Oleg R. Kotsyurbenko, Dr. habil. of Biol. Sci. (Khanty-Mansiysk, Russia)

Alexei V. Kouraev, PhD in Geogr. Sci., Assistant professor (Toulouse, France)

Shamil S. Maksyutov, PhD in Phys. and Math. Sci. (Tsukuba, Japan)

Vasily B. Martynenko, Dr. habil. of Biol. Sci., Professor (Ufa, Russia)

Nsdezhdha V. Matveeva, Dr. habil. of Biol. Sci. (Sankt-Petersburg, Russia)

Alexander V. Puzanov, Dr. habil. of Biol. Sci., Professor (Barnaul, Russia)

Andrey B. Rozanov, PhD in Geogr. Sci. (Stellenbosch, Republic of South Africa)

Andrey A. Sirin, Dr. habil. of Biol., Professor (Uspenskoe, Moscow region, Russia)

Viktor M. Stepanenko, Dr. habil. of Phys. and Math. Sci. (Moscow, Russia)

Alexey L. Stepanov, Dr. habil. of Biol. Sci. (Moscow, Russia)

Evgeniy V. Shein, Dr. habil. of Biol. Sci. (Moscow, Russia)

Sergey A. Shoba, Dr. habil. of Biol. Sci., Professor, Corresponding Member of the RAS (Moscow, Russia)

Kirsi Latola, PhD, (Oulu, Finland)

Mariusz Lamentowicz, Dr. habil., (Poznan, Poland)

Kári Fannar Lárusson, PhD, (Akureyri, Iceland)

Ivan Mammarella, PhD, Assistant Professor (Helsinki, Finland)

Timo Vesala, Dr., Academy Professor (Helsinki, Finland)

Vincent F. Warwick, Dr., Full-Professor (Quebec Canada)

Editorial Office

Oleg A. Frolov, managing editor (Moscow, Russia)

Inna O. Rozhkova-Timina, WEB editor, computer layout (Tomsk, Russia)

Ruslan A. Runkov, technical editor (Moscow, Russia)

Founders:

Yugra State University. 628012, Russia, Khanty-Mansi autonomous Area, Khanty-Mansiysk, Chekhova str., 16.
Phone/fax: +7(3467)377-000, ext. 101, WEB: www.ugrasu.ru

National Research Tomsk State University. 634050, Russia, Tomsk, Lenin Ave., 36.
Phone: +7(3822)58-98-52, fax: +7(3822)52-95-85, WEB: www.tsu.ru

Institute for Water and Environmental Problems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science.
656038, Russia, Barnaul, Molodezhnaya str., 1. Phone: +7(3852)66-64-60, fax: +7(3852)24-03-96, WEB: www.iwep.ru

Arctic Research Center of the Yamal-Nenets autonomous Area. 629001, Russia, Yamal-Nenets autonomous District, Salekhard, Respublic str., 73. Phone/fax: +7(34922)441-32, WEB: www.arctic.yanao.ru

ДИНАМИКА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ И ГЛОБАЛЬНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

Том 12
Выпуск 1
2021

Журнал издается с 2008 года

<https://edgcccjournal.org>

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

ГЛАВНЫЕ РЕДАКТОРЫ

Елена Дмитриевна Лапина, д-р биол. наук, профессор (Ханты-Мансийск, Россия)
Михаил Владимирович Глаголев, канд. биол. наук (Москва, Россия)

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ

Ответственный секретарь

О.М. Шадуйко (Томск, Россия)

Е.В. Агбалян, д-р биол. наук (Салехард, Россия)
С.А. Благодатский, д-р биол. наук (Штутгарт, Германия)
В.А. Вавилин, д-р физ.-мат. наук (Москва, Россия)
Е.А. Дюкарев, канд. физ.-мат. наук (Томск, Россия)
М.В. Кабанов, д-р физ.-мат. наук, профессор, чл.-корр. РАН (Томск, Россия)
Д.В. Карелин, д-р биол. наук (Москва, Россия)
Р.А. Колесников, канд. геогр. наук (Салехард, Россия)
О.Р. Коцюрбенко, д-р биол. наук (Ханты-Мансийск, Россия)
А.В. Кураев, канд. геогр. наук, доцент (Тулуза, Франция)
Ш.Ш. Максюттов, канд. физ.-мат. наук (Цукуба, Япония)
В.Б. Мартыненко, д-р биол. наук, профессор (Уфа, Россия)
Н.В. Матвеева, д-р биол. наук (Санкт-Петербург,

Россия)
А.В. Пузанов, д-р биол. наук, профессор (Барнаул, Россия)
А.Б. Розанов, канд. геогр. наук (Стелленбос, ЮАР)
А.А. Сиринов, д-р биол. наук, профессор (Успенское, Московская обл., Россия)
В.М. Степаненко, д-р физ.-мат. наук (Москва, Россия)
А.Л. Степанов, д-р биол. наук, профессор (Москва, Россия)
Е.В. Шеин, д-р биол. наук, профессор (Москва, Россия)
С.А. Шоба, д-р биол. наук, профессор, чл.-корр. РАН (Москва, Россия)
Т. Весала, д-р, профессор (Хельсинки, Финляндия)
К. Латола, д-р (Оулу, Финляндия)
М. Ламентович, д-р, профессор (Познань, Польша)
К.Ф. Ларуссон, д-р (Акурейри, Исландия)
И. Маммарелла, д-р, доцент (Хельсинки, Финляндия)
В.Ф. Варвик, д-р, профессор (Квебек, Канада)

Редакция

О.А. Фролов, заведующий редакцией (Москва, Россия)
И.О. Рожкова-Тимина, WEB-редактор, компьютерная верстка (Томск, Россия)
Р.А. Руньков, технический редактор (Москва, Россия)

Учредители:

ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет».

628012, Россия, Ханты-Мансийский автономный округ — Югра, г. Ханты-Мансийск ул. Чехова, 16.
Тел./факс: +7(3467)37-70-00 (доб. 101), WEB: www.ugrasu.ru

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет».

634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 36. Тел.: +7(3822)58-98-52, факс: +7(3822)52-95-85, WEB: www.tsu.ru

ФГБУН Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской Академии наук.
656038, Россия, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1. Тел.: +7(3852)66-64-60, факс: +7(3852)24-03-96, WEB: www.iwep.ru

ГКУ Ямало-Ненецкого автономного округа «Научный центр изучения Арктики».

629008, Россия, Ямало-Ненецкий автономный округ, г. Салехард, ул. Республики, 73. Тел./факс: +7(34922)441-32,
WEB: www.arctic.yanao.ru

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций, связи и охране культурного наследия. Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-73235 от 06.07.2018

Индексируется: Science Index (РИНЦ), Google Scholar, Ulrich's Periodicals Directory, WorldCat, EBSCO

Архив журнала «Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата» размещен в сети Интернет www.elibrary.ru, <https://edgcccjournal.org/EDGCC/issue/archive>

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РАБОТЫ

<i>D.K. Davydov, A.V. Dyachkova, O.A. Krasnov, D.V. Simonenkov, A.V. Fofonov, S.S. Maksyutov</i> Application of the automated chamber method for long-term measurements of CO ₂ and CH ₄ fluxes from wetland ecosystems of the West Siberia	5
---	---

<i>P.V. Bolshanik, S.B. Kuznetsova, D.D. Karaseva</i> Natural features of the orchid refugium on the territory of the natural park "Samarovsky chugas»	15
---	----

<i>E.V. Agbalyan, E.A. Zarov, I.V. Filippov, Yu.A. Pechkina, E.V. Shinkaruk, K.V. Yulbarisova, N.A. Khnycheva, E.D. Lapshina</i> Biogeochemical assessment of the main plants at the Nadym district's reindeer pastures (Yamal-Nenets autonomous okrug)	27
---	----

ДИСКУССИИ

<i>D.M. Frolov</i> Impact of snow cover and air temperature on ground freezing depth and stability in mountain area	43
--	----



EXPERIMENTAL WORKS

D.K. Davydov, A.V. Dyachkova, O.A. Krasnov, D.V. Simonenkov, A.V. Fofonov, S.S. Maksyutov

Application of the automated chamber method for long-term measurements
of CO₂ and CH₄ fluxes from wetland ecosystems of the West Siberia 5

P.V. Bolshanik, S.B. Kuznetsova, D.D. Karaseva

Natural features of the orchid refugium on the territory of the natural park "Samarovsky chugas» 15

*E.V. Agbalyan, E.A. Zarov, I.V. Filippov, Yu.A. Pechkina, E.V. Shinkaruk,
K.V. Yulbarisova, N.A. Khnycheva, E.D. Lapshina*

Biogeochemical assessment of the main plants at the Nadym district's reindeer pastures
(Yamal-Nenets autonomous okrug) 27

DISCUSSIONS

D.M. Frolov

Impact of snow cover and air temperature on ground freezing depth and stability in mountain area 43



APPLICATION OF THE AUTOMATED CHAMBER METHOD FOR LONG-TERM MEASUREMENTS OF CO₂ AND CH₄ FLUXES FROM WETLAND ECOSYSTEMS OF THE WEST SIBERIAD.K. Davydov¹, A.V. Dyachkova¹, O.A. Krasnov¹, D.V. Simonenkov¹, A.V. Fofonov¹, S.S. Maksyutov²¹ V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, Russia² National Institute for Environmental Studies, Tsukuba, JapanАвтор для переписки: A.V. Fofonov, e-mail: alenfo@iao.ru**Citation:** Davydov D.K., Dyachkova A.V., Krasnov O.A., Simonenkov D.V., Fofonov A.V., Maksyutov S.S. 2021. Application of the automated chamber method for long-term measurements CO₂ and CH₄ fluxes from wetland ecosystems of the West Siberia // Environmental dynamics and global climate change. V. 12. N 1. P. 5–14. DOI: <https://doi.org/10.17816/edgcc48700>

Автоматизированные камерные системы, работающие в закрытом динамическом режиме, рекомендованы в качестве основного метода для измерений потоков парниковых газов на границе «почва — атмосфера» для станций, входящих в систему ICOS (Integrated Carbon Observation System). В работе приводятся данные измерений сезонных потоков метана (CH₄) и углекислого газа (CO₂) в характерных растительных ассоциациях на Бакcharском болоте в Томской области в теплое время 2013–2019 гг. с использованием автоматического камерного комплекса «Flux-NIES». Обсуждается межгодовая и пространственная изменчивость поглощения атмосферного углерода болотной растительностью и его эмиссии из торфяной залежи. Наблюдается связь этих процессов с уровнем увлажнения в болотных экосистемах.

Ключевые слова: автоматизированный комплекс для измерения газовых потоков; газообмен на границе «почва — атмосфера»; болотные экосистемы.

ПРИНЯТЫЕ СОКРАЩЕНИЯ

WL — почвенные воды,
п.п. — проективное покрытие.

ВВЕДЕНИЕ

Понимание причин изменения климата Земли и планирование необходимых мероприятий по предотвращению катастрофических последствий требуют долгосрочных и высокоточных измерений выбросов и стоков парниковых газов и их эволюции. Стандартизированные измерения и расчет газовых потоков увеличивают доступность и удобство использования накопленных данных для моделирования происходящих процессов. Автоматизированные камерные системы, работающие в закрытом динамическом режиме, рекомендованы в качестве основного метода для измерений потоков парниковых газов на границе «почва — атмосфера» на станциях мониторинга входящих в систему ICOS (Integrated Carbon Observation System) [Pavelka et al., 2018].

Камерные измерения потоков малых газовых составляющих (trace gases) между поверхностью суши и атмосферой проводятся уже почти 100 лет [Вадюнина и Корчагина, 1961, с. 137–140; Pavelka et al., 2018]. Различные методы исследований, в том числе статические и динамические, применяются для фиксации потоков основных парниковых газов. Все они

имеют определенные недостатки, которые либо мешают дать адекватную оценку процессам обмена, либо ограничивают диапазон их использования. Однако камерные методы относительно дешевы и просты в эксплуатации и в сочетании с использованием методов математического моделирования могут быть адаптированы для широкого спектра исследований от локальных до глобальных пространственных масштабов. Стандартизация камерных измерений облегчает их применение в различных сетях мониторинга разнообразных наземных экосистем.

Углекислый газ (CO₂) и метан (CH₄) являются парниковыми газами, которые чаще всего контролируются с использованием камерного метода. CO₂ является одним из наиболее распространенных и важных газов в системе суша — океан — атмосфера. Он имеет как природные, так и антропогенные источники. В естественном углеродном цикле CO₂ играет ключевую роль в ряде биологических процессов (фотосинтез, дыхание и т. д.). Концентрация CO₂ в атмосфере увеличилась на 40% — с 278 млн⁻¹ в 1750 до 406 млн⁻¹ в 2017 году [NOAA/ESRL, 2017].

CH₄ также обладает сильным парниковым эффектом и играет важную роль в определении окислительной способности тропосферы и истощении стратосферного озона. Он имеет как природные, так и антропогенные источники. По-прежнему существует много регионов

с источниками CH_4 , которые слабо изучены. К малоизученным территориям относятся и обширные районы Российской Арктики, где наличие природных водно-болотных угодий и использование ископаемого топлива приводят к значительным выбросам CH_4 в атмосферу. За тот же промежуток времени, что и наблюдаемый рост содержания CO_2 , концентрация CH_4 в атмосфере увеличилась на 150% — с 722 млрд⁻¹ в 1750 году до 1859 млрд⁻¹ в 2017 году [NOAA/ESRL, 2017].

Таким образом, концентрации CO_2 , CH_4 и других парниковых газов увеличились в атмосфере с доиндустриальных времен из-за антропогенных выбросов, связанных со сжиганием ископаемого топлива, используемого в качестве источника энергии и с изменениями в землепользовании. Наблюдаемые изменения в концентрации CO_2 и CH_4 в атмосфере являются результатом нарушения динамического баланса между антропогенными выбросами и естественными процессами, которые приводят к частичному удалению этих газов из атмосферы [Ciais et al., 2013].

Камерные измерения полезны при определении временных и пространственных неоднородностей потоков парниковых газов, при разделении суммарных потоков CO_2 на их компоненты (дыхание/поглощение) и т. д. Использование автоматизированных систем для изучения газовых потоков на границе «почва — атмосфера» позволяет проводить точные измерения независимо от погоды и времени суток, с минимальными нарушениями поверхности почвы и получать данные с высоким разрешением в течение продолжительных периодов времени.

Анализ литературы показывает, что российские научные группы для измерений газовых потоков используют автоматические камеры различных конструкций. Например, широко применяются газоанализаторы LI-8100A (Licor Inc., США) со встроенной камерой небольшого объема в виде перевернутой чаши [Махныкина и др., 2016; Ivanov et al., 2017].

Другие исследователи сами разрабатывают и изготавливают камеры под конкретные задачи [Maximov et al., 2012; Молчанов, 2017]. Автоматизация, непосредственно самих камер, заключается в создании механизма способного открывать и закрывать отдельную камеру по заданному временному циклу. Для этого обычно применяют либо пневматический привод, либо электромеханический. Стоит отметить, что большинство исследователей отдают предпочтение камерам пневматической конструкции, поскольку использование электродвигателей постоянного тока сопряжено с рядом проблем.

Для проветривания внутреннего объема камер также применяют два решения. Первое —

поднятие верхней крышки-колпака, второе — поднятие всего колпака над основанием [Белан и др., 2017; Dyukarev et al., 2019].

Пионерами же применения автоматизированного камерного метода для исследования газовых потоков на границе «почва — атмосфера» на территории России (Западная Сибирь) следует признать группу российских и японских ученых под общим руководством проф. Г. Иноуэ (G. Inoue) [Глаголев, 2010, с. 3]. Первый автоматический комплекс-прототип был установлен на территории Бакчарского болота (Томская обл.) в 1997 году [Nakano et al., 1998]. С тех пор, структура измерительного комплекса претерпела многочисленные изменения как в аппаратном составе, так и в обеспечении непрерывности автономных измерений.

В результате выполненных работ, сконструированный автоматизированный комплекс получил собственное название «Flux-NIES». В данной статье приводится актуальное описание структуры комплекса и обсуждаются результаты измерения сезонных газовых потоков в болотных экосистемах южно-таежной зоны Западной Сибири, полученных по данным многолетних наблюдений.

СРЕДСТВА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Измерительный комплекс «Flux-NIES» с 6 автоматическими камерами разработан совместно National Institute for Environmental Studies (NIES, Цукуба, Япония) и Институтом оптики атмосферы СО РАН (ИОА, Томск, Россия) в конце 1990-х — начале 2000-х гг. для исследования потоков метана и диоксида углерода на границе «почва-атмосфера» [Maksyutov et al., 1999; Краснов и др., 2013]. С тех пор его состав неоднократно изменялся и модернизировался. В настоящее время на полевом стационаре «Plotnikovo» эксплуатируются два почти идентичных комплекса (рис. 1).

В качестве газоанализатора CH_4 в состав измерительного оборудования включен модифицированный полупроводниковый сенсор TGS-842 (Figaro Inc., США) с чувствительным элементом на основе кристалла диоксида олова — касситерита (SnO_2) [Suto and Inoue, 2010]. Для измерения концентрации CO_2 используется недисперсионный инфракрасный NDIR-газоанализатор LI-820 (Licor Inc., США). Подача пробы воздуха от камер к приборам газоанализа осуществляется нагнетающим насосом типа N86KN (KNF Neuberger GmbH, Германия) по системе полиэтиленовых трубок ($\varnothing$ 4 мм) и пневмоэлектрических клапанов. Управление измерительным комплексом, сбор и сохранение информации осуществляется через дата-логгер CR1000 (Campbell Sci., США).

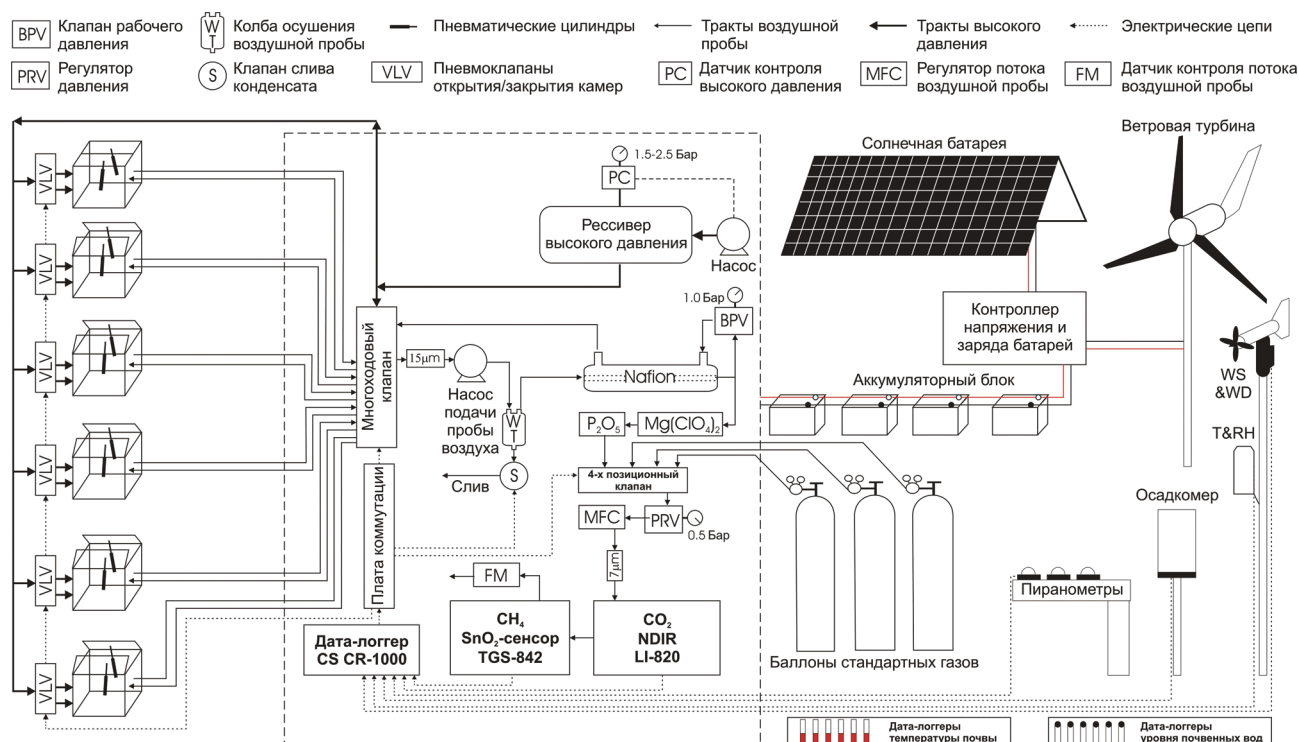


Рис. 1. Схема автоматического камерного комплекса «Flux-NIES»

Большое внимание при осуществлении газоанализа уделяется подготовке воздушной пробы: очистке от твердых аэрозольных фракций, осушению и стабилизации потока и температуры в приборах. Для этого в измерительный комплекс «Flux-NIES» последовательно включены (рис. 1): фильтры тонкой очистки (15 и 7 мкм), регулятор давления (RPV), регулятор потока воздушной пробы (MFC), система сбора и слива конденсата (WT и S), нафионовый осушитель (Nafion), и финальные химические порошковые осушители ($\text{Mg}(\text{ClO}_4)_2$ и P_2O_5).

Для автономного функционирования комплекса в качестве бесперебойного источника электроэнергии используется набор аккумуляторных батарей, подзарядка которых осуществляется в дневное время солнечными электропанелями или ветровой турбиной.

Контроль основных параметров окружающей среды осуществляется: датчиком атмосферного давления RX2760 (OMEGA, США); датчиком температуры и относительной влажности атмосферного воздуха HMP45A (VAISALA, Финляндия); датчиком скорости/направления ветра 05103VM; датчиком осадков 52202H (R.M. Young Com., США); пиргеометр/радиометром PIR (Eppley Lab., США); пиранометрами солнечной интегральной радиации PCM-21 и фотосинтетически активной радиации PQS-1 (Kipp&zonen, Нидерланды). Дополнительные измерения температуры почвы на глубинах 5, 10, 20, 30, 40 см регистрируются отдельно термодатчиками iButton DS1921G (Maxim Integrated,

США), а уровень грунтовых вод измеряется датчиками HOBO U20-001-04 (Onset Comp. США) на различных болотных участках.

Методика измерений основана на регистрации изменения концентрации исследуемого газа внутри кратковременно изолируемой от атмосферы камеры (рис. 1). Анализируемый воздух по трубкам через управляемый многоходовый клапан выбора камеры подается на вход блока газоанализа со скоростью 3 л/мин. Клапан высокого давления (BPV) разделяет поток воздуха из рабочей камеры на два, меньший из которых (20–30 мл/мин) поступает в газоанализаторы и контролируется датчиком воздушного потока (FM), а оставшаяся часть через внешний контур Nafion-осушителя по обратной трубке возвращается в камеру, чем достигается постоянство давления воздуха внутри ее изолируемого объема [Краснов и др., 2013]. Учитывая, что максимальная длина трубок в измерительном комплексе не превышает 100 метров, время доставки воздушной пробы к системе газоанализа составляет не более 0,5 минуты.

В нормальном состоянии все камеры открыты, кроме одной (рабочей), из которой производится отбор воздушной пробы. Очередность работы камер, продолжительность и время их открытия-закрытия определяются программой управления в логгере. Как правило, использовался режим пятиминутного экспонирования рабочей камеры с пятиминутным интервалом в ее закрытом состоянии.

