16+

ISSN 2500-2961
УДК 55:57:58:59:61:91

СОЦИАЛЬНО-ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

2020. Т. 10. № 2

Природа и человек: экологические исследования

Учредитель и издатель:
Московский педагогический государственный университет

Свидетельство о регистрации СМИ: ПИ № ФС 77–67765 от 17.11.2016 г.

Адрес редакции:
109240, Москва, ул. В. Радищевская, д. 16–18, каб. 223

Сайт: soc-ecol.ru
E-mail: izdat_mgopu@mail.ru

Издается с 2011 г.

Выходит 4 раза в год

Журнал входит в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий ВАК РФ:

Биологические науки
03.02.01 – Ботаника
03.02.07 – Генетика
03.02.08 – Экология
03.02.13 – Почвоведение
03.02.14 – Биологические ресурсы
03.03.01 – Физиология
03.03.06 – Нейробиология

Науки о Земле
25.00.23 – Физическая география и биогеография, география почв и геохимия ландшафтов
25.00.36 – Геоэкология

Подписной индекс журнала по Объединенному каталогу «Пресса России» – **85004**

© МПГУ, 2020

ISSN 2500-2961

ENVIRONMENT AND HUMAN:
ECOLOGICAL STUDIES

2020. Vol. 10. No. 2

Socialno-ecologicheskie Technologii

The Founder and Publisher:
Moscow Pedagogical State University

Mass media registration certificate
ПИ № ФС 77–67765
as of 17.11.2016

Editorial office:
Moscow, Russia, Verhnyaya Radishchevskaya str., 16–18, room 223, 109240

The journal is included in the list of the leading peer-reviewed scholarly journals the Higher Attestation Commission of The Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation recommended to PhD candidates and those working for their habilitation who wish to publish the results of their research

The journal has been published since 2011

The journal is published 4 times a year

E-mail: izdat_mgopu@mail.ru

Information on journal can be accessed via: soc-ecol.ru

© MPGU, 2020

Редакционная коллегия

Главный редактор

Марина Викторовна Костина – доктор биологических наук, доцент; профессор кафедры ботаники Института биологии и химии, Московский педагогический государственный университет

Заместитель главного редактора

Зинаида Ивановна Гордеева – кандидат географических наук, профессор; профессор кафедры экологии и природопользования географического факультета, Московский педагогический государственный университет

Ответственный секретарь

Екатерина Олеговна Королькова – кандидат биологических наук, доцент; доцент кафедры ботаники Института биологии и химии, Московский педагогический государственный университет; доцент кафедры клеточной биологии факультета биологии и биотехнологии, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», г. Москва

Павел Алексеевич Агапов – кандидат биологических наук; доцент кафедры анатомии и физиологии человека и животных Института биологии и химии, Московский педагогический государственный университет; научный сотрудник лаборатории анатомии и архитектоники мозга Отдела исследований мозга, Научный центр неврологии, г. Москва

Ирина Олеговна Алябина – доктор биологических наук, доцент; профессор кафедры географии почв факультета почвоведения, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Ирина Вениаминовна Беляева-Чемберлен – доктор биологических наук; редактор содержания (номенклатура и таксономия) баз данных растений и грибов отдела «Биоразнообразие, биоинформатика и анализ распространения растений», Королевские ботанические сады, Кью, Великобритания

Владимир Владимирович Бобров – кандидат биологических наук; старший научный сотрудник лаборатории сохранения биоразнообразия и использования биоресурсов, Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, г. Москва

Алексей Владимирович Богданов – доктор биологических наук; главный научный сотрудник лаборатории прикладной физиологии высшей нервной деятельности человека, Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, г. Москва

Василий Николаевич Бурдь – доктор химических наук (ВАК Республики Беларусь); профессор кафедры химии и химической технологии факультета биологии и экологии, Гродненский государственный университет им. Я. Купалы, Республика Беларусь

Владимир Павлович Викторов – доктор биологических наук, доцент; заведующий кафедрой ботаники Института биологии и химии, Московский педагогический государственный университет

Юлия Константиновна Виноградова – доктор биологических наук; главный научный сотрудник отдела флоры, Главный ботанический сад им. Н.В. Цицина РАН, г. Москва

Юрий Никифорович Водяницкий – доктор сельскохозяйственных наук, доцент; профессор кафедры общего почвоведения факультета почвоведения, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Ольга Владимировна Галанина – кандидат биологических наук; доцент кафедры биогеографии и охраны природы Института наук о Земле, Санкт-Петербургский государственный университет

Владимир Борисович Дорохов – доктор биологических наук; заведующий лабораторией нейробиологии сна и бодрствования, Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, г. Москва

Александр Сергеевич Зернов – доктор биологических наук; профессор кафедры высших растений биологического факультета, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Василий Иванович Ерошенко – кандидат педагогических наук, доцент; заведующий кафедрой экологии и природопользования географического факультета, Московский педагогический государственный университет

Сергей Вячеславович Левыкин – доктор географических наук, профессор; заведующий отделом степеведения и природопользования, Институт степи Уральского отделения РАН, г. Оренбург

Дмитрий Леонидович Лопатников – доктор географических наук, доцент; старший научный сотрудник лаборатории географии мирового развития, Институт географии РАН, г. Одинцово Московской обл.

Татьяна Михайловна Лысенко – доктор биологических наук, доцент; ведущий научный сотрудник лаборатории проблем фиторазнообразия, Институт экологии Волжского бассейна РАН, г. Тольятти Самарской области; ведущий научный сотрудник лаборатории общей геоботаники, Ботанический институт им. В.Л. Комарова РАН, г. Санкт-Петербург

Ирина Владимировна Лянгузова – доктор биологических наук, старший научный сотрудник; ведущий научный сотрудник лаборатории экологии растительных сообществ, Ботанический институт им. В.Л. Комарова РАН, г. Санкт-Петербург

Наталья Олеговна Минькова – кандидат биологических наук, доцент; заместитель проректора по учебной работе, Севастопольский государственный университет

Сергей Владимирович Наугольных – доктор геолого-минералогических наук, профессор; главный научный сотрудник лаборатории палеофлористики, Геологический институт РАН, г. Москва

Наталия Борисовна Панкова – доктор биологических наук, доцент; главный научный сотрудник лаборатории физико-химической и экологической патофизиологии, Научно-исследовательский институт общей патологии и патофизиологии, г. Москва

Светлана Камильевна Пятунина – кандидат биологических наук, доцент; директор Института биологии и химии, Московский педагогический государственный университет

Владимир Николаевич Сальков – доктор медицинских наук; старший научный сотрудник лаборатории функциональной морфохимии Отдела исследований мозга, Научный центр неврологии, г. Москва

Олег Викторович Созинов – доктор биологических наук, доцент (ВАК Республики Беларусь); заведующий кафедрой ботаники, Гродненский государственный университет им. Янки Купалы, Республика Беларусь

Владимир Семёнович Фридман – кандидат биологических наук; старший научный сотрудник лаборатории экологии, биологических инвазий и охраны природы кафедры высших растений биологического факультета, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Алексей Владимирович Чернов – доктор географических наук, доцент; ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории эрозии почв и русловых процессов им. Н.И. Маккавеева географического факультета, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Андрей Викторович Щербаков – доктор биологических наук; ведущий научный сотрудник лаборатории экологии, биологических инвазий и охраны природы кафедры высших растений биологического факультета, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Михаил Сергеевич Яблоков – кандидат биологических наук; эксперт WWF России

Владимир Иванович Яшкичев – доктор химических наук, профессор; профессор кафедры экологии и природопользования географического факультета, Московский педагогический государственный университет

Editorial Board

Editor-in-Chief

Marina V. Kostina – professor at the Department of Botany at the Institute of Biology and Chemistry, Moscow Pedagogical State University, Russia

Deputy Chief Editor

Zinaida I. Gordeeva – professor at the Department of Ecology and Environmental Sciences at the Faculty of Geography, Moscow Pedagogical State University, Russia

Executive secretary

Ekaterina O. Korolkova – associate professor at the Department of Botany at the Institute of Biology and Chemistry, Moscow Pedagogical State University; Associate Professor at the Department of Cell Biology of the Faculty of Biology and Biotechnologies, National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia

Pavel A. Agapov – associate professor at the Department of Anatomy and Physiology at the Institute of Biology and Chemistry, Moscow Pedagogical State University; researcher at the Anatomy and Architectonics Laboratory at the Brain Research Department, Research Center of Neurology, Moscow, Russia

Irina O. Alyabina – professor at the Soil Geography Department at the Faculty of Soil Science, Lomonosov Moscow State University, Russia

Irina V. Belyaeva-Chamberlain – content editor – Plant & Fungal Names, Biodiversity Informatics & Spatial Analysis, Royal Botanic Gardens, Kew, United Kingdom

Vladimir V. Bobrov – senior researcher at the Laboratory of Biodiversity Conservation and Use of Biological Resources, A.N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Aleksej V. Bogdanov – head at the Laboratory of General Physiology of Temporary Connections, Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Vasilii N. Burd – professor at the Department of Chemistry and Chemical Technology at the Faculty of Biology and Ecology, Yanka Kupala State University of Grodno, Republic of Belarus

Aleksei V. Chernov – leading researcher at the N.I. Makkaveev Research Laboratory of Soil Erosion and Channel Processes at the Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University, Russia

Vladimir B. Dorohov – head at the Laboratory of Neurobiology of Sleep and Wakefulness, Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Vasilii I. Eroshenko – head at the Department of Ecology and Environmental Sciences at the Faculty of Geography, Moscow Pedagogical State University, Russia

Vladimir S. Friedman – senior researcher at the Laboratory of Ecology, Biological Invasions and Conservation at the Department of Higher Plants of Biological Faculty, Lomonosov Moscow State University, Russia

Olga V. Galanina – associate professor at the Department of Biogeography and Environmental Protection at the Institute of Earth Sciences, St. Petersburg State University, Russia

Sergey V. Levykin – Head at the Department of Steppe Studies and Nature Management, Institute of Steppe, Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Orenburg, Russia

Dmitry L. Lopatnikov – senior researcher at the World Development Geography Laboratory, Institute of Geography RAS, Odintsovo, Moscow region, Russia

Irina V. Lyanguzova – leading researcher at the Laboratory of Ecology of Plant Communities, Komarov Institute of Botany, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

Tatyana M. Lysenko – senior researcher at the Laboratory of Phytodiversity Problems, Institute of Ecology of the Volga River Basin, Russian Academy of Science, Togliatti, Samara region, Russia

Natalia O. Minkova – deputy vice-rector for Academic Affairs, Sevastopol State University, Russia

Serge V. Naugolnykh – chief scientific officer at the Laboratory of Paleofloristics, Geological Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Natalia B. Pankova – chief scientific officer at the Laboratory of Physical-Chemical and Environmental Pathophysiology, Institute of General Pathology and Pathophysiology, Moscow, Russia

Svetlana K. Piatunina – director at the Institute of Biology and Chemistry, Moscow Pedagogical State University, Russia

Vladimir N. Salkov – senior researcher at the Laboratory of Functional Morphochemistry, Research Center of Neurology, Moscow, Russia

Andrei V. Scherbakov – leading researcher at the Laboratory of Ecology, Biological Invasions and Nature Protection of Higher Plants at the Biological Faculty, Lomonosov Moscow State University, Russia

Oleg V. Sozinov – head at the Department of Botany, Yanka Kupala State University of Grodno, Republic of Belarus

Yulia K. Vinogradova – chief researcher at the Flora Department, N.V. Tsitsin Main Botanical Garden, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Vladimir P. Viktorov – head at the Department of Botany at the Institute of Biology and Chemistry, Moscow Pedagogical State University, Russia

Yury N. Vodyanitsky – professor at the Department of General Soil Science at the Faculty of Soil Science, Lomonosov Moscow State University, Russia

Mikhail S. Yablokov – expert WWF Russia

Vladimir I. Yashkichev – professor at the Department of Ecology and Environmental Sciences at the Faculty of Geography, Moscow Pedagogical State University, Russia

Aleksandr S. Zernov – professor at the Department of Higher Plants at the Biological Faculty, Lomonosov Moscow State University, Russia

Содержание

ИЗУЧЕНИЕ И СОХРАНЕНИЕ БИОЛОГИЧЕСКОГО РАЗНООБРАЗИЯ

В.В. Бобров

Редкие и исчезающие виды беспозвоночных животных Монголии: современное состояние, угрозы и меры охраны 121

С.В. Наугольных, В.В. Линкевич

Флора артинского яруса (нижняя пермь) стратотипического региона (Средний Урал) 133

Е.А. Пинаевская, С.Н. Тарханов, А.С. Пахов

Особенности роста разных форм сосны обыкновенной в кустарничково-сфагновом типе леса устья реки Онега 151

Т.Ю. Толпышева

Распределение микотоксинов в цианолишайниках на побережье Белого моря 170

ИССЛЕДОВАНИЯ АНТРОПОГЕННО-ИЗМЕНЕННЫХ ЭКОСИСТЕМ И УРБОЭКОЛОГИЯ

И.В. Владимцева, И.В. Могилевская, О.В. Колотова, В.Е. Древин

Магнитоуправляемые микроорганизмы для биологической очистки промышленных сточных вод 185

М.В. Шабанов, М.С. Маричев

Тяжелые металлы в почвах геохимически сопряженных ландшафтов Красноуральского промышленного узла. 201

АНТРОПОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

И.А. Яковенко, Н.Е. Петренко, Е.А. Черемушкин, В.Б. Дорохов, З.В. Бакаева, Е.Б. Якунина, В.И. Торшин, Ю.П. Старшинов, Д.С. Свешников

Влияние недостатка ночного сна на когнитивную установку по показателям взаимодействия ритмов ЭЭГ 226

Contents

STUDY AND CONSERVATION OF BIOLOGICAL DIVERSITY

V.V. Bobrov

Rare and endangered species
of invertebrate animals of Mongolia:
Current status, threats and measures of protection 121

S.V. Naugolnykh, V.V. Linkevich

Artinskian flora (Lower Permian)
of the stratotypic area (the Middle Cis-Urals) 133

E.A. Pinaevskaya, S.N. Tarkhanov, A.S. Pakhov

Growth features of different forms
of scots pine in the shrub-sphagnum forest type
estuary of the Onega River 151

T.Yu. Tolpysheva

Distribution of mycotoxins in cyanolichens
on the coast of the White Sea. 170

ANTHROPOGENICALLY MODIFIED ECOSYSTEMS
AND URBAN ECOLOGY

*I.V. Vladimtseva, I.V. Mogilevskaya,
O.I. Kolotova, V.E. Drevin*

Magnetically controlled microorganisms
for the biological industrial wastewater treatment 185

M.V. Shabanov, M.S. Marichev

Heavy metals in the soils
of geochemically coupled landscapes
of the Krasnouralsk Industrial Centre. 201

ANTHROPOECOLOGICAL RESEARCH

*I.A. Yakovenko, N.E. Petrenko, E.A. Cheremoushkin,
V.B. Dorokhov, Z.V. Bakaeva, E.B. Yakunina,
V.I. Torshin, Yu.P. Starshinov, D.S. Sveshnikov*

Influence of lack of night sleep on the cognitive set
by indicators of EEG rhythms coupling 226

Социально-экологические технологии
2020. Т. 10. № 2

Проблемное исследование

DOI: 10.31862/2500-2961-2020-10-2-121-132

В.В. Бобров

**Институт проблем экологии и эволюции имени А.Н. Северцова РАН,
117091, г. Москва, Российская Федерация**

Редкие и исчезающие виды беспозвоночных животных Монголии: современное состояние, угрозы и меры охраны

На основании приведенной во 2-м и 3-м изданиях Красной книги Монголии информации проанализировано современное состояние редких и исчезающих видов моллюсков, ракообразных и насекомых Монголии и угрозы для их существования: загрязнение воды и случайный вылов при рыболовстве (для водных видов); деградация местообитаний (сенокошение, осушение болот); перевыпас скота; коллектирование (прежде всего, для видов дневных бабочек). Выявлена действенность принятых мер охраны: местообитания некоторых видов включены в границы особо охраняемых природных территорий; некоторые виды занесены в Приложение II Конвенции о международной торговле видами дикой фауны и флоры, находящимися под угрозой исчезновения, что позволит установить строгий контроль над международной торговлей редкими и исчезающими видами беспозвоночных Монголии. Указано, что для сохранения некоторых видов моллюсков, ракообразных и насекомых необходимы дополнительные и более конкретные меры: предотвращение деградации местообитаний, включая перевыпас скота и загрязнение водоемов; запрет на коллектирование; проведение исследований с целью выявления концентрации популяций, а также оценки ресурсов пищевых растений.

© Бобров В.В., 2020
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International License
The content is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Ключевые слова: Красная книга Монголии, беззубкообразные моллюски, десятиногие ракообразные, стрекозы, жуки, бабочки, перепончатокрылые, двукрылые

Благодарности. Работа была выполнена в рамках научных планов Совместной Российско-Монгольской комплексной биологической экспедиции. Автор выражает благодарность руководителю российской части экспедиции в 1988–2018 гг. П.Д. Гунину (1942–2019), который был инициатором данного исследования и сделал ценные замечания по тексту рукописи.

ДЛЯ ЦИТИТРОВАНИЯ: Бобров В.В. Редкие и исчезающие виды беспозвоночных животных Монголии: современное состояние, угрозы и меры охраны // Социально-экологические технологии. 2020. Т. 10. № 2. С. 121–132. DOI: 10.31862/2500-2961-2020-10-2-121-132

Problematic research

DOI: 10.31862/2500-2961-2020-10-2-121-132

V.V. Bobrov

A.N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117091, Russian Federation

Rare and endangered species of invertebrate animals of Mongolia: Current status, threats and measures of protection

Based on the information provided in the 2nd and 3rd editions of the Red Book of Mongolia, the current state of the rare and endangered species of mollusks, crustaceans and insects of Mongolia and the threat to their existence are analyzed: water pollution and accidental catch during fishing (for aquatic species); degradation of habitats (haying, draining of swamps); overgrazing; collecting. The effectiveness of protection measures has been identified: the habitats of some species are included in the boundaries of specially protected natural territories; some species are listed in Appendix II of the Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Fauna and Flora which will establish strict control over the international

trade of rare and endangered species of invertebrates in Mongolia. It is indicated that the conservation of certain species of mollusks, crustaceans and insects requires additional and more specific measures: prevention of habitat degradation, including overgrazing and pollution of water bodies; a ban on collecting; conducting research to identify the concentration of populations, as well as assess the resources of food plants.

Key words: Mongolia, Red Data Book, Red Data Book of Mongolia, toothless mollusks, decapod crustaceans, dragonflies, beetles, butterflies, hymenoptera, dipterans

Acknowledgments. The work was carried out as part of the scientific plans of the Joint Russian-Mongolian Integrated Biological Expedition. The author is grateful to P.D. Gunin (1942–2019), the leader of the Russian part of the expedition in 1988–2018, who initiated this study and made valuable comments on the text of the manuscript.

FOR CITATION: Bobrov V.V. Rare and endangered species of invertebrate animals of Mongolia: Current status, threats and measures of protection. *Environment and Human: Ecological Studies.* 2020. Vol. 10. № 2. Pp. 121–132. (In Russ.) DOI: 10.31862/2500-2961-2020-10-2-121-132

К 50-летию Совместной Российско-Монгольской комплексной биологической экспедиции

К настоящему времени вышло три издания Красной книги Монголии. Первое издание [Бугд Найрамдах.., 1987] было только на монгольском языке, последующие – как на монгольском, так и на английском [Mongolian Red Book, 1997, 2013]. В первое издание были включены только позвоночные животные, во второе и третье также и беспозвоночные (4 вида моллюсков, 2 вида ракообразных и 19 видов насекомых). В первом издании не были приведены карты распространения, а только перечень аймаков, в которых встречается каждый вид; начиная со 2-го издания очерк о каждом виде сопровождается картой ареала (как правило, приведены точки находок, а в случае с широко распространенными видами – и сплошная заливка). Число видов беспозвоночных, занесенных во 2-е и 3-е издания, не изменилось.

В каждом очерке информация приводится по нескольким основным разделам: статус («Status»), распространение и ареал («Distribution and range»), местообитания («Habitat»), популяция и угрозы («Population and threat»), принятые меры по сохранению («Conservation measures) и предлагаемые меры по сохранению («Further action»).

В настоящем сообщении на основании приведенной во 2-м и 3-м изданиях Красной книги Монголии информации проанализировано современное состояние, угрозы для существования, действенность принятых мер и предлагаемые меры по охране редких и исчезающих видов моллюсков, ракообразных и насекомых Монголии. Это вторая статья в серии о редких и исчезающих видах Монголии. Первая была посвящена пресмыкающимся [Бобров, 2019].

Моллюски (Mollusca)

Во 2-е и 3-е издания Красной книги Монголии включено 4 вида представителя отряда беззубкообразных (Unionoida), все в категории «rare» («редкие»).

Все они известны из очень небольшого числа точек на территории страны: одной (гребенчатка складчатая (*Cristaria plicata* Leach, 1815) из семейства беззубковых (Unionidae)), двух (даурская жемчужница (*Dahurinaia dahurica* (Middendorf, 1850)) из семейства жемчужниц (Margaritiferidae) и беззубка Седакова (*Anodonta sedakovi* (Siemaschko, 1848)) из семейства беззубковых) или трех точек (монгольская миддендорффиная (*Middendorffinaia mongolica* (Middendorf, 1851)), также из семейства беззубковых).

Два из этих видов (гребенчатка складчатая и даурская жемчужница) включены в «Красный список Международного союза охраны природы» [IUCN Red List], оба в категории “Data deficient” («недостаточно данных»), а даурская жемчужница и монгольская миддендорффиная занесены также в Красную книгу РФ (2001), обе в категории 3 («Редкий вид»).

Для всех видов моллюсков главной угрозой еще в 1997 г. было указано загрязнение воды, а для гребенчатки складчатой также случайный вылов во время рыболовства. Во 2-м издании в графе «Меры по сохранению» для всех видов было написано: «не разработаны». В качестве дальнейших действий для гребенчатки складчатой было указано: разъяснять рыбакам необходимость выпускать случайно пойманные экземпляры обратно в водоем. Предлагалось рассмотрение вопроса возможности интродукции беззубки Седакова в другие реки. В 3-м издании уже указываются следующие принятые меры: часть ареала даурской жемчужницы входит в пределы строго охраняемой природной территории Нумруг (Numrug Strictly Protected area); озеро Буйр-Нур, в котором обитает гребенчатка складчатая, и окружающая его территория теперь охраняется Рамсарской конвенцией; местообитания монгольской миддендорфинаи вошли в пределы строго охраняемых природных

территорий Монгол Дагур (Mongol Daguur) и Нумруг. Только места обитания беззубки Седакова не охвачены особо охраняемыми природными территориями (ООПТ), поэтому ее существование вызывает наибольшее беспокойство. В качестве дальнейших мер охраны предлагаются: предотвращение загрязнения воды, запрещение лова рыбы в местах вывода личинок гребенчатки складчатой и продолжение разъяснительной работы среди рыбаков о необходимости выпуска случайно пойманных моллюсков обратно в водоемы; изучение возможности интродукции беззубки Седакова в другие реки и реинтродукции в реки бассейна Северного Ледовитого океана, в той части, где вид вымер или резко сократилась его численность.

Ракообразные (Crustacea)

Во 2-е и 3-е издание Красной книги Монголии занесены два вида ракообразных, оба из отряда десятиногих (Decapoda), оба отнесены к категории «rare» («редкие»).

Пресноводная ханкайская креветка (*Exopalaemon modestus* (Heller, 1862)) (в изданиях Красной книги Монголии фигурирует под устаревшим названием *Leander modestus*) из семейства Palaemonidae известна в Монголии из одной точки – озера Буйр-Нур (в «Красном листе МСОП» – в категории «Least Concern» («вызывающий наименьшее беспокойство»)). Даурский рак (*Cambaroides dauricus* (Pallas, 1773)) из семейства Cambaridae (в красном списке МСОП имеет статус «Data Deficient» («недостаточно данных»)) известен из трех точек: в реках Онон, Блж и Эг.

Основные опасности для обоих видов – загрязнение воды и нелегальный вылов, а для первого вида также случайный вылов рыболовными сетями. В качестве мер сохранения обоих видов предлагается предотвращение загрязнения и повышение чистоты воды, в отношении первого вида – также обучение рыбаков возвращать выловленных креветок обратно в дикую среду.

Насекомые (Insecta)

Насекомых во 2-е и 3-е издания Красной книги Монголии включено 19 видов (стрекозы (Odonata) – 1 вид, жуки (Coleoptera) – 2, бабочки (Lepidoptera) – 11, перепончатокрылые (Hymenoptera) – 4, двукрылые (Diptera) – 1)), из них только один вид (бабочка-сатурния малый ночной павлиний глаз (*Eudia pavonia* Linnaeus, 1758) во 2-м издании отнесен к категории «very rare» («очень редкий»), остальные к категории «rare» («редкий»); в 3-м издании все виды отнесены к категории «редкий».

В «Красный список МСОП» входят всего 2 вида из числа занесенных в Красную книгу Монголии: голубое коромысло (и то как вид, а не как монгольский подвид, – в категории «Least concern»), и аполлон – в категории «Vulnerable» («уязвимый»).

Единственный таксон стрекозы – монгольский подвид голубого коромысла (*Aeshna juncea mongolica* Bartenef, 1929) – в 1997 г. был известен на территории Монголии из 3-х точек, в 2013 г. – из 9-ти. Очевидно, что здесь имеет место не расширение ареала, а недостаток изученности. В обоих изданиях основными причинами сокращения численности были названы: гибель личинок вследствие дренажа маршей и прудов для развития рыболовства и вылов любителями-коллекционерами. Во 2-м издании было написано об отсутствии каких-либо принятых мер по сохранению вида, в 3-м издании уже сказано, что некоторые из районов распространения входят в состав ООПТ, включенных в NSPAN (National Specially Protected Area Network), а также вид включен в список редких видов, вошедших в Приложение к Постановлению № 7, утвержденному Правительством Монголии в 2012 г. Во 2-м издании в качестве мероприятий по сохранению вида было указано прекратить деградацию местообитаний. В 3-м издании перечень мер уже расширился: также предлагается выявить причины сокращения популяции, остановить осушение водных потоков и прудов и дренаж маршей.