Для определения чувствительности газоанализаторов в измерительном комплексе «FluxNIES» дважды в сутки используется процедура калибровки по стандартным газовым смесям. Концентрации CO_2 и CH_4 в трех баллонах (в нейтральной среде чистого синтетического воздуха в атмосферных пропорциях) были подобраны таким образом, чтобы в первом случае они заведомо превышали наибольшие концентрации этих газов, достижимые в рабочих (закрытых) автоматических камерах (и в разные годы составляли для CO_2 от 450 до 612 млн⁻¹, а для CH_4 — от 5 до 10 млн⁻¹), во втором сопоставимы с атмосферными фоновыми значениями, а в третьем являлись очень низкими (для CO_2 — от 0 до 318 млн⁻¹, для CH_4 — от 1,7 до 1,8 млн⁻¹). По изменению сигналов газоанализаторов $dC(t)$, в зависимости от известных концентраций в газовых смесях, определяется текущее значение коэффициента калибровки прибора $S(t)$ (млн⁻¹/мВ), которое в идеале должно быть постоянным. Однако, анализ циклов калибровки (в течении всего периода измерений) показал, что полученные значения $S(t)$ для используемых газоанализаторов непостоянны и зависят от внешних погодных условий, поэтому возможна дополнительная их коррекция (причем для CO_2 -анализатора она незначительна, тогда как датчик метана нуждается в ней постоянно).

Для NDIR CO_2 -газоанализаторов найдена значимая корреляция сигнала с атмосферным давлением P (гПа). На измерения CH_4 в большей степени влияют изменения температуры окружающей среды T (°C) и связанные с ней флуктуации потока воздушной пробы через анализируемый объем.

Для уменьшения вариативности $S(t)$, результаты всех измерений были скорректированы с использованием найденных зависимостей по следующим формулам:

$$\begin{aligned} S_{\text{CO}_2}(t_k) &= \Delta C_{\text{CO}_2} / (dC_{\text{CO}_2}(t_k) + K_{\text{CO}_2} \cdot (P_0 - P(t_k))), \\ S_{\text{CH}_4}(t_k) &= \Delta C_{\text{CH}_4} / (dC_{\text{CH}_4}(t_k) + K_{\text{CH}_4} \cdot (T_0 - T(t_k))), \end{aligned} \quad (1)$$

где t_k время калибровки, ΔC_{CO_2} и ΔC_{CH_4} максимальные разности концентраций в стандартных газовых смесях (млн⁻¹), $dC_{\text{CO}_2}(t_k)$ и $dC_{\text{CH}_4}(t_k)$ — соответствующие им разности сигналов газоанализаторов (мВ), K_{CO_2} (мВ/гПа) и K_{CH_4} (мВ/°C) эмпирические коэффициенты, $P_0 = 1000$ гПа и $T_0 = 0$ °C исходные давление и температура окружающей среды.

Для наиболее точного определения величин газовых потоков при обработке изменения выходных сигналов газоанализаторов $dC(t)/dt$ (мВ·сек⁻¹) в режиме закрытой камеры использовался метод наименьших квадратов с определением линейности процесса по коэффициенту

парной корреляции R . Ширина окна фильтрации данных определялась по максимальному значению R^2 , что соответствовало наибольшим значениям фиксируемых эмиссии/стока исследуемых газов на границе «почва — атмосфера». Так как использовалось двадцатисекундное усреднение данных измерений сигналов приборов газоанализа, размер окон фильтрации составлял от 2 до 4 минут (или 6—12 точек отсчета) из-за разности в длине воздушных трактов для отдельных камер комплекса.

Для удобства дальнейшего анализа данных в измерении газовых потоков принято переходить к весовым характеристикам (мг·м⁻²·час⁻¹), которые вычисляются по известной формуле [Ivanov et al., 2017]:

$$F(t) = S_n(t) \cdot dC(t)/dt \cdot 100 \cdot P / (273,15 + T) \times M / 8312,6 \cdot V / S \cdot 3600, \quad (2)$$

где $S_n(t)$ — коэффициенты калибровки прибора — см. выше формулу (1), P — атмосферное давление (гПа), T — средняя температура воздуха во время экспозиции камеры (°C), M — молярная масса газа (г·моль⁻¹), 8312,6 — универсальная газовая постоянная (Дж·кмоль⁻¹·К⁻¹), V и S объем и площадь основания применяемых камер (м³ и м², соответственно), 3600 — число секунд в часе.

МЕСТО ПРОВЕДЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

Измерения проводились на полевом стационаре «Plotnikovo» Института почвоведения и агрохимии СО РАН (ИПА, Новосибирск, Россия) на Бакчарском болоте в Томской области в теплое время года (с мая по октябрь). Измерительная площадка, обозначенная литерой «Е», находится примерно в 16 км от поселка Плотниково Бакчарского района [Maksyutov et al., 1999; Краснов и др., 2013]. Координаты площадки 56°51' с.ш., 82°51' в.д.

На рис. 2 представлены спутниковый снимок и схема расположения автоматических камер на измерительной площадке.

Удельные потоки метана определялись при помощи автоматического метода закрывающихся динамических камер (*non-steady-state through-flow systems*) согласно рекомендациям ICOS [Pavelka et al., 2018]: шесть одинаковых камер из прозрачного оргстекла (0,9·0,9·0,5 м³) с пневматическим приводом верхних крышек были установлены на увлажненной части открытого мезотрофного болота, покрытого в основном травой и мхом. Они были расставлены на различных участках болотного микрорельефа таким образом, чтобы тип подстилающей поверхности на каждом из них соответствовал характерной растительной ассоциации.

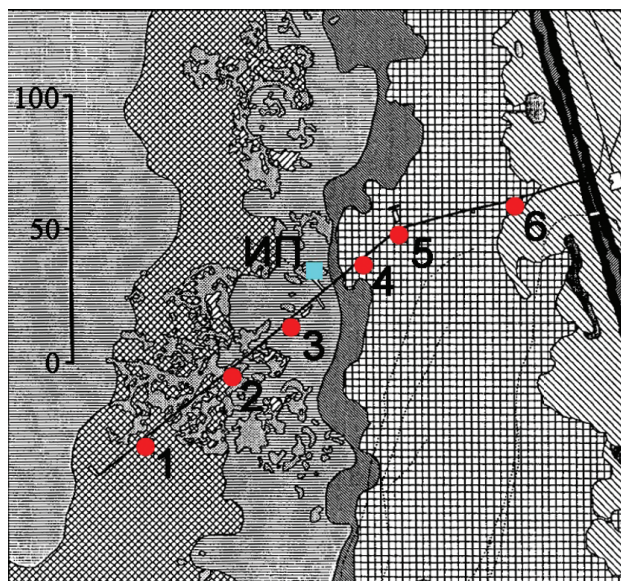
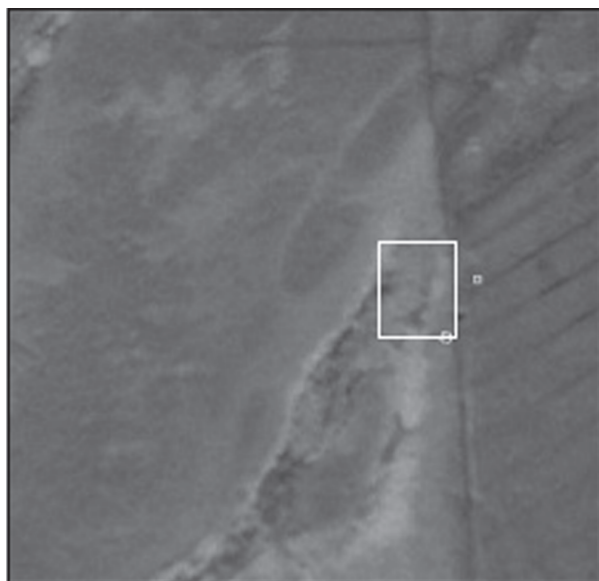


Рис. 2. Космический снимок местности и схема расположения автоматизированного комплекса «Flux-NIES» на болотной площадке «Е» согласно [Maksyutov et al., 1999]. (●) точки установки измерительных камер и их номера; (■) местоположение измерительного поста (ИП) для газоанализа и регистрации метеопараметров

Формируемый камерами профиль из точек наблюдений проложен от обводненной топи к сосново-кустарничково-сфагновому фитоценозу.

Первая и вторая точки наблюдений соответствуют пушицево-сфагновому фитоценозу. Камера 1 расположена на некотором повышении, травяной ярус представлен кочками пушицы (*Eriophorum vaginatum* L.) — проективное покрытие (п.п.) 50%, хвощом болотным (*Equisetum palustre*) — п.п. 30%, осокой (*Carex limosa*) — п.п. 5%, также встречаются единичные растения вахты (*Menyanthes trifoliata*). Моховой покров состоит в основном из *Sphagnum angustifolium* (п.п. 80%). Камера 2 отличается более высокой степенью обводненности, травянистая растительность представлена пушицей — п.п. 50%, единичными экземплярами вахты, осоки и хвоща. Моховой покров состоит в основном из *S. cuspidatum* — п.п. 70%.

Третья и четвертая точки наблюдений расположены в осоково-сфагновом фитоценозе, растительный покров которого состоит из осок (*Carex rostrata*, *Carex limosa*) — п.п. 50%, встречаются единичные растения вахты и клюквы (*Oxycoccus microcarpus* Turcz.). В камере 3 моховой покров представлен *Sphagnum angustifolium* (п.п. 100%), в камере 4 — *S. angustifolium* и *S. papillosum* (п.п. 80%).

По мере продвижения к облесенной части болотной окраины в растительном покрове появляются кустарнички кассандры (*Chamaedaphne calyculata*) — п.п. 10%, встречаются единичные экземпляры андромеды (*Andromeda polifolia*),

в травяном ярусе преобладает *Carex limosa* (п.п. 40%) в сочетании с пушицей (п.п. 20%). В моховом покрове камеры 5 встречаются *Sphagnum angustifolium* и *S. lindbergii* (п.п. 80%).

Шестая точка наблюдений расположена в сосново-кустарничково-сфагновом фитоценозе. Древесный ярус разреженный и представлен *Pinus silvestris* f. *Litwinowii* высотой 2–3 м. В кустарничковом ярусе доминирует кассандра (п.п. 10%), встречаются единичные кустики багульника (*Ledum palustre* L.), довольно обильно растет на кочках клюква (п.п. 15%), в травяном ярусе преобладает пушица (п.п. 40%), встречается морошка (*Rubus chamaemorus*) — п.п. 3%. Моховой покров в камере 6 мозаичный, представлен несколькими видами сфагновых мхов (*Sphagnum fuscum*, *S. angustifolium*, *S. magellanicum*) с вкраплениями зеленого мха (*Polytrichum strictum*).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

На рисунке 3 представлены результирующие газовые удельные потоки на границе «почва-атмосфера», полученные в ходе измерительных кампаний последних лет. Анализ данных показывает, что наиболее продуктивная эмиссия и поглощение CO₂ в болотных растительных ассоциациях наблюдались для камер 1–3, относящихся к центральному участку открытой топи. Меньшие значения удельных потоков CO₂ зафиксированы на окраине болота в камерах 5 и 6.

Среднее сезонное поглощение CO₂ из атмосферы значительно варьируется год от года, как

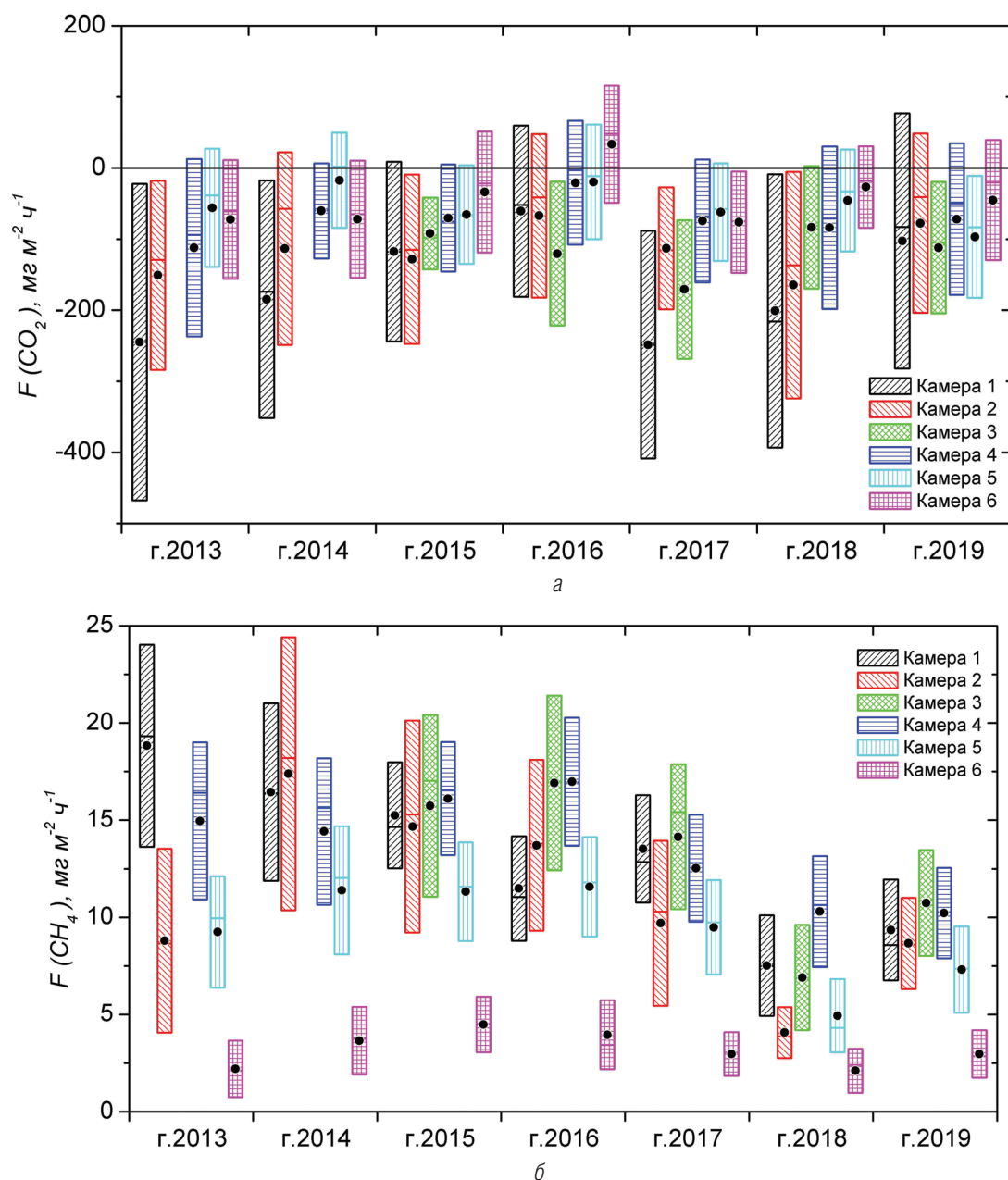


Рис. 3. Среднесезонные (июнь – сентябрь) удельные потоки CO_2 (а) и CH_4 (б) на границе болотная «почва – атмосфера» на Бакчарском болоте в 2013–2019 гг. (•) средние суточные значения; (—) медианные суточные значения; (▨) области среднеквадратических отклонений

Таблица 1

Корреляционный анализ данных и среднесезонные значения по увлажнению болотной топи в 2014–2019 гг.

Годы	2015	2016	2017	2018	2019	WL сред. ± СКО, м	WL min, м	WL max, м	$T_{130 \text{ см}}$ сред., °C
2014	0,570	0,369	0,872	0,688	0,698	$-0,125 \pm 0,083$	-0,252	0,054	+6,21
2015	1	-0,26	0,286	0,199	-0,06	$-0,120 \pm 0,059$	-0,261	-0,002	+6,88
2016		1	0,519	0,481	0,752	$-0,166 \pm 0,068$	-0,298	-0,052	+6,42
2017			1	0,690	0,771	$-0,141 \pm 0,062$	-0,263	-0,018	+6,92
2018				1	0,803	$-0,038 \pm 0,042$	-0,114	0,075	+5,96
2019					1	$-0,132 \pm 0,083$	-0,264	-0,004	+6,40

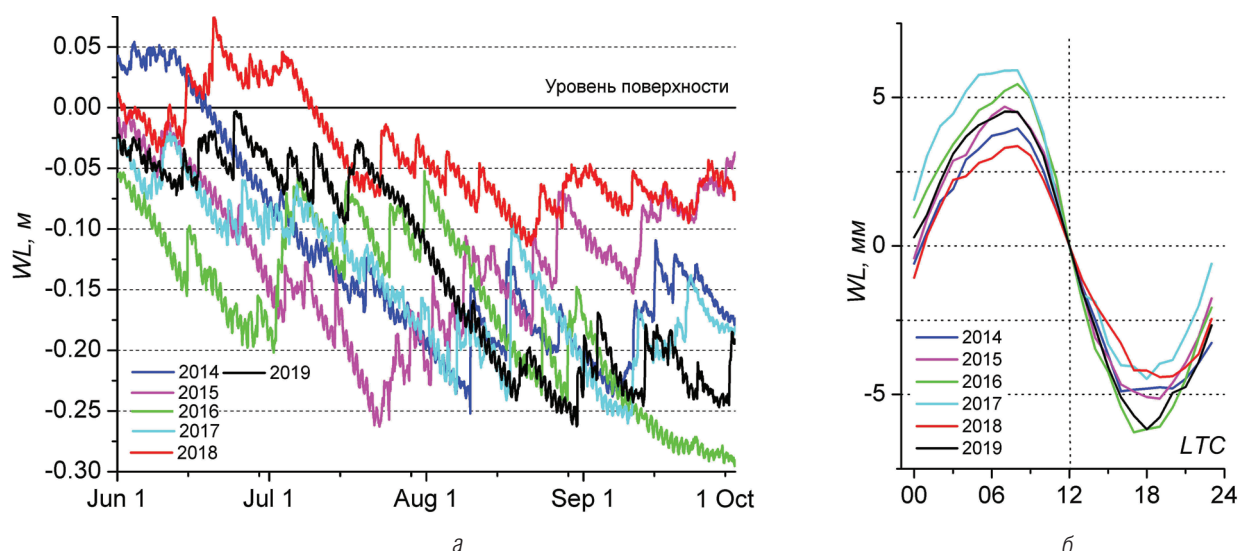


Рис. 4. Многолетнее сезонное поведение уровня почвенных вод (*а*) и его суточный ход (*б*), нормированный на среднесуточное значение и приведенный к 12-ти часам местного времени (LTC). (Бакчарское болото, 2014–2019 гг.)

для отдельных растительных ассоциаций, так и для экосистемы в целом. Например, суммарные показатели стока CO_2 на болотную поверхность в 2017 году значительно превысили величины, наблюдавшиеся в измерительном сезоне 2016 (рис. 3, *а*).

Причины такого разброса в поглощении атмосферного углерода болотной поверхностью кроются в погодных условиях конкретного года наблюдений. Хотя болота трудно рассматривать как страдающие от засухи территории, сезоны пониженного уровня стояния почвенных вод здесь так же наблюдаются, что сказывается на продуктивности местных растительных ассоциаций.

На рисунке 4, *а* приведена запись многолетних сезонных показателей уровня почвенных вод (WL) по данным датчика НОВО U20-001-04, установленного в центре измерительной площадки «Е» на глубине 130 см. Подробный межсезонный анализ данных WL в таблице 1 выявил высокую значимую корреляцию поведения почвенных вод в 2014 и 2017 гг., когда наблюдался наиболее эффективный сток CO_2 в болотных экосистемах (рис. 3, *а*).

Однако, для средних показателей потоков углеродного обмена критерий сезонных колебаний WL не столь надежен. Например, при схожих значениях стока CO_2 в 2015 и 2019 гг. корреляции в поведении почвенных вод за эти годы не наблюдалось. Вместе с тем в 2019 году колебания WL показали исключительную корреляцию с другими измерительными сезонами, что заставляет считать его эталонным по данной характеристике исследуемой болотной экосистемы (табл. 1).

Стоит отметить наличие устойчивого суточного хода у WL (рис. 4, *б*), определяемого дневным испарением из торфяной залежи и ночной адвекцией вод по всей площади болота [Eppinga et al., 2008]. Для наблюдавшегося в 2016 году спада поглощения CO_2 в болотных экосистемах было зафиксировано повышенное испарение почвенной влаги по сравнению с другими сезонами (рис. 4, *б*).

Зафиксированное межгодовое поведение потоков метана в исследуемой экосистеме показывало достаточно стабильные величины эмиссии CH_4 в 2013–2017 гг., причем суммарное выделение метана в открытой топи (камеры 1–5) оказалась значительно выше по сравнению с участком рям (камера 6). Однако, в сезоне 2018 г. значения эмиссии CH_4 показали почти повсеместное падение в 1,5–2 раза (рис. 3, *б*).

Причины такого критического изменения в газообмене с поверхности болотной экосистемы были связаны с наблюдавшимися аномальными количествами осадков и высокими значениями WL в период выхода процессов метаногенеза на сезонный максимум в конце июня – начале июля 2018 г. (рис. 4, *а*). Приток избыточной атмосферной влаги мог вызвать вымывание и вынос за пределы болота питательного субстрата необходимого для жизнедеятельности метаногенных микроорганизмов, а также нарушить баланс биохимических процессов, отвечающих за окисление CH_4 в болотных экосистемах [Калужный, 2018]. Суточный ход WL в 2018 году показал наименьшую амплитуду колебаний (рис. 4, *б*).

Влияние погодной аномалии 2018 г. на газообмен в болотных экосистемах подробно рассматривается в работе [Дьячкова и др., 2019].

Величина газовых потоков в болотных экосистемах определяется не только уровнем почвенных вод, но и сезонным поведением таких характеристик окружающей среды как инсоляция подстилающей поверхности и прогрев торфяной залежи. В работе [Краснов и др., 2015] приводятся подробные данные измерений температуры болотной почвы на различной глубине для двух участков измерительной площадки «Е» на полевом стационаре «Plotnikovo»: с повышенной (камера 2) и пониженной (камера 5) увлажненностью. С использованием теории теплопроводности Фурье было определено время запаздывания проникновения импульса тепла в торфяной толще для периода активного развития процессов метаногенеза в июне 2014 г. К сожалению, в данной работе удельные потоки CH_4 были рассчитаны по завышенным коэффициентам калибровки (из-за выхода характеристики сенсора метана в область нелинейности), так что можно проследить лишь качественную зависимость их величины от температуры прогрева торфяной залежи в отдельные дни измерительной кампании.

С другой стороны, авторы работы [Веретенникова и Дюкарев, 2017] подробно описали взаимосвязь поведения эмиссии метана и температуры торфа для открытой топи на другом участке Бакчарского болота в 2013–2014 гг., но получили явно заниженные медианные значения суточных удельных потоков CH_4 (менее $2 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$). Следует отметить, что в данном исследовании для измерений использовался метод переносных статических камер, который не позволяет охватить достаточно длительный временной период.

В работах [Sabrekov et al., 2013; Глаголев и др., 2017] приведены данные крупномасштабных исследований удельных потоков CH_4 (тем же методом статических камер) и температур верхнего почвенного слоя на Бакчарском болоте в 2008, 2011 и 2015 гг. На участке открытой топи, сравнимого с условиями для камер 1–5 измерительного комплекса «Flux-NIES», измеренные потоки метана в июле 2008 г. составляли $10,5\text{--}36 \text{ мгС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$ (или $14\text{--}48 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$). На участке рья в сосново-кустарничково-сфагновом сообществе (микрорельеф с доминированием *Pinus sylvestris*), сравнимого с условиями для камеры 6 измерительного комплекса «Flux-NIES», в августе 2015 г. была зарегистрирована слабая эмиссия CH_4 с медианным значением $0,3 \text{ мгС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$ (или $0,4 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$).

Наконец, авторы работы [Friborg et al., 2003] проводили исследования газовых потоков непосредственно на полевом стационаре «Plotnikovo» методом турбулентных пульсаций (*eddy covariance*). На основании данных трех измеритель-

ных кампаний в мае, июле и сентябре 1999 г. были получены следующие среднесезонные удельные потоки: $-2247 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$ (или около $-100 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$) для CO_2 ; $136 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$ (или $\sim 6 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$) для CH_4 . Сравнивая результаты исследований газовых потоков в данной болотной экосистеме двумя автоматическими методами, получаем хорошее их совпадение, если взять за точку турбулентных измерений (т. н. *footprint*) микрорельеф между камерами 5 и 6.

ВЫВОДЫ

Многолетнее использование автоматизированного камерного метода показало эффективность его применения для исследований поведения газовых потоков на болотной поверхности во временном и пространственном масштабах.

Интегральные значения потоков CO_2 за весь период измерений показывают, что поверхности западносибирских болот являются мощным «поглотителем» атмосферного углерода. При этом, величины эмиссии CH_4 из различных участков болотных почв зависят от типа растительности, уровня увлажнения и прогрева торфяной залежи. Наибольшие величины эмиссии CH_4 из болот наблюдаются в июле и достигают довольно больших величин в открытой топи ($15\text{--}25 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$). Наименьшими значениями эмиссии CH_4 характеризовался участок рья ($2\text{--}3 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$).

Отмечено значительное снижение показателей эмиссии CH_4 с болотной поверхности почти на всех измерительных участках в 2018 г. Это увязывается с наблюдавшимися погодными аномалиями в период выхода процессов метаногенеза на максимальные сезонные показатели.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-45-700020 р_а. Для выполнения гранта использовалась инфраструктура ИОА СО РАН, созданная и эксплуатируемая по госзаданию № АААА-А17-117021310142-5, включая ЦКП «Атмосфера». Обеспечение полевых измерений осуществлялось при участии Фонда глобальных исследований окружающей среды для Национальных институтов Министерства окружающей среды Японии.

Авторы статьи благодарят Головацкую Е.А. за предоставленное подробное описание растительных ассоциаций исследуемой болотной экосистемы; Аршинова М.Ю. за помощь в составлении стандартизированной блок-схемы измерительного комплекса; Плотникова А.А. за

техническую поддержку непрерывных измерений в течении многих лет.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белан Б.Д., Аршинов М.Ю., Козлов А.В., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А. 2017. Автоматическая камера для измерения потоков парниковых газов на поверхности раздела почва-атмосфера // Патент на полезную модель № 169373. Правообладатель: ИОА СО РАН (RU).
2. Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. 1961. Методы определения физических свойств почв и грунтов в поле и лаборатории. М.: Высшая школа. С. 345.
3. Веретенникова Е.Э., Дюкарев Е.А. 2017. Суточные вариации эмиссии метана с поверхности болотных экосистем Западной Сибири в летний период // Метеорол. и гидрол. № 5. С. 69-79.
4. Глаголев М.В. 2010. Аннотированный список литературных источников по результатам измерений потоков CH_4 и CO_2 на болотах России // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. Т. 1. № 2. DOI: 10.17816/edgcc121.
5. Глаголев М.В., Ильясов Д.В., Терентьева И.Е., Сабреков А.Ф., Краснов О.А., Максюттов Ш.Ш. 2017. Потоки метана и диоксида углерода в заболоченных лесах южной и средней тайги Западной Сибири // Оптика атмосф. и океана. Т. 30. № 4. С. 301-309. DOI: 10.15372/A0020170407.
6. Дьячкова А.В., Давыдов Д.К., Фофонов А.В., Краснов О.А., Головацкая Е.А., Симоненков Д.В., Nakayama T., Максюттов Ш.Ш. 2019. Влияние аномальных факторов среды на эмиссию метана на Бакчарском болоте в районе п. Плотниково летом 2018 г. // Оптика атмосф. и океана. Т. 32. № 6. С. 482-489. DOI: 10.15372/A0020190611.
7. Калюжный И.Л. 2018. Общие черты формирования гидрохимического режима основных типов болот России // Метеорол. и гидрол. № 8. С. 72-81.
8. Краснов О.А., Maksyutov S., Глаголев М.В., Катаев М.Ю., Inoue G., Надеев А.И., Шелевой В.Д. 2013. Автоматизированный комплекс «Flux-NIES» для измерения потоков метана и диоксида углерода // Оптика атмосф. и океана. Т. 26. № 12. С. 1090-1097.
9. Краснов О.А., Maksyutov S., Давыдов Д.К., Фофонов А.В., Глаголев М.В., Inoue G. 2015. Мониторинг эмиссии метана и двуоксида углерода из почвы в атмосферу и параметры почвы. Бакчарское болото Томской области (2014 г.) // Оптика атмосф. и океана. Т. 28. № 7. С. 644-654. DOI: 10.15372/A0020150707.
10. Махныкина А.В., Прокушкин А.С., Ваганов Е.А., Верховец С.В., Рубцов А.В. 2016. Динамика потоков CO_2 с поверхности почвы в сосновых древостоях Средней Сибири // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Биология. Т. 3. № 9. С. 338-357.
11. Молчанов А.Г. 2017. Газообмен диоксида углерода с поверхности сфагнома в заболоченном сосняке южной тайги // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. Т. 8. № 1. С. 43-54.
12. Ciais P., Sabine C., Bala G., Bopp L., Brovkin V., Canadell J., Chhabra A., DeFries R., Galloway J., Heimann M., Jones C., Quirry C. Le, Myneni R.B., Piao S., Thornton P. 2013. Carbon and other biogeochemical cycles // Climate Change: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. P. 570. Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9781107415324.015
13. Dyukarev E., Godovnikov E., Karpov D., Kurakov S., Lapshina E., Filippov I., Filippova N., Zarov E. 2019. Net ecosystem exchange, gross primary production and ecosystem respiration in ridge-hollow complex at Mukhrino bog // Geography Environment Sustainability. V. 12. N. 2. P. 227-244. DOI: 10.24057/2071-9388-2018-77.
14. Eppinga M.B., Rietkerk M., Borren W., Lapshina E.D., Bleuten W., Wassen M.J. 2008. Regular surface patterning of peatlands: Confronting theory with field data // Ecosystems. V. 11. P. 520-536. DOI: 10.1007/s10021-008-9138-z.
15. Friberg T., Soegaard H., Christensen T.R., Lloyd C.R., Panikov N.S. 2003. Siberian wetlands: Where a sink is a source // Geophysical Research Letters V. 30. N. 21. P. 2129. DOI: 10.1029/2003GL017797.
16. Ivanov D.G., Avilov V.K., Kurbatova Y.A. 2017. CO_2 fluxes at south taiga bog in the European part of Russia in summer // Contemporary Problems of Ecology. V. 10. N. 2. P. 97-104. DOI: 10.1134/s1995425517020056.
17. Maximov T.C., Dolman A.J., van Huissteden J., Ohta T., Sugimoto A., Maximov A.P., Kononov A.P., Petrov R.E., Ivanov B.I. 2012. Carbon budget in forest and tundra permafrost ecosystems of north-east Russia // Proceedings of the 5th International Workshop on $\text{C}/\text{H}_2\text{O}$ /Energy balance and climate over boreal and arctic regions with special emphasis on eastern Eurasia (11-13 November 2010, Wageningen, The Netherlands). Amsterdam. P. 21-24.
18. Maksyutov S., Inoue G., Sorokin M., Nakano T., Krasnov O., Kosykh N., Mironycheva-Tokareva N., Vasiliev S. 1999. Methane fluxes from wetland in West Siberia during April-October 1998 // Proc. Seventh Sympos. on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 1998. Tsukuba: Isebu. P. 115-124.
19. Nakano T., Inoue G., Maksyutov S., Sorokin M. 1999. Automatic measurements of methane flux in West Siberian wetlands in 1997 summer // Proceedings of the Seventh Symposium on the Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 1998. Tsukuba: Isebu. P. 211-215.
20. NOAA/ESRL. 2017. URL: <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/global.html> (the date of access: 01.12.2020).
21. Suto H., Inoue G. 2010. A new portable instrument for in situ measurement of atmospheric methane mole fraction by applying an improved tin dioxide-base gas sensor // J. Atmos. Ocean. Technol. V. 27. P. 1175-1184.
22. Sabrekov A.F., Glagolev M.V., Kleptsova I.E., Machida T., Maksyutov S.S. 2013. Methane Emission from Mires of the West Siberian Taiga // Eurasian Soil Science. V. 46. No. 12. P. 1182-1193. DOI: 10.1134/S1064229314010098.

23. Pavelka M., Acosta M., Kiese R., Altimir N., Брэммер С., Crill P., Darenova E., Fuß R., Gielen B., Graf A., Klemetsson L., Lohila A., Longdoz B., Lindroth A., Nilsson M., Jiménez S.M., Merbold L., Montagnani L., Peichl M., Pihlatie M., Pumpanen J., Ortiz P.S., Silvennoinen H., Skiba U., Vestin P.,

Janous D., Kutsch W. 2018. Standardisation of chamber technique for CO₂, N₂O and CH₄ fluxes measurements from terrestrial ecosystems // *Int. Agrophys.* V. 32. P. 569–587. DOI: 10.1515/intag-2017-0045.

Поступила: 19.04.2021

Одобрена: 15.05.2021

Принята: 20.06.2021



NATURAL FEATURES OF THE ORCHID REFUGIUM ON THE TERRITORY OF THE NATURAL PARK «SAMAROVSKY CHUGAS»P.V. Bolshanik¹, S.B. Kuznetsova¹, D.D. Karaseva¹¹ Ugra State University, Khanty-Mansiysk, Russia

Автор для переписки: P.V. Bolshanik, e-mail: bolschpetr@mail.ru

Citation: Bolshanik P.V., Kuznetsova S.B., Karaseva D.D. 2021. Natural features of the orchid refugium on the territory of the natural park «Samarovsky chugas»// Environmental dynamics and global climate change. V. 12. N 1. P. 15–26. DOI: <https://doi.org/10.17816/edgcc50667>

В статье рассматриваются природные условия и биологические ресурсы, ландшафтные особенности ключевой территории природного парка «Самаровский чугас», расположенного в черте города Ханты-Мансийска. Дается обзор географических исследований природного парка. Характеризуются основные компоненты, влияющие на формирование природных комплексов особо охраняемой природной территории. Особое внимание уделяется характеристике растительности и процессам антропогенного изменения ландшафтов данного ключевого участка. Выделяются основные пути трансформации растительности, вызванные хозяйственной деятельностью, изменением характера поверхностного стока. Характеризуются условия эколого-географические условия рефугиума орхидных. Обосновывается необходимость наделения исследуемого участка в качестве зоны с заповедным режимом в пределах территории природного парка.

Ключевые слова. Рефугиум, семейство *Orchidaceae*, флора, особо охраняемые природные территории, антропогенная трансформация растительности.

ВВЕДЕНИЕ

Экологическая ситуация в Югре, основном нефтедобывающем регионе России, характеризуется высоким уровнем антропогенного и техногенного воздействия на окружающую среду, низкими показателями здоровья окружающей среды, а также интенсивным развитием процессов деградации естественных экологических систем. Ханты-Мансийск является столицей Ханты-Мансийского автономного округа — Югры. На его территории расположен природный парк «Самаровский чугас», который подвергается интенсивному селитебному и туристско-рекреационному воздействию. Поэтому основной целью исследования являлось выделение участков на территории природного парка с заповедным режимом, в отношении определенных эколого-географических ниш (рефугиум) произрастания орхидных.

Виды семейства *Orchidaceae* не только наиболее интересная, но и наиболее уязвимая часть флоры. Большинство орхидных — это редкие виды. Основная причина сокращения популяций видов семейства *Orchidaceae* на территории Ханты-Мансийского автономного округа — это растущее промышленное освоение, связанное, в первую очередь, с нефтегазодобычей, развитием местной инфраструктуры, бурным ростом населения городов и поселений округа. При этом происходит изменение естественных

биоценозов, что может привести к снижению устойчивости редких видов. Поэтому актуальны вопросы поиска новых местообитаний, оценки устойчивости популяций и выявления факторов, ограничивающих их в условиях северных регионов [Шепелева Л.Ф., Лукьяненко Д.Н., 2009].

Большинство видов семейства *Orchidaceae* на территории России — это редкие виды, требующие охраны. На территории Ханты-Мансийского автономного округа произрастает 25 видов из 16 родов семейства *Orchidaceae*. Из них 18 видов (72,2%) занесены в Красную книгу ХМАО, 7 видов (10,6%) в Красную книгу Российской Федерации [Определитель, 2006; Красная книга, 2013; Красная книга, 2008].

Природный парк «Самаровский Чугас» расположен на территориях муниципальных образований — Ханты-Мансийский район и город Ханты-Мансийск. На территории природного парка «Самаровский Чугас» ранее отмеченное число видов семейства *Orchidaceae* — 6 (гудайера ползучая — *Goodyera repens* (L.) R.Br., пальчатокоренник гебридский — *Dactylorhiza hebridensis* (Billmot) Aver, венерин башмачок капельный — *Cypripedium guttatum* Sw., поллопестник зеленый — *Coeloglossum viride* (L.) C. Hartm., бровник одноклубневый — *Herminium monorchis* (L.) R. Br., мякотница однолистная — *Mycrostylis monophyllos* (L.) Lindley [Летопись, 2017]. Из них 4 вида вне-

сены в Красную Книгу ХМАО — *Cypripedium guttatum* Sw., *Coeloglossum viride* (L.) C. Hartm., *Herminium monorchis* (L.) R. Br., *Mycrostylis monophyllos* (L.) Lindley.

Венерин башмачок капельный, пололепестник зеленый, мякотница однолистная отнесены по шкале редкости Красной книги РФ к 3 категории — редкие, бровник одноклубневый к 0 категории — вероятно, исчезнувшие, но возможность их сохранения нельзя исключить [Определитель, 2006].

Как на территории округа в целом, так и на территории природного парка в частности наблюдается сокращение популяций видов семейства *Orchidaceae*. Как правило, общими лимитирующими факторами для данных представителей семейства *Orchidaceae* на территории округа являются: низкая конкурентная способность, малочисленность популяций, слабое семенное возобновление, нарушение местообитаний вследствие усиленной антропогенной нагрузки (рубка лесов, пожары, выпас оленей, мелиорация и торфоразработки, рекреация, сбор на букеты и для лекарственных целей, выкапывание с целью интродукции [Определитель, 2006; Красная книга, 2013; Красная книга, 2008]. На территории Югры недостаточно сведений о распространении представителей семейства *Orchidaceae*. Встречаемость разных видов орхидей была оценена на территориях заповедника «Малая Сосьва», природного парка «Кондинские озера» Советского района, заповедника «Юганский» в Сургутском районе и на территории междуречья Большого Салыма и Иртыша.

Как правило, общими лимитирующими факторами для данных представителей семейства Орхидные на территории округа являются: низкая конкурентная способность, малочисленность популяций и нарушение местообитаний вследствие усиленной антропогенной нагрузки (рубка лесов, пожары, выпас оленей, рекреация).

Для вида *Cypripedium guttatum* Sw., помимо вышеперечисленных факторов, дополнительным фактором служит сбор на букеты и для лекарственных целей, выкапывание с целью интродукции и слабое семенное возобновление.

Лимитирующим фактором для *Mycrostylis monophyllos* (L.) Lindley является хозяйственное освоение территории, мелиорация и торфоразработки [Красная книга, 2013].

Поиск новых местообитаний, описание физико-географических условий произрастания, выявление факторов, ограничивающих распространение представителей семейства *Orchidaceae* в условиях северных регионов

являются весьма актуальными, что и явилось задачами нашего исследования

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Район исследования (рис. 1) расположен к северо-востоку от селитебной части г. Ханты-Мансийска и юго-западу от международного аэропорта и входит в состав природного парка «Самаровский чугас». Северо-западной границей участка является Обьездная дорога (азимут 247°), северо-восточной границей — велосипедная дорожка (азимут 336°), юго-восточной границей — трасса Ханты-Мансийск — Сургут (азимут 57°), юго-западной границей — территория землепользования Югорского научно-исследовательского института информационных технологий (азимут 152°). Конфигурация исследуемого участка напоминает трапецию, вытянутую в северо-восточном направлении. Площадь исследуемого участка 10,23 га. Координаты крайних точек участка: северо-западный угол — 61°01'18,4206» и 69°05'09,3148», северо-восточный угол — 61°01'21,1525» и 69°05'34,9610», юго-восточный угол — 61°01'10,3365» и 69°05'18,0438», юго-западный угол — 61°01'16,5119» и 69°05'38,3599».

Собственные полевые исследования авторов были направлены на изучение флористического богатства участка, заложении рекогносцировочных маршрутов с фотографированием видов флоры, проведении геоботанического и геоморфологического профилей, описании характерных ландшафтов, выполнении ландшафтного картографирования, характеристике рельефа ключевого участка.

Обследование территории проводилось методом маршрутно-глазомерной съемки. Через 250 м делались станции с полным геоботаническим эталонным описанием. Закладывались геоботанические профили шириной 5 м по пересечению рельефа. На территории ключевого участка заложено 4 профиля и сделано 18 описаний растительных сообществ.

Онтогенетические состояния представителей семейства *Orchidaceae* выделены по общепринятым методикам (Ценопопуляции растений, 1988) с учетом особенностей описания онтогенеза орхидных (Вахрамеева и др., 1991). В популяционно-онтогенетических исследованиях за счетную единицу орхидных со стеблекорневым тубероидом принята особь, для корневищных видов — парциальный побег (Ценопопуляции растений, 1988). Возрастная структура популяций видов семейства *Orchidaceae* подробно не изучалась. Был проведен подсчет особей генеративного и предгенеративного состояния.

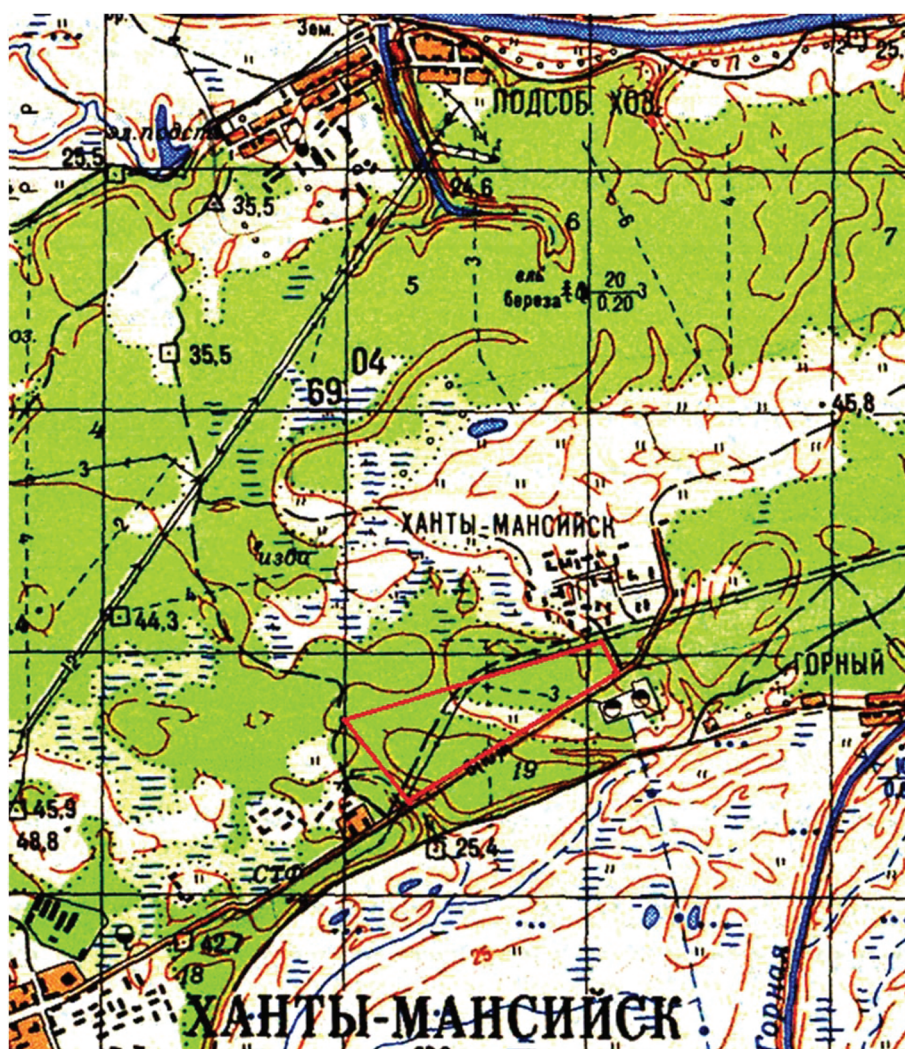


Рис. 1. Географическое положение исследуемого участка

История создания природного парка и изучение его природных условий и ресурсов

В целях сохранения уникальных природных комплексов и в соответствии с Федеральным законом «Об особо охраняемых природных территориях» Распоряжением Президиума Правительства Ханты-Мансийского округа от 17 октября 2000 г. № 375-рпп создается учреждение — Природный парк «Ханты-Мансийские холмы». В январе 2001 г. Парк приобретает статус государственного учреждения и окончательное свое название — Природный парк регионального значения «Самаровский чугас». В марте 2013 г. Постановлением правительства Ханты-Мансийского автономного округа — Югры № 65-п утвержден правоустанавливающий документ «Об образовании природного парка «Самаровский чугас».

При разработке проекта природного парка принимали участие следующие организации: Западно-Сибирское государственное

унитарное лесоустроительное предприятие — «Запсиблеспроект» (Генеральный подрядчик), Западно-Сибирское отделение ВНИИОЗ им. проф. Б.М. Житкова РАСХН, Уральский государственный лесотехнический университет, Институт почвоведения и агрохимии СО РАН, Центральный Сибирский ботанический сад СО РАН, Тюменская лесная опытная станция ВНИИЛМ.

Природа территории парка исследовалась многими авторами. Геологическое строение и рельеф территории г. Ханты-Мансийска был проанализирован в коллективной монографии [Волков И.А., Волкова В.С., Гуртовая Е.Е., 1973], где впервые ставится вопрос о происхождении возвышенности. Последующие работы рассматривают две гипотезы происхождения возвышенности — тектоническую и ледниковую [Крапивнера Р.Б., 1979]. Дальнейшие геологические и геоморфологические исследования были дополнены данными бурения, которые свидетельствуют, что в толще горных

пород возвышенности встречаются как аллювиальные, так и ледниковые отложения [Отчет, 1985]. Детальное происхождение эрозионного останца и влияние на него экзогенных геологических процессов рассмотрено в ряде работ [Кусковский В.С., 2002; Большаниĭ П.В., 2017]. Климатические условия исследуемого участка были охарактеризованы на основании данных Ханты-Мансийской метеостанции и обобщены по данным пояснительной записки к Атласу Ханты-Мансийского автономного округа — Югры [Атлас, 2004]. Характеристика почвенно-растительного покрова и животного мира исследована на территории природного парка «Самаровский чугас», так и на территории других ООПТ региона [Антипов А.М., 2001; Байкалова А.С., Звягина Е.А., 2020].