Оба вида жуков, занесенных в Красную книгу Монголии, известны из очень ограниченного числа точек на территории страны: скарабей-тифон (*Scarabaeus typhon* Fischer von Waldheim, 1824) в 1997 г. был известен всего лишь из одной точки (территория между Сайншандом, Зуунбайном и Эрдене в Восточно-Гобийском аймаке), к настоящему времени обнаружен в 6 точках. Восточноазиатский подвид мускусного усача (*Aromia moschata orientalis* Plavilstshikov, 1932) и ранее, и сейчас известен из двух точек в долинах рек Зуунхараа и Халх. Для скарабея основными угрозами были названы: сбор жуков коллекционерами, а в качестве мер охраны было предложено изучение популяции и охрана местообитаний. Для усача основными угрозами являются лесные пожары. В настоящее время оба вида жуков включены в уже упомянутое Приложение к Постановлению № 7.

Самая обширная группа насекомых, включенных в Красную книгу Монголии, – бабочки. Бóльшая часть их известна из ограниченного числа мест, и только аполлон (*Parnassius apollo* Linnaeus, 1758) (рис. 1) и махаон (*Papilio machaon* Linnaeus, 1758) (рис. 2, 3) распространены достаточно широко, но в силу своей эффектности пользуются большой популярностью у коллекционеров, поэтому отлов бабочек является

основной угрозой для этих видов. Для других представителей семейства парусников (Papilionidae) также одной из основных угроз является сбор для коллекций, а помимо этого – перевыпас скота, вызывающий деградацию местообитаний. Другие виды бабочек, занесенные в Красную книгу Монголии, распространены очень локально: аполлон Эверсманна (*Parnassius eversmanni* (Menetries in Siemaschko, 1850)) ранее был известен из одной точки в Хубсугульском аймаке, в настоящее время – из 3-х; аполлон Штуббендорфа (*P. stubbendorfi* Menetrie, 1849) – также из одной точки (Дархадская котловина), сейчас – из 3-х; аполлон Феб (*P. phoebus* (Fabricius, 1793)) был известен из 5-ти точек, в настоящее время к ним прибавились еще две; аполлон тенедий (*P. tenedius* Eversmann, 1851) – ранее 4 точки, сейчас 6.

Рис. 1. Местообитание аполлона (*Parnassius apollo* Linnaeus, 1758). Сомон Мунхаан (Сухэ-Баторский аймак).
Отмечено произрастание горноколосника (*Orostachys malacophylla*) – одного из главных кормовых растений гусениц этого вида

Fig. 1. The habitat of the Apollo (*Parnassius apollo* Linnaeus, 1758). Mönhhaan somon (Sükhbaatar aimak).
The growth of mountain-grouse (*Orostachys malacophylla*), one of the main food plants of caterpillars of this species, is noted

Малый ночной павлиний глаз (*Eudia pavonia* (Linnaeus, 1758)), единственный вид насекомых, который входил в категорию «Очень редкие», был известен из одной точки – Шамар (Селенгинский аймак), в настоящее время добавилась еще две – Мандал в Селенгинском аймаке

и Хиалгант в Булганском аймаке. Бражник языкан обыкновенный (*Macroglossum stellatarum* Linnaeus, 1758) и ранее, и сейчас известен из одного района – в окрестностях озер Айраг и Хяргас в Убсунурском аймаке. Другой вид бражника – винный (*Deilephia elpenor* (Linnaeus, 1758)) был известен также из одной точки – Сонгино, в настоящее время наблюдается также в районе р. Мумрег в сомоне Халхин-Гол Восточного аймака. Еще один вид бражника, шмелевидка скабиозная (*Hemaris tityus* Linnaeus, 1758), также был известен из одной точки – Богд Хан Уул. В настоящее время найден еще в двух точках. Бражник сиреневый (*Sphinx ligustri* Linnaeus, 1758) был известен из двух точек в Хэнтейском аймаке, в настоящее время – уже из 6. Практически для всех видов бабочек в 1997 г. в графе «меры по сохранению» стоял прочерк, а в графе «необходимые мероприятия» было указано проведение исследований по экологии. И, в общем-то, в 3-м издании ситуация не изменилась, по-прежнему отмечается недостаток сведений о состоянии популяций и необходимость проведения детальных исследований.

Рис. 2. Махаон (*Papilio machaon* Linnaeus, 1758). Окрестности стационара Тумэнцогт (одноименный сомон, Сухэ-Баторский аймак)

Fig. 2. Machaon (*Papilio machaon* Linnaeus, 1758). Surroundings of the stay Tümentsogt (Tümentsogt somon, Sükhbaatar aimak)

Рис. 3. Местообитание махаона (*Papilio machaon* Linnaeus, 1758) (степь с преобладанием солодки (*Glycyrrhíza* sp.)). Сомон Тумэнцогт (Сухэ-Баторский аймак)

Fig. 3. Habitat of machaon (*Papilio machaon* Linnaeus, 1758) (steppe dominated by *Glycyrrhíza* sp.). Tümentsogt somon (Sükhbaatar aimak)

4 вида шмелей занесены в Красную книгу Монголии. 3 из них в 1997 г. были известны каждый из одной точки: моховой шмель (*Bombus muscorum* Fabricius, 1775) – в бассейне Селенги, шмель модестус, или скромный (*B. modestus* Eversmann, 1852), – в Богд Хан Уул, байкальский шмель (*B. subbaicalensis* Vogt, 1909) на севере Селенгинского аймака, и только последний из них в настоящее время обнаружен еще в одной (на западном берегу озера Хубсугул). И только шмель спорадикус (*B. sporadicus* Nylander, 1848) известен из 4 точек и тогда, и сейчас. Для всех видов шмелей отмечается слабая изученность ареала и состояния популяции. В качестве мер охраны предлагается только охрана местообитаний и изучение особенностей экологии.

Единственный представитель отряда двукрылых – гигантский ктырь (*Satanas gigas* Eversmann, 1855) в 1997 г. был известен из одной точки в бассейне р. Булган. К 2013 г. обнаружен еще в одной – в сомоне Гурвантес Южно-Гобийского аймака. В качестве угроз для существования

во 2-м издании Красной книги назывался перевыпас скота и деградация местообитаний. И к настоящему времени нет детальной информации о распространении вида. В качестве первоочередных мер, как и для большинства насекомых, называются исследования по экологии вида.

Анализ основных угроз для существования насекомых, занесенных в Красную книгу Монголии, принятых и предлагаемых мер показал следующее. Основной угрозой для существования большинства видов насекомых называется деградация местообитаний, которая может выражаться в сенокошении (3 вида аполлонов и махаон), осушении болот и других водных объектов (коромысло), перевыпасе скота (те же 3 вида аполлонов, махаон, моховой шмель и ктырь) (рис. 4). Для 8 видов (коромысло, скарабея и 6 видов бабочек) одной из основных угроз названо коллектирование. Только для двух видов насекомых приводятся угрозы неатропогенного характера: засухи для мохового шмеля и пожары (хотя случается, что и они вызваны человеком) для него же и мускусного усача. Только для махаона в качестве одной из главных угроз названо применение пестицидов (хотя, очевидно, это может быть указано для большинства видов). Для 8 видов насекомых во 2-м издании не были определены основные угрозы, в 3-м издании таких видов приводится уже 13.

Рис. 4. Перевыпас скота – одна из основных угроз для редких и исчезающих видов насекомых Монголии

Fig. 4. Overgrazing is one of the main threats to the rare and endangered insect species in Mongolia

Относительно принятых мер охраны для 13 видов во 2-м издании было указано: «не разработаны». В 3-м издании подобное указано только для одного вида – малого ночного павлиньего глаза. В 3-м издании практически для всех видов (исключая того же малого ночного павлиньего глаза) в качестве принятых мер указано включение в упомянутое Приложение к Постановлению № 7. Одной из главных принятых мер указано включение части ареала в границы ООПТ: во 2-м издании подобное приводится для 4-х видов (махаон, шмелевидка, скромный шмель и гигантский ктырь), в 3-м издании к ним присоединяются еще 7 видов (коромысло, аполлоны Штуббендорфа, феб и тенедий, языкан, бражники винный и сиреневый). Один вид (аполлон) включен в Приложение II СИТЕС, включающее виды, над международной торговлей которыми должен быть установлен строгий контроль.

Наибольший интерес вызывает раздел про предлагаемые меры охраны. И здесь можно оценить, насколько предложенные во 2-м издании меры оказались эффективными. Для большинства видов приводятся общие слова: «изучить распространение и популяцию», «провести экологические и биологические исследования», «определить причины сокращения численности». Для многих видов эти фразы остались и в 3-м издании. Конкретные предлагаемые меры изложены для незначительного числа видов. Для пяти видов во 2-м издании главной мерой было названо прекращение деградации местообитаний, включая перевыпас скота (коромысло, аполлон Штуббендорфа, шмели скромный, спорадикус и байкальский). В 3-м издании в этом перечне остался только один: аполлон Штуббендорфа. Вызывает удивление, что только для одного вида (махаона) указано: ввести запрет на коллектирование (учитывая, что это приводится в качестве одной из главных угроз для 8 видов, как сказано выше). Достаточно конкретные задачи названы для аполлона (исследования с целью выявления концентрации популяции) и аполлона Эверсманна (исследования с целью оценки ресурсов пищевых растений).

Таким образом, можно сделать вывод, что меры по сохранению редких и исчезающих видов беспозвоночных животных в Монголии находится на гораздо меньшей стадии разработанности, чем в части позвоночных, и требуются масштабные исследования в этом направлении, которые, видимо, сдерживаются недостатком специалистов в этой области.

Библиографический список / References

Бобров В.В. Редкие и исчезающие виды пресмыкающихся Монголии: современное состояние, угрозы и меры охраны // Материалы Международной конференции, посвященной 50-летию СРМКБЭ РАН и АМН. Москва, 23–25 октября

2019 г. / Ред. совет: Н.И. Дорофеюк, С.Н. Бажа, Ю.И. Дробышев и др. М., 2019. С. 298–301. [Bobrov V.V. Rare and endangered species of reptiles of Mongolia: Current state, threats, and measures of conservation. *Proceedings of the International conference dedicated to the 50th anniversary of JRMKBE RAS & MAS*. N.I. Dorofeyuk, S.N. Bazha, Yu.I. Drobyshev et al. (eds.). Moscow, 2019. Pp. 298–301. (In Russ.)]

Бугд Найрамдах Монгол Ард Улс Улаан Ном. Гүйцэтгэх редактор О. Шагдарсүрэн. Улаанбаатар, 1987. [Mongolian Red Book. O. Shagdarsuren (chief ed.). Ulaanbaatar, 1987. (In Mongolian)]

Красная книга Российской Федерации (животные) / Председатель гл. ред. коллегии В.И. Данилов-Данильян. М., 2001. [Red Data Book of Russian Federation (Animals). V.I. Danilov-Danilyan (chief ed.). Moscow, 2001.]

IUCN Red List of threatened species. URL: http://www.iucnredlist.org/ (accessed: 30.04.2020).

Mongolian Red Book. 2nd ed. Ts. Shiirevdamba (chief ed.). Ulaanbaatar, 1997.

Mongolian Red Book. 3rd ed. Ts. Shiirevdamba (chief ed.). Ulaanbaatar, 2013.

Статья поступила в редакцию 21.03.2020, принята к публикации 24.04.2020
The article was received on 21.03.2020, accepted for publication 24.04.2020

Сведения об авторе / About the author

Бобров Владимир Владимирович – кандидат биологических наук; старший научный сотрудник лаборатории сохранения биоразнообразия и использования биоресурсов, Институт проблем экологии и эволюции имени А.Н. Северцова РАН, г. Москва

Bobrov Vladimir V. – PhD in Biology; Senior Researcher at the Laboratory of Biodiversity Conservation and Use of Biological Resources, A.N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution, Russian Academy of Sciences, Moscow

ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6756-516X
E-mail: vladimir.v.bobrov@gmail.com

Оригинальное исследование

DOI: 10.31862/2500-2961-2020-10-2-133-150

С.В. Наугольных[1], В.В. Линкевич[2]

[1] Геологический институт Российской академии наук,
119017 г. Москва, Российская Федерация

[2] Андреапольский краеведческий музей им. Э.Э. Шимкевича,
172800 г. Андреаполь, Тверская область, Российская Федерация

Флора артинского яруса (нижняя пермь) стратотипического региона (Средний Урал)

В статье приведена характеристика флористического комплекса, характеризующего отложения артинского яруса в его стратотипической местности (Артинский район Свердловской области). Артинская флора включает в свой состав хвощевидные *Paracalamites decoratus* (Eichwald) Zalessky, *P.* spp., *Calamites gigas* Brongniart, папоротники *Pecopteris* ex gr. *leptophylla* Bunbury, пельтаспермовые *Permocallipteris* sp., *Gracilopteris* sp. (sp. nov.); гинкгофиты s.l. *Psygmophyllum expansum* (Brongniart) Schimper, хвойные *Tylodendron* sp., *Walchia* sp., войновскиевые *Rufloria* cf. *duvanica* Vladimirovich, *Lepeophyllum sabanakovae* Vladimirovich, *Vojnovskya* sp., а также многочисленные и разнообразные изолированные семена. Один из видов семян описан в настоящей работе в качестве нового вида *Ovalocarpus butmanii* Naugolnykh et Linkevich. Этот вид, по мнению авторов, принадлежал примитивным гинкгофитам и мог продуцироваться растением с листьями *Psygmophyllum* Schimper и семеносными органами *Cheirocladus* Naugolnykh. На семенах *Ovalocarpus butmanii* обнаружены округлые перфорации, возможно, оставленные хоботками насекомых-фитофагов из группы палеодиктиоптер.

Ключевые слова: пермская система, артинский ярус, палеоэкология, палеоботаника, семена, новые таксоны

Благодарности. Авторы выражают глубокую и искреннюю признательность администрациям Красноуфимского и Артинского районов Свердловской области за помощь в организации полевых исследований; А.А. Сидорову (Геологический музей Самарского государственного технического университета, г. Самара) за помощь в сборе

© Наугольных С.В., Линкевич В.В., 2020
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International License
The content is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

растительных остатков. Работа выполнена в рамках темы государственного задания Геологического института РАН № 0135-2019-0044 «Фитостратиграфия, палеофлористика, кризисные события кайнозоя, мезозоя и палеозоя различных регионов Евразии, палеоклиматические, палеофитоценотические и палеофитогеографические реконструкции», при поддержке средств из гранта РФФИ № 18-04-00322.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Наугольных С.В., Линкевич В.В. Флора артинского яруса (нижняя пермь) стратотипического региона (Средний Урал) // Социально-экологические технологии. 2020. Т. 10. № 2. С. 133–150. DOI: 10.31862/2500-2961-2020-10-2-133-150

Original research

DOI: 10.31862/2500-2961-2020-10-2-133-150

S.V. Naugolnykh[1], V.V. Linkevich[2]

[1]Geological Institute RAS,
Moscow, 119017, Russian Federation

[2] Andreapol Regional Museum of Local Lore,
Andreapol city, Tver region, 172800, Russian Federation

Artinskian flora (Lower Permian) of the stratotypic area (the Middle Cis-Urals)

The paper deals with the characteristics of the floristic assemblage, which is typical of stratotype area of the Artinskian stage (Lower Permian), i.e. Arti District of Sverdlovsk region. Taxonomical composition of the Artinskian flora includes equisetophytes *Paracalamites decoratus* (Eichwald) Zalessky, *P.* spp., *Calamites gigas* Brongniart, ferns *Pecopteris* ex gr. *leptophylla* Bunbury, peltasperms *Permocallipteris* sp., *Gracilopteris* sp. (sp. nov.); ginkgophytes s.l. *Psygmophyllum expansum* (Brongniart) Schimper, conifers *Tylodendron* sp., *Walchia* sp., vojnovskyans *Rufloria* cf. *duvanica* Vladimirovich, *Lepeophyllum sabanakovae* Vladimirovich, *Vojnovskya* sp., and numerous and diverse isolated seeds. One of the seed morphotype is described in the present paper as a new species *Ovalocarpus butmanii* Naugolnykh et Linkevich. According to the author's viewpoint, this species belonged to primitive ginkgophytes and could be produced by the plant with the leaves *Psygmophyllum* Schimper and seed-bearing organs *Cheirocladus* Naugolnykh. Round perforations

most probably left by trunks of phytophagous insects of Palaeodictyoptera were found on the seeds *Ovalocarpus butmanii*.

Key words: Permian system, Artinskian stage, palaeoecology, palaeobotany, seeds, new taxa

Acknowledgments. The authors express deep and sincere gratitude to the administrations of the Krasnoufimsky and Artinsky districts of Sverdlovsk region for their help in organizing field studies; A.A. Sidorov (Geological Museum of Samara State Technical University, Samara) for help in collecting plant fossils. This work was carried out within the framework of the topic of the state assignment of the Geological Institute RAS No. 0135-2019-0044 "Phytostratigraphy, paleofloristics, crisis events of the Cenozoic, Mesozoic and Paleozoic of various regions of Eurasia, paleoclimatic, paleophytocenotic and paleophytogeographic reconstructions", with support from the RFBR grant No. 18-04-00322.

FOR CITATION: Naugolnykh S.V., Linkevich V.V. Artinskian flora (Lower Permian) of the stratotypic area (the Middle Cis-Urals). *Environment and Human: Ecological Studies.* 2020. Vol. 10. № 2. Pp. 133–150. (In Russ.) DOI: 10.31862/2500-2961-2020-10-2-133-150

Введение

Среди разрезов пермских отложений в Приуралье есть немало таких, которые изучаются уже многие десятилетия и которым посвящено большое количество геологических, стратиграфических и палеонтологических публикаций. В большинстве случаев это связано не только с информативностью этих разрезов, их стратиграфическим потенциалом и значимостью для истории науки, но и с выигрышным географическим расположением, часто – рядом с крупными населенными пунктами, железнодорожными станциями или вблизи автомагистралей.

Однако помимо таких широко известных геологических разрезов в указанном регионе есть целый ряд выходов пермских отложений, очень важных для науки, но гораздо менее известных в связи с их труднодоступностью и расположением в отдалении от научных и культурных центров. К таким незаслуженно обойденным вниманием геологов разрезам можно отнести целый комплекс обнажений, расположенных в окрестностях с. Поташка в Артинском районе Свердловской области.

Именно в результате изучения разрезов «жерновых» песчаников, обнажающихся по склонам горы Кашкабаш рядом с г. Арти, выдающимся российским геологом и палеонтологом академиком А.П. Карпинским был установлен артинский ярус (об истории проблемы см.: [Карпинский, 1945]). Таким образом, разрезы артинских отложений,

находящиеся в районе с. Поташка, также входят в стратотипический регион выделения артинского яруса в качестве самостоятельного подразделения стратиграфической шкалы пермской системы.

В.Д. Наливкин (1949) для этого района приводит список аммоноидей, включающий виды *Medlicottia orbygniana* Verneuil, *Artinskia ariensis* (Grünwald), *Waagenina krasnopolskyi* (Karpinsky), *Uraloceras fedorovi* (Karpinsky), *U. suessi* (Karpinsky), *Agathiceras krotovi* Karpinsky, *Pronorites praepermicus* Karpinsky, *Sakmarites vulgaris* (Karpinsky), указывая на сходство таксономического состава аммоноидей с комплексом из габдрашитовской свиты Башкирии (названия даны с учетом изменившейся номенклатуры). Кроме этого, Наливкин отдельно подчеркивает, что «Из позвоночных в правом борту лога, в 500 м выше дер. Поташка В.Д. Даргевичем (из партии А.В. Хабакова) были найдены две зубные спирали *Helicoprion* sp.» [Наливкин, 1949, с. 112]. Позднее эти наблюдения были подтверждены новыми находками геликоприонид в этом районе [Чувашов, 2001, рис. 5, 6; Наугольных, 2016, с. 18, 21, табл. IX, фиг. 1]. Из растительных остатков, встречающихся в этой толще, Наливкин указывает виды *Paracalamites decoratus* (Eichwald) Zalessky, *Calamites gigas* Brongniart, *Pecopteris anthriscifolia* (Goeppert) Zalessky, *Psygmophyllum expansum* (Brongniart) Schimper, "*Noeggerathiopsis*" *lancifolius* (Schmalhausen) Zalessky (названия даны с учетом изменившейся номенклатуры, за исключением вида "*N.*" *lancifolius*, скорее всего, относящегося к роду *Rufloria* S. Meyen, но требующего специального дополнительного изучения). Ни одно из этих определений не вызывает существенных сомнений, однако новые исследования показали, что список растений, характерных для отложений артинского яруса из группы разрезов у с. Поташка, должен быть существенно расширен (см. ниже).

Основной целью настоящей работы является подробная характеристика флористического комплекса, установленного для артинских (верхнеартинских, саргинских) отложений Поташкинской группы разрезов, а также описание нового вида семян *Ovalocarpus butmanii* Naugolnykh et Linkevich, sp. nov.

Материал и методика

В основу написания статьи положены данные, собранные авторами во время работы на геологических разрезах в Артинском районе Свердловской обл., у г. Арти и в окрестностях с. Поташка (рис. 1). Полевые работы проводились в течение трех сезонов (2014, 2015 и 2018 гг.). Кроме этого, с помощью городских (муниципальных) и районных

администраций г. Красноуфимска и г. Арти была проведена полевая экскурсия в район с. Поташка 22 августа 2018 г.

Данные о региональной стратиграфии и генетический анализ основных литологических типов нижнепермских отложений Среднего и Южного Приуралья приведены в капитальной монографии Б.И. Чувашова и Г.В. Дюпиной (1973).

Растительные остатки сохранились, преимущественно, в форме отпечатков (листья, репродуктивные органы), естественных слепков (побеги, семена) или, реже, углефицированных или ожелезненных фитолейм (семена и, в редких случаях, листья, побеги и репродуктивные органы).

Изученная коллекция растительных остатков хранится в Геологическом институте РАН (ГИН, г. Москва) и Андреапольском краеведческом музее (КМА, г. Андреаполь, Тверская обл.); сокращения: экз. ГИН w-n – экземпляр ГИН без номера.

Палеоботанические наблюдения

Наиболее широкую характеристику артинского флористического комплекса приводит В.П. Владимирович [Владимирович, 1981, 1986]. Характеристика была основана как на коллекции растительных остатков, собранной В.П. Горским и хранящейся в Центральном Геологоразведочном музее им. академика Ф.Н. Чернышева (Санкт-Петербург), так и на ранее опубликованных данных [Залесский, 1927].

В своей депонированной работе В.П. Владимирович, помимо широкого и вполне содержательного исторического очерка, приводит следующий список таксонов, характеризующих артинские отложения стратотипической местности (описано пятнадцать видов, принадлежащих восьми родам): *Paracalamites decoratus* (Eichwald) Zalessky, *P. frigidus* Neuburg, *P. exilicostatus* Vladimirovich, *Pecopteris leptophylla* Bunbury, *P. crenulata* Brongniart, *P. kruglovii* Vladimirovich, “*Callipteris*” *conferta* (Sternberg) Brongniart (этот вид в данном флористическом комплексе определен ошибочно. – *С.Н.*, *В.Л.*), “*C.*” *praelongata* Weiss (также есть сомнения в корректности определения этого вида), “*C.*” *snjatkovii* Vladimirovich, “*C.*” *mucronata* (Zalessky) Vladimirovich (comb. nov.: подробнее см. ниже), гинкгофиты “*Syniopteris*” *expansa* var. *typical* Vladimirovich, comb. nov. (= *Psygmophyllum expansum* (Brongniart) Schimper), войновскиевые *Rufloria duvanica* Vladimirovich, хвойные *Walchia appressa* Zalessky, *Tylodendron speciosum* Weiss, *Cardiocarpus cordatus* (Eichwald) Schmalhausen [Владимирович, 1981]. Удивляет комментарий В.П. Владимирович в обосновании создания новой комбинации “*Callipteris*” *mucronata* (Zalessky) Vladimirovich в рубрике «Сравнение», где

утверждается, что принадлежность описываемого вида роду *Callipteris* определяется прохождением средней жилки по всей длине перышка [Владимирович, 1981]. В действительности, характер и даже само наличие или отсутствие средней жилки никогда не использовались в качестве родового признака для рода *Callipteris* Brongniart.

По итоговому мнению В.П. Владимирович, в состав типичного артинского (а именно саргинского, без учета материалов из иргинского горизонта. – *С.Н.*, *В.Л.*) комплекса входят следующие виды (список приводится с орфографическими исправлениями): хвощевидные *Paracalamites frigidus* Neuburg, *P. exilicostatus* Vladimirovich, *P. decoratus* (Eichwald) Zalessky, папоротники *Pecopteris leptophylla* Bunbury, *P. crenulata* Brongniart, *P. kruglovii* Vladimirovich, пельтаспермовые "*Callipteris*" *mucronata* (Zalessky) Vladimirovich, "*C.*" *snjatkovii* Vladimirovich, "*C.*" *conferta* (Sternberg) Brongniart, гинкгофиты "*Syniopteris*" *expansa* var. *typica* Vladimirovich (= *Psygmophyllum expansum* (Brongniart) Schimper), войновскиевые *Rufloria duvanica* Vladimirovich, хвойные *Tylodendron speciosum* Weiss, *Walchia appressa* Zalessky, *Cardiocarpus cordatus* (Eichwald) Schmalhausen [Владимирович, 1986].

В.П. Владимирович подчеркивает, что «комплекс имеет до 30% еврамерийских видов, в основном, среди папоротников и птеридоспермов», при этом «членистостебельные и хвойные представлены местными видами» [Там же, с. 32].

По мнению авторов настоящей работы, если и пытаться установить палеофитогеографические связи артинской флоры Приуралья, то закономерности выявляются совершенно иные. Из папоротников условно еврамерийским можно считать *Pecopteris leptophylla*, но при этом важно помнить, что этот же вид встречается и в Ангариде, в частности, в пермских отложениях Печорского угольного бассейна. А вот среди членистостебельных артинской флоры есть типично еврамерийский вид – *Calamites gigas* Brongniart. Это же замечание можно сделать и в отношении хвойных, представляющих еврамерийское семейство Walchiaceae [Meyen, 1997; Barthel, 2007] и, более того, относящихся к еврамерийским родам *Walchia* Sternberg и *Tylodendron* Weiss, причем В.П. Владимирович определяет в составе артинской флоры и еврамерийский вид *Tylodendron speciosum*. Вид *Paracalamites exilicostatus*, происходящий из местонахождения Мечетлино (Башкирия), по современным представлениям происходит из нижнекунгурских отложений.

Коллекция растительных остатков, собранных авторами в серии обнажений, расположенных в Артинском районе Свердловской области, позволяет, с одной стороны, уточнить таксономический состав артинской флоры, с другой – дополнить его новыми растениями.

В местонахождении Поташка-1 (рис. 1) был найден репродуктивный орган, определенный как *Vojnovskya* sp. (рис. 2, фиг. 1). Скорее всего, этот орган принадлежал растению, продуцировавшему листья руфлорий с длинным оттянутым неокаймленным основанием (типа *Rufloria duvanica* Vladimirovich), а также с чешуевидными листьями *Lepeophyllum sabanakovae* Vladimirovich (рис. 2, фиг. 3), известными и из более молодых (кунгурских) отложений этого региона. Важным дополнением к таксономическому составу артинской флоры Приуралья служит обнаружение нового представителя рода *Gracilopteris* Kerp et al., в предварительном плане определенного в открытой номенклатуре как *Gracilopteris* sp. (рис. 2, фиг. 5).

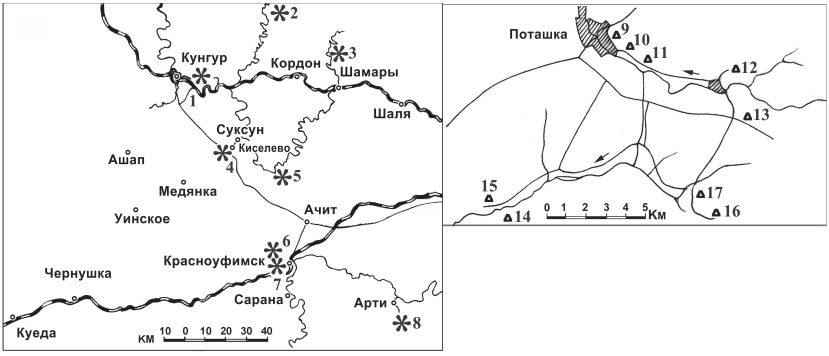


Рис. 1. Географическое расположение наиболее важных изученных разрезов и групп местонахождений нижнепермских растений Приуралья, упоминаемых в тексте:

1 – Филипповский карьер; *2* – группа местонахождений у с. Матвеево (Матвеево, Красная Глинка, Крутая Катушка-1, Крутая Катушка-2, Таежное-1, Таежное-2, Барда); *3* – Шайдуры; *4* – Киселево-Суксун; *5* – Чекарда-1; *6* – Красноуфимские Ключики; *7* – Соболя (карьер Солнечный); *8* – группа разрезов у с. Поташка (см. ниже); *9* – Поташка-1; *10* – Поташка-2; *11* – Поташка-3; *12* – Березовка-1; *13* – Березовка-2; *14* – Сухановка-1; *15* – Сухановка-2; *16* – Черкасовка-1; *17* – Черкасовка-2

Fig. 1. Geographical position of the most important outcrops studied and the groups of localities of the Lower Permian plants of the Cic-Urals, noted/cited in the text:

1 – Philippovsky Quarry; *2* – the group of localities in the close vicinity of the Matveevo village (Matveevo, Krasnaya Glinka, Krutaya Katushka-1, Krutaya Katushka-2, Taezhnoe-1, Taezhnoe-2, Barda); *3* – Shaidury; *4* – Kiselevo-Suksun; *5* – Chekarda-1; *6* – Kranoufimskie Kluchiki; *7* – Sobolja (Solnechny quarry); *8* – the group of localities in the close vicinity of the Potashka village (see below); *9* – Potashka-1; *10* – Potashka-2; *11* – Potashka-3; *12* – Berezovka-1; *13* – Berezovka-2; *14* – Sukhanovka-1; *15* – Sukhanovka-2; *16* – Cherkasovka-1; *17* – Cherkasovka-2

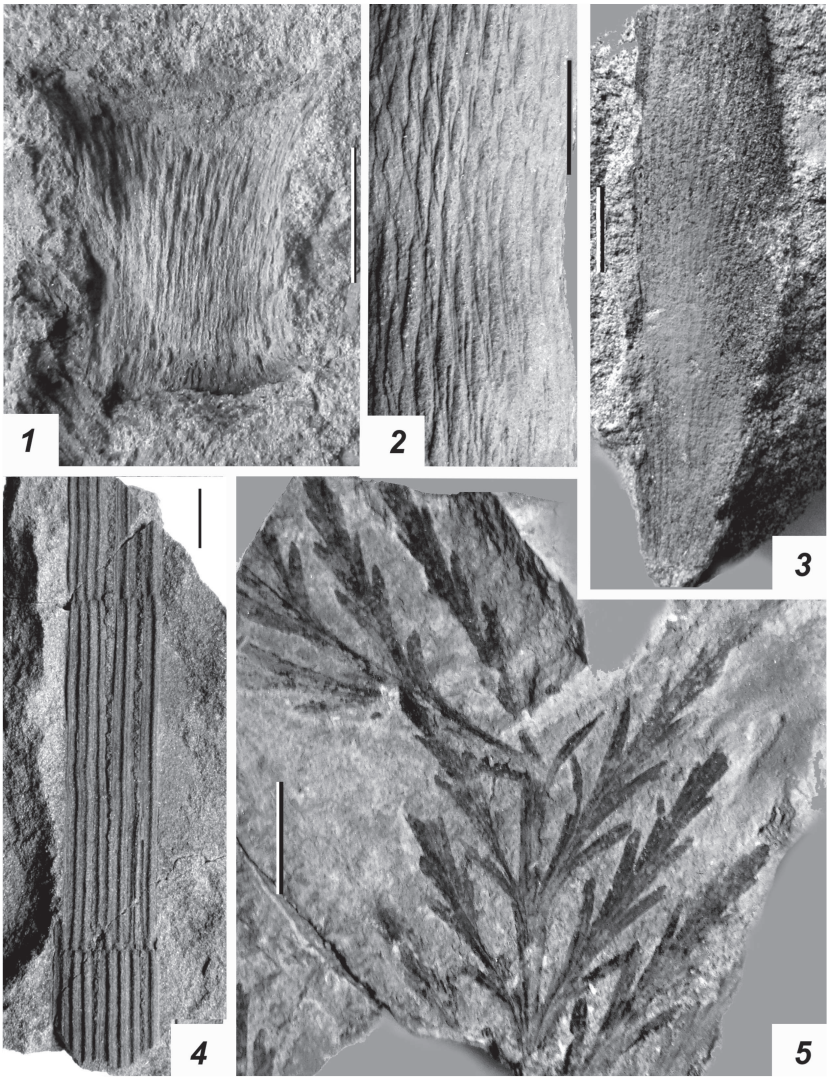


Рис. 2. Растения верхнеартинского флористического комплекса из стратотипического региона:

1 – Vojnovskya sp., мужской репродуктивный орган голосеменного (семейство Vojnovskyaceae), экз. ГИН № 4856/581; *2 – Tylodendron* sp., декортицированный побег хвойного, экз. ГИН № 4856/662; *3 – Lepeophyllum sabanakovae* Vladimirovich, чешуевидный лист войновскиевого, экз. ГИН № 4856/669; *4 – Paracalamites* sp., фрагмент побега хвощевидного, экз. ГИН № 4856/668; *5 – Gracilopteris* sp., фрагмент вайи птеридосперма, экз. ГИН w-n.

Какое место флора артинского яруса стратотипической местности занимает в общей последовательности флористических комплексов Среднего и Южного Приуралья?

Флористический комплекс артинского яруса, характеризующий группу разрезов, расположенных в Артинском районе Свердловской области (см. рис. 1), а именно, Поташка-1, Поташка-2, Поташка-3, Березовка-1, Березовка-2, Сухановка-1, Сухановка-2, Черкасовка-1 и Черкасовка-2 отличается повышенным содержанием остатков вальхиевых хвойных, которые, как правило, представлены декортицированными побегами *Tylodendron*. Стратиграфически близкие местонахождения растительных остатков, расположенные западнее (например, Красноуфимские Ключики и Соболя), а также севернее, в бассейне реки Сылвы (например, Шайдуры), также содержат значительный процент хвойных, но они все же не столь многочисленны, как в местонахождениях Артинского района. Возможно, это отражает более сухие условия произрастания пермской растительности в Южном Приуралье, по сравнению со Средним Приуральем, поскольку хвойные пермского периода были хорошо адаптированы к существованию в условиях сезонного недостатка влаги.

Флора шуртанской свиты, известная из обнажений в дорожных выемках шоссе Арти – Кунгур (Свердловск – Пермь) в районе населенных пунктов Киселево и Суксун имеет переходный характер и, с одной стороны, включает элементы, известные из артинского яруса (например, вальхиевые хвойные *Shaidurodendron columnaris* Naug.), но, с другой стороны, она содержит и растения, характерные для кунгурского яруса – крупные листья войновскиевых (т.н. «Ангарских кордаитов») *Rufloria derzavinii* (Neuburg) S. Meyen.

Местонахождения: Поташка-1 (*1*, *5*); Поташка-2 (*4*); Сухановка-1 (*2*, *3*)
Длина масштабной линейки – 1 см

Fig. 2. Plants of the Upper Artinskian floristic assemblage from the stratotype region:

1 – Vojnovskya sp., male reproductive organ of a gymnosperm (Vojnovskyaceae family), spec. GIN № 4856/581; *2 – Tylodendron* sp., decorticated conifer stem, spec. GIN № 4856/662; *3 – Lepeophyllum sabanakovae* Vladimirovich, scale-like leaf of vojnovskyalean affinity, spec. GIN № 4856/669; *4 – Paracalamites* sp., the fragment of an equisetophyte stem, spec. GIN № 4856/668; *5 – Gracilopteris* sp., the fragment of a pteridosperm frond, spec. GIN w-n.

Localties: Potashka-1 (1, 5); Potashka-2 (4); Sukhanovka-1 (2, 3).
Scale is 1 cm

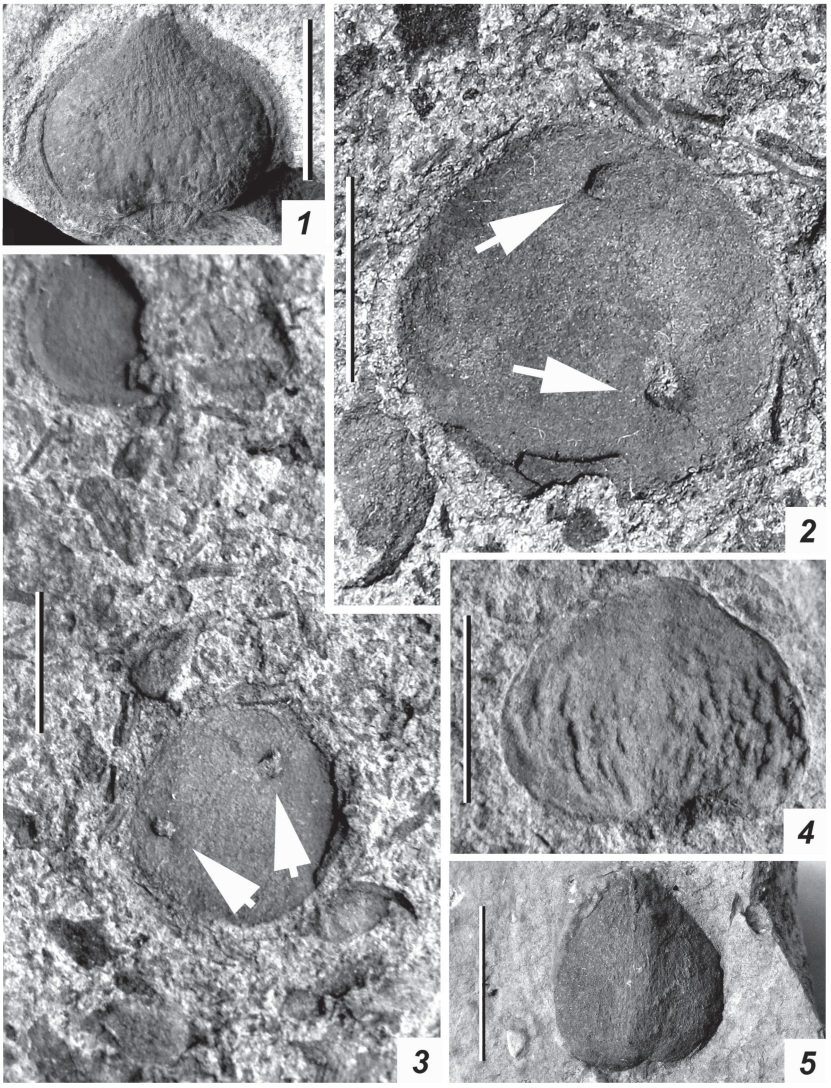


Рис. 3. Растения верхнеартинского флористического комплекса из стратотипического региона. Изолированные семена:

1 – Cardiocarpus cordatus (Eichwald) Schmalhausen, семя вальхиевого хвойного, экз. ГИН № 4856/582; *2*, *3* – семена *Ovalocarpus butmanii* Naugolnykh et Linkevich, sp. nov. (*2* и *3*, справа внизу, – голотип КМА/4888-2/D); *4 – Cardiocarpus* sp.; КМА/4888-2/B; *5 –Cordaicarpus* sp., экз. ГИН № 4856/670.

Выше по разрезу, в филипповском горизонте кунгурского яруса (разрез Филипповский карьер), а также в лекской свите (группа местонахождений у с. Матвеево (Матвеево, Красная Глинка, Крутая Катушка-1, Крутая Катушка-2, Таежное-1, Таежное-2, Барда) флористическое разнообразие постоянно нарастает, достигая своего максимума в верхнекунгурских отложениях (кошелевская свита, местонахождения Чекарда-1 и Чекарда-2 [Zalessky, 1937, 1939; Meyen, 1997]).

Описание растительных остатков

Отдел Ginkgophyta Bessey, 1907

Класс Ginkgoopsida Engler, 1897

Порядок Ginkgoales Gorozhankin, 1904

Семейство Cheirocladaceae Naugolnykh, 2007
(= "Psygmophyllidae" Zalessky, 1937, nom. dub.)

Род *Ovalocarpus* Naugolnykh, 2018

Ovalocarpus butmanii Naugolnykh et Linkevich, sp. nov.

Рис. 3 (фиг. 2, 3); рис. 4 (фиг. 1–4), рис. 5 (реконструкция положения семян на женском репродуктивном органе).

Этимология (Derivatio nominis). Вид назван в честь И.М. Бутмана, известного российского музыканта-саксофониста, предоставившего финансовую поддержку в организации полевых исследований и в изучении нижнепермских отложений Приуралья.

Голотип. КМА/4888-1/D; КМА/4888-2/D – местонахождение Поташка-1, нижняя пермь, артинский ярус, верхнеартинский подъярус, саргинский горизонт, габдрашитовская свита (аналог урминской свиты). Типовая коллекция хранится в Андреапольском районном краеведческом музее (г. Андреаполь, Тверская обл.).

Местонахождения: Сухановка-1 (*1*, *5*); Поташка-1 (*2–4*).
Длина масштабной линейки – 1 см

Fig. 3. Plants of the Upper Artinskian floristic assemblage from the stratotype region. Isolated seeds:

1 – Cardiocarpus cordatus (Eichwald) Schmalhausen, the seed of a walchian conifer, spec. GIN № 4856/582; *2*, *3* – seeds *Ovalocarpus butmanii* Naugolnykh et Linkevich, sp. nov. (*2* and *3*, down right, – the holotype KMA/4888-1/D); *4 – Cardiocarpus* sp.; KMA/4888-2/B; *5 – Cordaicarpus* sp., spec. GIN № 4856/670.

Localities: Sukhanovka-1 (*1*, *5*); Potashka-1 (*2–4*).
Scale is 1 cm

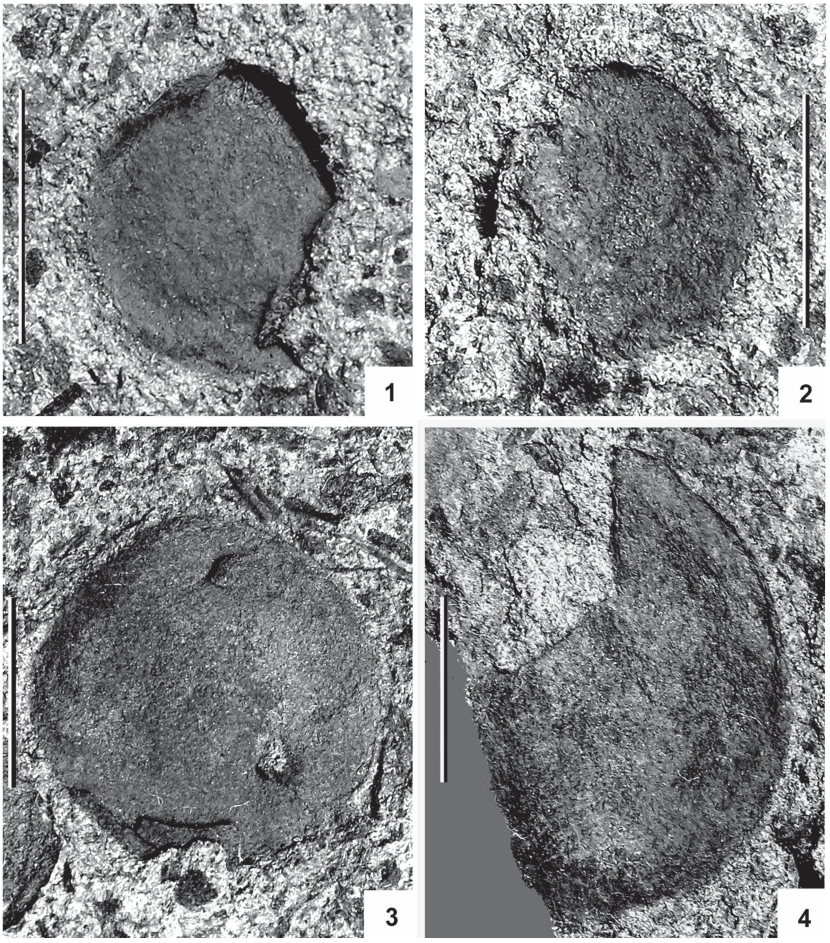


Рис. 4. Растения верхнеартинского флористического комплекса из стратотипического региона. Изолированные семена. *Ovalocarpus butmanii* Naugolnykh et Linkevich, sp. nov.:

1 – КМА/4888-2/E; *2* – КМА/4888-1/E; *3* – голотип КМА/4888-2/D; *4* – КМА/4888-2/A.

Местонахождение: Поташка-1.
Длина масштабной линейки – 1 см

Fig. 4. Plants of the Upper Artinskian floristic assemblage from the stratotype region. Isolated seeds. *Ovalocarpus butmanii* Naugolnykh et Linkevich, sp. nov.:

1 – КМА/4888-2/E; *2* – КМА/4888-1/E; *3* – голотип КМА/4888-2/D; *4* – КМА/4888-2/A.

Locality: Potashka-1.
Scale is 1 cm

D i a g n o s i s. Seeds of round shape, mid-sized (1.2 to 2.3 cm in diameter). Spermoderm smooth. Seed scar small, of linear or crescenrtic shape, disposed in central part of seed base. Apical (micropylar) part of seed round or could be somewhat pointed. Basal part of seed round. Marginal parts of seed can be slightly flatten.

О п и с а н и е. Семена округлые, реже округло-овальные, с прямой главной осью, уплощенные, средних размеров (от 1,2 до 2,3 см в диаметре или по наибольшему измерению, как правило, совпадающему с продольной осью семени). Спермодерма гладкая или несущая очень тонкую продольную штриховку, развитую только в краевых частях семени. Краевая часть семян может быть уплощена за счет диагенетического уплотнения мягких саркотестальных тканей. Семенной рубчик маленький, округлых очертаний, иногда может образовывать небольшое углубление полулунных очертаний. Микропилярная часть округлая, иногда может быть слегка приострена. Основание семени закругленное. Какие-либо придатки спермодермы (крылья или волоски) отсутствуют.

По типу диссеминации семена *Ovalocarpus butmanii* sp. nov., очевидно, были автохорными (барохорными).

С р а в н е н и е. Отличительной особенностью нового вида являются его округлые, как правило, изометричные очертания, что обособляет имеющуюся выборку от типовых экземпляров другого вида рода *Ovalocarpus*: *Ovalocarpus ovoides* Naug., встречающегося в отложениях того же возраста [Наугольных, 2018], но представленных другими фациями – преимущественно, тонкозернистыми плитчатыми мергелями с большим количеством карбонатной составляющей. Не исключено, что различия в морфологии видов *O. ovoides* Naug. и *O. butmanii* Naug. et Linkevich были вызваны экологическими условиями произрастания материнских растений: в первом случае – тяготевших к берегам спокойных лагун с низкой гидродинамикой, или, во втором случае, – к береговым зонам временных водотоков с высокой гидродинамикой.

М а т е р и а л. Три экземпляра хорошей или удовлетворительной сохранности; все расположены на одной поверхности напластования и находятся на одном штуфе песчаника (№№ КМА/4888-1/D (голотип); КМА/4888-1/A; КМА/4888-1/E; КМА/4888-2/D (противоотпечаток голотипа); КМА/4888-2/A; КМА/4888-1/E.

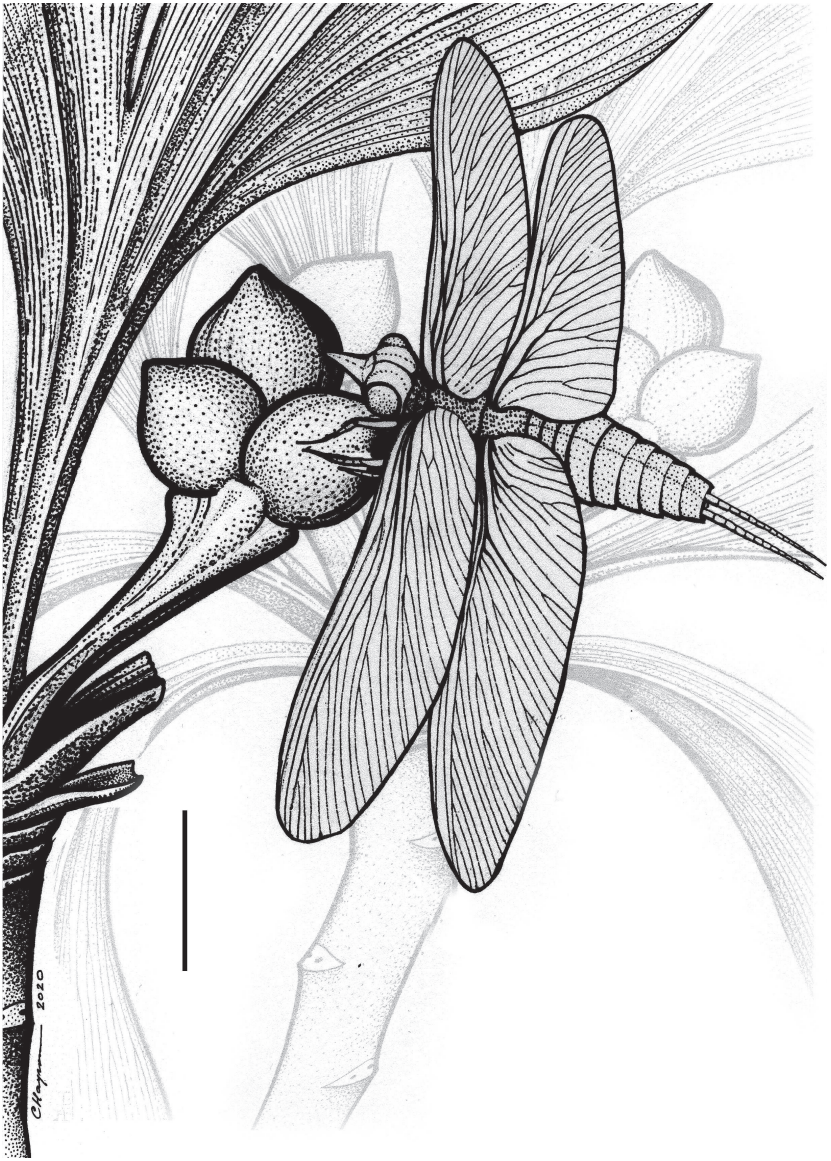


Рис. 5. Возможный автор перфораций на спермодерме *Ovalocarpus* – представитель палеодиктиоптер *Paradunbaria pectinata* Sharov et Sinitshenkova.

Палеоэкология и возможные симбиотические связи *Ovalocarpus butmanii*

Обнаруженные на одном из семян *O. butmanii* округлые перфорации имеют много общего с проколами, оставленными на различных репродуктивных органах каменноугольных и пермских голосеменных. В первую очередь, следует назвать округлые отверстия, присутствующие на семенах из среднекаменноугольных отложений Сибири [Шаров, 1973]. Эти семена, ассоциативно связанные с листьями и побегами войновскиевых, условно отнесенные к роду *Samaropsis*, несли перфорации около 0,5–1,1 мм в диаметре с загнутыми внутрь перфорации краями спермодермы семян [Шаров, 1973, рис. 5, 6]. По мнению А.Г. Шарова, эти отверстия были оставлены насекомыми из группы палеодиктиоптер (подробнее см.: [Шаров, Синиченкова, 1977]), что подтверждается как находками ископаемых остатков этих насекомых в тех же отложениях, так и формой и размером отверстий, которые совпадают с формой и размерами хоботка палеодиктиоптер. Отдельно А.Г. Шаров отмечает наличие защитных чешуй на репродуктивных органах войновскиевых (в то время относившихся к кордаитам s.l.: [Мейен, 1987; Meyen, 1988]). Наличие сходных защитных межсеменных чешуй позже было установлено у репродуктивных органов других представителей войновскиевых [Naugolnykh, 2014, Fig. 4, 5]. Существование тесных трофических взаимоотношений между насекомыми и ангарскими голосеменными, продуцировавшими пыльцу *Cladaitina*, также было вполне убедительно доказано на материале из нижнепермских отложений Приуралья [Afonin, 2000].