ХАРАКТЕРИСТИКА ПРИРОДНЫХ РЕКРЕАЦИОННЫХ РЕСУРСОВ

Геологическое строение и рельеф

Становление современного рельефа происходило в позднечетвертичное время и было обусловлено развитием боковой эрозии водных потоков и мерзлотными процессами. По низменным равнинам блуждали многочисленные

реки и формировались обширные аллювиальные поверхности. Возраст этих равнин (современных надпойменных террас), включая приледниковую равнину, составляет 13–20 тыс. лет [Волков И.А., Волкова В.С., Гуртовая Е.Е., 1973].

В голоцене оформились современные поймы рек, которые в условиях плоского рельефа и небольших перепадов высот имеют значительную ширину, хотя и уступают аллювиальным равнинам плейстоцена.

Равнинная часть территории природного парка «Самаровский чугас» относится к трем надпойменным террасам реки Оби. Относительная высота третьей надпойменной террасы составляет 45–60 м, первой — до 25 м [Кусковский В.С., 2002].

Рельеф исследуемого участка представлен пологовыпуклой поверхностью второй надпойменной террасы междуречья Оби и Иртыша. Терраса эрозионно-аккумулятивная, располагается на высотах от 33 до 45 м. Терраса сложена в основном опесчаненными суглинками, мощностью более 3 метров, с линзами супесей и мелкозернистых песков, чередование которых придает профилю слоистость. Поверхность террасы прорезает долина временного водотока. Мезорельеф надпойменной террас имеет гриви-



Рис. 2. Пруд в пределах ключевого участка

сто-западинный характер, создающий пестроту в растительном и почвенном покрове.

После строительства Обьездной дороги в 2004 г., изменились условия поверхностного стока и в долине малого водотока образовался пруд (рис. 2) с небольшим островком. Антропогенным элементом рельефа является насыпь Обьездной дороги и проходящая вдоль нее дренажная канава, глубиной 2 м.

Климат и гидрография

Климат исследуемой территории отражает основные закономерности формирования климата Ханты-Мансийского автономного округа-Югры. В силу местоположения исследуемой территории, и её небольшой площади, для характеристики биоклиматических ресурсов вполне корректно использовать данные по многолетним наблюдениям метеостанции г. Ханты-Мансийска.

Температурный режим. В общих чертах температурный режим любой территории определяется количеством поступающей солнечной радиации и дальнейшим её распределением.

К термоэнергетическим ресурсам территории Природного парка относятся следующие показатели. Средняя годовая температура воздуха $-1,1^{\circ}\text{C}$. Зимние месяцы отличаются устойчивыми низкими температурами. Самый холодный месяц – январь со средней температурой $-19,8^{\circ}\text{C}$ (табл. 1).

Приведённые данные позволяют характеризовать биоклиматические ресурсы территории Природного парка как недостаточно обеспеченные теплом с очень холодной и суровой зимой и холодным летом. Дискомфортные условия в зимние месяцы для всех биологических объектов связаны, прежде всего, с сильным переохлаждением. Термические условия летнего сезона свидетельствуют о коротком периоде вегетации.

Условия увлажнения. Основным источником поступления влаги на территорию природного

парка «Самаровский чугас» являются атмосферные осадки. Среднегодовое количество осадков 494 мм (табл. 2). Коэффициент увлажнения (по Н.Н. Иванову) составляет 1,2, что позволяет охарактеризовать условия увлажнения как избыточно влажные.

Распределение осадков по сезонам года неравномерное. Максимальное их количество выпадает с апреля по октябрь (75–83%), особенно много в июле и августе. Зимой, в связи с установлением антициклонального режима и низкой температуры, количество осадков составляет 17–20% от годового количества. Таким образом, на вегетационный период (с мая по сентябрь) приходится до двух третей осадков годовой суммы. Осенний переход среднесуточной температуры через 0°C приурочен к первой декаде октября. В это же время начинается формирование снежного покрова. Устойчивый снежный покров образуется уже к ноябрю. Наибольшей мощности он достигает в марте. Средняя его высота к этому времени составляет 57 см, максимальная — 90 см [Атлас, 2004]. Исходя из всего сказанного выше, исследуемую территорию можно отнести к зоне избыточного увлажнения и недостаточной теплообеспеченности.

Наиболее важные с экологической точки зрения биоклиматические показатели отражены в таблице 3.

После строительства автомагистрали аэропорт — Ханты-Мансийск и подъездных путей к ней отмечается усиление процесса подтопления ландшафтов, что нередко приводит к гибели древостоев от повышения уровня грунтовых вод. Обьездная дорога для ландшафта представляет собой протяжённую низконапорную плотину (барраж). Вдоль дороги, несмотря на оснащённость водопропускными сооружениями, образовались, с одной стороны, интенсивно подтопляемые, а с другой — осушаемые микроландшафты. На грунтах с многолетней мерзлотой ситуация усугубляется процессами термо-

Таблица 1

Температура воздуха, $^{\circ}\text{C}$ (по данным метеостанции г. Ханты-Мансийска)

Средняя месячная						Средняя годовая	Продолжительность периода со среднесуточной температурой $\leq 0^{\circ}\text{C}$, дни	Продолжительность периода со среднесуточной температурой $\leq 10^{\circ}\text{C}$, дни
I	V	VI	VII	IX	X			
-19,8	6,6	14,3	17,5	8,4	-0,7	+1,4	187	98

Таблица 2

Среднемесячная и годовая суммы осадков (мм) (по данным метеостанции г. Ханты-Мансийска)

Средняя месячная						Средняя годовая
I	V	VI	VII	IX	X	
23	48	55	67	54	48	494

Таблица 3

Основные климатические показатели территории Природного парка «Самаровский чугас»
 (по данным метеостанции г. Ханты-Мансийска)

Климатические показатели	
1. Среднегодовая температура, °С	–1,4
2. Среднегодовая сумма осадков, мм	494
3. Термоэнергетические ресурсы в год, ккал/см ²	30
4. Сумма эффективных для вегетации температур, °С	1400
5. Средняя продолжительность вегетационного периода, дни	98
6. Среднегодовой коэффициент увлажнения (по Н.Н. Иванову)	1,2

карста. На исследуемой территории примером такого подтопления является образование пруда в ложбине стока и болота в плосковогнутой водосборной вершине долины малого водотока.

Почвы

Почвообразующими породами на территории Природного парка «Самаровский чугас» являются верхнечетвертичные покровные маломощные лёгкие суглинки, подстилаемые песками или погребенной мореной, и аллювиальные слоистые опесчаненные отложения [Крапивнера Р.Б., 1979].

Формирование верхней толщи четвертичных отложений на территории ХМАО связано с существованием здесь в верхнем плейстоцене подпрудного ледникового озера с абсолютными отметками воды около 120 м. После исчезновения озера сформировались четыре озёрно-ледниковые террасы с абсолютными отметками тылового шва 120, 80, 60 и 40 м. После спуска озера начался этап заложения долин современных рек (9–8 тыс. лет назад) [Волков И.А., Волкова В.С., Гуртовая Е.Е., 1973].

В целом, на исследуемой территории присутствуют выположенные и дренированные водоразделы. Это способствует формированию как автоморфных почв, так и почв с различной степенью гидроморфизма.

Почвенный покров отличается большим разнообразием и резко выраженной мозаичностью, отражая собой результат взаимодействия биоклиматических и литолого-геоморфологических условий.

На приречных частях водоразделов, вершинах увалов и гряд, древних террасах, где грунтовые воды залегают глубоко, под темнохвойными и светлохвойными насаждениями с моховым и мохово-кустарничковым напочвенным покровом почвообразование идет по подзолистому типу. Но выраженность процесса подзолообразования не одинаковая. Она определяется водопроницаемостью почвенной толщи, зависящей главным образом от механического состава по-

чвообразующих пород [Атлас, 2004].

Подзолистые почвы являются преобладающим типом на территории природного парка и формируются на повышенных хорошо дренированных элементах рельефа с глубоким залеганием грунтовых вод под темнохвойным лесом. Там, где подстилающим породам свойственна пониженная водопроницаемость, процесс подзолообразования выражен слабее. Почвенный покров представлен подзолистыми оглеенными почвами с признаками поверхностного, внутри-профильного и глубинного оглеения.

На слабодренированных центральных частях плоских водоразделов, древних террасах и на пологих склонах, то есть в местоположениях, где характерен ослабленный сток поверхностных вод, появляется переувлажнение, которое способствует проявлению болотного процесса и формированию болотно-подзолистых почв.

В межуальных понижениях и замкнутых котловинах определенное влияние на почвообразование оказывают почвенно-грунтовые воды, которые залегают неглубоко от поверхности. Это усиливает развитие болотного процесса почвообразования, независимо от литологии пород, на которых формируются болотные почвы.

Таким образом, на территории района исследования в почвообразовании активно выражено участие двух ведущих процессов — подзолистого и болотного, которые определяют развитие автоморфных, полугидроморфных и гидроморфных почв.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Флора исследуемого участка.

Антропогенное влияние

Биоклиматические условия почвообразования, свойственные средней тайге, усугубляются «отепляющим» влиянием пойменных экосистем Оби и Иртыша. В результате этого в составе растительности встречаются пихта, рябина, можжевельник, бузина столь характерные для подзоны южной тайги. С характером растительного

Таблица 4

Взаимосвязь типов леса и почв ключевого участка

Тип леса	Почвы	Местоположение	Тип увлажнения
Сосняки, березняки багульниково-брусничные	Подзолистые грунтово-глеевые иллювиально-железистые	Нижние части склонов дренированных водоразделов на опесчаненных породах	Гидроморфный
Кедрачи, ельники, пихтовые леса зеленомошно-ягодниковые	Подзолистые	Повышенные участки водоразделов, верхние части грибовидных увалов надпойменных террас на породах легкого состава	Автоморфный, полугидроморфный
Кедрачи, ельники, пихтачи зеленомошно-мелкотравные	Подзолистые поверхностно-глееватые иллювиально-железистые	Повышенные участки водоразделов и надпойменных террас на легкосуглинистых породах	Полугидроморфный

покрова (повышенная зольность опада) связано и появление в почвенном покрове дерново-подзолистых почв.

На основе сопряженного анализа почвенных, геоботанических и лесотаксационных данных о взаимосвязи типов леса и почв, была дана лесорастительная характеристика почв (табл. 4).

Распространение. На территории природного парка «Самаровский Чугас» гудайера ползучая — *Goodyera repens* (L.) R.Br. произрастает в темнохвойных лесах (редко), венерин башмачок капельный — *Cypripedium guttatum* Sw. в смешанных и лиственных лесах (редко), поллопестник зеленый — *Coeloglossum viride* (L.) C. Hartm. в темнохвойных лесах и у ручьев (редко). Местонахождения бровника одноклубного — *Herminium monorchis* (L.) R.Br. и мякотницы однолистной — *Mycrostylis*

monophyllos (L.) Lindley требуют подтверждения [Шепелева Л.Ф., Лукьяненко Д.Н., 2009].

Dactylorhiza hebridensis (Billmot) Aver обичен в темнохвойных лесах. Однако наши наблюдения показывают, что этот вид представлен малыми изолированными популяциями. В лесах в черте города Ханты-Мансийска уменьшается число местонахождений этого вида.

На территории ключевого участка нами встречена большая популяция пальчатокоренника гебридского (табл. 5). Она расположена в двух местообитаниях (табл. 6). Первая приурочена к дренажной канаве, проходящей вдоль объездной дороги. Здесь найдено 307 растений пальчатокоренника гебридского, которые расположены тремя группами (общая протяженность этого местообитания составляет в длину 1087 метров, в ширину от 3 до 6 метров).



Рис. 3. Пальчатокоренник гебридский (*Dactylorhiza maculata*)



Рис. 4. Пальчатокоренник мясочный (*Dactylorhiza incarnata*)



Рис. 5. Ладьян трехраздельный (*Corallorhiza trifida*)



Рис. 6. Ветреница лесная (*Anemone sylvestris* L.)

Крайняя восточная точка этого местообитания имеет координаты $61^{\circ}01'19,9924''$ с.ш. и $69^{\circ}05'24,9961''$ в.д., крайняя западная — координаты $61^{\circ}01'14,9400''$ с.ш. и $69^{\circ}04'35,7893''$ в.д. К популяции пальчатокоренника гебридского (рис. 3) примешивается популяция пальчатокоренника мясо-красного (рис. 4), всего их обнаружено около 10 штук.

Второе местообитание находится под пологом хвойного с примесью мелколиственных пород леса, произрастающего на пологовогнутой котловине водосборной воронки, лежащей в верховьях долины стока. Здесь встречается пальчатокоренник гебридский и ладьян трехраздельный — координаты $61^{\circ}01'14,5283''$ с.ш.

и $69^{\circ}05'30,0172''$ в.д. (рис. 5).

За пределами ключевого участка, но в границах природного парка, находится еще одно местообитание орхидных (координаты $61^{\circ}01'14,5283''$ с.ш. и $69^{\circ}05'30,0172''$ в.д.), со сходными физико-географическими условиями, для которой характерны следующие редкие и охраняемые растения: пальчатокоренник гебридский — 50 растений и ветреница лесная — 9 растений (рис. 6).

Отдельное местообитание образуют ценопопуляции пальчатокоренника гебридского и мясо-красного расположенные на удалении от границ природного парка (координаты $61^{\circ}00'47,7282''$ с.ш. и $68^{\circ}59'50,2049''$ в.д.). Однако и для этого участка характерны аналогичные особенности физико-географических условий. С одной стороны участок защищает насыпь Обьездной дороги, с которой идет дополнительное стоковое увлажнение, с другой стороны защитным барьером является стена леса, все участки хорошо освещаются солнцем в вечернее время и вблизи расположен водоем.

География распространения охраняемых растений на территории ключевого участка показана на рис. 7.

Фауна ключевого участка представлена утками, обитающими в пруду (гоголь обыкновенный *Bucephala clangula* и чернеть хохлатая *Aythya fuligula*) [Антипов А.М., 2001] и млекопитающими леса (белка обыкновенная *Sciurus vulgaris*, бурундук сибирский *Tamias sibiricus*).

Антропогенное воздействие на участок про-



Рис. 7. Расположение редких растений в пределах ключевого участка на аэрофотоснимке (красные звезды — ладьян трехраздельный, оранжевые звезды — пальчатокоренник гебридский, желтые звезды — пальчатокоренник мясо-красный, белая звезда — кизильник черноплодный)

Таблица 5
Редкие виды орхидей исследуемых участков

Название	Статус	Экология и биология	Лимитирующие факторы	Меры охраны	Местоположение в районе исследования
Пальчатокоренник мясо-красный (<i>Dactylorhiza incarnata</i> (L.) Soó)	3 категория. Редкий вид. Внесён в Приложение II Международной конвенции СИТЕС.	лугово-болотный вид. На территории Югры произрастает на осоковых и моховых низинных и переходных болотах, осоково-вахтовых гипновых толях; однажды встречен на песчаной отсыпке, поросшей ивняком. Размножение семенное. Цветёт в июне — июле.	узость экологической амплитуды вида, нарушение природных местообитаний при хозяйственном освоении территории.	требуется выявление новых местообитаний, мониторинг состояния популяций	встречается вдоль северной границы ключевого участка тремя разорванными ценопопуляционными локусами. Общее количество около 10 штук.
Пальчатокоренник гебридский (<i>Dactylorhiza hebridensis</i> (Wilmott) Aver.)	4 категория. Вид с неопределённым статусом. Внесён в Приложение II Международной конвенции СИТЕС..	лугово-болотный вид, распространён преимущественно на сырых и заболоченных лугах, переходных и низинных болотах, по окраинам сфагновых болот, в заболоченных хвойных и лиственных лесах, зарослях кустарников, иногда по берегам водоёмов, вдоль ручьёв, по долинам рек, а также в антропогенно нарушенных местообитаниях — на зарастающих вырубках, обочинах дорог и др. Размножается преимущественно семенами. Цветёт в конце июня — июле.	нарушения природных местообитаний при хозяйственном освоении территории, осушение болот, низкая конкурентная способность.	требуется поиск новых местообитаний, уточнение ареала распространения, мониторинг состояния популяций вида	встречается вдоль северной границы ключевого участка, в виде сплошной полосы с небольшими разрывами, по дренажной канаве вдоль обездной дороги. Общее количество обнаруженных растений около 300 штук.
Ладьян трехраздельный (<i>Corallorhiza trifida</i> Chate)	2-я категория. Вид, сокращающийся в численности. В Югре найден в природном парке Нумто	многолетнее травянистое растение, лишённое хлорофилла (сапротроф). Цветет в конце мая — июне, плодоносит в августе. Нередко по несколько лет ведёт подземный образ жизни. Растет в сырых лесах, на лугах, болотах, среди кустарников, на вскрытых торфяниках. Предпочитает хорошо увлажненные участки, к богатству почвы и ее реакции малотребователен	в наибольшей степени страдает от вырубки леса, осушения переувлажненных местообитаний, а также вытаптывания мест произрастания.	включен в Приложение II к Конвенции СИТЕС	встречен в количестве 4 экземпляров в водосборной котловине верховьев долины малого водотока

Таблица 6
 Местобитания орхидей на исследуемых участках

Местообитание и его координаты	Тип фитоценоза и его видовой состав	Биотические и абиотические условия и антропогенное воздействие	Видовой состав орхидных	Численность каждого вида в данном местообитании
западный слабонаклонный склон дренажной канавы, от точки с координатами от 61°01'19,9924" с.ш. и 69°05'24,9961" в.д. до точки с координатами 61°01'14,9400" с.ш. и 69°04'35,7893" в.д.	Разнотравно-злаковый фитоценоз техногенно-измененного ландшафта. (<i>Calamagrostis epigeios</i> (L.) Roth, <i>Equisetum arvense</i> L., <i>Chamaenerion angustifolium</i> (L.) Scop., <i>Equisetum sylvaticum</i> L., <i>Hieracium umbellatum</i> L., <i>Trifolium pratense</i> L., <i>Calamagrostis langsdorffii</i> (Link) Trin., <i>Agrostis gigantea</i> Roth, <i>Poa angustifolia</i> L., <i>Elytrigia repens</i> (L.) Nevski, <i>Poa palustris</i> L., <i>Bromopsis inermis</i> (Leyss.) Holub, <i>Phleum pratense</i> L., <i>Poa pratensis</i> L., <i>Crepis tectorum</i> L., <i>Rubus idaeus</i> L., <i>Festuca pratensis</i> Huds., <i>Artemisia vulgaris</i> L.).	периодическое сенокосение и сброс снега при очистке протуара	<i>D. hebridensis</i> (Wilmott) Aver <i>D. incarnata</i> (L.) Soo.	307 единиц 10 единиц
западный пологовогнутый склон водосборной воронки, лежащей в верховьях долины водостока с координатами 61°01'14,5283" с.ш. и 69°05'30,01" в.д.	Пихтово-елово-березовый кедровый чернично-зеленомошный (в травяно-кустарничковом ярусе наиболее представлены <i>Vaccinium myrtillus</i> L., <i>Oxalis acetosella</i> L., <i>Maianthemum bifolium</i> (L.) F.W.Schmidt, <i>Pyrola rotundifolia</i> L., <i>Vaccinium vitis-idaea</i> L., <i>Gymnocarpium dryopteris</i> (L.) Newn, <i>Linnaea borealis</i> L. В редком подлеске <i>Sorbus sibirica</i> Hedl., <i>Rosa majalis</i> Hettm., <i>Sambucus sibirica</i> Nakai).	антропогенного воздействия нет	<i>D. hebridensis</i> (Wilmott) Aver <i>C. trifida</i> Chatel.	28 единиц 4 единицы
западный слабонаклонный склон к канаве с координатами 61°01'14,5283" с.ш. и 69°05'30,0172" в.д.	Разнотравно-злаковый фитоценоз техногенно-измененного ландшафта (<i>Calamagrostis epigeios</i> (L.) Roth, <i>Equisetum arvense</i> L., <i>Equisetum sylvaticum</i> L., <i>Hieracium umbellatum</i> L., <i>Tussilago farfara</i> L., <i>Trifolium repens</i> L., <i>Poa angustifolia</i> L., <i>Elytrigia repens</i> (L.) Nevski, <i>Poa palustris</i> L., <i>Bromopsis inermis</i> (Leyss.) Holub, <i>Poa pratensis</i> L., <i>Crepis tectorum</i> L., <i>Festuca pratensis</i> Huds., <i>Geum aleppicum</i> Jacq., <i>Prunella vulgaris</i> L., <i>Leucanthemum vulgare</i> Lam. <i>Ranunculus repens</i> L., <i>Taraxacum officinale</i> (L.) Webb ex F.H.Wigg.	периодическое сенокосение	<i>D. hebridensis</i> (Wilmott) Aver	50 единиц
западная поверхность склона дренажной канавы с координатами 61°00'47,7282" с.ш. и 68°59'50,2049" в.д.	Разнотравно-злаковый фитоценоз техногенно-измененного ландшафта (<i>Calamagrostis epigeios</i> (L.) Roth, <i>Equisetum arvense</i> L., <i>Achillea millefolium</i> L., <i>Chamaenerion angustifolium</i> (L.) Scop., <i>Hieracium umbellatum</i> L., <i>Trifolium pratense</i> L., <i>Trifolium repens</i> L., <i>Calamagrostis langsdorffii</i> (Link) Trin., <i>Agrostis gigantea</i> Roth <i>Poa angustifolia</i> L., <i>Elytrigia repens</i> (L.) Nevski, <i>Poa palustris</i> L., <i>Bromopsis inermis</i> (Leyss.) Holub, <i>Phleum pratense</i> L., <i>Poa pratensis</i> L., <i>Crepis tectorum</i> L., <i>Artemisia vulgaris</i> L. <i>Cirsium arvense</i> (L.) Scop, <i>Tussilago farfara</i> L., <i>Taraxacum officinale</i> (L.) Webb ex F.H.Wigg., <i>Potentilla anserina</i> L.	периодическое сенокосение	<i>D. hebridensis</i> (Wilmott) Aver <i>D. incarnata</i> (L.) Soo.	38 единиц 12 единиц

является в зимнее время вследствие расчистки велосипедной дорожки, когда часть снега сгребаётся в пруд. Для ликвидации негативного влияния растаявшего снега на растительность участка, необходимо установить заграждение и со второй стороны от велосипедной дорожки, что также послужит дополнительной защитой от эрозионных процессов. Уклон склона объездной дороги в районе пруда превышает 45°. В летнее время происходит покос трав в дренажной канаве, что тоже может повлиять на численность орхидных.

Антропогенное воздействие, рассматриваемое нами как экзогенный геологический фактор, действует в отношении флоры аналогично другим природным условиям. Воздействие человека приводит к формированию новых местообитаний, в которых одни виды растений находят убежище, а другие исчезают. Такими местообитаниями на территории природного парка стали дренажные каналы, которые создают микроклиматические и гидрологические условия, благоприятные для роста и развития орхидных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На территории природного парка «Самаровский чугас» обнаружен нарушенный экотоп, где произрастают представители семейства *Orchidaceae* — дренажная канава вдоль Объездной дороги. Произрастанию здесь *D. incarnata* и *D. hebridensis* способствует отсутствие видовой конкуренции, благоприятные микроклиматические и гидрологические условия. Способность этих видов заселять антропогенно измененные ландшафты следует рассматривать как проявление эксплерентной составляющей эколого-фитоценотической стратегии. В разных регионах России имеются данные о произрастании представителей семейства *Orchidaceae* в техногенно-измененных экотопах. Предлагается рассматривать такие места в качестве рефугиумов для редких видов растений (Егорова, 2018; Мишагина, 2018).

Таким образом, антропогенное влияние на ландшафты проявляется не только в негативных чертах (исчезновение или уменьшение численности видов), но и в создании новых местообитаний, которые являются убежищами для редких растений.

Выявленные нами техногенно-измененные экотопы имеют другую материнскую породу (техногенные грунты из щебня и песка), наклонный склон западной экспозиции, особые микроклиматические условия (дополнительное склоновое увлажнение, защита от ветров). Наблюдение за ростом растений в весенне-лет-

ний период не выявило негативного влияния сенокоса на вегетацию и цветение представителей семейства *Orchidaceae*.

Необходимы тщательные наблюдения за состоянием малочисленной популяции *C. trifida*, поскольку это растение, вероятно, вегетирует не каждый год, и поэтому нахождение его вызывает затруднения.

Таким образом, рекомендуются меры охраны орхидных, осуществление которых предполагает выявление характерных местообитаний, наблюдение за состоянием популяций в природе, защиты биотопов в местах произрастания орхидных, уменьшения нагрузок на окружающую среду, а также культивирования орхидных *in vitro* и их интродукции.

В дальнейшем нами предполагается детальное изучение представителей семейства *Orchidaceae* как на территории природного парка «Самаровский Чугас», так и на сопредельных территориях. Открытие участков с орхидными, расположенными за границами природного парка, позволяет выступить с предложением о расширении границы ООПТ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антипов А.М. 2001. Результаты авиаучетов водоплавающих и околоводных птиц, рекомендованных в Красную книгу Ханты-Мансийского автономного округа // Актуальные проблемы изучения и охраны птиц Восточной Европы и Северной Азии. — Казань.
2. Атлас Ханты-Мансийского автономного округа — Югры. 2004. Том II. Природа и экология. Ханты-Мансийск — Москва. С. 125.
3. Байкалова А.С., Звягина Е.А. *Dactylorhiza russowii* (Klinge) Holub (Пальчатокоренник Руссова) Электронный гербарий Юганского заповедника. [Электронный ресурс] URL: <http://ugansky.ru/activities/scientific/encyclopedia/166/1345/> (Дата обращения: 30.01.2020)
4. Большаниĭ П.В. 2017. Геоэкологические проблемы трансформации рельефа урбанизированных территорий (на примере городов Западной Сибири) Большаниĭ П.В., Недбай В.Н. М.: ИНФРА-М. С. 243.
5. Большаниĭ П.В. 2010. Развитие ландшафтов Прииртышья и их антропогенная трансформация (на примере Среднего и Нижнего Прииртышья и Нижнего-Среднего Приобья) (монография) Lambert Academic Publishing. С. 207.
6. Вахрамеева М. Г., Денисова Л. В., Никитина С. В. 1991. Орхидеи нашей страны. М.: Наука. С. 222.
7. Волков И. А., Волкова В. С., Гуртовая Е. Е. 1973. О строении и условиях формирования отложений района г. Самарово // Плейстоцен Сибири и смежных областей. М.: Наука. С. 34-39.
8. Егорова Н.Ю., Егошина Т.Л. 2018. Новые местонахождения редких и нуждающихся в охране сосудистых растений выработанных торфяных месторождений (Кировская область) // Самарский научный вестник. Т. 7. №3.

- С. 35-41.
9. Крапивнер Р. Б. 1979. Самаровский феномен в Западной Сибири // Ледники или тектоника? Бюл. МОИП. Отд. геол. Т. 54, вып. 4. С. 79-93.
 10. Красная книга Российской Федерации (растения и грибы). 2008. Москва.
 11. Красная книга Ханты-Мансийского автономного округа — Югры : животные, растения, грибы. 2013. Екатеринбург: Издательство Баско. С. 460.
 12. Кусковский В.С. 2002. Особенности мониторинга геологической среды городского природного парка на севере Западной Сибири // Экология северных территорий России. Проблемы, прогноз ситуаций, пути развития, решения. Мат-лы межд. конф. Том 1. Архангельск. С. 641-645.
 13. Летопись природы: отчет по НИР. 2017. БУ ХМАО-Югры «Природный парк «Самаровский чугас»; рук. Рыбьякова Н. Н.; исполн.: Меликов Д. Д. [и др.]. Ханты-Мансийск. С. 259. URL: <http://samchugas86.ru/wp-content/uploads/2019/02/Летопись-природы-2017-ИТОГОВЫЙ-СО-СПИСКОМ.pdf> (дата обращения 20.03.2019).
 14. Мишагина Д.А. 2018. Виды семейства ORCHIDACEAE техногенно-измененных экосистем Ивановской области. Успехи современного естествознания. № 6. С. 102-106.
 15. Обзор «О состоянии окружающей природной среды Ханты-Мансийского автономного округа в 2019 году». 2020. Гос. комитет по охране окружающей среды Ханты-Мансийского АО. Ханты-Мансийск.
 16. Определитель растений Ханты-Мансийского автономного округа. 2006. Новосибирск — Екатеринбург: «Изд-во «Баско». С. 304.
 17. Отчет Ханты-Мансийской геолого-съёмочной партии о результатах групповой геологической съёмки. 1985. М-б 1:200 000 листов -42-III-XII; XIV-IX, 75-76, XXI-XXV, XXII в трех томах. Т 1. Книга 2.
 18. Постановление Правительства Ханты-Мансийского автономного округа — Югры от 12 июля 2013 года № 245-п «О концепции развития и функционирования системы особо охраняемых природных территорий Ханты-Мансийского автономного округа — Югры на период до 2030 года (с изменениями на 26 апреля 2019 года) <http://www.docs.cntd.ru> (дата обращения 23 августа 2019 года).
 19. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 31 августа 2002 года N 1225-р «Об одобрении Экологической доктрины Российской Федерации» <http://docs.cntd.ru/document/901826347> (дата обращения 23 августа 2019 года).
 20. Ценопопуляции растений (очерки популяционной биологии). 1988. М.: Наука. 184 с.
 21. Черепанов С.К. 1995. Сосудистые растения России и сопредельных государств (в пределах бывшего СССР). СПб.: Мир и семья. С. 992.
 22. Чиркова Н.Ю., Егошина Т.Л. 2011. Проявление черт эксплерентности некоторых видов семейства Orchidaceae Juss. в антропогенно измененных экосистемах // Охрана и культивирование орхидей: материалы IX междунар. конф. (26-30 сентября 2011). М.: Товарищество научных изданий КМК. С. 466-468.
 23. Шепелева Л.Ф., Лукьяненко Д.Н. 2009. Состояние популяций орхидных на территории междуречья Большого Салыма и Иртыша // Вестн. Том. гос. ун-та. №326.

Поступила: 13.03.2021

Одобрена: 15.05.2021

Принята: 25.06.2021



BIOGEOCHEMICAL ASSESSMENT OF THE MAIN PLANTS AT THE NADYM DISTRICT'S REINDEER PASTURES (YAMAL-NENETS AUTONOMOUS OKRUG)

E.V. Agbalyan¹, E.A. Zarov², I.V. Filippov², Yu.A. Pechkina¹, E.V. Shinkaruk¹, K.V. Yulbarisova¹, N.A. Khnycheva¹, E.D. Lapshina²

¹ State Public Institution of Yamalo-Nenets Autonomous Okrug «Scientific Research Centre of the Arctic»;

² Federal State Budgetary Institution of Higher Education “Yugorsk State University”

Автор для переписки: E.V. Agbalya, e-mail: agbelena@yandex.ru

Citation: Agbalyan E.V., Zarov E.A., Filippov I.V., Pechkina Yu.A., Shinkaruk E.V., Yulbarisova K.V., Khnycheva N.A., Lapshina E.D. 2021. Biogeochemical assessment of the main plants at the Nadym district's reindeer pastures (Yamal-Nenets autonomous okrug) // Environmental dynamics and global climate change. V. 12. N 1. P. 27–41. DOI: <https://doi.org/10.17816/edgcc41876>

На фоновых участках нефтегазоносных районов севера Западной Сибири в пределах северной тайги, лесотундры и южной тундры изучен элементный состав широко распространенных модельных видов древесных пород (*Betula pubescens*, *Larix sibirica*, *Pinus sylvestris*), кустарников *Salix lanata*, кустарничков (*Vaccinium vitis-idaea*, *Ledum palustre* s. l.), трав (*Eriophorum angustifolium*, *Equisetum arvense*) и лишайников (*Cladonia stellaris*, *Cladonia stygia*). Приведены данные о содержании Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, As, Y, V, Na, Mg, Si, P, S, K, Ca, Ti, Mn, Fe, S, полученные с использованием метода рентгенофлуоресцентного энергодисперсионного анализа.

Выявлены биогеохимические особенности растений, изучена их видовая геохимическая специализация. Наибольшее различие уровня аккумуляции между разными видами растений обнаружено для Ni, Zn, Ca, Mn, S и Si. Проведен анализ коэффициентов биологического накопления химических элементов в растениях относительно локального фонового содержания элементов в почвах ЯНАО. Статистические достоверные различия в накоплении элементов растениями в разных биоклиматических зонах выявлены для Cu, Fe, Co, Cr, As, Mg, V, Y.

Изученные растения по критериям экологической безопасности и содержанию нормируемых микро- и макроэлементов соответствуют требованиям, предъявляемым к кормовым растениям. Исключение составляет низкий уровень содержания биогенных элементов Co, Na и K. Для профилактики заболеваний животных, связанных с дефицитом эссенциальных элементов, необходимо оптимизировать рацион питания оленей путём обогащения кормов биологически активными веществами и макро- и микроэлементами.

Ключевые слова: растения; химические элементы; видовая специфика; биогенные элементы; олени; пастбища; экологическая безопасность; Надымский район; ЯНАО; Западная Сибирь.

ВВЕДЕНИЕ

Растения — это важнейший компонент биосферы и звено трофической цепи в биогеохимической миграции макро- и микроэлементов из горных пород и почв в живые организмы. Природная неоднородность химического состава среды и интенсивная хозяйственная деятельность человека приводят к дисбалансу биологически активных веществ в растениях, кормах и организме животных [Битюцкий, 2011; Позов, Орлова, 2012].

Одним из источников поступления в организм животных токсичных веществ являются кормовые растения. В условиях антропогенного загрязнения отмечается увеличение интенсивности вовлечения тяжелых металлов в биологический круговорот [Опекунова, 2019]. Многие химические элементы обладают способностью

к аккумуляции в организме животных, оказывают токсическое воздействие и приводят к появлению специфической заболеваемости — микроэлементозам [Авцын, 1972].

Научный и прикладной интерес представляют исследования биогеохимических особенностей элементного состава растений, произрастающих на фоновых участках в границах расположения нефтегазодобывающей промышленности, и выявление видовой специфики аккумуляции химических элементов в растениях, изучение географических особенностей накопления химических элементов растениями.

Цель работы заключается в выявлении особенностей элементного состава и оценке качества некоторых видов растений, составляющих кормовую базу северного оленя в разных биоклиматических зонах территории Надымского района.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

В ходе геоботанического обследования оленьих пастбищ на фоновых участках Надымского района Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО) в июле-августе 2019 года были отобраны образцы 8 видов растений и 2 видов кормовых лишайников¹ для определения их элементного состава. В пределах Надымского района выделяют несколько природных подзон — южная тундра, лесотундра и северная тайга [Атлас

ЯНАО, 2004]. Образцы растений отобраны на трёх участках (рис. 1). Участок № 1 расположен в подзоне северной тайги, в редкостойных лиственничных и елово-лиственничных кустарничково-лишайниковых лесах, в окрестностях пос. Приозерный. Участок № 2 находится в подзоне лесотундры, в лиственнично-березовых с незначительной примесью ели, кустарничково-зелёномошно-лишайниковых редкостойных лесах и редколесьях, в окрестностях г. Надым. Участок № 3 выбран в подзоне южной тундры, в кустарнико-

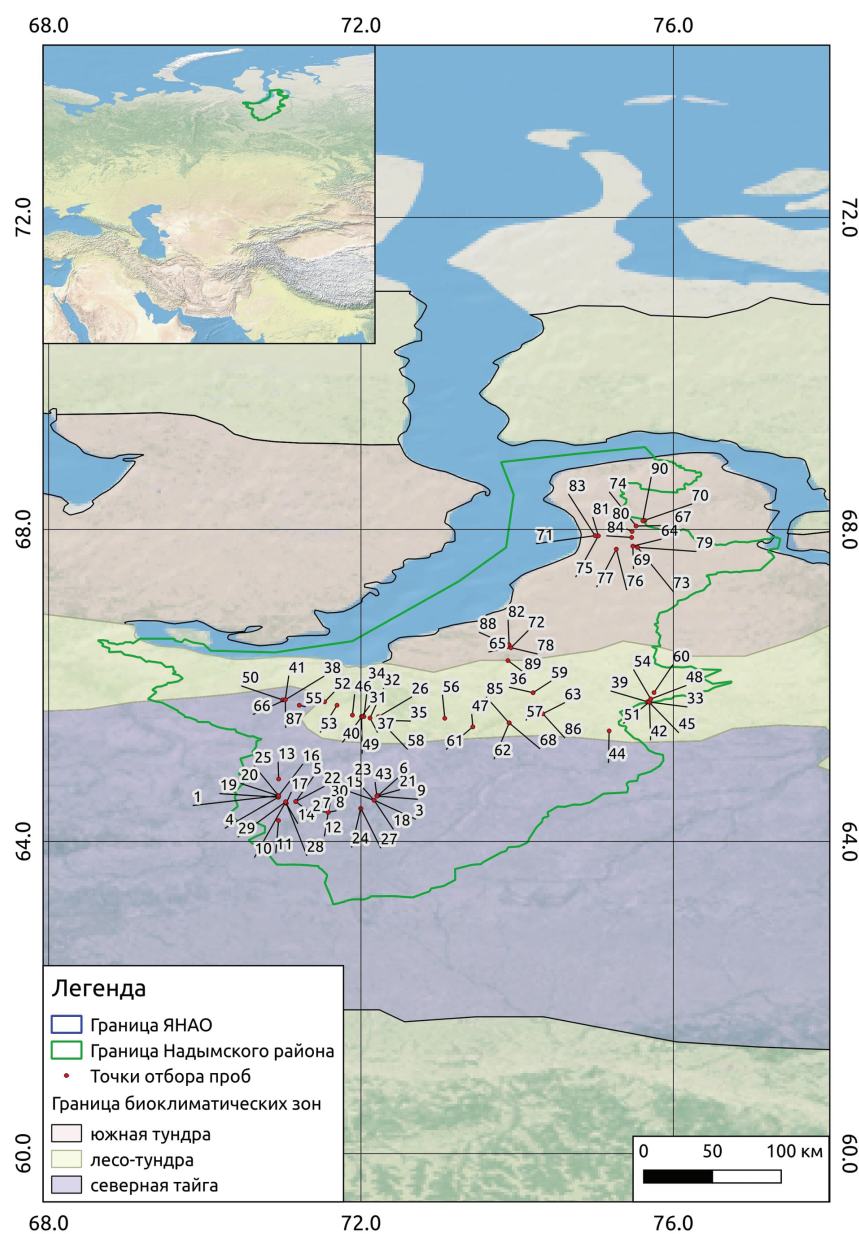


Рис. 1. Пробные площадки на территории Надымского района, ЯНАО

¹ Для упрощения в дальнейшем по тексту лишайники будут включены в термин «растительность»

во-зеленомошной с ивой и ерником местами с ольховником бугорковой и пятнисто-бугорковой тундре, в окрестностях пос. Ямбург. Всего отобрано 90 проб.

Определён элементный состав фитомассы следующих видов: листья *Betula pubescens* Ehrh., *Salix lanata* L., кора *Larix sibirica* Ledeb., хвоя *Pinus sylvestris* L., вегетирующие зеленые надземные части *Vaccinium vitis-idaea* L., *Ledum palustre* L. (incl. *L. Decumbens* (Aiton) Lodd. ExSteud.), *Eriophorum angustifolium* Honck., *Equisetum arvense* L., слоевища лишайников *Cladonia stellaris* (Opiz.) Pouzaret Uezda и *Cladonia stygia* (Fr.) Ruoss.

Перечисленные выше виды были отобраны в трёхкратной повторности для каждой биоклиматической подзоны. На каждой пробной площадке 10 × 10 м была выбрана типичная экосистема и осуществлялся отбор проб не менее чем с 10 индивидуальных растений для каждого вида. Ввиду неоднородности территории и разности экологических факторов, для отбора всего перечня видов растений в каждой подзоне было организовано 10–18 пробных площадей (рис. 1, таблица 7 в Appendix). Масса каждого образца составляла не менее 0,2 кг. В лаборатории образцы были высушены до постоянной массы в сушильном шкафу ($t = 80^{\circ}\text{C}$), а затем измельчены в механической мельнице до порошкообразного состояния.

Определение элементного состава растений выполнялось с использованием метода рентгенофлуоресцентного энергодисперсионного анализа (РФАЭД) на спектрометре БРА 135-ф (АО НПП «Буревестник», г. Санкт-Петербург). В пробах фитомассы определялось содержание элементов Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, As, Y, V, Na, Mg, Si, P, S, K, Ca, Ti, Mn, Fe, Sr. Концентрации элементов рассчитаны на воздушно-сухое вещество.

Изучалась аналитическая К α — линия. Выбор аналитических линий для измерения интенсивности излучения элементов осуществлялся в соответствующем диапазоне длин волн. Общая интенсивность излучения определялась, как сумма вторичного характеристического и первичного рассеянного излучений. Режим работы: для средней области — 19 кВ, 100 мкА; для тяжелой области — 50 кВ, 60 мкА. Фильтр первичного излучения из циркония.

Для построения градуировочных характеристик использовались государственные стандартные образцы (ГСО): ЛБ-1 (состав листа березы); ЭК-1 (состав элодеи канадской); ТР-1 (состав травосмеси). Для оценки правильности результатов применяли стандартные образцы растений. Градуировочные и стандартные об-

разцы готовились к РФАЭД таким же способом, что и исследуемые образцы растений. Значения пределов обнаружения устанавливали с помощью стандартных образцов с малым содержанием элемента: Cr — 0,4 мкг, Co — 0,02 мг/кг, Ni — 0,3 мг/кг, Cu — 0,4 мг/кг, Zn — 1,1 мг/кг, Ga — 0,02 мг/кг, As — 0,02 мг/кг, Y — 0,02 мг/кг, V — 0,09 мг/кг, Na — 30 мг/кг, Mg — 200 мг/кг, Si — 400 мг/кг, P — 60 мг/кг, S — 200 мг/кг, K — 300 мг/кг, Ca — 300 мг/кг, Ti — 12 мг/кг, Mn — 30 мг/кг, Fe — 50 мг/кг, Sr — 7 мг/кг. Величина ошибки (воспроизводимость результатов) для изученных элементов варьировала от 5% до 10%.

По данным литературного обзора установлено, что почвы исследуемого региона характеризуются выраженным дефицитом элементов [Опекунова с соавт., 2007; Иеронова с соавт., 2014; Томашунас с соавт., 2014; Агбальян с соавт., 2015; Журба с соавт., 2016; Страховенко с соавт., 2016; Скипин с соавт., 2016; Агбальян с соавт., 2018; Алексеев с соавт., 2019; Семенов, 2019]. Данные исследования проводились на территории незатронутой хозяйственной деятельностью. Для оценки фонового содержания были использованы медианные значения результатов всех вышеперечисленных работ для минеральных почв Надымского района.

Для выявления зональных особенностей накопления химических элементов растениями были выбраны виды, встречающиеся во всех биоклиматических подзонах. Также, данные виды могут быть использованы в качестве объектов биоиндикации. Из общего перечня исследованных видов *Betula pubescens* и *Pinus sylvestris* не были обнаружены в зоне тундры и по этой причине исключены из анализа.

Исследуемая выборка отлична от нормального распределения, поэтому статистическая обработка аналитических данных включала определение Med — медианы, 1-го и 3-го квартилей. Для сравнительных оценок использовался критерий Краскела-Уоллиса, непараметрический метод проверки принадлежности двух и более выборок к одному распределению, с последующим применением теста Данна для попарного сравнения. Объем выборки составил 90 измерений для проведения корреляционного анализа (рис. 3), 9 измерений для оценки видовой геохимической специализации растений (рис. 4) и 30 измерений для оценки содержания элементов в растениях различных биоклиматических подзон (рис. 5). Обработка, анализ данных и построение графиков были выполнены в программном продукте R с использованием пакетов rstatix, ggplot2 и ggpubr.

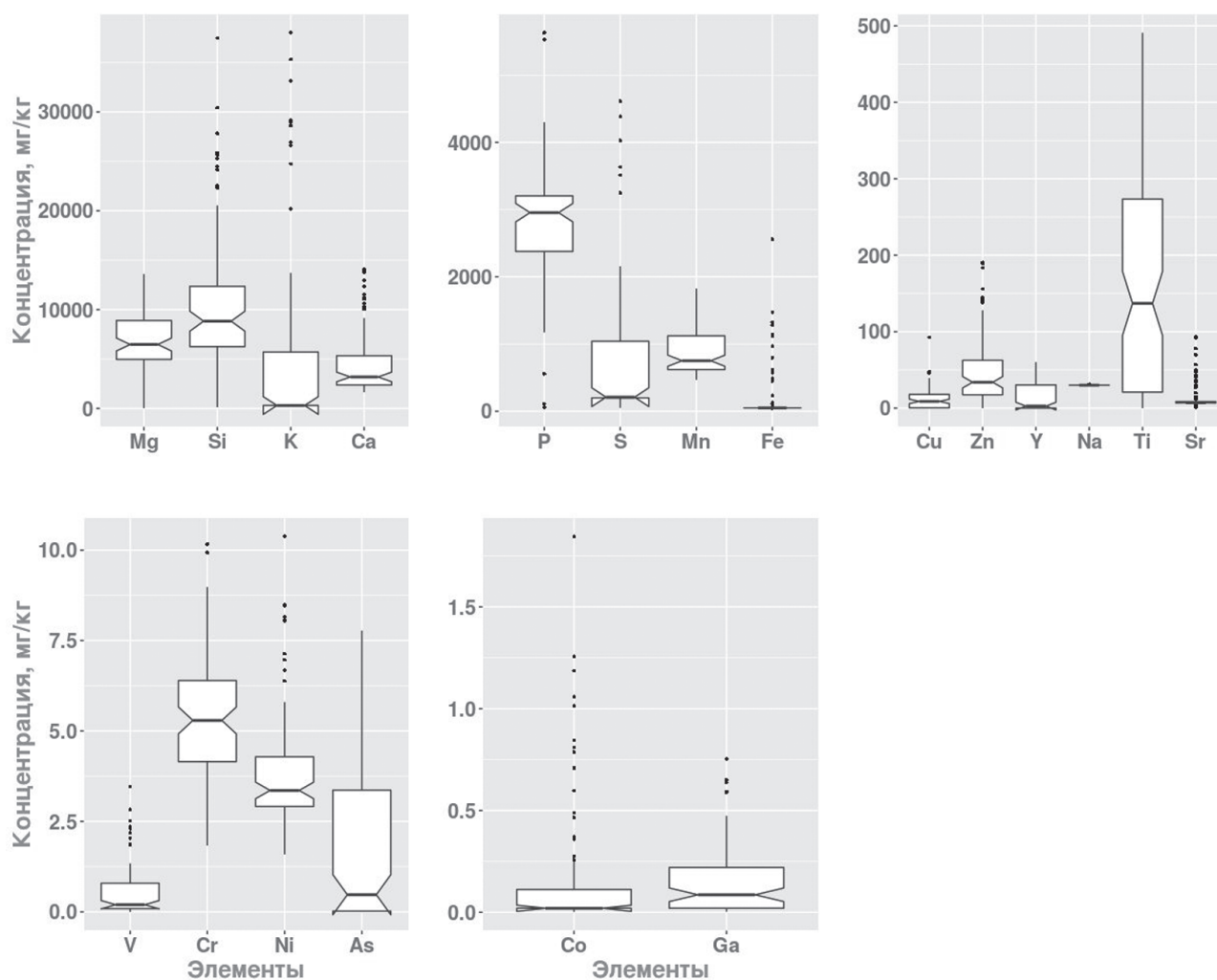


Рис. 2. Значения обнаруженных концентраций элементов. Линией обозначена медиана, нижняя и верхняя границы блока — нижний и верхний квартили, насечки показывают доверительный интервал относительно медианы, усы — 1,5 интерквартильных значения ($\sim 3\sigma$), точки — выбросы (все, что выходит за пределы усов)

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Биогеохимические особенности растений

На содержание химических элементов в растениях оказывают влияния, главным образом, климатические, ландшафтно-геохимические особенности и видовая специфика аккумуляции химических элементов растениями. Содержание химических элементов зависит от пространственной неоднородности среды их обитания. Климат один из важнейших факторов, обуславливающий биогеохимическую специализацию флоры и соотношение между всеми формами миграции химических элементов в ландшафте. В гумидном климате формируются, в основном, катионофитные растения с преобладающим высоким накоплением катионогенных элементов [Скарлыгина-Уфимцева, 1991]. В ландшафтах с кислым классом водной миграции энергично мигрируют катионогенные элементы, которые легко поглощаются растительностью.