Морфология парадунбарии дана по: [Шаров, Синиченкова, 1977];
с учетом изменения пропорций тела вследствие (суб)фронатальной перспективы;
жилкование на крыльях парадунбарии показано условно.

Длина масштабной линейки – 1 см

Fig. 5. Possible author of the perforations on the spermoderm of *Ovalocarpus*, i.e. a representative of palaeodictyopters *Paradunbaria pectinata* Sharov et Sinitshenkova.

Morphology of *Paradunbaria* ***is*** given after: [Sharov, Sinitchenkova, 1977];
according to change of the body proportions due to (sub)frontal perspective;
the wing venation is shown generalized.

Scale is 1 cm

Морфологически сходные перфорации, но существенно меньшего размера, были найдены на стенках микроспорангиев рода *Permotheca* Zalessky из нижнепермских (кунгурских) отложений Среднего Приуралья [Наугольных, 1998, табл. XXIII, фиг. 1–3; Наугольных, 2007, рис. 68, N], а также на стенках семеносных капсул *Sylvocarpus armatus* Naug. [Naugolnykh, 2008, Plate 12].

В тех же местонахождениях, где встречаются семена *Ovalocarpus*, можно обнаружить семена *Cardiocarpus cordatus* (Eichwald) Schmalhausen, по мнению авторов, продуцировавшихся вальхиевыми хвойными *Walchia bardaeana* Zalessky. На семенах *Cardiocarpus cordatus* также встречаются аналогичные перфорации, в отношении которых было высказано предположение, что и они были оставлены насекомыми из группы палеодиктиоптер [Naugolnykh, 2018].

Исходя из всего вышесказанного, вполне логично предположить, что проколы, обнаруженные на спермодерме семян *Ovalocarpus butmanii*, были оставлены представителем палеодиктиоптер (см. рис. 5). Плотные покровы семян *O.* spp. косвенным образом указывают на то, что, возможно, растение, продуцировавшее эти семена, уже проявляло адаптивные реакции, направленные на защиту семязачатков/семян и уменьшение трофического давления со стороны насекомых-фитофагов. Подобные адаптации ранее отмечались для семян некоторых каменноугольных голосеменных [Taylor, Scott, 1983].

Библиографический список / References

Владимирович В.П. Артинская флора Урала. Л., 1981. Рукопись, депонированная в ВИНИТИ. № 2381-81. Деп. 41С. [Vladimirovich V.P. Artinskaya flora Urala [Flora of the Artinskian Stage of the Urals]. Leningrad, 1981. Manuscript deposited at VINITI. No. 2381-81. Dep. 41C.]

Владимирович В.П. Высшие растения // Атлас характерных комплексов пермской фауны и флоры Урала и Русской платформы. Л., 1986. С. 32–38. [Vladimirovich V.P. Higher plants. *Atlas kharakternykh kompleksov permskoy fauny i flory Urala i Russkoy platformy*. Leningrad, 1986. Pp. 32–38. (In Russ.)]

Залесский М.Д. Пермская флора Уральских пределов Ангариды // Тр. Геолкома. Нов. сер. 1927. Вып. 176. [Zalesskiy M.D. Permskaya flora Uralskikh predelov Angaridy [Perm flora of the Ural limits of Angarida]. *Trudy Geolkoma*. *Novaya seriya*. 1927. Vol. 176.]

Карпинский А.П. Собрание сочинений. Т. I. М., Л., 1945. [Karpinskiy A.P. Sobranie sochineniy [Collected works]. Vol. 1. Moscow, Leningrad, 1945.]

Мейен С.В. Основы палеоботаники. М., 1987. [Meyen S.V. Osnovy paleobotaniki [The basics of paleobotany]. Moscow, 1987.]

Наугольных С.В. Флора кунгурского яруса Среднего Приуралья. М., 1998. (Труды Геологического института РАН. Вып. 509). [Naugolnykh S.V. Flora

kungurskogo yarusa Srednego Priuralya [Kungurian flora of the Middle Cis-Urals]. Moscow, 1998. (Trudy Geologicheskogo instituta RAN. Vol. 509)]

Наугольных С.В. Пермские флоры Урала. М., 2007. (Тр. ГИН РАН. Вып. 524). [Naugolnykh S.V. Permskie flory Urala [Permian flora of the Urals]. Moscow, 2007. (Trudy Geologicheskogo instituta RAN. Vol. 524)]

Наугольных С.В. Экология и палеоэкология – решение задач геомониторинга на примере Красноуфимска (Свердловская область) // Социально-экологические технологии. 2018. № 1. С. 38–64. [Naugolnykh S.V. Ecology and paleoecology in context of geomonitoring aims as exemplified by the City of Krasnoufimsk (Sverdlovsk region). *Environment and Human: Ecological Studies*. 2018. No. 1. Pp. 38–64. (In Russ.)]

Наливкин В.Д. Стратиграфия и тектоника Уфимского плато и Юрезано-Сылвенской депрессии. Л., М., 1949. [Nalivkin V.D. Stratigrafiya i tektonika Ufimskogo plato i Yurezano-Sylvenskoy depressii [Stratigraphy and tectonics of the Ufa plateau and the Yuryuzano-Sylvensky depression]. Moscow, Leningrad, 1949.]

Чувашов Б.И. Пермские акулы семейства Helicoprionidae – стратиграфическое и географическое распространение, экология, новый представитель // Материалы по стратиграфии и палеонтологии Урала. 2001. Вып. 6. С. 12–27. [Chuvashov B.I. Perm sharks of the family Helicoprionidae – stratigraphic and geographical distribution, ecology, a new representative. *Materialy po stratigrafii i paleontologii Urala*. 2001. Vol. 6. Pp. 12–27. (In Russ.)]

Чувашов Б.И., Дюпина Г.В. Верхнепалеозойские терригенные отложения западного склона Среднего Урала. М., 1973. [Chuvashov B.I., Dyupina G.V. Verkhnepaleozoyskie terrigennye otlozheniya zapadnogo sklona Srednego Urala [Upper Paleozoic terrigenous deposits of the western slope of the Middle Urals]. Moscow, 1973.]

Шаров А.Г., Синиченкова Н.Д. Новые Palaeodictyoptera с территории СССР // Палеонтологический журнал. 1977. № 1. С. 48–63. [Sharov A.G., Sinichenkova N.D. New Palaeodictyoptera from the territory of the USSR. *Paleontological Journal*. 1977. No. 1. Pp. 48–63. (In Russ.)]

Шаров А.Г. Морфологические особенности и образ жизни палеодиктиоптер // Доклады на 24-м ежегодном чтении памяти Н.А. Холодковского. Вопросы палеонтологии насекомых. Л., 1973. С. 49–63. [Sharov A.G. Morphological features and lifestyle of Palaeodictyoptera. *Doklady na 24-m ezhegodnom chtenii pamyati N.A. Kholodkovskogo*. *Voprosy paleontologii nasekomykh*. Leningrad, 1973. Pp. 49–63. (In Russ.)]

Afonin S.A. Pollen grains of the genus *Cladaitina* extracted from the gut of the Early Permian insect Tillyardembia (Grylloblattida). *Paleontological Journal*. 2000. Vol. 34. No. 5. Pp. 575–579.

Barthel M. Die Rotliegendenflora des Thüringer Waldes. Teil 5: Ginkgophyten, Coniferophyten. *Veröffentlichungen Naturhist. Museum Schleusingen*. 2007. Bd. 22. S. 41–67.

Meyen S.V. Gymnosperms of the Angara flora. *Origin and evolution of gymnosperms*. Ch.B. Beck (ed.). New York, 1988. Pp. 338–381.

Meyen S.V. Permian conifers of Western Angaraland. *Rev. Palaeobot. Palynol*. 1997. Vol. 96. Pp. 351–447.

Naugolnykh S.V. A new gymnosperm *Sylvocarpus armatus* gen. et sp. nov. from the Lower Permian of the Ural Mountains. *Paleontological Journal*. 2008. Vol. 42. No. 4. Pp. 431–439.

Naugolnykh S.V. Fossil flora and stratigraphy of the terrigenous Kungurian beds (Lower Permian) of the basin of the Barda River (Urals, Perm krai). *Stratigraphy and Geological Correlation*. 2014. Vol. 22. No. 7. Pp. 680–707.

Naugolnykh S.V. Lower Permian conifers of the Urals: Taxonomic and morphological diversity and paleoecology. *Paleontological Journal*. 2018. Vol. 52. No. 7. Pp. 34–51.

Taylor T.N., Scott A.C. Interactions of plants and animals during the Carboniferous. *BioSciences*. 1983. Vol. 33. No. 8. Pp. 488–493.

Zalessky M.D. Sur la distinction de l'étage Bardien dans le Permien de l'Oural et sur sa flore fossile. *Problems of Paleontology*. 1937. Vol. 2–3. Pp. 37–101.

Zalessky M.D. Végétaux Permiens du Bardien de l'Oural. *Problems of Paleontology*. 1939. Vol. 5. Pp. 329–374.

Статья поступила в редакцию 21.03.2020, принята к публикации 24.04.2020

The article was received on 21.03.2020, accepted for publication 24.04.2020

Сведения об авторах / About the authors

Наугольных Сергей Владимирович – доктор геолого-минералогических наук; главный научный сотрудник лаборатории палеофлористики, Геологический институт Российской академии наук, г. Москва.

Serge V. Naugolnykh – Dr. Geol. and Mineral. Hab.; Chief Scientist Officer of Laboratory of Paleofloristics, Geological Institute RAS, Moscow

ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6506-7319
E-mail: naugolnykh@list.ru

Линкевич Валерий Викторович – директор; Андреапольский краеведческий музей им. Э.Э. Шимкевича, г. Андреаполь, Тверская область

Valeryi V. Linkevich – Director, Andreapol Regional Museum of Local Lore, Andreapol city, Tver region

E-mail: linkevichvalerijj@rambler.ru

Заявленный вклад авторов

С.В. Наугольных – общее руководство исследованиями, планирование исследований, организация и проведение полевых работ

В.В. Линкевич – участие в полевых работах, сбор коллекционных материалов, обсуждение полученных результатов

Contribution of the authors

S.V. Naugolnykh – general management of the research, the research planning, organisation and realisation of the field work

V.V. Linkevich – participation in the field work, collecting of the fossils, discussion of the obtained results

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи
All authors have read and approved the final manuscript

Оригинальное исследование

DOI: 10.31862/2500-2961-2020-10-2-151-169

Е.А. Пинаевская, С.Н. Тарханов, А.С. Пахов

Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаверова Уральского отделения Российской академии наук, 163000, г. Архангельск, Российская Федерация

Особенности роста разных форм сосны обыкновенной в кустарничково-сфагновом типе леса устья реки Онега

Сосна (*Pinus sylvestris* L.) – основной древесный вид лесных экосистем Европейского Севера России, поэтому необходимы углубленные исследования разнообразия форм и ростовых процессов этого растения. Формы у сосны выделяются по ряду морфологических и других признаков. В условиях длительного избыточного увлажнения почвы наблюдается совместное произрастание различных форм сосны. Цель работы – изучение роста разных форм сосны по морфоструктурным показателям в кустарничково-сфагновом типе леса устья реки Онега. Исследования роста деревьев по форме апофиза семенных чешуй шишек и габитусу кроны проведены в разновозрастных кустарничково-сфагновых сосняках на северо-западе Европейской части России (северная подзона тайги). Проведены морфометрические измерения вегетативной и генеративной сфер у форм сосны обыкновенной. Установлено, что преимущество по морфометрическим показателям, средним значениям радиального прироста, поздней и ранней древесины имеет сосна с «выпуклой» формой апофиза по сравнению с деревьями, имеющие «плоскую» форму. У форм с разным габитусом кроны выявлено, что преимущество по морфометрическим показателям ствола и кроны имеет «обычная» форма. Деревья «обычной» формы имеют более крупные шишки, большую величину радиального прироста и макроструктурные показатели древесины (ранняя и поздняя зоны годичного кольца) по сравнению с «болотной».

© Пинаевская Е.А., Тарханов С.Н., Пахов А.С., 2020
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International License
The content is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Ключевые слова: *Pinus sylvestris* L., формы сосны обыкновенной, морфометрические показатели деревьев, радиальный прирост сосны

Благодарности. Исследование проведено в ходе выполнения государственного задания по теме: «Структура и изменчивость популяций лесных сообществ на приарктических территориях Севера Русской равнины», № гос. регистрации АААА-А18-118011690221-0.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Пинаевская Е.А., Тарханов С.Н., Пахов А.С. Особенности роста разных форм сосны обыкновенной в кустарничково-сфагновом типе леса устья реки Онега // Социально-экологические технологии. 2020. Т. 10. № 2. С. 151–169. DOI: 10.31862/2500-2961-2020-10-2-151-169

Original research

DOI: 10.31862/2500-2961-2020-10-2-151-169

E.A. Pinaevskaya, S.N. Tarkhanov, A.S. Pakhov

**N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research,
Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Arkhangelsk, 163000, Russian Federation**

Growth features of different forms of scots pine in the shrub-sphagnum forest type estuary of the Onega River

Pinus sylvestris L. is the main tree species of forest ecosystems in the European North of Russia, therefore, in-depth studies of the diversity of forms and growth processes of this plant are important. Forms in pine stand out according to morphological and other characteristics. In conditions of prolonged excessive soil moisture, the joint growth of various forms of pine is observed. The aim of the work is to study the growth of various forms of pine according to morphostructural characteristics in the shrub-sphagnum forest type estuary of the Onega River. Investigations of tree growth (according to the form of seed cone scales apophysis and crown habit) were carried out in shrub-sphagnum pine forests of different ages in the northwest of the European part of Russia (northern taiga subzone). Morphometric measurements of the vegetative and generative spheres in the forms of scots pine

were made. It is established that the advantage in morphometric characteristics, average values of radial growth, late and early wood has a pine tree with a «convex» apophysis form. The advantage with respect to the morphometric characteristics of the trunk and crown is form with «ordinary» crown habit. The «ordinary» form has larger cones, a larger value of radial growth and macrostructural parameters of wood compared to the «swamp».

Key words: *Pinus sylvestris* L., forms of scots pine, morphometric characteristics of trees, radial growth of pine

Acknowledgments. This study was carried out on the topic of the state assignment «The structure and variability of forest community populations in the Subarctic territory of the North of the Russian Plain», project No. AAAA-A18-118011690221-0.

FOR CITATION: Pinaevskaya E.A., Tarkhanov S.N., Pakhov A.S. Growth features of different forms of scots pine in the shrub-sphagnum forest type estuary of the Onega River. *Environment and Human: Ecological Studies*. 2020. Vol. 10. № 2. Pp. 151–169. (In Russ.) DOI: 10.31862/2500-2961-2020-10-2-151-169

Сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) – один из основных древесных видов лесных экосистем Европейского Севера России, вид, обладающий экологической пластичностью и высокой индивидуальной изменчивостью. Для изучения разнообразия форм и ростовых процессов необходимы углубленные исследования *P. sylvestris* L.

Исследования по дифференциации сосны по ряду морфологических и других признаков расширили представления о внутривидовых формах [Правдин, 1964; Мамаев, 1972; Путенихин, 2000; Farjon, 2001]. Из морфологических признаков комплексным индикатором, фиксирующим информацию за длительное время, у древесных растений является радиальный прирост [Ваганов, Шашкин, 2000; Linderholm et al., 2002; Shiyatov, 2003; Mazepa, 2005; Радиальный прирост сосны..., 2013]. К настоящему времени имеются данные по росту разных форм сосны в условиях длительного избыточного увлажнения почвы разных районов Архангельской области [Тарханов и др., 2014, 2018; Пинаевская, Тарханов, 2018, 2019 и др.], но работы по изменчивости морфометрических признаков у морфологических форм сосны, произрастающих в устье реки Онега, не проводились.

У всех хвойных древесных видов репродуктивный этап развития представлен ежегодными параллельными циклами вегетативного и генеративного морфогенеза. Признаки генеративных органов (цвет мужских и женских стробилов, семян, форма апофиза семенных чешуй

шишек и др.) являются надежными маркерами морфологических форм у сосны, т.к. стабильны во всех метамерах кроны деревьев и во времени [Мамаев, 1972; Путенихин, 2000]. В условиях длительного избыточного увлажнения почвы наблюдается совместное произрастание различных форм сосны. Визуально выделяются формы у сосны по габитуальным особенностям кроны: «болотная» форма, отличительными признаками которой являются небольшие приросты побегов, компактный или уродливый внешний вид с разнообразной формой кроны, и «обычная» форма – с типичными морфологическими признаками для деревьев этого возраста [Аболин, 1915; Селекция лесных пород..., 1982; Тарханов, Бирюков, 2013].

Цель исследования – изучение роста разных форм сосны (*Pinus sylvestris* L.) по морфоструктурным показателям в кустарничково-сфагновом типе леса устья реки Онега.

Задачи исследования: изучить изменчивость морфометрических признаков вегетативной и генеративной сфер у форм сосны с разной формой апофиза семенных чешуй шишек («выпуклая» и «плоская»); выявить различия по морфоструктурным признакам у форм по габитусу кроны («обычная» и «болотная»); выявить особенности в радиальном приросте и макроструктурных показателях древесины у деревьев выделенных форм.

Материалы и методы

Исследования роста разных форм сосны (*Pinus sylvestris* L.) проведены в разновозрастных сосняках кустарничково-сфагновых (Va класс бонитета) устья реки Онега (северная подзона тайги) на 4 пробных площадях (63˚53 с.ш.; 38˚06 в.д.) в 2017 г.

Средний возраст древостоя составляет 140–160 лет, средняя высота – 7 м, средний диаметр (на высоте 1,3 м) – 12 см. По признакам генеративных органов отобраны деревья с разной формой апофиза семенных чешуй шишек: «выпуклая» (f. *gibba*) и «плоская» (f. *plana*) [Правдин, 1964]. По внешнему облику деревьев выделены «обычная» (типичный для вида внешний вид) и «болотная» (деревья отличаются от типичного облика по ряду морфологических признаков) формы [Аболин, 1915]. В исследованиях по «болотной» сосне В.Н. Сукачев детально описал 3 морфологические формы, Р.И. Аболин характеризовал 4. Все они отличались слабым ростом. В данном исследовании авторы опирались на данный подход, но не ограничивались общепринятым выделением форм у сосны в болотных насаждениях.

Объем выборки каждой формы составил 37–40 деревьев. Выделение форм по типу апофиза семенных чешуй шишек и габитусу кроны проводилось на одних и тех же деревьях (всего 80 деревьев).

У деревьев разных форм измерены морфометрические показатели вегетативной сферы, отобраны керны древесины (2 образца с каждого дерева на высоте 1,3 м) и проведен сбор шишек (10 штук с каждого дерева) (в полевых условиях). В лабораторных условиях определены морфометрические показатели шишек и семенных чешуй (в сухом состоянии). Методом световой микроскопии определены радиальный прирост, ширина зон поздней и ранней древесины.

Обработка материала выполнена с помощью общепринятых методик, дендрохронологического анализа и статистического расчета в программе Statistica.

Результаты

Надежными диагностическими и селекционными признаками у сосны является форма апофиза семенных чешуй шишек. В кустарничково-сфагновых сосняках устья реки Онега преимущество по морфометрическим показателям ствола и кроны имеет сосна с «выпуклой» формой апофиза по сравнению с деревьями, имеющие «плоскую» форму ($t > t_{0,05}$) (рис. 1). Форма f. *plana* имеет большие значения коэффициентов вариации по высоте ствола (29%) и протяженности кроны (47%) по сравнению с формой f. *gibba* (17 и 28% соответственно). По диаметру ствола и диаметру кроны формы имеют близкие значения и соответствуют низкому и среднему уровню (13–19%).Установлены достоверные различия между сосной с «выпуклой» и «плоской» формой апофиза по длине и массе шишки, длине и высоте апофиза ($t > t_{0,05}$) (см. рис. 1). Коэффициент изменчивости морфоструктурных параметров шишек у разных форм имеет близкие значения и соответствует низкому – повышенному уровню (8–34%).

Сосна с «выпуклой» формой достоверно превосходит деревья с «плоским» апофизом по средним значениям годичного кольца ($t > t_{0,01}$), поздней ($t > t_{0,001}$) и ранней ($t > t_{0,05}$) древесины (табл. 1).

Во временных рядах радиального прироста сосна с «плоской» формой апофиза доминирует по образованию ранней и поздней древесины в молодом возрасте (до 10 лет), а с 30 лет отмечается превосходство по показателям деревьев с «выпуклой». В возрасте 60–70 лет до 120–130 лет у форм отмечаются близкие значения поздней и ранней древесины, а с 140 лет деревья с «выпуклой» формой преобладают по значениям над «плоской» (рис. 2).

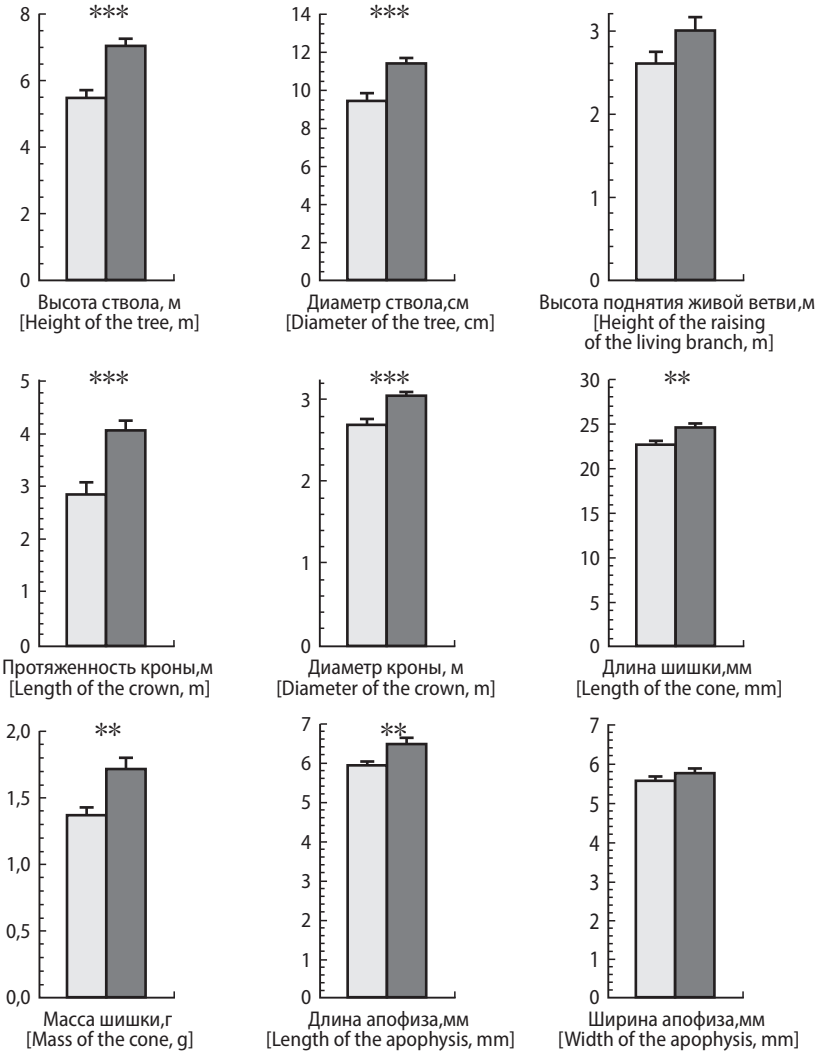


Рис. 1. Морфометрические показатели (среднее значение с ошибкой) вегетативной и генеративной сфер сосны с разной формой апофиза семенных чешуй шишек.

$^{*}t > t_{0,05}$; $^{**}t > t_{0,01}$; $^{***}t > t_{0,001}$

Fig. 1. Morphometric characteristics of the vegetative and generative spheres of pine with different forms of seed cones scales apophysis.

$^{*}t > t_{0,05}$; $^{**}t > t_{0,01}$; $^{***}t > t_{0,001}$

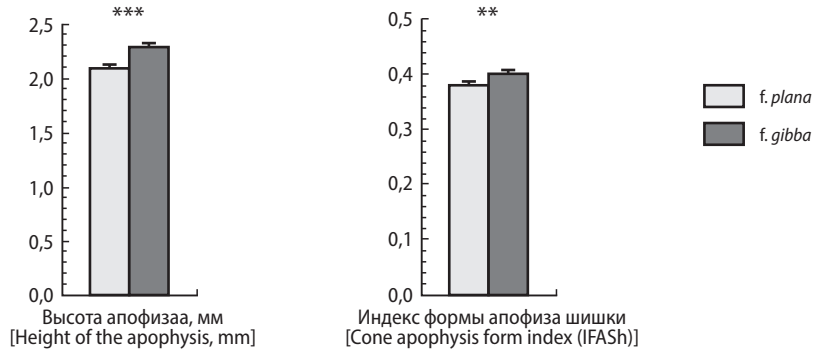


Рис. 1. Окончание

Fig. 1. Continuation

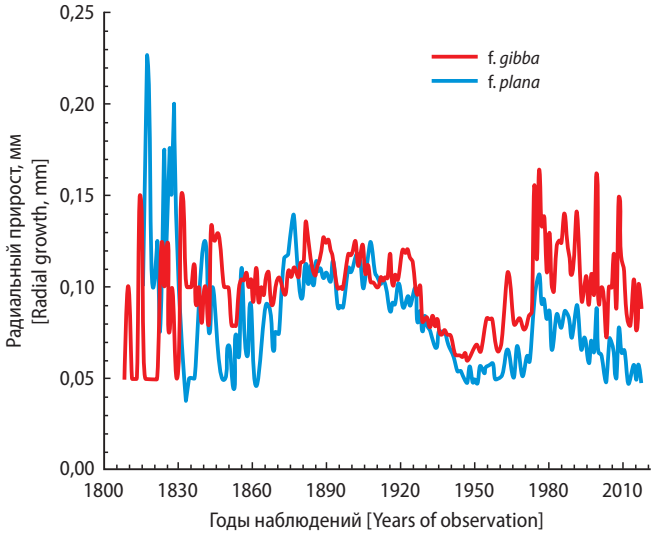
Таблица 1

Изменчивость радиального прироста сосны с разной формой апофиза семенных чешуй шишек [The variability of radial growth of pine with different forms of seed cone scales apophysis]

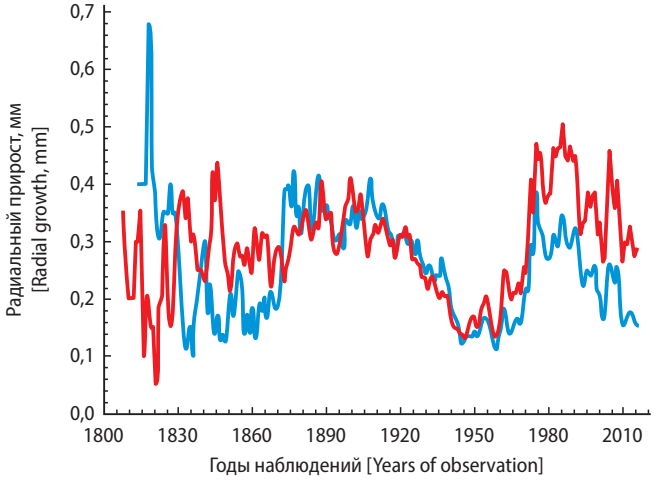
Показатели [Characteristics]		Форма апофиза [Apophysis form]		*t*-критерий [*t*-test]
		f. *gibba*	f. *plana*	
Радиальный прирост, мм [Radial growth, mm]	$\bar{x} \pm s_{\bar{x}}$	0,45 ± 0,03	0,34 ± 0,02	2,86
	min–max	0,25–1,26	0,19–0,84	
	C.V, %	45	38	
Поздняя древесина, мм [Late wood, mm]	$\bar{x} \pm s_{\bar{x}}$	0,11 ± 0,01	0,08 ± 0,004	3,83
	min–max	0,06–0,28	0,06–0,17	
	C.V, %	38	30	
Ранняя древесина, мм [Early wood, mm]	$\bar{x} \pm s_{\bar{x}}$	0,33 ± 0,03	0,26 ± 0,02	2,18
	min–max	0,01–0,98	0,13–0,68	
	C.V, %	51	41	

Примечание. $\bar{x} \pm s_{\bar{x}}$ – среднее значение с ошибкой; min–max – минимальное и максимальное значения; *C.V.* – коэффициент вариации.

[Note: $\bar{x} \pm s_{\bar{x}}$ – average value with an error; min–max – minimum and maximum values; *C.V.* – the coefficient of variation.]



a



b

Рис. 2. Временная динамика макроструктурных показателей древесины у сосны с разной формой апофиза семенных чешуй шишек:
a – поздняя древесина; *b* – ранняя древесина

Fig. 2. Temporal dynamics of macrostructural parameters of wood of pine with different forms of seed cones scales apophysis:
a – late wood; *b* – early wood

Выделенные формы имеют близкие значения по числу годичных колец в 1 см в возрасте 30 (18 и 19 шт.) и 70 (28 и 32 шт.) лет. В более старшем возрасте отмечается большее значение числа слоев у деревьев с «плоской» формой (32 шт.), по сравнению с «выпуклой» (25 шт.) (рис. 3). Древесина разных форм сосны характеризуется близкими значениями содержания поздней зоны в разном возрасте (19–25%) (рис. 3).

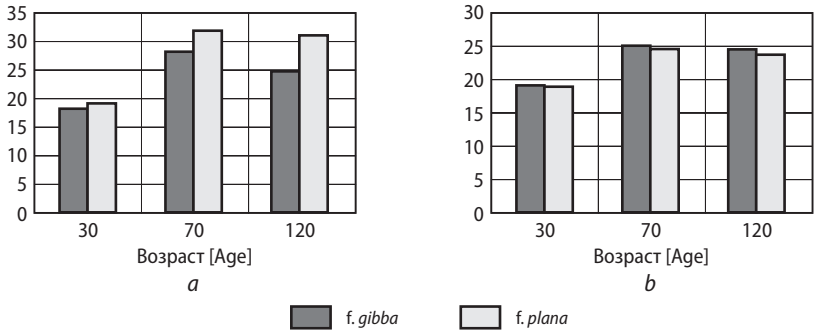


Рис. 3. Изменение числа годичных слоев в 1 см (*a*) и содержания поздней древесины (*b*) с возрастом у сосны с разной формой апофиза семенных чешуй шишек

Fig. 3. The number of annual layers of 1 cm (*a*) and change in the content of late wood (*b*) with age of pine with different forms of seed cones scales apophysis

В условиях длительного избыточного увлажнения почв отмечается разнообразие морфологических форм у сосны, в том числе и по габитусу кроны. В кустарничково-сфагновом типе леса устья реки Онега установлено, что преимущество по морфометрическим показателям ствола и кроны имеет форма с «обычной» кроной ($t > t_{0,05}$) (рис. 4). Близкие значения коэффициента вариации формы имеют по высоте ствола, протяженности, диаметру кроны и соответствуют низкому – повышенному уровню (13–34%). По диаметру ствола деревья «болотной» формы имеют большие значения коэффициента вариации (18%), а высоте поднятий живой ветви – «обычная» форма (40%). «Обычная» форма имеет более крупные шишки, по сравнению с «болотной» (см. рис. 4). Уровни изменчивости морфометрических параметров шишек невысокие (низкий – повышенный уровень) (8–34%).

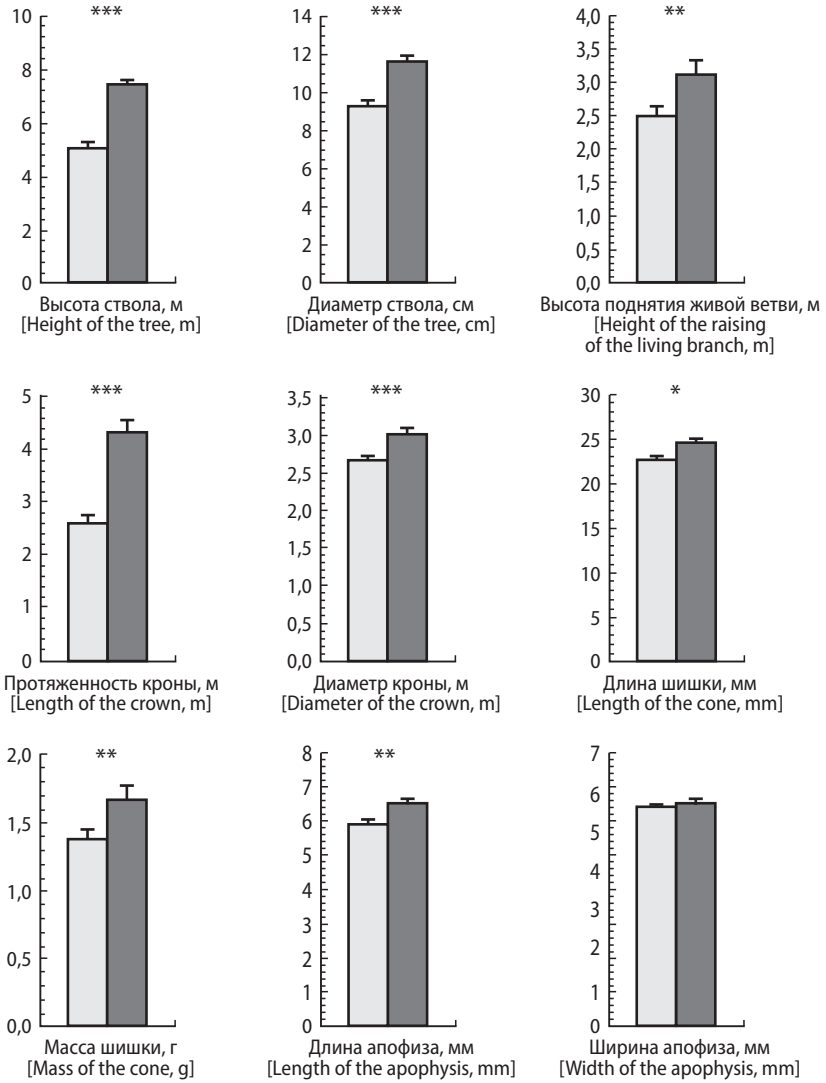


Рис. 4. Морфометрические показатели вегетативной и генеративной сфер сосны с разным габитусом кроны.
$^{*}t > t_{0,05}$; $^{**}t > t_{0,01}$; $^{***}t > t_{0,001}$

Fig. 4. Morphometric characteristics of the vegetative and generative spheres of pine with different crown habit.
$^{*}t > t_{0,05}$; $^{**}t > t_{0,01}$; $^{***}t > t_{0,001}$

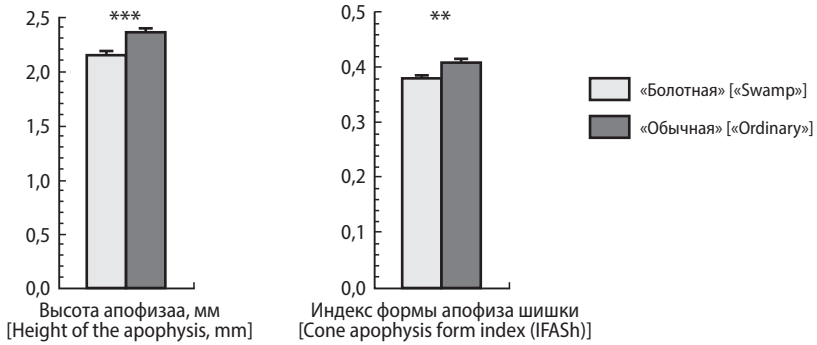


Рис. 4. Окончание

Fig. 4. Continuation

«Болотная» по габитусу форма сосны имеет меньшие значения радиального прироста по сравнению с «обычной» ($t > t_{0,001}$). Деревья «обычной» формы достоверно превосходят «болотную» форму по средним значениям поздней и ранней древесины ($t > t_{0,001}$) (табл. 2).

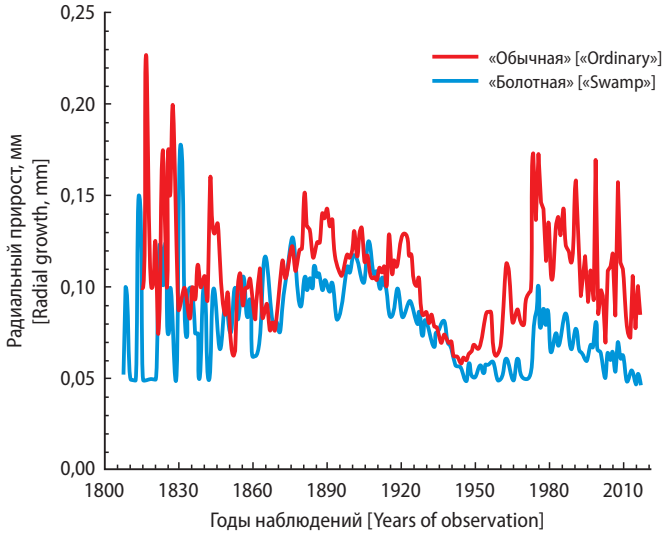
Таблица 2

Изменчивость радиального прироста у сосны с разным габитусом кроны [The variability of radial growth of pine with different crown habit]

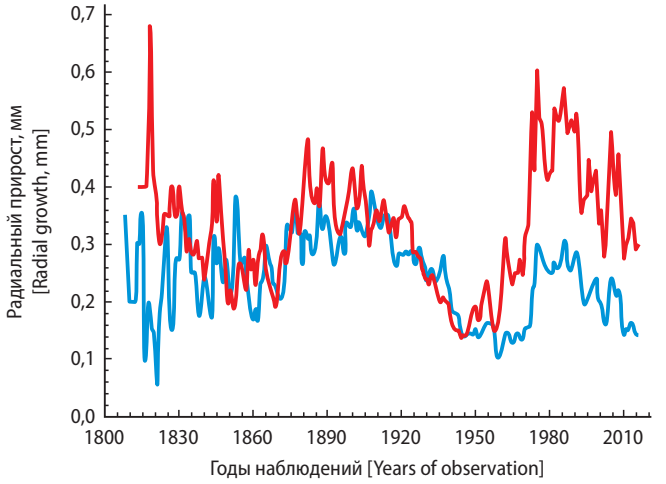
Показатели [Characteristics]		Габитус кроны [Crown habit]		*t*-критерий [*t*-test]
		«обычная» [«ordinary»]	«болотная» [«swamp»]	
Радиальный прирост, мм [Radial growth, mm]	$\bar{x} \pm s_{\bar{x}}$	0,50 ± 0,04	0,32 ± 0,01	4,87
	min–max	0,19–1,26	0,23–0,46	
	C.V, %	43	19	
Поздняя древесина, мм [Late wood, mm]	$\bar{x} \pm s_{\bar{x}}$	0,11 ± 0,01	0,08 ± 0,002	5,39
	min–max	0,06–0,28	0,06–0,11	
	C.V, %	37	18	
Ранняя древесина, мм [Early wood, mm]	$\bar{x} \pm s_{\bar{x}}$	0,38 ± 0,03	0,24 ± 0,01	4,88
	min–max	0,13–0,98	0,15–0,35	
	C.V, %	46	21	

Примечание. $\bar{x} \pm s_{\bar{x}}$ – среднее значение с ошибкой; min–max – минимальное и максимальное значения; *C.V.* – коэффициент вариации.

[Note: $\bar{x} \pm s_{\bar{x}}$ – average value with an error; min–max – minimum and maximum values; *C.V.* – the coefficient of variation.]



a



b

Рис. 5. Временная динамика макроструктурных показателей древесины у сосны с разным габитусом кроны:

a – поздняя древесина; *b* – ранняя древесина

Fig. 5. Temporal dynamics of macrostructural parameters of wood of pine with a different crown habit:

a – late wood; *b* – early wood

Наибольшие значения прироста в древесно-кольцевых рядах у «обычной» формы отмечаются в старшем возрасте (150–200 лет). Близкие значения прироста формы имеют в 20-, 60-, 120–140-летнем возрасте (рис. 5). «Обычная» и «болотная» формы имеют близкие значения по количеству годичных колец в 1 см в возрасте 20–30 (17 и 20 шт.) и 70 (26 и 31 шт.) лет. В возрасте 120 лет отмечается большее значение слоев у «болотной» формы (32 шт.), по сравнению с деревьями «обычной» (23 шт.) (рис. 6). Древесина разных форм сосны характеризуется близкими значениями содержания поздней зоны в разном возрасте (18 – 24%) (см. рис. 6).

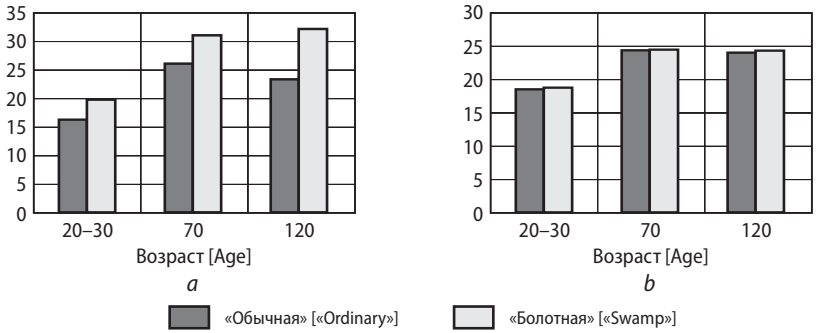


Рис. 6. Изменение числа годичных слоев в 1 см (*a*) и содержания поздней древесины (*b*) с возрастом у сосны с разным габитусом кроны

Fig. 6. The number of annual layers of 1 cm (*a*) and change in the content of late wood (*b*) with age of pine with a different crown habit

Обсуждение результатов

Полученные результаты об изменчивости ростовых показателей дополняют сведения о разнообразии форм сосны северных ценопопуляций. Изменчивость шишек сосны обыкновенной по морфологическим свойствам изучалась рядом исследователей [Правдин, 1964; Дворецкий, 1993; Видякин, 1995]. По данным С.А. Мамаева (1972) соотношение вариаций сосны по форме апофиза на разной широте не меняется. Есть сведения, что на севере Архангельской области соотношение особей с «плоским» апофизом составляет 27%, «выпуклым» – 71% и «крючковатым» – 2% [Листов, 1990]. В Восточной Сибири преобладают деревья с «выпуклой» формой (74%), в меньшем количестве представлены деревья с «плоской» (19%) и «крючковатой» (7%) формой [Кузьмина, 1978]. Установлена значительная вариабельность встречаемости сосны

с разной формой апофиза в Костромской области: на западе доминируют по численности деревья с «выпуклой» формой; на востоке – деревья с апофизом в виде крючка[1]; центр области – деревья с «плоской» формой [Иванов, 2011]. Частота встречаемости сосны с «выпуклой» формой апофиза семенных чешуй (f. *gibba*) в сосняках кустарничково-сфагновых устья реки Онега составляет 65%, а с «плоской» формой (f. *plana*) – 35%. Сосна с «выпуклой» формой апофиза превосходит деревья с «плоской» формой по некоторым морфометрическим признакам и средним значениям радиального прироста. При делении ряда радиального прироста на разные временные промежутки с шагом 10 (2007–2016 гг.), 50 (1967–2016 гг.) и 100 (1917–2016 гг.) лет, установлено, что деревья «выпуклой» формы (0,39–0,49 мм) имеют большие средние значения камбиального роста по сравнению с «плоской» формой (0,24–0,31 мм) ($t > t_{0,001}$) (рис. 2). Ранее были выявлены различия по морфоструктурными показателям у форм (f. *gibba* и f. *plana*) среднетаежных и лесотундровых ценопопуляций [Пинаевская, Тарханов, 2016, 2019].

В условиях длительного избыточного увлажнения почвы растут различные формы сосны. На нетипичный для вида внешний облик сосны в таких условиях указывали ряд работ [Сукачев, 1905; Аболин, 1915; Правдин, 1964; Мамаев, 1972]. Отмечается, что в северной части Архангельской области (Северо-Двинской бассейн) соотношение «болотной» и «обычной» форм в среднем составляет 1 к 10 [Тарханов, Бирюков, 2013]. Частота встречаемости «обычной» формы в сосняках кустарничково-сфагновых устья реки Онега составляет 85%, а «болотной» – 15%. Установлено, что деревья с разным габитусом кроны различаются по большинству морфометрических показателей. «Болотная» форма имеет меньшие средние значения радиального прироста по сравнению с «обычной». В разном возрасте деревья «обычной» формы имеют большие средние значения радиального прироста по сравнению с «болотной» формой, особенно это выражено в старшем возрасте ($t > t_{0,001}$) (см. рис. 5). Ранее установлено, что в бассейне реки Северная Двина (северная подзона тайги) и устье реки Вычегда (средняя подзона тайги) «болотная» форма значительно уступает в росте «обычной» по высоте и диаметру ствола (в 1,3–2,6 раза), длине кроны (в 2–3,6 раза), радиальному приросту (не менее чем в 2 раза) [Пинаевская, 2016; Пинаевская, Тарханов, 2018].

Формы у сосны сочетают в себе разные морфологические признаки. Деревья с «выпуклой» формой апофиза и «обычным» габитусом кроны

[1] В анализ наших исследований не были включены деревья f. *reflexa* (апофиз семенных чешуй шишек в виде крючка) в связи с единичным присутствием в выборке.

имеют большие морфометрические показатели, а особи с «плоским» апофизом и «болотной» формы отстают в росте. В изучаемом типе леса (устье реки Онега) встречаемость деревьев с сочетанием этих признаков («выпуклая» форма апофиза и «обычная» форма; «плоская» форма апофиза и «болотная» форма) составляет 40%. Деревья «обычной» формы с «выпуклым» апофизом семенных чешуй шишек имеют большие значения по высоте дерева (7,4 ± 0,21 м), диаметру ствола (11,8 ± 0,30 см) и средним значениям радиального прироста (0,49 ± 0,04 мм) по сравнению с деревьями «болотной» формы, имеющие «плоский» тип апофиза (высота дерева 5,0 ± 0,22 м; диаметр ствола 9,1 ± 0,30 см; радиальный прирост 0,31 ± 0,01 мм) ($t > t_{0,05}$). Это указывает на важность изучения роста сосны с учетом экологических и наследственных факторов.

Заключение

В сосняках кустарничково-сфагновых устья реки Онега по численности преобладают деревья с «выпуклой» формой апофиза семенных чешуй и «обычная» форма (65–85%). Эти формы имеют большие морфометрические показатели по сравнению с альтернативными. Изучение особенностей роста у разных форм сосны обыкновенной, выявление закономерностей изменчивости морфометрических показателей и радиального прироста расширяет представления о внутривидовом разнообразии, характере адаптаций и направленности приспособительных процессов к этим условиям.

Выводы

1. Сосна с «выпуклой» формой апофиза (f. *gibba*) имеет большие высоту и диаметр ствола на высоте 1,3 м, протяженность и диаметр кроны (на 13–43%), а также величину радиального прироста и морфометрические показатели шишки по сравнению с деревьями, имеющие «плоскую» форму (f. *plana*).

2. Во временной динамике радиального прироста отмечается преобладание формы f. *plana* в молодом возрасте, а в более старшем возрасте явное преимущество в росте имеет f. *gibba*. Последняя существенно превосходит форму f. *plana* по величине прироста поздней и ранней древесины.

3. Деревья «обычной» формы превосходят по морфометрическим показателям вегетативной и генеративной сфер «болотную» форму (в 1,1–1,7 раза). Наибольшие значения прироста в древесно-кольцевых рядах у «обычной» формы отмечаются в старшем возрасте.

Библиографический список / References

Аболин Р.И. Болотные формы *Pinus sylvestris* L. // Труды Ботанического музея АН. 1915. Вып. 14. С. 62–84. [Abolin R.I. Swampforms of *Pinus sylvestris* L. *Trudy Botanicheskogo muzeya AN*. 1915. Issue 14. Pp. 62–84. (In Russ.)]

Ваганов Е.А., Шашкин А.В. Рост и структура годичных колец хвойных. Новосибирск, 2000. [Vaganov E.A., Shashkin A.V. Rost i struktura godichnykh kolets khvoinykh [Growth and structure of conifer tree rings]. Novosibirsk, 2000.]

Видякин А.И. Изменчивость формы апофизов шишек в популяциях сосны обыкновенной на востоке Европейской части России // Экология. 1995. № 5. С. 356–362. [Vidyakin A.I. Variability of the shape of cone apophysis in populations of scots pine in the east of the European part of Russia. *Russian Journal of Ecology*. 1995. No. 5. Pp. 356–362. (In Russ.)]

Дворецкий Н.И. Изменчивость морфологических признаков сосны обыкновенной в Восточном Забайкалье // Лесоведение. 1993. № 4. С. 77–80. [Dvoretskii N.I. Variability of morphological features of scots pine in East Transbaikalia. *Russian Journal of Forest Science*. 1993. No.4. Pp. 77–80. (In Russ.)]

Иванов А.М. Изучение морфологической изменчивости шишек сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в Костромской области // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. 2011. № 4. С. 192–195. [Ivanov A.M. Studying of the morphological variability of cones pines (*Pinus sylvestris* L.) in the Kostroma region. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoi vestnik*. 2011. No. 4. Pp. 192–195. (In Russ.)]

Кузьмина Н.А. Изменчивость генеративных органов сосны обыкновенной в Приангарье // Селекция хвойных пород Сибири. Красноярск, 1978. С. 96–120. [Kuzmina N.A. Variability of the generative organs of scots pine in Angara]. *Selektsiya khvoinykh porod Sibiri*. Krasnoyarsk, 1978. Pp. 96–120. (In Russ.)]

Листов А.А. Семяношение сосны в лишайниковых борах Севера // Селекция и семеноводство хвойных пород на Европейском Севере. 1990. С. 51–60. [Listov A.A. Softwood breeding and seed production in the European North. *Selektsiya i semenovodstvo khvoinykh porod na Evropeiskom Severe*. 1990. Pp. 51–60. (In Russ.)]

Мамаев С.А. Формы внутривидовой изменчивости древесных растений (на примере семейства *Pinaceae* на Урале). М., 1972. [Mamaev S.A. Formy vnutrividovoi izmenchivosti drevesnykh rastenii (na primere semeistva Pinaceae na Urale) [Forms of intraspecies variability of ligneous plants (on the example of the *Pinaceae* family in the Urals)]. Moscow, 1972.]

Пинаевская Е.А. Рост разных форм сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на болотных почвах северной тайги // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2016. № 11 (122). С. 163–170. [Pinaevskaya E.A. Growth of different forms of *Pinus sylvestris* L. on marshy soils of the northern taiga. *Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2016. No. 11 (122). Pp. 163–170. (In Russ.)]

Пинаевская Е.А., Тарханов С.Н. Закономерности роста форм сосны (*Pinus sylvestris* L.) с разной формой апофиза семенных чешуй на северной границе ареала Европейской части России // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т. 18. № 2-2. С. 483–487. [Pinaevskaya E.A., Tarkhanov S.N. Growth regularities of *Pinus sylvestris* L. with different forms

of seed scales apophysison the areal northern border of European Russia. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*. 2016. Vol. 18. No. 2-2. Pp. 483–487. (In Russ.)]

Пинаевская Е.А., Тарханов С.Н. Оценка изменчивости роста у разных форм сосны обыкновенной в условиях постоянного избыточного увлажнения почв средней тайги // Лесохозяйственная информация. 2018. № 4. С. 5–11. [Pinaevskaya E.A., Tarkhanov S.N. Estimation of growth variability in different forms scots pine in conditions of constant overwetting of soils in the middle taiga. *Lesokhozyaistvennaya informatsiya*. 2018. No. 4. Pp. 5–11. (In Russ.)]