Анализ медианного содержания макро-

и микроэлементов в образцах всех изученных растений показал специфику и различия в накоплении элементов, как между видами растений, так и между биоклиматическими подзонами (рис. 2, табл. 4–6). Установлено, что почвы исследуемого региона характеризуются выраженным дефицитом элементов.

По величине медианного содержания в растениях элементы располагаются в следующем убывающем порядке (мг/кг):

Si(8827) > Mg(6469) > Ca(3186) > P(2955) > Mn(752) > S(210) > Ti(137) > Zn(33,9) > Cu(8,3) > Sr(7,0) > Cr(5,3) > Ni(3,4) > Y(2,6) > As(0,47) > V(0,2) > Ga(0,09)².

Фитогеохимический спектр, представляющий собой ранжированный ряд химических элементов по убыванию коэффициентов био-

² Медианные значения концентраций Na, Fe, K, Co и Sr ниже предела определения, поэтому исключены из перечня

Таблица 1

Коэффициенты биологического накопления (K_{61}) химических элементов в растениях относительно фоновых концентраций в почвах округа (данные о фоновых концентрациях Ga и S в почвах ЯНАО нами не обнаружены)

Приоритетные элементы	$P_{22.4}, Mg_{9.1}, Mn_{8.0}, Ca_{6.2}, Zn_{1.5}$
Дефицитные элементы	$Cu_{0.9}, Y_{0.4}, As_{0.2}, Ni_{0.2}, Cr_{0.1}, Ti_{0.09}, K_{0.08}, Sr_{0.07}, Na_{0.03}, Si_{0.02}, V_{0.0007}, Co_{0.005}, Fe_{0.005}$

Таблица 2

Коэффициенты биологического накопления (K_{62}) химических элементов в растениях относительно кларка верхней части континентальной земной коры

Приоритетные элементы	$P_{4.3}$
Дефицитные элементы	$Mn_{0.98}, Zn_{0.5}, Mg_{0.4}, Cu_{0.2}, Y_{0.1}, As_{0.08}, Ca_{0.08}, Ni_{0.07}, Cr_{0.06}, Ti_{0.04}, Si_{0.03}, Sr_{0.03}, K_{0.01}, V_{0.002}, Na_{0.001}, Fe_{0.001}, Co_{0.001}$

логического накопления K_{61} (отношение содержания химических элементов в растениях к фоновому содержанию элементов в почвах ЯНАО [Опекунова с соавт., 2007; Иеронова с соавт., 2014; Томашунас с соавт., 2014; Агбалин с соавт., 2015; Журба с соавт., 2016; Страховенко с соавт., 2016; Скипин с соавт., 2016; Агбалин с соавт., 2018; Алексеев с соавт., 2019; Семенов, 2019], позволяет выявить интенсивность аккумуляции химических элементов в изученных образцах растений (табл. 1).

Фосфор является биогенным элементом и накапливается в растениях на территории Надымского района в максимальном количестве. При довольно низком содержании в почвах (132 мг/кг) его концентрация в растениях выше в ~22 раза.

Магний, марганец и кальций характеризуются высоким коэффициентом биологического накопления, несмотря на их конкурентные свойства в накоплении. Магний участвует в процессах фотосинтеза, транспорта фосфора и прочих жизненно важных функций [Marschner, 2011; Воеводина, 2015]. Mn является индикатором биогеохимических циклов в ландшафтах с гумидным климатом. Накопление Mn в растениях обусловлено изменением подвижности химических элементов при смене песчаных почв торфяниками [Опекунова, 2013]. Кальций участвует в построении клеточных стенок и мембран [White, 2003]. Растения накапливают цинк в полтора раза больше его фонового содержания в почвах. Данный элемент задействован во многих биохимических процессах.

Для удобства сравнения результатов с фундаментальными работами Добровольского В.В. и Перельмана А.И. были посчитаны коэффициенты биологического накопления (K_{62}) химических элементов по отношению к кларку [Григорьев, 2009]. Полученные результаты (табл. 2) свидетельствуют о накоплении в растениях Надымского района лишь фосфора, остальные элементы содержатся в раститель-

ности в значительно меньших концентрациях.

Представляет интерес оценка ассоциаций химических элементов на основе корреляционных зависимостей между их содержанием в изученных образцах растений. Такой подход позволяет установить роль антропогенной нагрузки и физиологических особенностей поглощения, специфику источников загрязнения. Аккумуляция химических элементов в растениях, подверженных одномоментному воздействию разных факторов, связана с поступлением загрязняющих веществ разными путями. Установлены элементы-антагонисты и элементы-синергисты в конкретных геохимических условиях в пределах Надымского района.

Установлены статистически достоверные ассоциации элементов для всех растений (рис. 3). Положительная значимая корреляция внутри групп V — S — K ($r_s = 0,58-0,91$) и Mg — Cr — Co — Fe — Si — P ($r_s = 0,15-0,91$), а также сильная связь As — Y ($r_s = 0,77$), Ni и Zn между собой ($r_s = 0,89$) и с Ca, Sr, Ga, Mn ($r_s = 0,2-0,76$).

Известно, что недостаток или избыток одних элементов может блокировать поглощение или метаболизм других химических элементов [Ермаков с соавт., 2018]. В данном исследовании выявлены элементы с достоверной обратной корреляционной зависимостью, т. е. высокое содержание одного элемента обычно сопряжено с низким содержанием другого. К таким элементам антагонистом относятся ассоциации Si с Zn ($r_s = -0,77$), Sr ($r_s = -0,8$) и Mn ($r_s = -0,89$), а также между группами Mg, Cr, Co, Fe, P и Sr, Mn, Ga, Cu, Ni, Zn ($r_s = -0,12 - -0,72$).

Важнейшими и нормируемыми в рационах питания животных макроэлементами считаются Ca, K, Mg, P, Na, S, микроэлементами — Fe, Mn, Zn, Cu, Co. В изученных образцах растений медианные содержания Mg, P и Mn превышают рекомендуемые величины (норму) в корме для крупного рогатого скота [Биогеохимические основы..., 1993], медианные содержания Zn, Cu, Fe и Si в растениях соответствуют норме, а кон-

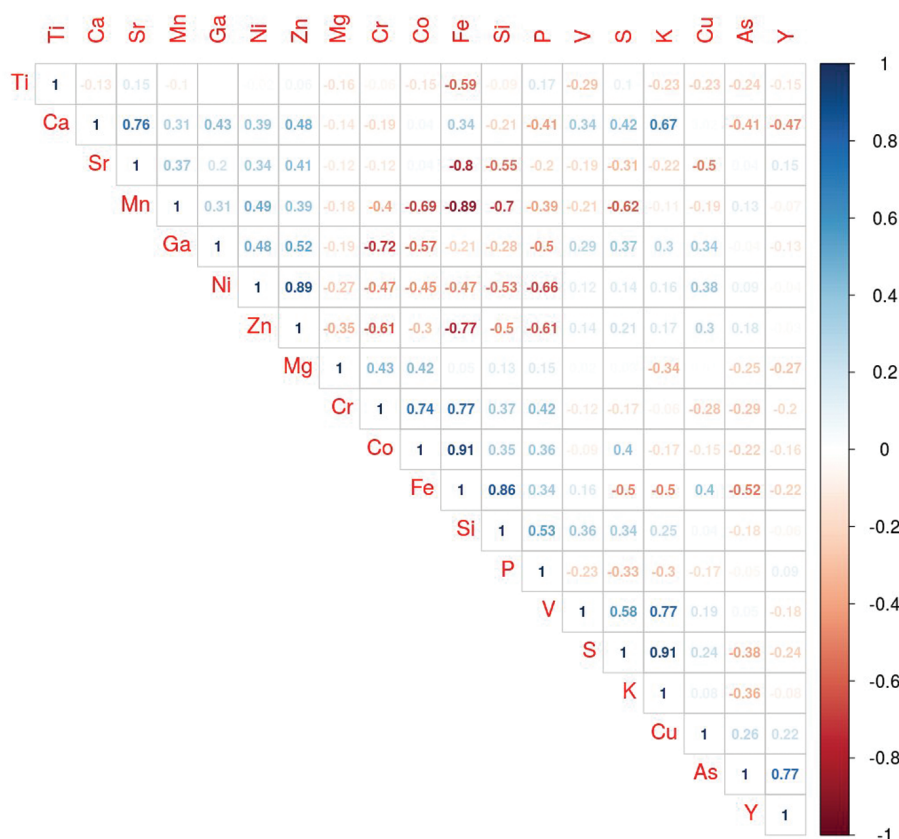


Рис. 3. Матрица корреляции между концентрациями элементов в растениях (по критерию Спирмана)¹

центрации Co, Na, K находятся в дефиците.

Существующие проблемы развития оленеводства в ЯНАО, связанные с истощением кормовой базы оленьих пастбищ в тундровой природной зоне [Зуев, 2016], возможно частично решить за счет более активного вовлечение в хозяйственный оборот естественных кормовых угодий Надымского района. Кормовая база Надымского района представлена кустистыми лишайниками, кустарниковыми ивами и березками, осоковыми, злаковыми, растениями группы разнотравья, среди которых сложноцветные и хвощи [Байкалова, Долгова 2018]. При этом следует строго учитывать норму выпаса оленьих стад, чтобы предотвратить деградацию растительности.

Видовая биогеохимическая специализация растений

Биогеохимическая специализация растений зависит от зонально-региональных закономерностей биогенной миграции элементов, видового уровня организации фитобиоты и уровня антропогенной нагрузки [Шихова, 2017].

Специфичность аккумуляции химических элементов растениями в природных ландшафтах проявляется на экобиоморфном уровне организации фитобиоты. Выделяются две основные группы растений, обусловленные эволюционно сложившимися адаптационными стратегиями: концентраторы и деконцентраторы [Уфимцева, 2015]. Концентраторы накапливают химические элементы, как при низком, так и при высоком их содержании в почве, почвообразующих и коренных породах. Деконцентраторами являются растения, у которых поступление химических элементов в надземную часть ограничено, несмотря на их высокое содержание в среде произрастания.

Изучена видовая геохимическая специализация растений (рис. 4, табл. 5). Содержание Mg и микроэлементов (V, Y, As и Co) статистически достоверно не отличается между видами исследованных растений. По остальным элементам отличия выявлены для нескольких пар растений. Наибольшее различие уровня аккумуляции между разными видами растений обнаружено для Ni, Zn, Ca, Mn, S и Si.

¹ На исключен из анализа ввиду значения концентраций ниже пределов обнаружения для всех исследуемых образцов

Содержание V изменяется от 0,09 мг/кг в хвое *Pinus sylvestris* и талломах *Cladonia stellaris* до 2,25 мг/кг в *Equisetum arvense* (табл. 5). Установлено увеличение концентрации V в ряду видов растений *Betula pubescens* > *Cladonia stygia* > *Eriophorum angustifolium* > *Larix sibirica* > *Ledum palustre* (incl. *decumbens*) > *Salix* > *Vaccinium vitis-idaea*.

Содержание Сг высокое во всех опробованных растениях. Концентрации Сг варьирует незначительно от 3,3 мг/кг в листьях *Betula pubescens* до 7,2 мг/кг в талломах *Cladonia stygia*.

Содержание Со в значительной части исследованных образцов ниже предела обнаружения. Неоднородность и повышенные уровни концентраций обнаружены в талломах лишайников и коре лиственницы, что говорит о локальных особенностях распределения кобальта.

Выраженная аккумуляция Ni установлена в листьях *Betula pubescens* — 8,3 мг/кг. Наиболее низкие значения обнаружены для *Cladonia stellaris* и *Cladonia stygia*.

В опробованной выборке растений содержание Си варьирует 0,4 (предел обнаружения) — 21,6 мг/кг. Так, в талломах *Cladonia stellaris*

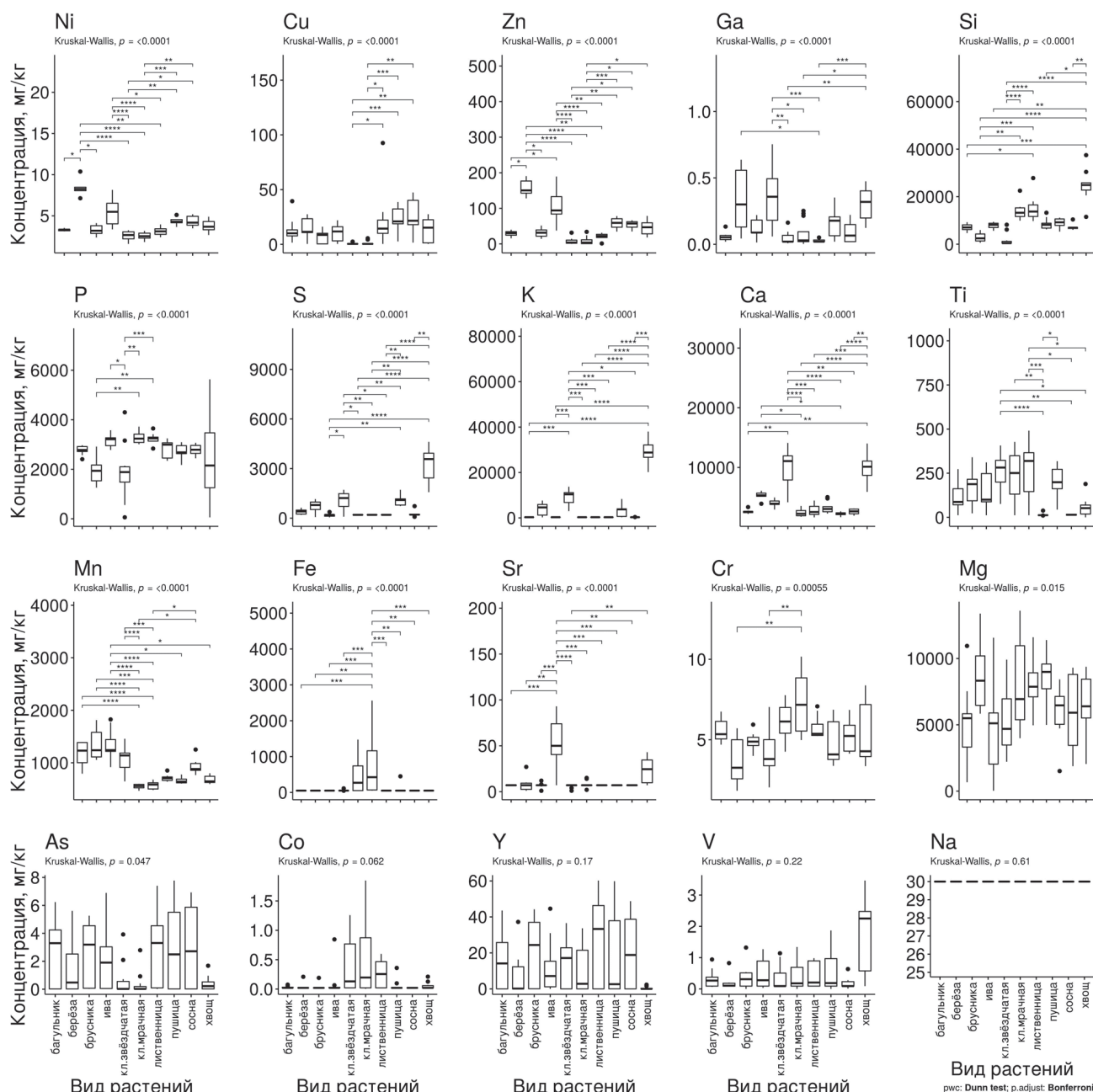


Рис. 4. Накопление элементов различными видами растений. Скобками отмечены виды растений со статистически достоверно расходящимися концентрациями, звездочками отмечена значимость различий (* — слабое достоверное различие, ***** — сильное различие)

и *Cladonia stygia* содержание Cu изменяется от 0,4 мг/кг до 5,5 мг/кг (медианное значение 0,4 мг/кг), в хвое *Pinus sylvestris* содержания Cu варьируют от 1,6 мг/кг до 47,4 мг/кг (медианное значение 21,6 мг/кг).

Максимальная аккумуляция цинка установлена в листьях *Betula pubescens* и листьях кустарников рода *Salix*. Варьирование концентраций Zn в листьях *Betula pubescens* от минимальных значений 128 мг/кг до максимальных уровней — 190 мг/кг (медианное значение 150 мг/кг). В листьях кустарников рода *Salix* накопления Zn изменяются от 38 мг/кг до 140 мг/кг (медианное значение 94 мг/кг). Минимальные содержания Zn установлены в *Cladonia stellaris* и *Cladonia stygia* (3,7–3,9 мг/кг).

Листья кустарников рода *Salix* активно аккумулируют Ga в концентрациях от 0,06 мг/кг до 0,75 мг/кг (медианное содержание 0,36 мг/кг). Минимальные уровни Ga установлены в *Larix sibirica* и *Cladonia stellaris* (0,02 мг/кг).

Максимальное содержание As установлено в *Larix sibirica* 3,31 мг/кг (от 0,02 мг/кг до 7,40 мг/кг) и в *Ledum palustre* 3,29 мг/кг (от 0,02 мг/кг до 6,23 мг/кг). Наименьшие концентрации As показаны в образцах кустистых лишайников (0,02 мг/кг).

Содержания Y в изученных растениях варьирует в широких пределах от 0,02 мг/кг (предел обнаружения) в траве *Equisetum arvense* до 33,3 мг/кг в коре *Larix sibirica*.

Низкое содержание Na менее предела обнаружения (30 мг/кг) показано во всех изученных растительных образцах. В ходе анализа обнаружены два существенных выброса значений 420 и 920 мг/кг для брусники и листьев ивы, которые мы связываем со случайным загрязнением отобранных образцов.

Максимальное количество Mg накапливается в листьях *Betula pubescens* — 8300 мг/кг и в коре *Larix sibirica* (8990 мг/кг).

Таблица 3

Коэффициенты биологического накопления ($K_{б1}$) химических элементов в растениях относительно рассчитанного локального фонового уровня в почвах ЯНАО (жирным шрифтом обозначены повышенные уровни аккумуляции, курсивом — пониженные уровни аккумуляции)

Химический элемент	<i>Cladonia stellaris</i>	<i>Cladonia stygia</i>	<i>Eriophorum angustifolium</i>	<i>Equisetum arvense</i>	<i>Ledum palustre</i>	<i>Vaccinium vitis-idaea</i>	<i>Salix lanata</i>	<i>Betula pubescens</i>	<i>Larix sibirica</i>	<i>Pinus sylvestris</i>	Локальный фон, мг/кг ¹
V	0,46	0,92	0,96	11,51	1,36	1,59	1,42	0,53	1,04	0,46	0,20
Cr	1,21	1,42	0,81	0,85	1,06	0,97	0,75	0,64	1,06	1,03	5,29
Co	5,50	9,80	—	—	—	—	—	—	12,75	—	<0,02
Ni	0,80	0,75	1,28	1,01	0,99	0,95	1,64	2,47	0,93	1,25	3,36
Cu	<i>0,05</i>	<i>0,05</i>	2,37	1,73	1,14	0,98	1,33	1,26	1,63	2,44	8,82
Zn	<i>0,10</i>	<i>0,09</i>	1,51	1,20	0,77	0,80	2,41	3,84	0,56	1,47	33,86
Ga	0,26	0,38	2,31	4,14	0,68	1,14	4,65	3,90	<i>0,26</i>	0,86	0,09
As	<i>0,04</i>	<i>0,04</i>	5,26	0,46	6,95	6,73	4,02	1,01	6,97	5,73	0,47
Y	6,52	1,08	1,00	<i>0,01</i>	5,38	9,27	2,72	<i>0,07</i>	12,65	7,17	2,63
Na	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	<30,0
Mg	1,08	1,22	1,01	0,99	0,85	0,80	0,73	1,29	1,40	0,92	6469,0
Si	1,36	1,69	1,13	3,06	0,87	1,00	<i>0,05</i>	<i>0,30</i>	1,00	0,86	8827,0
P	1,16	1,17	0,96	0,77	1,00	1,15	0,68	0,70	1,08	1,00	2955,0
S	0,95	0,95	5,22	17,01	1,94	0,95	5,79	3,80	0,95	1,01	210,0
K	—	—	12,58	95,98	—	—	34,58	15,38	—	—	<300,0
Ca	0,79	0,89	0,81	3,57	0,90	1,38	3,90	1,88	1,07	0,93	3186,0
Ti	1,74	2,22	1,38	0,36	0,60	0,69	1,96	1,31	<i>0,08</i>	<i>0,1</i>	137,0
Mn	0,70	0,74	0,81	0,81	1,55	1,56	1,44	1,67	0,89	1,11	752,0
Fe	5,40	8,50	—	—	—	—	—	—	—	—	<50,0
Sr	—	—	—	3,50	—	—	7,14	—	—	—	<7,0

Все изученные растения обогащены кремнием. В листьях *Salix* концентрации Si минимальны и варьируют от 400 мг/кг до 8190 мг/кг. Максимальное содержание Si выявлено в *Equisetum arvense* и *Cladonia stellaris*, *Cladonia stygia* (24890 мг/кг, 13220 и 13730 мг/кг соответственно).

Максимальное накопление P характерно для *Vaccinium vitis-idaea*, *Cladonia stellaris* и *Cladonia stygia*, которое изменяется от 3210 мг/кг до 3250 мг/кг.