Пинаевская Е.А., Тарханов С.Н. Особенности роста разных форм сосны в среднетаежных кустарничково-сфагновых сосняках в устьях рек Вага и Вычегда // Лесной вестник. 2019. Т. 23. № 6. С. 29–36. [Pinaevskaya E.A., Tarkhanov S.N. Growth peculiarities of different pine forms in middle of couple-sphagnetic orders of the Vaga and Vychegda rivers. *Lesnoi vestnik* / *Forestry Bulletin*. 2019. Vol. 23. No.6. Pp. 29–36. (In Russ.)]

Правдин Л.Ф. Сосна обыкновенная. Изменчивость, внутривидовая систематика и селекция. М., 1964. [Pravdin L.F. Sosna obyknovennaya. Izmenchivost, vnutrividovaya sistematika i selektsiya [Scots pine. Variability, intraspecific systematics and breeding]. Moscow, 1964.]

Путенихин В.П. Популяционная структура и сохранение генофонда хвойных видов на Урале: Автореф. дис. … д-ра биол. наук. Красноярск, 2000. [Putenikhin V.P. Populyatsionnaya struktura i sokhranenie genofonda khvoynykh vidov na Urale [Population structure and conservation of coniferous species gene pool in the Urals]. Dr. Hab. theses. Krasnoyarsk, 2000.]

Радиальный прирост сосны в сфагновых сосняках лесной зоны России и глобальные факторы среды / Ловелиус Н.В., Дьяконов К.Н., Пальчиков С.Б. и др. // Общество. Среда. Развитие. 2013. № 4. С. 251–259. [Lovelius N.V., Dyakonov K.N., Palchikov S.B. et al. Radial growth of pine in sphagnum pine forests of the Russian forest zone and global environmental factors. *Obshchestvo*. *Sreda*. *Razvitie*. 2013. No. 4. Pp. 251–259. (In Russ.)]

Селекция лесных пород / Молотков П.И., Патлай И.Н., Давыдова Н.И. и др. М., 1982. [Molotkov P.I., Patlai I.N., Davydova N.I. et al. Selektsiya lesnykh porod [Forest Breeding]. Moscow, 1982.]

Сукачев В.Н. О болотной сосне // Лесной журнал. 1905. Т. 35. Вып. 3. С. 354–372. [Sukachev V.N. About the swamp pine. *Lesnoi zhurnal*. 1905. Vol. 35. Issue 3. Pp. 354–372. (In Russ.)]

Тарханов С.Н., Бирюков С.Ю. Формовое разнообразие *Pinus sylvestris* (Pinaceae) в бассейне Северной Двины // Растительные ресурсы. 2013. Т. 49. № 4. С. 481–490. [Tarkhanov S.N., Biryukov S.Yu. Form diversity of *Pinus sylvestris* (Pinaceae) in the Northern Dvina basin. *Rastitelnye resursy*. 2013. Vol. 49. No. 4. Pp. 481–490. (In Russ.)]

Тарханов С.Н., Пинаевская Е.А., Аганина Ю.Е. Адаптивные реакции морфологических форм сосны (*Pinus sylvestris* L.) в стрессовых условиях северной тайги (на примере Северо-Двинского бассейна) // Сибирский экологический журнал. 2018. Т. 25. № 4. С. 425–437. [Tarkhanov S.N., Pinaevskaya E.A., Aganina Yu.E. Adaptive responses of morphological forms of the pine (*Pinus sylvestris* L.) under stressful conditions of the northern taiga (in the Northern Dvina Basin). *Contemporary Problems of Ecology*. 2018. Vol. 25. No. 4. Pp. 425–437. (In Russ.)]

Тарханов С.Н., Пинаевская Е.А., Аншукова Ю.Е. Морфоструктурные особенности и изменчивость биохимических признаков форм *Pinus sylvestris* (Pineceae) в условиях избыточного увлажнения почв северной тайги // Растительные ресурсы. 2014. Т. 50. № 4. С. 567–578. [Tarkhanov S.N., Pinaevskaya E.A., Anshukova Yu.E. Morpho-structural features and variability of biochemical characters of *Pinus sylvestris* (Pineceae) variants under overwetting of soils in the northern taiga. *Rastitelnye Resursy*. 2014. Vol. 50. No. 4. Pp. 567–578.]

Farjon A. World Checklist and Bibliography of Conifers. Kew: Royal Botanic Gardens, 2001.

Linderholm H.M., Moberg A., Grudd H. Peatland pines as climate indicators? A regional comparison of the climatic influence onscots pine growth in Sweden. *Canadian Journal of Forest Research*. 2002. Vol. 32. № 4. Pp. 1400–1410.

Mazepa V.S. Stand density in the last millennium at the upper tree-line ecotone in the Polar Ural Mountains. *Canadian Journal of Forest Research*. 2005. № 35. Pp. 2082–2091.

Shiyatov S.G. Rates of change in the upper treelineecotone in the Polar Ural Mountains. *Pages News*. 2003. Vol. 11. № 1. Pp. 8–10.

Статья поступила в редакцию 27.03.2020, принята к публикации 13.05.2020
The article was received on 27.03.2020, accepted for publication 13.05.2020

Сведения об авторах / About the authors

Пинаевская Екатерина Александровна – кандидат биологических наук; научный сотрудник лаборатории экологии популяций и сообществ, Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаверова Уральского отделения РАН, г. Архангельск

Ekaterina A. Pinaevskaya – PhD in Biology; researcher at the Laboratory of Ecology of Populations and Communities, N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Arkhangelsk

ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1877-1412
E-mail: eapinaevskaya@yandex.ru

Тарханов Сергей Николаевич – доктор биологических наук; заведующий лабораторией экологии популяций и сообществ, Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаверова Уральского отделения РАН, г. Архангельск

Sergey N. Tarkhanov – Dr. Hab. in Biology, head at the Laboratory of Ecology of Populations and Communities, N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Arkhangelsk

ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9037-8995
E-mail: tarkse@yandex.ru

Пахов Александр Сергеевич – младший научный сотрудник лаборатории экологии популяций и сообществ, Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаверова Уральского отделения РАН, г. Архангельск

Aleksandr S. Pakhov – junior researcher at the Laboratory of Ecology of Populations and Communities, N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Arkhangelsk

E-mail: aleksander.pakhoff@yandex.ru

Заявленный вклад авторов

Е.А. Пинаевская – отбор кернов древесины сосны, морфометрические измерения, дендрохронологический анализ, статистическая обработка данных и интерпретация результатов, подготовка текста статьи.

С.Н. Тарханов – общее руководство направлением исследования, подготовка текста статьи.

А.С. Пахов – сбор и первичная обработка материала (образцы шишек, керны древесины сосны).

Contribution of the authors

E.A. Pinaevskaya – pine wood core sampling, morphometric measurements, dendrochronological analysis, statistical processing data and interpretation of the results, preparation of the text of the article.

S.N. Tarkhanov – general direction of research, preparation of the text of the article.

A.S. Pakhov – collection and primary processing of material (samples of cones, cores of pine wood).

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи
All authors have read and approved the final manuscript

Оригинальное исследование

DOI: 10.31862/2500-2961-2020-10-2-170-184

Т.Ю. Толпышева

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, 119991 г. Москва, Российская Федерация

Распределение микотоксинов в цианолишайниках на побережье Белого моря

В талломах лишайников 6 видов рода *Peltigera* и *Nephroma arcticum* методом иммуноферментного анализа исследовано распределение низкомолекулярных биологически активных метаболитов, относящихся к группе микотоксинов. У *N. arcticum* исследован также характер распределения усниновой кислоты в талломе. В лишайниках выявлено 13 микотоксинов. Качественный состав микотоксинов варьирует у разных видов лишайников рода *Peltigera* и у собранного в разные годы вида *P. aphthosa*. Для некоторых микотоксинов получены статистически значимые различия по их содержанию в верхних и нижних частях талломов у 4 видов лишайников рода *Peltigera* и у *Nephroma arcticum*. Для других микотоксинов прослеживается тенденция более высокого их накопления в нижних, более старых участках талломов лишайников. Получены статистически достоверные данные о более высоком содержании усниновой кислоты в верхних, более молодых участках таллома *N. arcticum*, чем в нижних, более старых.

Ключевые слова: лишайники, микотоксины, род *Peltigera*, *Nephroma arcticum,* экология

Благодарности. Автор выражает благодарность А.А. Буркину за помощь в проведении иммуноферментного анализа.

ДЛЯ ЦИТИТРОВАНИЯ: Толпышева Т.Ю. Распределение микотоксинов в цианолишайниках на побережье Белого моря // Социально-экологические технологии. 2020. Т. 10. № 2. С. 170–184. DOI: 10.31862/2500-2961-2020-10-2-170-184

© Толпышева Т.Ю., 2020
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International License
The content is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Original research

DOI: 10.31862/2500-2961-2020-10-2-170-184

T.Yu. Tolpysheva

Lomonosov Moscow State University,
Moscow, 119991, Russian Federation

Distribution of mycotoxins in cyanolichens on the coast of the White Sea

In the lichen thalli of 6 *Peltigera* species and *Nephroma arcticum* enzyme-linked immunosorbent assay was conducted to investigate the distribution of low-molecular biologically active metabolites related to the group of mycotoxins, as well as the distribution of usnic acid at *N. arcticum*. Thirteen of micotoxins have been founds in the lichens. Qualitative composition of mycotoxins varies in different species of *Peltigera* and *P. aphthosa*, collected in different years. Some mycotoxins showed statistically significant differences of their content in the upper and lower parts of the thalli of 4 *Peltigera* species and *Nephroma arcticum*. The trend of higher accumulation of mycotoxins in the lower older part of the thalli as compared with the younger ones was noted. Statistically reliable data on the higher usnic acid content in the younger of the thallus of *N. arcticum* as compared with the older one was obtained.

Key woods: lichens, mycotoxins, *Peltigera* species, *Nephroma arcticum*, ecology

Acknowledgments. The author is grateful to A.A. Burkin for his help in conducting enzyme-linked immunosorbent assay.

FOR CITATION: Tolpysheva T.Yu. Distribution of mycotoxins in cyanolichens on the coast of the White Sea. *Environment and Human: Ecological Studies*. 2020. Vol. 10. № 2. Pp. 170–184. (In Russ.) DOI: 10.31862/2500-2961-2020-10-2-170-184

Введение

Многочисленные исследования по накоплению элементов в лишайниках показали, что некоторые соединения распределяются внутри таллома неравномерно [Lounamaa, 1965; Nöske et al., 1970; Lawrey, 1977; Вайштейн, 1982; Бязров, 2005 и др.]. Подобное неравномерное

распределение характерно и для веществ, образующихся в лишайниках в процессе метаболизма [Моисеева 1959; Равинская, Вайнштейн, 1975; Mirando, Fahselt, 1978; Rundel, 1978; Hamada, 1982; Hyvärinen et al., 2000].

В лишайниках, помимо собственных метаболитов, также встречаются соединения, вырабатываемые свободноживущими микроскопическими грибами родов *Alternaria*, *Aspergillus*, *Fusarium*, *Penicillium* [Антрахиноны..., 1980, 1981; Krivoshchekova et al., 1982; Kononenko et al., 2012; Буркин, Кононенко, 2014]. Эти соединения из группы микотоксинов могут долго сохраняться в лишайниках [Burkin et al., 2012], и, как было показано для кустистых представителей семейств *Parmeliaceae* и *Cladoniaceae*, по-разному распределены в талломах лишайников [Tolpysheva, 2014].

В группу цианолишайников включают представителей семейств, у которых одним из партнеров является цианобактерия (сине-зеленая водоросль). Цианобактерия участвует в образовании таллома лишайника или находится в цефалодиях [Nordic lichen flora, 2007].

Целью работы было изучение распределения низкомолекулярных биологически активных метаболитов в листоватых цианолишайниках. В связи с этим были поставлены задачи: определить количество микотоксинов и их распределение в талломах 6 видов рода *Peltigera*; определить количество микотоксинов и усниновой кислоты и распределение этих метаболитов в талломе *Nephroma arcticum* (L.) Torss.

Материалы и методы

В работе использовали эпигейные листоватые лишайники из семейств *Peltigeraceae* и *Nephromataceae*, одним из бионтов которых являются цианобактерии. У представителей семейства *Peltigeraceae* нижний коровой слой отсутствует, а у представителей семейства *Nephromataceae* он развит.

Лишайники собирали на побережье Кандалакшского залива Белого моря в окрестностях Беломорской биологической станции Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова. Район исследования находится в подзоне северной тайги. Здесь преобладают сосновые леса из *Pinus sylvestris* L. Для района исследования характерны долгая зима, длинная весна и короткое лето. Среднегодовая температура воздуха составляет около 0,5 °C. Февраль – самый холодный месяц года (средняя месячная температура от –10 °C до –12 °C); июль – самый теплый месяц (средняя месячная температура +13,2 °C). Число дней со снежным покровом более 190. Количество осадков 390–420 мм в год, из них

в теплый период выпадает 290–300 мм [Романов, 1961]. Почвы развиты слабо и представлены иллювиально-гумусовыми подзолами. Нередко почвой служит слой каменисто-песчаного грунта, лежащий на сплошном массиве гранитогнейсов и на базальте. *Nephroma arcticum* (L.) Torss., *Peltigera canina* (L.) Willd., *P. malacea* (Ach.) Funck, *P. neopolydactyla* (Gyeln.) Gyeln., *P. polydactylon* (Neck.) Hoffm., *P. scabrosa* Th. Fr., были собраны в 2012 г., а *P. aphthosa* (L.) Willd. в 2010 и в 2012 гг.

Фотобионт исследованных видов рода *Peltigera*, за исключением *P. aphthosa*, – цианобактерия *Nostoc*. У *P. aphthosa* фотобионтом является зеленая одноклеточная водоросль *Coccomyxa*, а цианобактерия *Nostoc* находится во внешних цефалодиях. У *Nephroma arcticum* фотобионт *Coccomyxa*, а цианобактерия *Nostoc* встречается во внутренних цефалодиях.

Таллом очищали от почвы, мха, хвоинок, а лопасти таллома делили на 2 равные части: верхнюю и нижнюю. Подробно методики подготовки материала к исследованию, определения микотооксинов и усниновой кислоты методом непрямого иммуноферментного анализа (ИАФ) приведены в соответствующих работах [Kononenko et al., 2012; Буркин и др., 2013; Tolpysheva, 2014]. Определяли концентрацию 16 микотоксинов: альтернариола (АОЛ), афлатоксина B1 (AB_1), дезоксиниваленола (ДОН), диацетоксисцирпенола (ДАС), зеараленона (ЗЕН), микофеноловой кислоты (МФК), охратоксина А (ОА), PR-токсина (PR), стеригматоцистина (СТЕ), Т-2 токсина (Т-2), фумонизина B_1 (ФУМ), циклопиазоновой кислоты (ЦПК), цитринина (ЦИТ) и эмодина (ЭМО), эргоалкалоидов (ЭА), роридина А (РоА).

Нижние пределы определения микотоксинов методом непрямого иммуноферментного анализа составили: для Т-2 токсина, эргоалкалоидов – 2 нг/г, для стеригматоцистина – 4 нг/г, для охратоксина – 8 нг/г, для альтернариола, зеараленона, микофеноловой кислоты, цитринина – 20 нг/г, для дезоксиниваленола, эмодина – 40 нг/г, для диацетоксисцирпенола, PR-токсина, циклопиазоновой кислоты – 100 нг/г.

Статистическую обработку материала проводили с использованием программы Statistica 8.0. Для сравнения средних использовали критерий Стьюдента (t-критерий) при уровне значимости 95%. Прочерк во всех таблицах означает, что вещество определяли, но его содержание равно 0.

Результаты и обсуждение

У видов рода *Peltigera* из 16 определяемых микотоксинов выявлено 10 (табл. 1). Качественный состав микотоксинов у исследованных видов различался. Наименьшее число микотоксинов (3) найдено у *P. canina*.

Эти микотоксины присутствовали и в гербарных образцах [Burkin et al., 2012]. Наибольшее число микотоксинов (9) выявлено у *P. aphthosa*, но качественный состав их у этого вида лишайника зависел от года сбора образцов. В образцах 2010 г. отсутствовали диацетоксисцирпенол и зеараленон, а в образцах 2012 г. – охратоксин и циклопиазоновая кислота (табл. 1).

Таблица 1

Содержание микотоксинов (нг/г) в видах рода *Peltigera* [The content of mycotoxins (ng / g) in species of *Peltigera*]

Микотоксины [Mycotoxins]	Лишайники [Lichens]	
	Верхняя часть таллома, среднее значение [Upper thallus, average]	Нижняя часть таллома, среднее значение [Lower thallus, average]
Peltigera scabrosa (*n* = 8)		
Т-2 токсин [T-2 toxin]	3 ± 0	–
Диацетоксисцирпенол [Diacetoxyscirpenol]	–	158,5 ± 7,5
Альтернариол [Alternariol]	211,6 ± 51,8	583,4 ± 142,6
Цитринин [Citrin]	–	32,3 ± 7,8
Стеригматоцистин [Sterigmatocystin]	77,8 ± 41,8	193,0 ± 128,4
Микофеноловая кислота* [Mycophenolic acid*]	25,6 ± 3,2	57,6 ± 9,3
Эмодин [Emodin]	290,7 ± 50,3	342,7 ± 91,3
Peltigera neopolydactyla (*n* = 6)		
Альтернариол* [Alternariol*]	59,8 ± 24,7	224,8 ± 104,0
Стеригматоцистин [Sterigmatocystin]	83,7 ± 27,8	231,8 ± 70,6
Циклопиазоновая кислота [Cyclopiazonic acid]	307,7 ± 40,9	412,2 ± 19,8
Микофеноловая кислота [Mycophenolic acid]	26,3 ± 3,7	29,0 ± 4,0
Эмодин* [Emodin*]	164,2 ± 34,9	403,3 ± 129,6

Продолжение табл. 1

Микотоксины [Mycotoxins]	**Лишайники [Lichens]**	
	Верхняя часть таллома, среднее значение [Upper thallus, average]	**Нижняя часть таллома, среднее значение [Lower thallus, average]**
Peltigera polydactylon (*n* = 5)		
Альтернариол [Alternariol]	50,2 ± 8,6	199,0 ± 57,6
Цитринин [Citrin]	–	48,0 ± 2,1
Стеригматоцистин [Sterigmatocystin]	57,5 ± 35,5	119,8 ± 85,7
Циклопиазоновая кислота* [Cyclopiazonic acid*]	396,0 ± 53,0	558,0 ± 62,5
Микофеноловая кислота [Mycophenolic acid]	29,5 ± 3,5	51,6 ± 13,24
Эмодин* [Emodin*]	156,8 ± 38,2	406,4 ± 105,26
Peltigera canina (*n* = 4)		
Стеригматоцистин [Sterigmatocystin]	196,0 ± 113,8	649,7 ± 294,4
Альтернариол [alternariol]	417,3 ± 215,9	1026 ± 492,2
Эмодин [Emodin]	96,0 ± 22,5	253,7 ± 74,1
Peltigera aphthosa (*n* = 4) (2010)		
Альтернариол* [Alternariol*]	272,0 ± 34,30	542,5 ± 179,59
Охратоксин А [Ocxhratoxin A] (*n* = 3)	9,3 ± 0,58	9,00
Цитринин [Citrin] (*n* = 3)	–	122,0 ± 30,19
Стеригматоцистин [Sterigmatocystin] (*n* = 2)	–	216,0 ± 182,0
Циклопиазоновая кислота [Cyclopiazonic acid] (*n* = 1)	240	224
Микофеноловая кислота [Mycophenolic acid]	–	48,75 ± 23,47
Эмодин* [Emodin*]	102,5 ± 23,5	236,25 ± 52,85

Окончание табл. 1

Микотоксины [Mycotoxins]	Лишайники [Lichens]	
	Верхняя часть таллома, среднее значение [Upper thallus, average]	Нижняя часть таллома, среднее значение [Lower thallus, average]
Peltigera aphthosa (*n* = 4) (2012)		
Диацетоксисцирпенол [Diacetoxyscirpenol]	–	168,3 ± 69,14
Зеараленон [Zearalenone]	25,00	22,2 ± 4,86
Альтернариол* [Alternariol*]	105,75 ± 31,58	271,25 ± 110,60
Цитринин* [Citrin*]	28,5 ± 2,5	51,25 ± 12,09
Стеригматоцистин [Sterigmatocystin]	95,0 ± 58,04	450,5 ± 292,32
Микофеноловая кислота* [Mycophenolic acid*]	28,75 ± 6,83	53,0 ± 3,80
Эмодин* [Emodin*]	93,25 ± 10,62	204,0 ± 38,49
Peltigera malacea (*n* = 1)		
Альтернариол [Alternariol]	–	52
Диацетоксисцирпенол [Diacetoxyscirpenol]	93	79
Микофеноловая кислота [Mycophenolic acid]	26	41
Стеригматоцистин [Sterigmatocystin]	–	143
Цитринин [Citrin]	–	30
Эмодин [Emodin]	71	266

Прочерк в таблице означает, что вещество определяли, но не обнаружили (содержание равно 0).
* – достоверные различия.

[A dash means that the substance was determined but not detected (content is 0).
* – significant differences.]

По качественному составу верхние и нижние части лопастей талломов некоторых видов лишайников тоже различались. Отсутствовали в верхних частях лопастей у *Peltigera scabrosa* цитринин и диацетоксисцирпенол, у *P. polydactylon* – цитринин. Только в верхней части таллома у *P. scabrosa* выявлен Т-2 токсин. В талломах *P. aphthosa*, собранных в 2010 г., в верхних частях лопастей не найдены цитринин, стеригматоцистин, микофеноловая кислота, а в талломах 2012 г. – диацетоксисцирпенол. У кустистых лишайников, собранных в этом районе в 2010 и 2012 гг., качественный состав микотоксинов не различался [Tolpysheva, 2014].

Для всех видов рода *Peltigera* отмечено высокое содержание альтернариола, стеригматоцистина, эмодина, а для *P. polydactylon*, *P. neopolydactyla*, *P. aphthosa* (сбор 2010 г.) также циклопиазоновой кислоты. Несколько особняком стоит *P. malacea* (изучен всего 1 образец лишайника), но и в этом случае можно предположить, что уровни эмодина и стеригматоцистина у этого вида будут высокими. Высокое содержание эмодина и альтернариола отмечалось ранее у других родов лишайников [Kononenko et al., 2012; Буркин, Кононенко, 2014].

Более высокие уровни содержания практически всех микотоксинов у лишайников рода *Peltigera* обычно наблюдаются в нижних, более старых частях лопастей талломов, чем в верхних, более молодых. Однако для большинства веществ не выявлены статистически значимые различия в зависимости от их нахождения в разных частях таллома. Это объясняется редкостью выявления некоторых микотоксинов в образцах и/или низкими значениями уровней микотоксинов, приближающихся к нижней границе измерения метода. Например, охратоксина А и зеараленона – у *P. aphthosa*, микофеноловой кислоты – у *P. neopolydactyla*.

Достоверные различия по накоплению микотоксинов в разных частях лопастей талломов отмечены у *P. scabrosa* для микофеноловой кислоты, у *P. neopolydactyla* для альтернариола и эмодина, у *P. polydactylon* для циклопиазоновой кислоты и эмодина, у *P. aphthosa* для альтернариола и эмодина (независимо от года сбора образцов) и для микофеноловой кислоты и цитринина (в образцах 2012 г). Отсутствие микофеноловой кислоты в верхних частях лопастей талломов у образцов, собранных в 2010 г., подтверждает эту закономерность (см. табл. 1). У *P. aphthosa* и *P. scabrosa* в относительно высоких концентрациях содержится диацетоксисцирпенол, но этот микотоксин встречался только в нижних частях лопастей талломов лишайников и отсутствовал в верхних. Малые концентрации некоторых микотоксинов обнаружены у *P. aphthosa* (зеараленон, охратоксин А), *P. neopolydactyla* (микофеноловая кислота),

Peltigera polydactylon (цитринин), *P. scabrosa* (Т-2 токсин, цитринин). У *P. scabrosa* и *P. polydactylon* цитринин найден только в нижней части, а Т-2 токсин у *P. scabrosa* только в верхней. Нижние пределы содержания этих веществ, за исключением микофеноловой кислоты, находятся у нижней границы измерения метода. Аналогичные результаты по распределению микотоксинов получены нами ранее для кустистых лишайников, фотобионтами которых являются зеленые водоросли [Tolpysheva, 2014]. Полученные данные могут свидетельствует о том, что форма таллома и фотобионт не влияют на наличие микотоксинов.

В талломе *Nephroma arcticum* выявлено 12 микотоксинов, два из которых (Т-2 токсин и эргоалкалоид) найдены впервые (табл. 2). Ранее в гербарных образцах у этого вида было выявлено 10 микотоксинов [Burkin et al., 2012]. *N. arcticum* превосходил виды рода *Peltigera* по качественному составу и уровню содержания микотоксинов (табл. 2). В отличие от видов рода *Peltigera*, у которых прослеживается тенденция увеличения уровня практически всех микотоксинов от верхних к нижним частям лопастей талломов, у *Nephroma arcticum* характер распределения разных микотоксинов различается. Альтернариола и стеригматоцистина больше в нижней части лопастей, а цитринина и микофеноловой кислоты – в верхней (различия достоверны). Для циклопиазоновой кислоты и эмодина отмечена тенденция накопления их в верхней части лопастей, в то время как другие микотоксины (Т-2 токсин, дезоксиниваленол, диацетоксисцирпенол, зеараленона, эргоалкалоид, PR-токсин) распределены по таллому равномерно (см. табл. 2). Уровень содержания в разных частях талломов стеригматоцистина и микофеноловой кислоты у *N. arcticum* выше, чем у видов рода *Peltigera*.

Одним из вторичных метаболитов *Nephroma arcticum* является усниновая кислота [Vitikainen, 2007]. Как показал проведенный анализ, содержание усниновой кислоты выше в верхних, более молодых участках лопастей таллома (121,0 ± 36,84 нг/г), чем в нижних (85,7 ± 51,60 нг/г), более старых (различия достоверны). Высокое содержание усниновой кислоты в молодых частях подециев, по сравнению со старыми, отмечалось у видов рода *Cladonia* [Моисеева, 1959; Равинская, Вайнштейн, 1975; Mirando, Fahselt, 1975]. Сравнение содержания усниновой кислоты с распределением микотоксинов в *Nephroma arcticum* подтверждает данные, полученные ранее для видов семейства *Parmeliaceae* [Tolpysheva, 2014].