Equisetum arvense L. способен аккумулировать максимальные концентрации S, K, Ca по сравнению с другими изученными расте-

ниями.

Содержания Ti в растениях изменяются от 12 мг/кг в коре *Larix sibirica* до 320 мг/кг в *Cladonia stygia*. Высокие концентрации Ti установлены в *Cladonia stellaris* и в листьях *Salix lanata* — 251 и 282 мг/кг.

В исследованной выборке растений содержания Fe, в основном, находятся на уровне предела определения 50 мг/кг, за исключением таллов лишайников *Cladonia stellaris* и *Cladonia stygia*, в которых концентрация Fe изменяется от 50 мг/кг до 2560 мг/кг (медианные значения 270 и 25 мг/кг).

Максимальные концентрации Mn зафик-

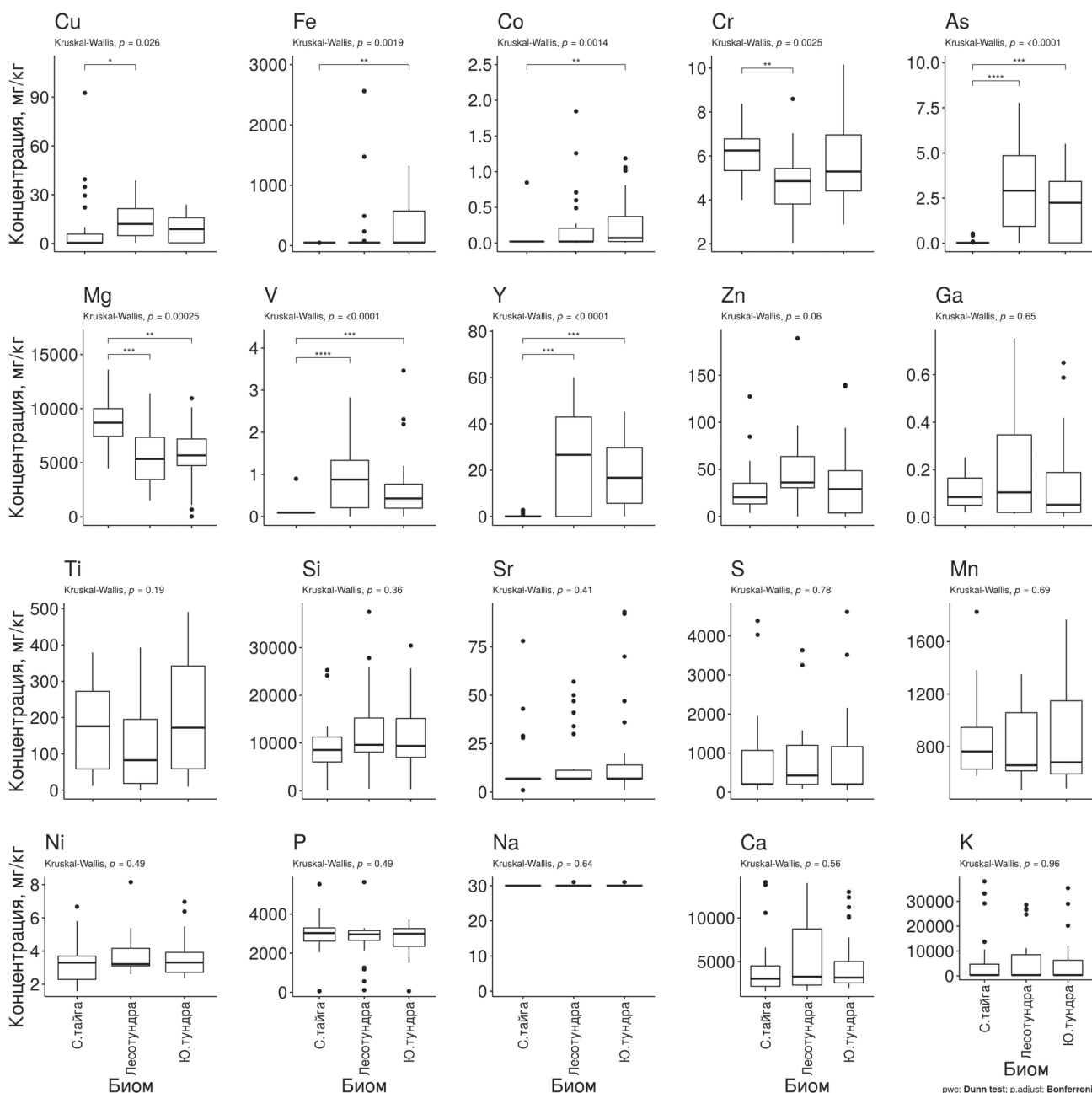


Рис. 5. Содержание элементов в растениях разных биоклиматических подзон Надымского района, ЯНАО. Скобками отмечены виды растений со статистически достоверно расходящимися концентрациями, звездочками отмечена значимость различий (* — слабое достоверное различие, **** — сильное различие)

сированы в листьях *Ledum palustre*, *Betula pubescens* и *Vaccinium vitis-idaea* (медианные значения от 1230 мг/кг до 1240 мг/кг).

Концентрации Sr в изученной выборке растений ниже предела определения. Максимальные содержания зафиксированы в листьях кустарников рода *Salix* (от 7 мг/кг до 93 мг/кг) и в *Equisetum arvense* (от 7 мг/кг до 43 мг/кг).

Анализ коэффициентов биологического накопления химических элементов в растениях относительно локального фонового уровня в почвах ЯНАО (табл. 3) позволил выделить группу растений-концентраторов ($K_{61} > 1.5$), виды растений с фоновым содержанием элементов и группу растений-деконцентраторов ($K_{61} < 0.5$). Сильные концентрационные способности обнаружены лишь у *Equisetum* по содержанию калия ($K_{61} = 96$).

К растениям — аккумуляторам химических элементов относится *Equisetum arvense*, способный накапливать 3–17-кратные количества V, S, Ga и Ca по сравнению с другими видами растений. Лишайники *Cladonia stygia* и *Cladonia stellaris* обладают способностью концентрировать Fe и Co, при этом *Cladonia stellaris* также специфична к накоплению Y. *Eriophorum* накапливает K, S и As, *Ledum palustre* — As и Y. *Salix lanata* аккумулирует в высоких количествах K, Sr, Ca и Ga; листья *Betula pubescens* являются концентраторами Zn и Ni; *Larix sibirica* содержит в коре повышенное содержание Co и Y; *Pinus sylvestris* — активно накапливает Cu.

Ниже фоновых значений показано содержание элементов в *Cladonia stellaris* и *Cladonia stygia* (Cu, Zn, As, Ga), *Equisetum arvense* (Y, Ti), *Salix lanata* (Si), *Betula pubescens* (Y, Si), *Larix sibirica* (Ga, Ti), *Pinus sylvestris* (Ti).

Зональные особенности накопления химических элементов растениями

Все полученные результаты были объединены для характеристики кормовой базы разных природных зон. Таким образом, на этом основании территория может быть охарактеризована как более или менее благоприятная для выпаса оленей. Статистические достоверные различия в накоплении элементов растениями в разных биоклиматических подзонах (рис. 5, табл. 6) обнаружены для Cu, Fe, Co, Cr, As, Mg, V, Y. Для остальных элементов специфики аккумуляции не выявлено.

Согласно полученным данным, территория северной тайги отличается низким содержанием Fe, Co, As, V и Y и повышенной концентрацией Mg и Cr в растениях. Низкие концентрации элементов обусловлены господством песчаных бедных почвообразующих пород и сформировавшихся на них подзонах [Опекунова, 2013; Московченко с соавт., 2015].

Для территории лесотундры характерно повышенное содержание As. Полученные нами данные согласуются с результатами почвенных исследований [Алексеева с соавт.]. В ЯНАО установлен повышенный региональный фон по As [Алексеев с соавт., 2019]. По содержанию Cu выявлено незначительное повышение концентрации от северотаежной подзоны к южной тундре.

Для подзоны лесотундры обнаружены повышенные концентрации Fe в кладониях, а для *Eriophorum angustifolium* только в подзоне южной тундры. В подзоне северной тайги повышенные концентрации V накапливаются в *Larix sibirica*. *Salix* аккумулирует максимальные концентрации Co в подзоне северной тайги, а для кладоний в этой подзоне наблюдаются минимальные значения, которые увеличиваются на север. *Equisetum arvense* и *Salix* накапливают низкие значения Cu в подзоне северной тайги; в *Larix sibirica* наоборот, обнаружено повышенное содержание этого элемента. Содержание Ga существенно выше в листьях *Betula pubescens* и в *Eriophorum angustifolium* в подзоне лесотундры, в *Salix* меньшее содержание этого элемента в подзоне северной тайги.

Различия в накоплении некоторых элементов в растениях, возможно, связаны с особенностями их поступления из атмосферы на поверхность растений в составе отдельных фракций пылеаэрозольных выпадений [Тентюков, 2008]. Повышенное содержание тяжелых металлов (в частности, Zn, Cr и Ni) обнаружено в растительности Западного Таймыра, что по мнению авторов [Сысо и др., 2014] является геохимической особенностью бореальной зоны.

В работе [Опекунова и др., 2018] показано, что повышенное содержание тяжёлых металлов в растительности является индикатором общего загрязнения территории. При этом лишайники характеризуются повышенным содержанием всех элементов. Для берёзы характерно повышенное накопление Zn, порой двадцатикратно превышающее фоновые концентрации данного элемента в почве [Marguí, et al., 2007]. Результаты содержания тяжелых металлов в наших исследованиях сопоставимы с результатами [Попова, 2016].

Выводы

Проведенные исследования позволили определить содержание Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, As, Y, V, Na, Mg, Si, P, S, K, Ca, Ti, Mn, Fe, S в растениях фоновых участков нефтегазоносных районов севера Западной Сибири в пределах северной тайги, лесотундры и южной тундры.

В качестве объектов исследования были выбраны широко распространенные виды древесных пород (*Betula pubescens*, *Larix sibirica*, *Pinus sylvestris*), кустарников *Salix lanata*, кустарничков (*Vaccinium vitis-idaea*, *Ledum palustre* s. l.), трав (*Eriophorum angustifolium*, *Equisetum arvense*) и лишайников (*Cladonia stellaris*, *Cladonia stygia*). По величине медианного содержания в растениях элементы располагаются в следующем порядке (мг/кг): Si(8827) > Mg(6469) > Ca(3186) > P(2955) > Mn(752) > S(210) > Ti(137) > Zn(33,9) > Cu(8,3) > Sr(7,0) > Cr(5,3) > Ni(3,4) > Y(2,6) > As(0,47) > V(0,2) > Ga(0,09). Рекомендовано использовать полученные значения содержания элементов в растительности в качестве ориентировочных для исследуемой территории.

Посчитаны коэффициенты биологического накопления элементов в растениях относительно региональных фоновых концентраций в почвах. Максимальные коэффициенты аккумуляции обнаружены для $P_{22,4}$, $Mg_{9,1}$, $Mn_{8,0}$, $Ca_{6,2}$ и для $Zn_{1,5}$. Сильные концентрационные способности обнаружены у *Equisetum* по содержанию калия ($K_c = 96$).

Выявлена видовая специфика аккумуляции химических элементов в растениях и изучены зональные особенности накопления этих элементов растениями. Содержание ряда макроэлементов (Mg) и микроэлементов (V, Y, As и Co) статистически достоверно не отличается между видами исследованных растений. Наибольшее различие уровня аккумуляции между видами растений обнаружено для Ni, Zn, Ca, Mn, S и Si.

Статистические достоверные различия в накоплении элементов растениями в разных биоклиматических зонах обнаружено для Cu, Fe, Co, Cr, As, Mg, V, Y. Для остальных элементов специфики аккумуляции не выявлено.

ЛИТЕРАТУРА

1. Авцын А.П. 1972. Введение в географическую патологию. М.: Медицина. С. 328.
2. Агбалян Е.В., Колесников Р.А., Печкин А.С., Моргун Е.Н., Красненко А.С., Ильясов Р.М., Локтев Р.И., Шинкарук Е.В. 2018. Экологическое состояние почв полигонов комплексного экологического мониторинга «Сабетта», «Харп», «Надымский» Ямало-Ненецкого автономного округа // Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. Салехард. №4 (101). С. 5-12.
3. Агбалян Е.В., Шинкарук Е.В. 2015. Уровень химического загрязнения почвы в долине реки Лукьяха Тазовского полуострова // Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. №89(4). С. 42-48.
4. Алексеев И.И., Абакумов Е.В. 2019. Тяжелые металлы в почвах природных и урбанизированных ландшафтов Ямало-Ненецкого автономного округа // Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. № 1. С. 89-92.
5. Атлас Ямало-Ненецкого автономного округа/ Под ред. С.И. Ларин. 2004. Омск. С.304.
6. Байкалова Л.П., Долгова Н.Г. 2018. Кормовые ресурсы и их рациональное использование для оленеводства арктической зоны // Арктика 2018: Международное сотрудничество, экология и безопасность, инновационные технологии и логистика, правовое регулирование, история и современность: материалы международной конференции. Изд-во Красноярский государственный аграрный университет. С. 21-27.
7. Биогеохимические основы экологического нормирования/ Под ред. В.Н. Башкина, Е.В. Евстафьевой, В.В. Снакина с соавт. 1993.М.: Наука. С. 304.
8. Битюцкий Н.П. Микроэлементы высших растений. 2011. СПб.: Изд-во СПб гос. у-та. С. 367.
9. Воеводина Л.А., Воеводин О.В. 2015. Магний для почвы и растений. Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. №2 (18). С. 70-81.
10. Григорьев Н.А. 2009. Распределение химических элементов в верхней части континентальной коры. Екб.: УрО РАН. С. 382.
11. Долгова Л.С., Гаврилова И.П. 1971. Особенности почв средне-и северотаежных подзон Западной Сибири (в пределах Тюменской области) // Природные условия Западной Сибири. М. С. 77.
12. Ермаков В.В., Тютиков С.Ф., Сафонов В.А. 2018. Биогеохимическая индикация микроэлементозов / Под ред. Т.И. Моисеенко. М. С. 386.
13. Журба О. М., Рукавишников В. С., Меринов А. В., Алексеенко, А. Н. 2016. Содержание нефтепродуктов, бенз (а) пирена, тяжелых металлов, мышьяка в почве Ямало-Ненецкого автономного округа и тяжелых металлов, мышьяка в волосах детей // Гигиена и санитария. № 95(6). С. 521-524.
14. Зуев С.М. 2016. Проблемы устойчивого развития оленеводства в ЯНАО// Россия в глобальном мире. № 9 (32). С. 173-187.
15. Иеронова В.В., Безухова, А.В. 2014. Оценка экологического состояния почв в зоне нефтегазодобычи по содержанию загрязняющих веществ (на примере нефтяного месторождения Ямало-Ненецкого автономного округа) // Вестник Югорского государственного университета. №3 (34). С. 38-40.
16. Московченко Д.В., Бабушкин А.Г. 2015. Фоновое содержание подвижных форм металлов в почвах севера Западной Сибири // Вестник Тюменского государственного университета. № 3(3). С. 163-174.
17. Опекунова М.Г. 2013. Диагностика техногенной трансформации ландшафтов на основе биоиндикации: автореф. дис. ... докт. геогр. наук. СПб. С. 36.
18. Опекунова М.Г., Опекунов А.Ю., Арестова И.Ю., Кукушкин С.Ю., Спасский В.В., Никитина М.А., Елсукова Е.Ю., Шейнерман Н.А., Недбаев И.С. 2018. Использование методов биоиндикации и биотестирования в оценке экологического состояния территории газоконденсатных месторождений севера Западной Сибири // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. Т. 63, №3. С. 326-344.
19. Опекунова М.Г., Опекунов А.Ю., Кукушкин С.Ю., Арестова И.Ю. 2007. Индикаторы антропогенной нагрузки на природно-территориальные комплексы нефтегазоконденсатных

- месторождений Ямало-Ненецкого автономного округа // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. №1. С. 124-127.
20. Опекунова М.Г., Опекунов А.Ю., Кукушкин С.Ю., Ганул А.Г. 2019. Фоновое содержание химических элементов в почвах и донных осадках севера Западной Сибири // Почвоведение. №4. С. 422-439.
 21. Позов С.А., Орлова, Н. 2002. Микроэлементозы животных в биогеохимических провинциях. Ставрополь: Saarbrucken. С. 150.
 22. Попова Е.И. 2016. Накопление тяжелых металлов фитоценозами Западно-Сибирской Арктики и Субарктики // Современные проблемы науки и образования. №5. С. 317-317.
 23. Семенов И.Н. 2019. Интенсивность биогенной аккумуляции тяжелых металлов в системе «почвы-растения» Обь-Пуровского междуречья // Биогеохимия-научная основа устойчивого развития и сохранения здоровья человека. С. 218-221.
 24. Скарлыгина-Уфимцева М.Д. 1991. Системно-иерархический анализ микроэлементного состава фитобиоты ландшафтов // Тр. Биогеохимической лаборатории АН СССР. №22. С. 120-134.
 25. Скипин Л.Н., Галямов А.А., Гаевая Е.В., Захарова, Е.В. 2016. Экологическая оценка состояния почвенного покрова оленьих пастбищ полуострова Ямал // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. №12. С. 194-202.
 26. Страховенко В.Д., Щербов Б.Л., Маликова И.Н. 2016. Сравнительный анализ распределения концентраций экологически опасных элементов в компонентах окружающей среды разных ландшафтов Сибири // Экологический мониторинг окружающей среды. С. 123-140.
 27. Сысо А.И., Колпашиков Л.А., Ермолов Ю.В., Черевко А.С., Сиромля Т.И. 2014. Элементный химический состав почв и растений Западного Таймыра // Сибирский экологический журнал. Т.21, №6. С. 855-862.
 28. Таланов Г.А., Хмелевский Б.Н. 1991. Санитария кормов: справочник. М.: Агропромиздат. С. 303.
 29. Тентюков М.П. 2008. Изменение информативности индикаторных характеристик тундровых кустарников в условиях аэротехногенного загрязнения // Сибирский экологический журнал. №2. С. 217-224.
 30. Томашунас В.М., Абакумов Е.В. 2014. Содержание тяжелых металлов в почвах полуострова Ямал и острова Белый // Гигиена и санитария. №93(6). С. 26-31.
 31. Уфимцева М.Д. 2015. Закономерности накопления химических элементов высшими растениями и их реакции в аномальных биогеохимических провинциях // Геохимия. №5. С. 450-450.
 32. Шихова Н.С. 2017. Эколого-геохимические особенности растительности южного Приморья и видоспецифичность арборифлоры в накоплении тяжелых металлов // Сибирский лесной журнал. №6. С.76-88.
 33. Margun E., Queralt I., Carvalho M. L., Hidalgo M. 2007. Assessment of metal availability to vegetation (*Betula pendula*) in Pb-Zn ore concentrate residues with different features // Environmental Pollution, 145(1), P. 179-184.
 34. Marschner, H. 2011. Mineral nutrition of higher plants / H. Marschner. — 3rd ed. — London. P. 672.
 35. White P.J., Broadley M.R. 2003. Calcium in plants // Annals of botany 92(4). P. 487-511.

Поступила: 10.02.2021

Одобрена: 12.04.2021

Принята: 22.06.2021



APPENDIX

Таблица 4

Содержание химических элементов в растениях Надымского района (мг/кг)

ХЭ	Med	M	SD	Норма*	МДУ**	Фоновое содержание в почвах ЯНАО***
V	0,20	0,55	0,72	—	—	27,00
Cr	5,3	5,4	1,7	—	0,5	43,70
Co	0,02	0,17	0,34	0,3–1,0	1,0	4,00
Ni	3,4	3,9	1,7	—	3,0	15,20
Cu	8,8	12,1	14,4	3–12	—	9,95
Zn	34	48	46	20–60	50	23,00
Ga	0,09	0,16	0,17	—	—	—
As	0,47	1,89	2,33	—	0,5	2,00
Y	2,63	14,89	18,12	—	—	6,00
Na	30	44	101	1000	—	1075,25
Mg	6470	6670	2930	1800	—	711,78
Si	8800	10300	7300	10000	—	496139,57
P	2960	2740	903	1500	—	132,0
S	210	790	1030	—	—	—
K	300	5080	9270	3000	—	3654,38
Ca	3190	4670	3370	6000	—	514,00
Ti	137	157	134	—	—	1528,00
Mn	752	877	337	20–60	>500	94,54
Fe	50	188	401	25–50	100	10982,00
Sr	7	15	19	—	—	106,75

Med — медианное значение, M — среднее значение, SD — стандартное отклонение, * норма по [Биогеохимические основы..., 1993], **МДУ — максимально допустимый уровень по [Таланов, Хмелевский, 1991]. *** по результатам анализа статей [Опекунов с соавт., 2007; Иеронова с соавт., 2014; Томашунас с соавт., 2014; Агбалиян с соавт., 2015; Журба с соавт., 2016; Страховенко с соавт., 2016; Скипин с соавт., 2016; Агбалиян с соавт., 2018; Алексеев с соавт., 2019; Семенов, 2019].

Таблица 5

Содержание химических элементов в растениях в зависимости от вида (мг/кг) (величина ошибки варьирована от 5% до 10%.)