Микобионты лишайников микотоксины не вырабатывают. Возможны 2 пути попадания микотоксинов в лишайники: в результате заселения талломов грибами, вырабатывающими микотоксины, в том числе почвенными, или в результате поступления из почвенного раствора, в котором содержатся микотоксины.

Таблица 2

Содержание микотоксинов (нг/г) в *Nephroma arcticum* [The content of mycotoxins (ng/g) in *Nephroma arcticum*]

Микотоксины [Mycotoxins]	*Nephroma arcticum*	
	Верхняя часть таллома, среднее значение [Upper thallus, average]	Нижняя часть таллома, среднее значение [Lower thallus, average]
Т-2 токсин [T-2-toxin]	5,6 ± 1,0	5,7 ± 1,8
Дезоксиниваленол [Deoxynivalenol]	98,3 ± 2,7	85
Диацетоксисцирпенол [Diacetoxyscirpenol]	282,8 ± 23,8	244,8 ± 33,4
Зеараленон [Zearalenone]	71,0 ± 14,2	66,2 ± 19,0
Альтернариол* [Alternariol*]	284,0 ± 39,8	369,2 ± 56,0
Цитринин* [Citrin*]	155,2 ± 27,9	109,2 ± 28,3
Стеригматоцистин* [Sterigmatocystin*]	418,8 ± 161,3	786,4 ± 266,3
Циклопиазоновая кислота [Cyclopiazonic acid]	612,2 ± 167,6	334,8 ± 43,7
Микофеноловая кислота* [Mycophenolic acid*]	1876,4 ± 237,4	1148 ± 78,1
Эргоалкалоид [Ergoalkaloid]	6,2 ± 0,7	9,6 ± 5,8
Эмодин [Emodin]	4003,0 ± 707,7	2094,2 ± 380,2
PR-токсин [PR-toxin]	100	124

* – достоверные различия.

[* – significant differences.]

Микотоксины, найденные в лишайниках, продуцируют широко распространенные свободноживущие микроскопические грибы: *Alterenaria alternata* синтезирует альтернариол [Zajkowski et al., 1991], *Aspergillus versicolor* и *Emerriella nidulans* – стеригматоцистин [Weidenborner, 2001], некоторые виды рода *Penicillium*, *Septonia nodorum*, *Verticieladella abientina* – микофеноловую кислоту [Turner, Aldridge, 1981],

эмодин и цитринин продуцируют многие виды грибов родов *Aspergillus* и *Penicillium* [Мирчинк, 1976; Cole, Cox, 1981; Weidenborner, 2001], а также виды родов *Cladosporium* и *Phoma* [Cole, Cox, 1981]; диацетоксисцирпенол, дезоксиниваленол, зеараленон, Т-2 токсин, фумонизин B_1 встречаются у видов рода *Fusarium* [Там же], афлатоксин B_1 у *Aspergillus flavus* [Мирчинк, 1976]. Наряду с антибиотиками, вырабатываемыми грибами, микотоксины усиливают конкурентную способность этих организмов, но могут быть причиной серьезных микотоксикозов человека и животных вплоть до летального исхода [Там же]. Некоторые виды этих грибов встречаются в районе исследования [Кузнецов, Тарасов, 2008]. В XXI в. вновь возродился интерес к лишайникам как потенциальным источникам лекарственного сырья, поэтому факт наличия микотоксинов в лишайниковых талломах необходимо учитывать при проведении соответствующих исследований.

Лишайники являются одной из экологических ниш для разных видов грибов [Hawksworth, 1979; Cole, Cox, 1981; Girlanda et al., 1997; Suryanarayanen et al., 2005; Li et al., 2007; Etayo, Rosato, 2008]. Виды грибов родов *Acremonium*, *Alternaria*, *Chaetomium*, *Cladosporium*, *Coniochaeta*, *Fusarium*, *Hypoxylon*, *Geniculosporium*, *Mucor*, *Nodulisporium*, *Paecilomyces*, *Penicillium*, *Phialophora*, *Phoma*, *Scopulariopsis*, *Sporormiella*, *Trichoderma*, *Ulocladium* выделены из лишайников, относящихся к разным таксономическим группам и развивающимся на разных субстратах [Petrini et al., 1990; Girlanda et al., 1997; Li et al., 2007]. Некоторые из видов грибов, относящихся к этим родам, способны вырабатывать микотоксины.

Микроорганизмы распределены в почвах мозаично [Ettema, Wardle, 2002]. Лишайники, избирательно влияя на почвенные грибы [Толпышева, 1979а, б, в], также могут способствовать созданию их неравномерного распределения в почве. Различия в видовом составе лишайников и различия в видовом составе микроорганизмов зависят и от экологии местообитаний. Экологические оптимумы изученных видов лишайников отличаются: на побережье Белого моря *Peltigera aphthosa* – теневой мезофит, *P. scabrosa* – криофит, *P. canina* – ксеромезофит, *Nephroma arcticum* – психрофит [Abramova et al., 2002]. Поэтому в сухих, хорошо освещенных местообитаниях, где обычно развивается *Peltigera scabrosa*, спектр видов микроскопических грибов в почве будет другим, по сравнению с более влажными и затененными местами, где произрастает *P. aphthosa*. Вырабатываемые этими грибами метаболиты тоже могут отличаться.

Лишайники не способны регулировать свой водный обмен, пассивно впитывают воду с содержащимися в ней веществами. Изученные лишайники имеют листоватый таллом, который во влажную погоду полностью распростерт по субстрату. В сухую погоду нижние части таллома дольше остаются во влажном состоянии, что способствует более длительному протеканию здесь процессов метаболизма, как у самих лишайников, так и у грибов-контаминантов. Возможно, этим объясняются более высокие уровни микотоксинов в старых, нижних частях талломов видов рода *Peltigera*.

Не исключено, что имеет значение и таксономическая принадлежность лишайников. Однако даже у одного и того же вида лишайника состав микотоксинов не постоянен и варьирует в зависимости от места [Burkin et al., 2012] и, как показало проведенное исследование, года сбора лишайника. Можно предположить, что микотоксины, наряду с метаболитами самих лишайников – лишайниковыми кислотами, могут защищать лишайники от поедания беспозвоночными и теплокровными животными. Однако это предположение, также как и способы попадания микотоксинов в талломы лишайников (в результате всасывания их из почвенного раствора или в результате развития в талломах грибов-контаминантов, вырабатывающих микотоксины), требует проведения дополнительных исследований.

Выводы

У 6 видов рода *Peltigera* выявлено 10 микотоксинов. Наименьшее число микотоксинов (3) найдено у *P. canina*, наибольшее (9) – у *P. aphthosa*. Качественный состав микотоксинов у *P. aphthosa* зависел от года сбора лишайника.

Для видов рода *Peltigera* характерно большее количество микотоксинов в нижних, более старых частях лопастей талломов, по сравнению с верхними, более молодыми. Достоверные различия в распределении микотоксинов отмечены у *P. scabrosa* для микофеноловой кислоты, у *P. neopolydactyla* для альтернариола и эмодина, у *P. polydactylon* для циклопиазоновой кислоты и эмодина, у *P. aphthosa* для альтернариола и эмодина (независимо от года сбора образцов) и для микофеноловой кислоты (в образцах 2012 г).

У *Nephroma arcticum* найдено 12 микотоксинов. Одних микотоксинов больше в молодых, верхних частях лопастей талломов, других, наоборот, в нижних, более старых. Содержание некоторых микотоксинов в верхних и нижних частях талломов одинаковое. Достоверные

различия получены для альтернариола и стеригматоцистина (их больше в нижней части таллома), для цитринина и микофеноловой кислоты (их больше в верхней части).

Усниновой кислоты больше в верхних, более молодых участках лопастей таллома, а в нижних, более старых участках ее меньше (различия достоверны).

Библиографический список / Referances

Антрахиноны лишайника *Asahinea chrysantha* / Мищенко Н.П., Степаненко Л.С., Кривощекова О.Е., Максимов О.Б. // Химия природных соединений. 1980. № 2. С. 160–165. [Mischenko N.P., Stepanenko L.S., Krivoschekova O.E., Maximov O.B. Lichen Antrahinons of the *Asahinea chrysantha*. *Khimia pripodnikh soedinenyi*. 1980. No. 2. Pp. 160–165. (In Russ.)]

Антрахиноны лишайников *Xanthoria aureola* и *X. ulophiloides* / Кривощекова О.Е., Максимов О.Б., Мищенко Н.П., Степаненко Л.С. // Химия природных соединений. 1981. № 1. С. 96–97. [Krivoschekova O.E., Maximov O.B., Mischenko N.P., Stepanenko L.S. Antrahinons of *Xanthoria aureola* and *X. ulophiloides* lichens. *Khimia pripodnikh soedinenyi*. 1981. No. 1. Pp. 96–97. (In Russ.)]

Бязров Л.Г. Лишайники – индикаторы радиоактивного загрязнения. М., 2005. [Biazrov L.G. Lishainiki – indikatori radioaktivnogo zagryasneniya [Lichens as indicators of radioactive contamination]. Moscow, 2005.]

Буркин А.А., Кононенко Г.П. Метаболиты токсигенных грибов в лишайниках родов *Parmelia*, *Melanohalea*, *Arctoparmelia*, *Melanelia* и *Hypogymnia* // Микология и фитопатология. 2014. Т. 48. Вып. 1. С. 43–48. [Burkin A.A., Kononenko G.P. Toxigenic fungi metabolites in lichens of *Parmelia*, *Melanohalea*, *Arctoparmelia*, *Melanelia* и *Hypogymnia* genera. *Mikologiya i fitopatologiya*. 2014. Vol. 48. No. 1. Pp. 43–48. (In Russ.)]

Буркин А.А., Кононенко Г.П., Толпышева Т.Ю. Иммуноферментный анализ усниновой кислоты в лишайниках // Прикладная биохимия и микробиология. 2013. Т. 49. № 3. С. 322–328. [Burkin A.A., Kononenko G.P., Tolpysheva T.Yu. Enzyme immunoassay of usnic acid in lichens. *Prikladnaya biokhimiya i mikrobiologiya*. 2013. Vol. 49. No. 3. Pp. 322–328. (In Russ.)]

Вайнштейн Е.А. Некоторые вопросы физиологии лишайников. III. Минеральное питание // Ботанический журнал. 1982. Т. 67. № 5. С. 561–571. [Vainshtein E.A. Some questions of the lichens physiology. III. Mineral nutritious. *Botanicheskiy zhurnal*. 1982. T. 67. № 5. Pp. 561–571. (In Russ.)]

Кузнецов Е.А., Тарасов К.Л. Царство Fungi (Грибы) // Каталог биоты Беломорской биологической станции МГУ. 2008. С. 139–176. [Kuznecov E.A., Tarasov K.L. Fungi. *Katalog bioty Belomorskoy biologicheskoy stantsii MGU*. 2008. Pp. 139–176. (In Russ.)]

Мирчинк Т.Г. Почвенная микология. М., 1976. [Mirchink T.G. Pochvennaya mikologiya [Soil mycology]. Moscow, 2008.]

Моисеева Е.Н. К вопросу о локализации ферментов и лишайниковых кислот в слоевище лишайников // Ботанический журнал. 1959. Т. 44. № 8. С. 1128–1134. [Moiseeva E.N. On the localization of enzymes and lichen acids in the thallus of lichens. *Botanicheskiy zhurnal*. 1959. Vol. 44. No. 8. Pp. 1128–1134. (In Russ.)]

Равинская А.П., Вайнштейн Е.А. Хемотаксономическое значение изменений содержания лишайниковых кислот // Новости систематики низших растений. 1975. Т. 12. С. 266–273. [Ravinskaja A.P., Vainshtein E.A. Chemotaxonomic significance of lichen acid changes. *Novosti sistematiki nitzchikh rastenii*. 1975. Vol. 12. Pp. 266–273. (In Russ.)]

Романов А.А. О климате Карелии. Петрозаводск, 1961. [Romanov A.A. O klimate Karelii [About the climate of Karelia.]. Petrozavodsk, 1961.]

Толпышева Т.Ю. Влияние лишайников на видовой состав почвенных микроскопических грибов лишайниковых сосняков // Ботанический журнал. 1979а. Т. 64. № 5. С. 705–710. [Tolpysheva T.Yu. The influence of lichens on the species composition micromycetes in the lichen pine forests. *Botanicheskiy zhurnal*. 1979. Vol. 64. No. 5. Pp. 705–710. (In Russ.)]

Толпышева Т.Ю. Влияние лишайников на заселение почв микроскопическими грибами // Микология и фитопатология. 1979б. Т. 13. № 3. С. 194–199. [Tolpysheva T.Yu. The influence of lichens on the soil colonization of the micromycetes. *Mikologiya i fitopatologiya*. 1979b. Vol. 13. No. 3. Pp. 194–199. (In Russ.)]

Толпышева Т.Ю. Влияние лишайников на численность почвенных микроскопических грибов лишайниковых сосняков // Ботанический журнал. 1979в. Т. 64. № 9. С. 1341–1344. [Tolpysheva T.Yu. The effect of lichens on the number of soil microscopic fungi of lichen pine forests. *Botanicheskiy zhurnal*. 1979a. Vol. 64. No. 8. Pp. 1341–1344 (In Russ.)]

Abramova L.I., Tolpysheva T.Yu., Zueva Yu.I. On the ecology of epigeous mosses growth and rhizoidal lichens with broad lobes on the Kandalaksha bay coast. *Moscow Univ. Biol. Sci. Bull*. 2002. No. 1. Pp. 45–52.

Burkin A.A., Tolpysheva T.Yu., Kononenko G.P. Safety of fungal secondary metabolites in herbarial lichen specimens. *Moscow Univ. Biol. Sci. Bull*. 2012. No. 3. Pp. 28–32.

Cole R.J. Cox R.H. Handbook of Toxic Fungal Metabolites. N.Y., 1981.

Etayo J., Rosato V.G. Observation on lichenicolous fungi described by Spegazzini. *Lichenologist*. 2008. Vol. 40. No. 3. Pp. 227–232.

Ettema C.H., Wardle D.A. Spatial soil ecology. *Trends in Ecology and Evolution*. 2002. Vol. 17. No. 4. P. 177–183.

Hamada N. The distribution pattern of the medullary depsidone salazinic acid in the thallus of *Ramalina siliquosa* (lichens). *Can. J. Bot*. 1982. Vol. 60. No. 4. Pp. 379–382.

Hawksworth D.L. The lichenicolous *Hyphomycetes*. *Bull. Brit. Mus*. (*Nat. Hist*.) *Bot. Ser*. 1979. Vol. 6. No. 3. Pp. 183–300.

Hyvärinen M., Koopmann R., Hormi O., Tuomi J. Phenols in reproductive and somatic structures of lichens: A case of optimal defence? *Oikos*. 2000. Vol. 47. Pp. 109–115.

Girlanda M., Isocrono D., Bianco C., Luppi-Mosca A.M. Two foliose lichens as microfungal ecological niches. *Mycologia*. 1997. Vol. 89. No. 4. Pp. 531–536.

Krivoshchekova O.E., Maximov O.B., Stepanenko L.S., Mishchenko N.P. Quinones of the lichen *Cetraria cucullata*. *Phytochemistry*. 1982. Vol. 21. No. 1. Pp. 193–196.

Kononenko G.P., Burkin A.A., Tolpysheva T.Yu. Enzyme immunoassay of the secondary metabolites of micromycetes as components of lichen substances. *Applied Biochem. and Microbiol*. 2012. Vol. 48. No. 1. Pp. 71–76.

Lawrey J.D. Trace element accumulation by plant species from a coal strip-mining area in Ohio. *Bull. Torrey Bot. Club*. 1977. Vol. 104. Pp. 368–375.

Li W.C., Zhou J., Guo S.Y., Guo L.D. Ebdophytic fungi associated with lichens in Baihue mountain of Beijing, China. *Fungal Diversity*. 2007. Vol. 25. Pp. 69–80.

Lounamaa K.J. Studies on the content of iron, manganese and zinc in macrolichens. *Ann. Bot. Fennici*. 1965. Vol. 2. Pp. 127–137.

Mirando M., Fahselt D. The effect of thallus age and drying procedure on extractable lichen substances. *Can. J. Bot*. 1978. Vol. 56. Pp. 1499–1504.

Nordic Lichen Flora. Vol. 3. *Cyanolichens*. Uddevalla 2007.

Nöske O., Lauchili A., Lange O.L., Vieweg G.H., Ziegler H. Konzentration und Lokalisieruing von Schwermetallen in Flechten der Erzschlackenhalden des Harzes. *Vortage aus dem Gesamtegebiet der Botanik*, *N.S.* [*Deutsch. Bot. Gez*.]. 1970. Bd. 4. S. 67–79.

Petrini O., Hake U., Dreyfuss M.M. An analysis of fungal communities isolated from fruticose lichens. *Mycologia*. 1990. Vol. 82. Pp. 444–451.

Rundel P.W. The ecological role of secondary lichens substences. *Biochem. Syst. and Ecol*. 1978. Vol. 6. Pp. 157–170.

Tolpysheva T.Yu. Micotoxins and usnic acid and their distribution in lichens belonging to the genera *Cetraria*, *Flavocetraria*, *Cladonia*. *Moscow Univ. Biol. Sci. Bull*. 2014. Vol. 69. No. 3. Pp. 125–129.

Turner W.B. Aldridge D.C. Fungal Metabolites II. London, 1983.

Zajkowski P., Grabarkiewicz-Szcesna J., Schmidt R. Toxicity of mycotoxins produced by four *Alternaria* species to *Artemia salina* larvae. *Mycotoxin Reserch*. 1991. Vol. 7. Pp. 11–18.

Suryanarayanen T. S., Thirunavukkarasu G.N., Hariharan G.N., Balaji P. Occurence of non-obligate microfungal inside lichen thalli. *Sydowia*. 2005. Vol. 57. Pp. 120–130.

Vitikainen O. *Nephromataceae*. *Nordic Lichen Flora*. 2007. Vol. 3. Pp. 91–95.

Weidenborner M. Encyclopedia of Food Mycotoxins. Berlin, 2001.

Статья поступила в редакцию 15.12.2019, принята к публикации 21.02.2020
The article was received on 15.12.2019, accepted for publication 21.02.2020

Сведения об авторе / About the author

Толпышева Татьяна Юрьевна – доктор биологических наук; ведущий научный сотрудник кафедры микологии и альгологии биологического факультета, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

Tatyana Yu. Tolpysheva – Dr. Biol. Hab.; leading researcher at the Department of Mycology and Algology of Biological Faculty, Lomonosov Moscow State University

E-mail: tolpysheva@mail.ru

Оригинальное исследование

DOI: 10.31862/2500-2961-2020-10-2-185-200

**И.В. Владимцева[1], И.В. Могилевская[1],
О.В. Колотова[1], В.Е. Древин[2]**

[1] Волгоградский государственный технический университет,
400005 г. Волгоград, Российская Федерация

[2] Волгоградский государственный аграрный университет,
400002 г. Волгоград, Российская Федерация

Магнитоуправляемые микроорганизмы для биологической очистки промышленных сточных вод

Микроорганизмы, иммобилизованные в магнитные носители, используются в биотехнологии для повышения эффективности и упрощения работы с микробными клетками. Целью данного исследования было получение магнитоуправляемых иммобилизованных форм экологически значимых микроорганизмов и изучение возможности их культивирования на искусственных питательных средах. В качестве объекта исследований использовали два бактериальных штамма рода *Bacillus*: *B. subtilis* ВГТУ05 и *B. species* ВГТУ06, перспективные для биологической очистки сточных вод промышленных производств. В работе провели иммобилизацию штаммов в магнитные альгинатные носители. Установлено, что иммобилизация бактериальных клеток не влияет на их жизнеспособность. Для проведения исследований был разработан экспериментальный прибор, создающий электромагнитное поле в бактериальной взвеси. Подобраны оптимальные параметры напряженности электромагнитного поля для выращивания штаммов в жидких питательных средах. Показано, что иммобилизованные в магнитные носители бактериальные штаммы-деструкторы дают прирост биомассы

© Владимцева И.В., Могилевская И.В., Колотова О.В., Древин В.Е., 2020
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International License
The content is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

на 24,3–25,0% при культивирования их в электромагнитном поле. Полученные результаты могут быть использованы для разработки эффективной технологии биологической очистки промышленных сточных вод.

Ключевые слова: иммобилизация бактериальных клеток, магнитные носители клеток, воздействие электромагнитного поля на микроорганизмы, локальная биологическая очистка сточных вод, бактериальные штаммы-деструкторы

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Магнитоуправляемые микроорганизмы для биологической очистки промышленных сточных вод / Владимцева И.В., Могилевская И.В., Колотова О.В., Древин В.Е. // Социально-экологические технологии. 2020. Т. 10. № 2. С. 185–200. DOI: 10.31862/2500-2961-2020-10-2-185-200

Original research

DOI: 10.31862/2500-2961-2020-10-2-185-200

I.V. Vladimtseva[1], I.V. Mogilevskaya[1], O.I. Kolotova[1], V.E. Drevin[2]

[1] Volgograd State Technical University, Volgograd, 400005, Russian Federation

[2] Volgograd State Agricultural University, Volgograd, 400002, Russian Federation

Magnetically controlled microorganisms for the biological industrial wastewater treatment

Microorganisms immobilized on magnetic carriers are used in biotechnology to increase efficiency and simplify work with microbial cells. The aim of this study was to obtain magnetically controlled immobilized forms of the environmentally significant microorganisms and to study the possibility of their cultivation with artificial nutrient media. Two bacterial strains, identified as the genus Bacillus, were used as the research object: *Bacillus subtilis* ВГТУ05 and *B. species* ВГТУ06, promising for biological industrial wastewater treatment. The work carried out the immobi-lization of strains in magnetic alginate carriers. Established the bacterial cells' immobilization did not affect their vitality. The optimal parameters of the electromagnetic field

strength for growing strains in liquid nutrient media were selected. Shown the bacterial destructive strains immobilized into magnetic carriers gave the biomass increase of 24.3–25.0% during the cultivation in the electromagnetic field. The results could be used to develop the effective technology for local biological industrial wastewater treatment.

Key words: Immobilization of bacterial cells, magnetic carriers of cells, the electromagnetic field effect on microorganisms, local biological wastewater treatment, bacterial destructing strains

FOR CITATION: Vladimtseva I.V., Mogilevskaya I.V., Kolotova O.I., Drevin V.E. Magnetically controlled microorganisms for the biological industrial wastewater treatment. *Environment and Human: Ecological Studies*. 2020. Vol. 10. № 2. Pp. 185–200. (In Russ.) DOI: 10.31862/2500-2961-2020-10-2-185-200

Введение

Развитие промышленности и связанное с этим резкое увеличение количества промышленных стоков остро обозначило проблему поиска новых возможностей интенсификации биологической очистки сточных вод.

Иммобилизация – это прикрепление биологических объектов, например, клеток или их метаболитов, к нерастворимым носителям различной природы [Ткачук, 1978; Скрябин, 1984; Гвоздяк, 1987; Иммобилизованные клетки микроорганизмов, 1994].

Бактериальные клетки, используемые в распространенных технологиях биологической очистки промышленных и бытовых сточных вод, являются иммобилизованной системой, т.к. находятся в прикрепленном состоянии на хлопьях активного ила в аэротенках или в биопленке на частицах загрузки биофильтров. Иммобилизованные на нерастворимых носителях микроорганизмы в различных по конструкции биореакторах, например, биофильтрах, используются уже более века. Однако только в последние десятилетия два направления – применение микроорганизмов-деструкторов и их иммобилизация на нерастворимых матрицах – произвели переворот в процессах биологической очистки сточных вод. Иммобилизованная на различных твердых носителях бактериальная микрофлора все шире применяется в научных исследованиях и промышленных технологиях для усовершенствования локальных методов биологической очистки сточных вод предприятий [Гвоздяк, 1985; Бухгалтер, 2003; Потапова, Владимцева, Колотова, 2005; Владимцева, Греков, Колотова, 2009; Кобызева, 2009; Герман, 2016].

Известно, что иммобилизованные клетки микроорганизмов имеют преимущества перед клетками суспензионной культуры:

– значительное упрощение разделения биологического объекта и среды по окончании процесса, что позволяет перейти от периодических технологий к более современным и производительным непрерывным схемам культивирования;
– в случае использования непрерывных процессов выращивания микроорганизмов появляется возможность более длительной эксплуатации микробных культур в иммобилизованном состоянии в отличие от однократного использования свободных клеток;
– увеличение эффективности превращения используемых при культивировании субстратов в конечные продукты в результате повышения концентрации биомассы в единице объема ферментера;
– снижение энергозатрат на процесс и упрощение процесса выделения и очистки целевых продуктов;
– повышение устойчивости клеток к действию различных неблагоприятных физико-химических факторов внешней среды, таких как температура, кислотность, концентрация токсических веществ [Скрябин, Кощеенко, 1984; Форстер, Вейз, 1990].

В литературе описано значительное количество способов иммобилизации живых клеток, однако наиболее перспективным является включение этих биообъектов в нерастворимые полимерные гранулы. Преимущества данного метода – простота применяемой методики, возможность создания желаемой формы иммобилизованного препарата (гранулы, волокна, пленки), сохранение микробных клеток в жизнеспособном состоянии, высокая каталитическая активность микроорганизмов, возможность реализации непрерывных и многостадийных процессов [Скрябин, Кощеенко, 1984; Burns, Kresitadze, Graves, 1985; Гвоздяк, 1987; Иммобилизованные клетки микроорганизмов, 1994].

Среди материалов, применяемых для иммобилизации живых микробных клеток, чаще всего используют альгинат, который является основным структурным полисахаридом бурых водорослей. Он состоит из связанных между собой остатков α-D-маннопиранозилуроната и α-L-гулопиранозилуроната. В присутствии двухвалентных катионов кальция этот полисахарид образует гель. Формирование геля происходит в мягких условиях, поэтому в нем можно иммобилизовать живые микробные клетки [Burns, Kresitadze, Graves, 1985].