Э	<i>Ledum palustre</i>	<i>Betula pubescens</i>	<i>Vaccinium Vitis-idaea</i>	<i>Salix lanata</i>	<i>Cladonia stellaris</i>	<i>Cladonia-tygia</i>	<i>Larix sibirica</i>	<i>Eriophorum angustifolium</i>	<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Equisetum arvense</i>
V	0,27	0,10	0,31	0,28	0,09	0,18	0,20	0,19	—	2,25
Cr	5,4	3,3	4,9	3,8	6,1	7,2	5,4	4,1	5,2	4,3
Co	—	—	—	—	0,11	0,19	0,26	—	—	—
Ni	3,3	8,3	3,2	5,5	2,7	2,5	3,1	4,3	4,2	3,4
Cu	10,1	11,1	8,6	11,8	0,4	0,4	14,4	20,9	21,6	15,2
Zn	30	150	32	94	4	4	22	59	57	47
Ga	0,05	0,30	0,09	0,36	—	0,03	—	0,18	0,07	0,32
As	3,29	0,48	3,19	1,91	—	—	3,31	2,49	2,72	0,22
Y	14,2	0,2	24,4	7,2	17,2	2,9	33,3	2,6	18,9	—
Mg	5500	8300	5120	4700	6900	7900	8990	6470	5900	6400
Si	7040	2450	8130	450	13220	13730	8140	9210	6960	24890

Э	<i>Ledum palustre</i>	<i>Betula pubescens</i>	<i>Vaccinium Vitis-idaea</i>	<i>Salix lanata</i>	<i>Cladonia stellaris</i>	<i>Cladonia tygia</i>	<i>Larix sibirica</i>	<i>Eriophorum angustifolium</i>	<i>Pinus sylvestris</i>	<i>Equisetum arvense</i>
P	2780	1940	3210	1890	3240	3250	2990	2680	2790	2150
S	410	800	—	1200	—	—	—	1100	—	3600
K	—	4600	—	10400	—	—	—	3800	—	28793
Ca	2600	5300	3900	11100	2200	2500	3000	2300	2600	10100
Ti	87	188	100	282	251	320	12	199	15	52
Mn	1230	1330	1240	1140	560	590	710	640	890	650
Fe	—	—	—	—	270	425	—	—	—	—
Sr	—	—	—	50	—	—	—	—	—	25

Таблица 6

Медианное содержание химических элементов в растениях в зависимости от территории произрастания (мг/кг)

ХЭ	Участок № 1	Участок № 2	Участок № 3
V	<0,09	<u>0,63</u> 0,17–1,28	<u>0,43</u> 0,2–0,77
Cr	<u>6,05</u> 5,4–6,7	<u>4,40</u> 3,7–5,3	<u>5,29</u> 4,4–6,9
Co	—	—	<u>0,07</u> <0,02–0,37
Ni	<u>3,5</u> 2,7–4,5	<u>3,5</u> 3,2–4,3	<u>3,3</u> 2,7–3,9
Cu	<u><0,4</u> <0,4–11,7	<u>14,6</u> 5,6–22,1	<u>8,8</u> <0,4–15,8
Zn	<u>25</u> 16–52	<u>48</u> 31–78	<u>29</u> 4–49
Ga	<u>0,08</u> 0,03–0,15	<u>0,18</u> 0,03–0,36	<u>0,05</u> <0,02–0,19
As	—	<u>3,17</u> 0,96–5,71	<u>2,24</u> <0,02–3,42
Y	—	<u>29,1</u> <0,02–41,9	<u>16,8</u> 5,7–29,7
Mg	<u>8900</u> 7700–10200	<u>5300</u> 3400–6600	<u>5700</u> 4700–7200
Si	<u>7600</u> 5700–11100	<u>9200</u> 6900–13400	<u>9400</u> 7000–15000
P	<u>2940</u> 2580–3270	<u>2900</u> 2150–3090	<u>2990</u> 2350–3260
S	<u><200</u> <200–760	<u>480</u> <200–1060	<u><200</u> <200–1170
K	<u><300</u> <300–3900	<u><300</u> <300–6500	<u><300</u> <300–6300
Ca	<u>3200</u> 2400–4800	<u>3300</u> 2300–6500	<u>3200</u> 2600–5020
Ti	<u>160</u> 20–260	<u>83</u> 12–202	<u>172</u> 59–342
Mn	<u>797</u> 650–1130	<u>740</u> 620–1090	<u>680</u> 590–1150
Fe	—	—	<u><50</u> <50–570
Sr	—	<u><7</u> <7–11	<u><7</u> <7–14

Числитель — медианное значение концентрации, знаменатель — первый и третий квартили.

Таблица 7

Координаты мест посещений

n	place	name	latitude	longitude	n	place	name	latitude	longitude
1	С.тайга	багульник	64,58598	70,94183	37	Лесотундра	брусника	65,58197	72,11540
2	С.тайга	багульник	64,51162	71,16405	38	Лесотундра	брусника	65,81552	71,03008
3	С.тайга	багульник	64,52786	72,16885	39	Лесотундра	брусника	65,75344	75,69913
4	С.тайга	берёза	64,56671	70,94138	40	Лесотундра	ива	65,59483	72,00751
5	С.тайга	берёза	64,51162	71,16405	41	Лесотундра	ива	65,81552	71,03008
6	С.тайга	берёза	64,58751	72,21848	42	Лесотундра	ива	65,74363	75,71055
7	С.тайга	брусника	64,37391	71,58059	43	Лесотундра	кл.звёздчатая	64,58121	72,20351
8	С.тайга	брусника	64,37391	71,58059	44	Лесотундра	кл.звёздчатая	65,43226	75,70997
9	С.тайга	брусника	64,58121	72,20351	45	Лесотундра	кл.звёздчатая	65,74461	75,70997
10	С.тайга	ива	64,50726	71,03552	46	Лесотундра	кл.мрачная	65,61874	71,88978
11	С.тайга	ива	64,26743	70,9437	47	Лесотундра	кл.мрачная	65,46921	73,43226
12	С.тайга	ива	64,37391	71,58059	48	Лесотундра	кл.мрачная	65,82544	75,71075
13	С.тайга	кл.звёздчатая	64,79944	70,94532	49	Лесотундра	лиственница	65,59483	72,00751
14	С.тайга	кл.звёздчатая	64,48877	71,04145	50	Лесотундра	лиственница	65,81479	70,99592
15	С.тайга	кл.звёздчатая	64,52836	72,16651	51	Лесотундра	лиственница	65,74461	75,70997
16	С.тайга	кл.мрачная	64,58493	70,94532	52	Лесотундра	пушица	65,78911	71,53417
17	С.тайга	кл.мрачная	64,48877	71,04145	53	Лесотундра	пушица	65,74567	71,6925
18	С.тайга	кл.мрачная	64,52786	72,1688	54	Лесотундра	пушица	65,82544	75,71075
19	С.тайга	лиственница	64,56671	70,94138	55	Лесотундра	сосна	65,74567	71,20916
20	С.тайга	лиственница	64,58493	70,94532	56	Лесотундра	сосна	65,57803	73,07286
21	С.тайга	лиственница	64,58121	72,20351	57	Лесотундра	сосна	65,71098	74,16663
22	С.тайга	пушица	64,51162	71,16405	58	Лесотундра	хвощ	65,55356	72,24153
23	С.тайга	пушица	64,52836	72,16651	59	Лесотундра	хвощ	65,90652	74,20425
24	С.тайга	пушица	64,42165	71,99564	60	Лесотундра	хвощ	65,90786	75,75230
25	С.тайга	сосна	64,58493	70,94532	61	Лесотундра	хвощ	65,46922	73,43225
26	С.тайга	сосна	65,59914	72,22268	62	Ю.тундра	багульник	65,51944	73,89777
27	С.тайга	сосна	64,42056	72,00008	63	Ю.тундра	багульник	65,63702	74,32866
28	С.тайга	хвощ	64,50726	71,03552	64	Ю.тундра	багульник	67,78527	75,48186
29	С.тайга	хвощ	64,50799	71,03507	65	Ю.тундра	брусника	66,48380	73,92025
30	С.тайга	хвощ	64,37391	71,58059	66	Ю.тундра	брусника	65,81552	71,03008
31	Лесотундра	багульник	65,60213	72,00791	67	Ю.тундра	брусника	68,04344	75,52311
32	Лесотундра	багульник	65,58197	72,11540	68	Ю.тундра	ива	65,51944	73,89778
33	Лесотундра	багульник	65,74461	75,70997	69	Ю.тундра	ива	67,78527	75,48186
34	Лесотундра	берёза	65,59972	72,03813	70	Ю.тундра	ива	68,25058	75,74994
35	Лесотундра	берёза	65,55356	72,24153	71	Ю.тундра	ива	67,91952	74,99752
36	Лесотундра	берёза	65,90652	74,20425	72	Ю.тундра	кл.звёздчатая	66,48380	73,92025

Окончание Табл. 7

n	place	name	latitude	longitude	n	place	name	latitude	longitude
73	Ю.тундра	кл.звёздчатая	67,76963	75,54088	82	Ю.тундра	лиственница	66,52038	73,89658
74	Ю.тундра	кл.звёздчатая	68,04344	75,52311	83	Ю.тундра	лиственница	67,91952	74,99752
75	Ю.тундра	кл.звёздчатая	67,91711	75,03992	84	Ю.тундра	лиственница	67,89675	75,46627
76	Ю.тундра	кл.мрачная	67,74619	75,26992	85	Ю.тундра	пушица	65,51952	73,89583
77	Ю.тундра	кл.мрачная	67,74619	75,26992	86	Ю.тундра	пушица	65,63702	74,32861
78	Ю.тундра	кл.мрачная	66,48380	73,92025	87	Ю.тундра	пушица	65,81552	71,03008
79	Ю.тундра	кл.мрачная	67,76963	75,54088	88	Ю.тундра	хвощ	66,51772	73,88197
80	Ю.тундра	кл.мрачная	67,97258	75,47141	89	Ю.тундра	хвощ	66,31844	73,88186
81	Ю.тундра	кл.мрачная	67,91711	75,03991	90	Ю.тундра	хвощ	68,24291	75,74708



IMPACT OF SNOW COVER AND AIR TEMPERATURE ON GROUND FREEZING DEPTH AND STABILITY IN MOUNTAIN AREA

D.M. Frolov

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Автор для переписки: e-mail: denisfrolov@mail.ru

Citation: Frolov D.M. 2020. Impact of snow cover and air temperature on ground freezing depth and stability in mountain area // Environmental dynamics and global climate change. V. 12. N. 1. P. 43–46. DOI: <https://doi.org/10.17816/edgcc21205>

Поскольку при строительстве селе- и лавиноудерживающих геотехнических сооружений на горных территориях возникает проблема крепления и устойчивости этих сооружений в условиях сезонного и/или многолетнего промерзания грунта, в данной работе производится оценка влияния снежного покрова и температуры воздуха на глубину промерзания и устойчивость грунта на основе разработанной расчётной схемы за зимние сезоны 2015/16–2019/20 в Приэльбрусье. Расчётная схема строилась на основе задачи теплопроводности трехслойной среды (снег, мерзлый и талый грунт) с фазовым переходом на границе. Уравнение теплового баланса включало энергию фазового перехода, приток тепла из талого грунта и отток в мерзлый грунт и при наличии снежного покрова через него в атмосферу.

Ключевые слова: снежный покров, температура воздуха, промерзание и устойчивость грунта.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из факторов устойчивости грунта на склонах при строительстве селе- и лавиноудерживающих геотехнических сооружений в горных территориях является промерзание подстилающего грунта, так как в горных районах грунт может находиться в мерзлом состоянии в течение восьми и более месяцев. Однако, происходящее последнее время изменение температуры воздуха и количества осадков (в первую очередь в виде снега) [Golubev et al., 2008] ведут к изменению глубины и длительности промерзания грунта и как следствие уменьшение его устойчивости. Модельное исследование промерзания грунта в горах производилось в работах [Haberhorn et al., 2016]. В данной работе на основе разработанной расчётной схемы производится оценка глубины промерзания грунта для последних пяти зимних сезонов на основе данных о толщине снежного покрова и температуре воздуха для метеостанции Терскол. Метеостанция Терскол расположена в долине Азау в Приэльбрусье на высоте 2141 м над уровнем моря. Средняя температура января составляет там $-^{\circ}\text{C}$, июля $-13,4^{\circ}\text{C}$, а средняя сумма отрицательных месячных температур зимнего периода (ноябрь–март) составляет -20°C . За период снегонакопления (в ноябре–марте) выпадает в среднем около 280 мм осадков, вызывая накопление снежного покро-

ва до 70–80 см толщиной. Расчёты изменения глубины промерзания грунта производились по предложенной расчётной схеме по данным о толщине снежного покрова и температуре воздуха на основании трехслойной модели среды (талый грунт, мерзлый грунт, снег) и при предположении линейного изменения температуры в средах и тепловому потоку согласно закону Фурье.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе произведены расчёты глубины промерзания грунта на основе данных о температуре воздуха и толщине снежного покрова для метеостанций Терскол за зимние сезоны 2015/16–2019/20 по предложенной в статье [Фролов, 2019] расчётной схеме. Расчётная схема строилась на основе задачи теплопроводности трехслойной среды (снег, мерзлый и талый грунт) с фазовым переходом на границе мерзлого и талого грунта. Расчётная схема применима для условий как покрытой снегом поверхности грунта, так и для оголённой поверхности. Уравнение теплового баланса включало энергию фазового перехода, приток тепла из талого грунта и отток в мерзлый грунт и при наличии снежного покрова через него в атмосферу. Поток тепла рассчитывался по закону Фурье, как произведение теплопроводности и градиента температуры. Предполагалось,

что температура в каждой из сред изменяется линейно (например, [DeGaetano et al., 2001]). Для снежного покрова и мерзлого грунта использовалась формула теплопроводности двухслойной среды.

Расчет промерзания грунта, на основе данных о температуре воздуха и толщине и теплопроводности снежного покрова в течение зимнего периода позволял оценить интенсивность движения фронта промерзания в этот период времени. Зависимость скорости движения фронта промерзания находилась по расчетной схеме. Схема учитывала намерзание грунта снизу на массиве мерзлого грунта в зимний период на основе данных о ежедневной температуре воздуха (и толщине и теплопроводности снежного покрова).

Уравнение теплового баланса на границе фронта промерзания записывалось как $F_1 = cLV + F_2$ или как:

$$dh_{\text{мг}}/dt = V = (F_1 - F_2)/cL,$$

где: F_1 — отток тепла через замёрзший грунт (и снежный покров) от фронта промерзания ($\text{Вт}/\text{м}^2$) в атмосферу; $LV = cLdh_{\text{мг}}/dt$ — расход тепла на фазовый переход, с влагосодержанием грунта ($1-4 \text{ кг}/\text{см} \cdot \text{м}^2$, или с долей содержания влаги $0,1-0,4$ от общего объёма среды, где максимальное значение содержания влаги, равное $0,4$ (которое было принято при расчётах) соответствует полному заполнению пор водой у легкой глины с плотностью $2000 \text{ кг}/\text{м}^3$ и коэффициентом пористости $0,617$ [Грунтоведение, 2005]); L — энергия фазового перехода ($335 \text{ кДж}/\text{кг}$), V — скорость движения фронта промерзания ($\text{см}/\text{с}$); F_2 — отток тепла на охлаждение талого грунта перед фронтом промерзания ($\text{Вт}/\text{м}^2$).

При составлении уравнения баланса тепла было сделано пренебрежение слагаемыми, отвечающими за теплотери на охлаждение грунта, а также за изменение его влажности с глубиной.

Тепловой поток выражается по закону Фурье через градиент температуры и теплопроводность как $F = -\lambda (\text{grad } T)$. Таким образом, тепловой поток от фронта промерзания в атмосферу через комбинацию из двух сред (снег и мерзлый грунт) согласно данным справочника [Михеев, 1977] может быть записан как:

$$F_1 = -\lambda \frac{\Delta T}{\Delta x} = \frac{-\Delta T}{\frac{\Delta x_{\text{с}}}{\lambda_{\text{с}}} + \frac{\Delta x_{\text{мг}}}{\lambda_{\text{мг}}}} = \frac{-T_{\text{возд}}}{\frac{h_{\text{с}}}{\lambda_{\text{с}}} + \frac{h_{\text{мг}}}{\lambda_{\text{мг}}}}$$

здесь $T_{\text{возд}}$ — температура воздуха, $h_{\text{с}}$ и $h_{\text{мг}}$ — толщина снега и глубина промерзания, а $\lambda_{\text{с}}$ и $\lambda_{\text{мг}}$ — теплопроводность снега и мёрзлого грунта.

Предполагалось, что на глубине 10 м в грунте находится точка нулевых годовых колебаний температуры T_0 со значением около 4°C (значение привязывалось к среднегодовой температуре в Терсколе). Поэтому

$$F_2 = -\lambda_{\text{тг}} \frac{\Delta T}{\Delta x} = \lambda_{\text{тг}} \frac{T_0}{10 - h_{\text{мг}}},$$

здесь $\lambda_{\text{тг}}$ — теплопроводность талого грунта. Вычисления производились с шагом в один день. На первый момент предполагалось, что толщина мерзлого грунта $h_{\text{мг}}$ равна $0,5 \text{ см}$. На каждом шаге по времени (каждый день) вычислялась (рассчитывалась) скорость промерзания V и значение толщины мерзлого грунта $h_{\text{мг}}$ для следующего дня (шага по времени). Согласно [Грунтоведение, 2005], средняя теплопроводность талого и мерзлого глинистого грунта может быть взята как $1,4$ и $1,8 \text{ Вт}/\text{м}^\circ\text{C}$.

Средняя теплопроводность снега $\lambda_{\text{с}}$ рассчитывалась относительно плотности по формуле А.В. Павлова [Павлов, 1979] и бралась равной $0,18 \text{ Вт}/\text{м}^\circ\text{C}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТОВ И ОБСУЖДЕНИЕ

В работе для выведенного дифференциального уравнения по времени первого порядка для изменения глубины промерзания грунта была построена разностная схема посредством аппроксимации этого дифференциального уравнения явным методом Эйлера: $h_{\text{мг}}(t_{n+1}) = h_{\text{мг}}(t_n) + \Delta t V(t_n)$. По полученной разностной схеме для каждого зимнего сезона на $2015/16-2019/20$ были произведены расчёты изменения глубины промерзания грунта. Результаты расчётов приведены на рис. 1.

Примененный метод расчёта является хорошо физически обоснованным. Решение по методу хорошо описывает процесс изменения глубины промерзания в течение зимнего сезона. Важным для успешной работы метода является наиболее возможно точное задание начальных данных.

Результаты расчета максимальной глубины промерзания грунта для метеостанции Терскол за зимние периоды $2015/16-2019/20$ приведены в таблице 1.

Согласно расчётам, грунт под снежным покровом остается мёрзлым в Приэльбрусье с декабря по апрель. Мощность накапливаемого снежного покрова может достигать при этом полуметра и более. При этом грунт под покрытой снежным покровом поверхностью промерзает согласно расчётам в среднем на 20 и более сантиметров. В случае частичного или полного сдувания снежного покрова промерзание грунта

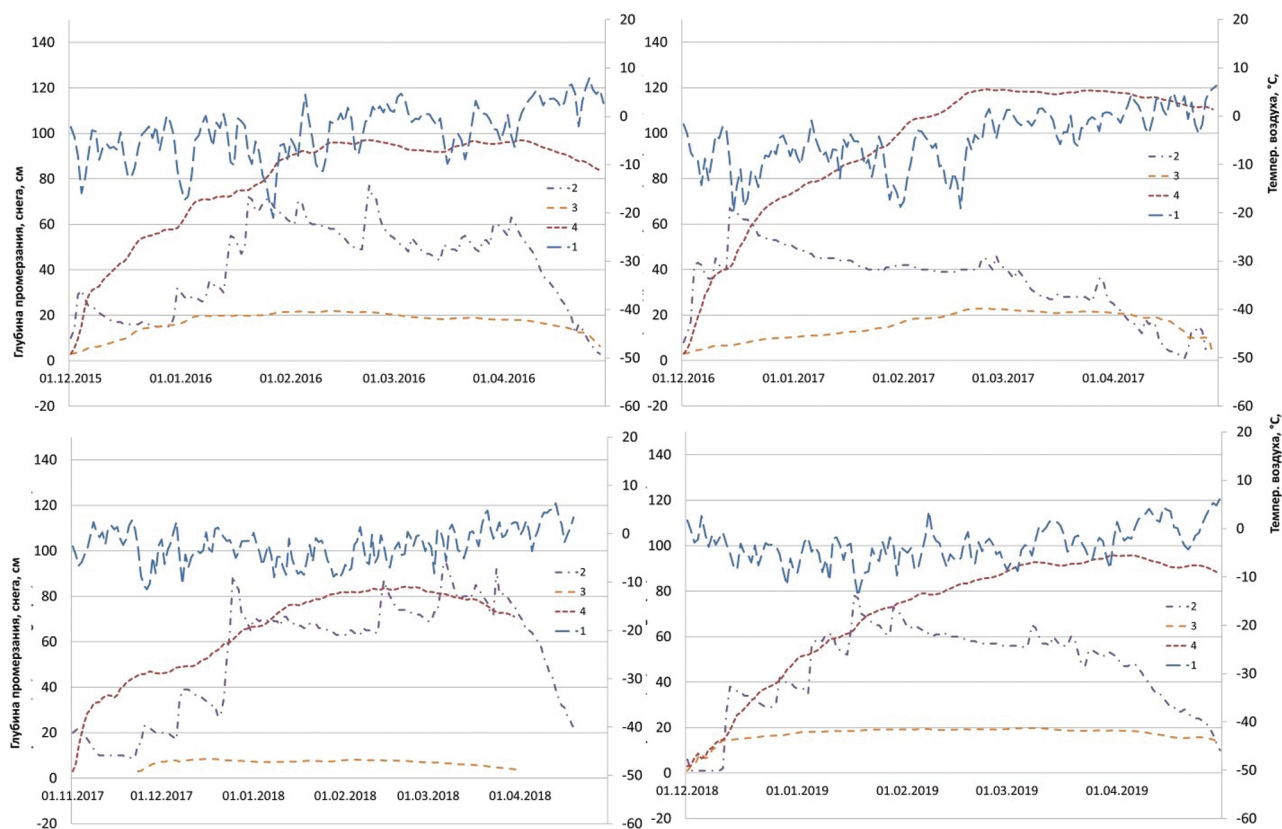


Рис. 1. Изменения температуры воздуха и глубины промерзания по данным расчётов для покрытой снегом и оголённой поверхности грунта для метеостанции Терскол для зимних периодов 2015/16–2018/19 (1 — температура воздуха, 2 — толщина снежного покрова и 3 — расчётная глубина промерзания грунта под снежным покровом 4 — расчётная глубина промерзания оголённого грунта)

Таблица 1

Изменение максимальной глубины промерзания грунта, средней за февраль толщины снежного покрова и суммы отрицательных среднемесячных температур для метеостанции Терскол за зимние периоды 2015/16–2019/20

Зимний период	Сумма отриц. среднемес. температур, °С	Сред. за февраль толщина снежного покрова, см	Макс. глубина промерзания покрытого снегом грунта, см	Макс. глубина промерзания оголённого грунта, см
2015/16	–18,7	60	21	97
2016/17	–27,7	40	23	119
2017/18	–14,2	70	8	83
2018/19	–19,4	60	20	96
2019/20			20	

может происходить на глубину до 1 метра и более и длится более продолжительный период. Таким образом, предложенный метод расчёта динамики глубины промерзания грунта на основе данных о температуре воздуха и толщине снежного покрова позволяет оценить промерзание грунта как фактора устойчивости грунта при строительстве селе- и лавинозащитных сооружений.

Работа выполнена на основе темы государственного задания № 121051300175-4 «Опасность и риск природных процессов и явлений».

ЛИТЕРАТУРА

1. Грунтоведение / Под ред. В.Т. Трофимов. 2005. М.: Изд-во Наука. С. 1024.
2. Кудрявцев В.А. 1954. Температура верхних горизонтов вечномёрзлой толщи в пределах СССР. М.: Изд-во АН СССР. С. 183.
3. Михеев М.А. 1977. Основы теплопередачи / Под. Ред. М.А. Михеев, И.М. Михеева. М.: Изд-во Энергия С. 344.
4. Павлов А.В. 1979. Теплофизика ландшафтов. Новосибирск.: Изд-во Наука. С. 284.

5. Фролов Д.М. 2019. Расчёт глубины промерзания грунта под оголённой и покрытой снегом поверхностью на метеостанции МГУ за зимние периоды 2011/12-2017/18 // Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. Т. 10. № 2. С. 86-90.
6. DeGaetano A.T., Cameron M.D., Wilks D.S. 2001. Physical simulation of maximum seasonal soil freezing depth in the United States using routine weather observations // Journal of Applied Meteorology. Vol. 40(3). P. 546-555.
7. Golubev V.N., Petrushina M.N., Frolov D.M. 2008. Winter regime of temperature and precipitation as a factor of snow-cover distribution and its stratigraphy // Annals of Glaciology Vol. 49, P. 179-186.
8. Haberkorn A., Wever N., Hoelzle M., Phillips M., Kenner R., Bavay M., Lehning M. 2016. Distributed snow and rock temperature modeling in steep rock walls using Alpine3D // The Cryosphere Discuss. DOI: <https://doi.org/10.5194/tc-2016-73>

Поступила: 17.03.2021

Одобрена: 14.04.2021

Принята: 22.06.2021