Все большее внимание исследователей-экологов привлекают публикации, предлагающие использовать в локальной биологической очистке сточных вод микроорганизмы, иммобилизованные в магнитоуправляе-

мые носители [Потапова, 2006; Магнитные носители для иммобилизации, 2006; Герман, 2016]. Такие системы имеют преимущества перед обычными иммобилизованными формами бактериальных деструкторов загрязнений: простота управления объектами с помощью электромагнитного поля (ЭМП), быстрота отделения иммобилизованных клеток.

В случае применения магнитных носителей клеток встает задача исследовать воздействие ЭМП на используемый биологический объект. В научной литературе накоплен значительный материал о положительном влиянии этого энергетического поля на рост и накопление биомассы различных видов микроорганизмов. В частности, установлено, что под влиянием ЭМП изменяются некоторые свойства микробных клеток, например, химическая устойчивость, антибиотикорезистентность, термотолерантность, вирулентность. Воздействие ЭМП может изменить морфологические, культуральные, тинкториальные и биохимические свойства культур [Веркин, Бондаренко, Шеремет, 1976; Ткачук, 1978; Павлович, 1981; Гусев, Тамбиев, Кирикова, 1990; Билобров, Хиженков, 1993; Алавердян, Акопян, Чарян, 1996].

Цель и задачи исследования

Целью работы явилось получение и культивирование иммобилизованных в магнитные носители микроорганизмов, перспективных для очистки промышленных сточных вод.

Задачи:

– подобрать методику и осуществить иммобилизацию экологически значимых бактериальных культур, выделенных из сточных вод промышленных предприятий, в магнитные гранулы, проверить их жизнеспособность в иммобилизованной форме;
– определить оптимальные параметры ЭМП для интенсификации роста исследуемых микроорганизмов;
– изучить возможность культивирования в жидких питательных средах иммобилизованных форм микробных штаммов в ЭМП.

Материалы и методы

В качестве объекта исследований были выбраны две бактериальных культуры – штамм *Bacillus subtilis* ВГТУ05, изолированный из сточных вод кожевенного производства, и *B. species* ВГТУ06, выделенный из смыва с оборудования мясокомбината [Изоляция и исследование роста…, 2010]. Иммобилизацию микроорганизмов осуществляли методом включения в структуру гранулированного полимерного носителя

из альгината кальция с внесением в них частиц оксида железа, придающих гелевым гранулам свойство магнитоуправляемости.

Включение бактериальных клеток в полиакриламидные магнитные гранулы осуществляли в стерильных условиях следующим образом: сомономеры геля – 1,5 г акриламида и 0,5 г N,N^1-метиленбисакриламида растворяли в 7 мл физиологического раствора (0,89% NaCl), добавляли 0,3 г персульфата аммония и 1,5 г магнитного порошка. Раствор дегазировали в вакуумном шкафу в течение 10 мин. Отдельно готовили взвесь микроорганизмов с концентрацией в объеме 3 мл. В стерильный сосуд для полимеризации (цилиндр) наливали 150 мл органической фазы, например, растительного масла, вносили эмульгатор СПЭН-85 до 0,5% концентрации. При постоянном перемешивании путем барботажа азотом под давлением 0,2–2 атм по трубке диаметром 0,8–1,5 мм в сосуд вливали предварительно соединенные растворы ингредиентов полимеризации. После образования равномерной эмульсии «вода в масле» в реакционную смесь вносили 0,2 мл катализатора N,N,N^1,N^1-тетраметилэтилендиамина. После окончания полимеризации (10–15 мин), которое визуально определяли по помутнению эмульсии, в сосуд, не прекращая перемешивание, добавляли 50 мл 0,1% раствора Твин-20 для предотвращения агрегации гранул. Перемешивание продолжали еще 5 мин, микрогранулы отделяли от смеси, прикладывая к стенкам сосуда магнит, и тщательно промывали стерильным физиологическим раствором. Размер получаемых микрогранул: 83,7 ± 6,7 мкм.

Иммобилизацию культур в альгинатный магнитный носитель проводили в асептических условиях следующим образом: 0,08 г альгината натрия и 0,1 г оксида железа ресуспендировали в 1,9 мл фосфатного буферного раствора pH 7,2. Реагенты перемешивали на магнитной мешалке в течение 15 мин. Полученную взвесь стерилизовали кипячением в течение 20 мин. После охлаждения добавляли 0,1 мл взвеси культур с концентрацией 10^9 микробных клеток в 1 мл (кл./мл). После перемешивания получали альгинатные гранулы путем продавливания жидкости в 0,2 М раствор хлорида кальция через шприц объемом 1 мл с тонкой иглой. Осевшие на дно магнитные гранулы оставляли в растворе на 30 мин, после чего их тщательно отмывали на магнитной мешалке стерильным физиологическим раствором. Декантацию проводили, удерживая магнитные гранулы на дне пробирки с помощью постоянного магнита.

С целью изучения возможности культивирования микроорганизмов в иммобилизованном состоянии к альгинатным магнитным гранулам, содержащим микробные клетки, вносили 5 мл стерильной жидкой

питательной среды (производства ООО «Биокомпасс», г. Углич). Среду готовили на дистиллированной воде и стерилизовали автоклавированием при 1 атм в течение 30–60 мин. Посевы инкубировали в течение 24 ч при 37 °С.

Изучение воздействия ЭМП различной напряженности на микроорганизмы проводили, используя экспериментальную установку, создающую соответствующее энергетическое поле в бактериальной взвеси. Принципиальная блок-схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Разработанный прибор обеспечивает регулируемую напряженность электромагнитного поля внутри соленоида с внутренним диаметром 15 мм, в который помещается пробирка с бульонной культурой изучаемых микроорганизмов.

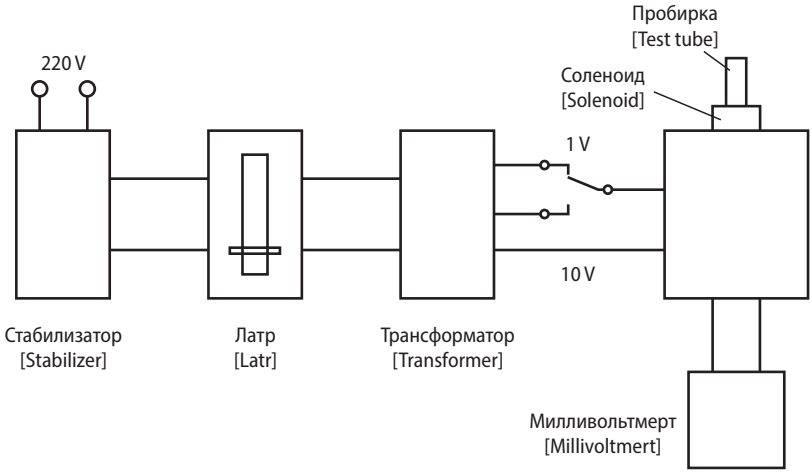


Рис.1. Блок-схема экспериментальной установки для изучения влияния ЭМП на микроорганизмы

Fig. 1. Block diagram of an experimental setup for studying the effect of electromagnetic fields on microorganisms

Концентрацию биомассы определяли оптическим методом на фотоколориметре КФК-2-УХЛ-4.2 (ПО «ЗОМЗ», Россия) при длине волны 750 нм в кюветах с длиной оптического пути 5,065 мм. Для перевода условных единиц оптической плотности в единицы концентрации биомассы строили калибровочные графики для обеих микробиологических моделей. Приводимые результаты исследований являлись средними из трех параллельных измерений.

Результаты и их обсуждение

Для магнитного манипулирования микроорганизмами необходима разработка технологии иммобилизации живых бактериальных клеток в магнитные носители. В нашей работе был проведен анализ возможности применения для этих целей трех способов иммобилизации: включения бактериальных клеток в структуру полимерных сферических гранул, метода адсорбции на поверхность носителя и ковалентного метода прикрепления клеток с использованием химических реагентов. В качестве полимерных носителей были испытаны микрогранулированные гели на основе полиакриламида и альгината натрия.

Условия эмульсионной полимеризации при получении гранулированного полиакриламидного носителя отрицательно влияли на жизнеспособность живых микроорганизмов. Согласно литературным данным [Старостина, Луста, Фихте, 1985] некоторые ингредиенты этого носителя, в частности, акриламид, оказывают токсическое действие на живые бактериальные клетки. В результате проведенных экспериментов было установлено, что наиболее щадящие условия полимеризации полиакриламидного геля создаются при использовании в качестве органической фазы растительного масла. Однако методика приготовления полиакриламидных микрогранул, особенно в асептических условиях, является довольно трудоемкой, в связи с чем она, на наш взгляд, не перспективна для технологического использования.

Наиболее приемлемым для наших целей оказался способ включения микроорганизмов в магнитные альгинатные микрогранулы. Данный носитель образуется в более щадящих условиях и не требует диспергирования в гидрофобной фазе, поэтому перспективен для иммобилизации живых бактериальных клеток. Введение магнитного материала (оксида железа) в качестве компонента носителя придает иммобилизованной системе магнитоуправляемость, что значительно облегчает работу с ней. Методика проста, отличается быстротой выполнения и обеспечивает практически полное включение желаемого количества бактерий в альгинатный носитель.

В экспериментах были получены иммобилизованные формы бактериальных штаммов *Bacillus subtilis* ВГТУ05 и *B. species* ВГТУ06 на основе магнитных альгинатных носителей. Иммобилизованные формы этих микроорганизмов представляли собой шаровидные гранулы коричневого цвета диаметром 2–4 мм.

Для изучения жизнеспособности иммобилизованных форм бактерий гранулы помещали в стерильные жидкие питательные среды

и культивировали в течение суток при 37 °С. В качестве контроля использовали магнитные альгинатные гранулы, приготовленные без добавления бактериальных клеток. По истечении указанного времени в пробирках наблюдали рост биомассы, выражающийся в помутнении питательной среды. В табл. 1 представлены результаты изучения урожайности биомассы культур, иммобилизованных в магнитные гранулы.

Таблица 1

Урожайность биомассы иммобилизованных микроорганизмов в жидкой питательной среде [Productivity of biomass of immobilized microorganisms in a liquid nutrient medium]

Наименование штамма [The name of the strain]	Оптическая плотность, усл. ед. [Optical density, conv. units]	Концентрация биомассы, $\times 10^8$ кл./мл [Biomass concentration, $\times 10^8$ cells/ml]
Bacillus subtilis ВГТУ05 Контроль	0,137 ± 0,01 0,000	7,0 0,0
B. species ВГТУ06 Контроль	0,142 ± 0,02 0,000	7,5 0,0

Данные, представленные в табл. 1, свидетельствуют, что оба штамма, иммобилизованные в магнитные гранулы, остались в жизнеспособном состоянии, росли и размножались в жидкой питательной среде. Контрольные гранулы, не содержащие бактериальную культуру, были стерильны.

Для реализации преимуществ использования иммобилизованных в магнитные гранулы клеток необходимо провести эксперименты по исследованию степени воздействия ЭМП на взятые в эксперимент бактериальные штаммы.

Микроорганизмы обладают различной чувствительностью к ЭМП, получаемый биологический эффект определяется особенностями каждого биологического объекта. В связи с этим универсальных параметров напряженности ЭМП, применимых к бактериальным клеткам, не существует.

Изучение влияния ЭМП на выбранные микробиологические модели проводили, помещая в экспериментальный прибор пробирки с жидкими питательными средами, засеянными исследуемыми бактериальными культурами. В качестве контроля использовали культивирование тех же штаммов в отсутствие ЭМП. Результаты эксперимента по исследованию воздействия ЭМП на штамм *Bacillus subtilis* ВГТУ05, перспективный для очистки сточных вод кожевенного производства, представлен на рис. 2.

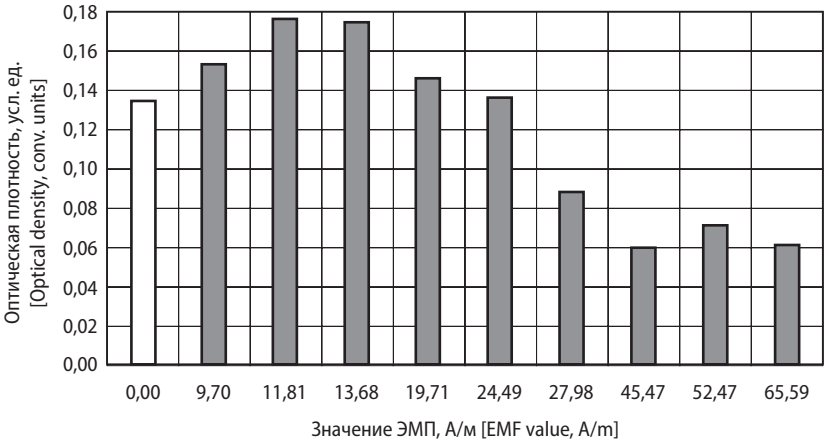


Рис. 2. Воздействие ЭМП на штамм *Bacillus subtilis* ВГТУ05.
В качестве контроля использовали культивирование тех же штаммов в отсутствие ЭМП

Fig. 2. The effect of EMF on the strain *Bacillus species* ВГТУ05.
Cultivation of the same strains in the absence of EMF was used as control

Полученные результаты свидетельствуют, что воздействие на культуру *Bacillus subtilis* ВГТУ05 ЭМП напряженностью 11,805 А/м было наиболее оптимальным, поскольку привело к увеличению урожайности этого штамма на 23,5% по сравнению с контролем.

На рис. 3 приведены результаты изучения влияния ЭМП различной напряженности на бактериальный штамм *B. species* ВГТУ06, перспективный для очистки сточных вод мясоперерабатывающего производства.

Полученные экспериментальные результаты позволяют сделать вывод, что для культуры *B. species* ВГТУ06 наиболее оптимальным значением напряженности ЭМП является 13,675 А/м. В этих условиях урожайность исследуемого штамма увеличивается на 22,5% по сравнению с контрольным образцом.

Следующим этапом работы было культивирование иммобилизованных бактериальных штаммов в ЭМП оптимальной напряженности. В качестве контроля применяли интактные (неиммобилизованные) микроорганизмы, выращиваемые в той же питательной среде. В табл. 2 приведены результаты экспериментов по исследованию урожайности иммобилизованных культур в ЭМП.

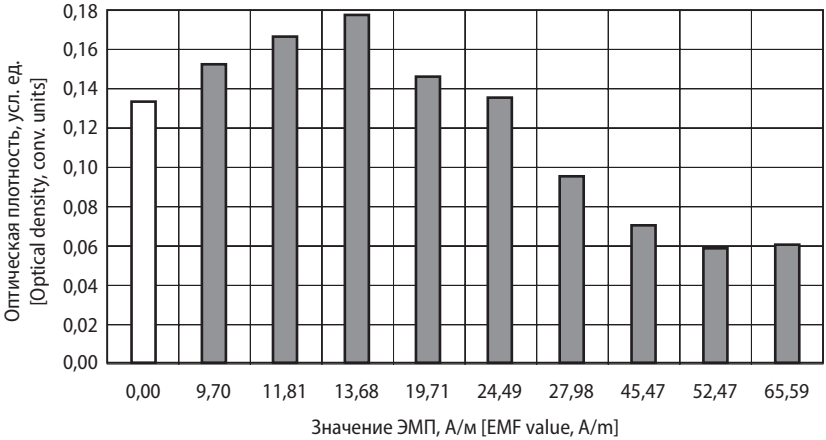


Рис. 3. Воздействие ЭМП на штамм *Bacillus species* ВГТУ06.
В качестве контроля использовали культивирование тех же штаммов в отсутствие ЭМП

Fig. 3. The effect of EMF on the strain *Bacillus species* ВГТУ06.
Cultivation of the same strains in the absence of EMF was used as control

Таблица 2

Результаты культивирования в ЭМП иммобилизованных бактериальных культур [The results of cultivation in EMF immobilized bacterial cultures]

Наименование штамма [The name of the strain]	Оптическая плотность, усл. ед. [Optical density, conv. units]	Концентрация биомассы, $\times 10^8$ кл./мл [Biomass concentration, $\times 10^8$ cells/ml]	Концентрация биомассы (контроль), $\times 10^8$ кл./мл [Biomass concentration (control), $\times 10^8$ cells/ml]	Прирост биомассы, % [The growth of biomass, %]
Bacillus subtilis ВГТУ05	0,175 ± 0,04	9,2	6,9	24,3
B. species ВГТУ06	0,176 ± 0,05	9,5	7,1	25,0

Данные, представленные в табл. 2, свидетельствуют, что при культивировании обоих иммобилизованных бактериальных штаммов произошло увеличение урожайности у штамма *Bacillus subtilis*

ВГТУ05 – на 24,3%, у культуры *Bacillus species* ВГТУ06 – на 25%. Прирост биомассы у обеих культур, по-видимому, связан со стимулирующим воздействием ЭМП.

Полученные в работе экспериментальные данные могут быть использованы для разработки эффективного метода локальной биологической очистки сточных вод с применением иммобилизованных магниточувствительных форм микроорганизмов-деструкторов в условиях оптимальной напряженности ЭМП.

Выводы

1. Получены иммобилизованные в магнитные альгинатныегранулы бактериальные клетки штаммов *B. subtilis* ВГТУ05 и *B. species* ВГТУ06, перспективные для использования в локальных сооружениях биологической очистки сточных вод.

2. Подобраны оптимальные параметры напряженности электромагнитного поля, интенсифицирующие рост микроорганизмов-деструкторов. Для культуры *B. subtilis* ВГТУ05 наиболее оптимальным значением напряженности электромагнитного поля являлось 11,805 А/м, а для штамма *B. species* ВГТУ06 – 13,675 А/м.

3. Показано, что иммобилизованные бактериальные штаммы *B. subtilis* ВГТУ05 и *B. species* ВГТУ06 дают прирост биомассы на 24,3 и 25,0% соответственно при культивировании их в ЭМП оптимальной напряженности.

Библиографический список / References

Алавердян Ж.Р., Акопян Л.Г., Чарян Л.М. Влияние магнитных полей на фазы роста и кислотообразующую способность молочнокислых бактерий // Микробиология. 1996. Т. 65. № 2. С. 241–244. [Alaverdyan Z.H., Akopyan L.G., Charyan L.M. The effect of magnetic fields on the growth phases and acid-forming ability of lactic acid bacteria. *Mikrobiologiya*. 1996. Vol. 65. No. 2. Pp. 241–244. (In Russ.)]

Билоборов В.М., Хиженков П.К. Об информационном и энергетическом влиянии электромагнитного излучения на бактериальные клетки // Электронная обработка материалов. 1993. № 2. С. 63–67. [Biloborov V.M., Khizhenkov P.K. *Elektronnaya obrabotka materialov*. 1993. No. 2. Pp. 63–67. (In Russ.)]

Бухгалтер Б.Л. Очистка сточных вод от нефтепродуктов с помощью иммобилизированных микроорганизмов: Дис. ... канд. техн. наук. М., 2003. [Bukhgalter B.L. Ochistka stochnykh vod ot nefteproduktov s pomoshhyu immobilizirovannykh mikroorganizmov [Wastewater treatment from petroleum products using immobilized microorganisms]. PhD Diss. Moscow, 2003.]

Веркин В.И., Бондаренко С.И., Шеремет В.И. Влияние слабого магнитного поля на некоторые виды бактерий // Микробиология. 1976. Т. 45. № 6.

С. 1067–1070. [Verkin V.I., Bondarenko S.I., Sheremet V.I. The influence of a weak magnetic field on some types of bacteria. *Mikrobiologiya*. 1976. Vol. 45. No. 6. Pp. 1067–1070. (In Russ.)]

Владимцева И.В. Научно-методические аспекты получения и использования магнитоуправляемых микробиологических систем: Дис. … д-ра биол. наук. Волгоград, 2002. [Vladimtseva I.V. Nauchno-metodicheskie aspekty polucheniya i ispolzovaniya magnitoupravlyaemykh mikrobiologicheskikh system [Scientific and methodological aspects of obtaining and using magnetically controlled microbiological systems]. Dr. Hab. Diss. Volgograd, 2002.]

Владимцева И.В., Греков Л.И., Колотова О.В. Применение магнитных носителей биологических объектов в биотехнологии // Высокие технологии – стратегия XXI века: Материалы международной конференции, Москва, ЦВК «Экспоцентр», 21–24 апр. 2009 г. М., 2009. С. 638–639. [Vladimtseva I.V., Grekov L.I., Kolotova O.V. The use of magnetic carriers of biological objects in biotechnology. *Vysokie tekhnologii – strategiya XXI veka*. Moscow, 2009. Pp. 638– 639. (In Russ.)]

Гвоздяк П.И. Иммобилизованные клетки в биотехнологии. Пущино, 1987. С. 56–61. [Gvozdyak P.I. Immobilizovannye kletki v biotekhnologii [Immobilized cells in biotechnology]. Pushhino, 1987.]

Гвоздяк П.И., Дмитренко Г.Н., Куликов Н.И. Очистка сточных вод прикрепленными микроорганизмами // Химия и технология воды. 1985. Т. 7. № 1. С. 64–68. [Gvozdyak P.I., Dmitrenko G.N., Kulikov N.I. Wastewater treatment by attached microorganisms. *Khimiya i tekhnologiya vody*. 1985. Vol. 7. No. 1. Pp. 64–68. (In Russ.)]

Герман Н.В. Получение и применение бактериального биопрепарата для очистки сточных вод кожевенного производства: Дис. … канд. биол. наук. Волгоград, 2016. [German N.V. Poluchenie i primenenie bakterial'nogo biopreparata dlya ochistki stochnykh vod kozhevennogo proizvodstva [Obtaining and using a bacterial biological product for wastewater treatment of leather production]. PhD Diss. Volgograd, 2016.]

Гусев М.В., Тамбиев А.Х., Кирикова Н.Н. Влияние электромагнитного излучения миллиметрового диапазона низкой интенсивности на рост цианобактерий // Микробиология. 1990. Т. 59. Вып. 2. С. 359–360. [Gusev M.V., Tambiev A.Kh., Kirikova N.N. The effect of low-intensity millimeter-wave electromagnetic radiation on the growth of cyanobacteria. *Mikrobiologiya*. 1990. Vol. 59. No. 2. Pp. 359–360. (In Russ.)]

Егоров Н.С., Самуилов В.Д. Биотехнология: Учеб. пособие для вузов в 8 кн. Кн. 7: Иммобилизованные ферменты / Под ред. Н.С. Егорова. М., 1987. [Egorov N.S., Samuilov V.D. Biotekhnologiya [Biotechnology]. Vol. 7: Immobilized enzymes. N.S. Egorov (ed.). Moscow, 1987.]

Изоляция и исследование роста аборигенных штаммов микроорганизмов, осуществляющих деструкцию загрязнений окружающей среды / Владимцева И.В., Колотова О.В., Соколова И.В. и др. // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. 2010. № 9. С. 16–20. [Vladimtseva I.V., Kolotova O.V., Sokolova I.V. et al. Isolation and growth study of indigenous strains of microorganisms involved in the destruction of environmental pollution. *Vodoochistka*. *Vodopodgotovka*. *Vodosnabzhenie*. 2010. No. 9. Pp. 16–20. (In Russ.)]

Иммобилизованные клетки микроорганизмов / Синицин А.П., Райнина Е.И., Лозинский В.И. и др. М., 1994. [Sinitsin A.P., Rajnina E.I., Lozinskij V.I. et al. Immobilizovannye kletki mikroorganizmov [Immobilized microorganism cells]. Moscow, 1994.]

Магнитные носители для иммобилизации микроорганизмов активного ила: поиск оптимальных условий иммобилизации / Потапова Л.В., Владимцева И.В., Колотова О.В. и др. // Водоочистка. 2006. № 6. С. 11–13. [Potapova L.V., Vladimtseva I.V., Kolotova O.V. et al. Magnetic carriers for immobilization of microorganisms of activated sludge: Search for optimal conditions for immobilization. *Vodoochistka*. 2006. No. 6. Pp. 11– 13. (In Russ.)]

Павлович С.А. Магниточувствительность и магнитовосприимчивость микроорганизмов. Мн., 1981. [Pavlovich S.A. Magnitochuvstvitelnost i magnitovospriimchivost mikroorganizmov [Magnetosensitivity and magnetic susceptibility of microorganisms]. Minsk, 1981.]

Потапова Л.В. Иммобилизация в магнитные носители микроорганизмов, осуществляющих очистку сточных вод: Дис. ... канд. биол. наук. Волгоград, 2006. [Potapova L.V. Immobilizatsiya v magnitnye nositeli mikroorganizmov, osushhestvlyayushhikh ochistku stochnykh vod [Immobilization of wastewater treatment microbes into magnetic carriers]. PhD Dis. Volgograd, 2006.]

Потапова Л.В., Владимцева И.В., Колотова О.В. Иммобилизация микроорганизмов активного ила на магнитные носители // Современные наукоемкие технологии. 2005. № 9. С. 69–71. [Potapova L.V., Vladimtseva I.V., Kolotova O.V. Immobilization of microorganisms of activated sludge on magnetic carriers. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*. 2005. No. 9. Pp. 69–71. (In Russ.)]

Потапова Л.В., Владимцева И.В., Колотова О.В. Подбор оптимальных условий иммобилизации микроорганизмов активного ила на магнитные носители // Биология, медицина, ветеринария и фармацевтика: Сб. научных трудов. Одесса, 2005. С. 17–18. [Potapova L.V., Vladimtseva I.V., Kolotova O.V. Selection of optimal conditions for the immobilization of microorganisms of activated sludge on magnetic carriers. *Biologiya*, *meditsina*, *veterinariya i farmatsevtika*. Odessa, 2005. Pp. 17–18. (In Russ.)]

Разработка технологии очистки сточной воды с использованием иммобилизованной микрофлоры / Кобызева Н.В., Гатауллин А.Г., Силищев Н.Н., Логинов О.Н // Вестник Оренбургского государственного университета. 2009. № 1. С. 104–107. [Kobyzeva N.V., Gataullin A.G., Silishhev N.N., Loginov O.N. Development of wastewater treatment technology using immobilized microflora. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2009. No. 1. Pp. 104–107. (In Russ.)]

Скрябин Г.К., Кощеенко К.А. Иммобилизованные клетки микроорганизмов // Биотехнология. 1984. № 5. С. 70–77. [Skryabin G.K., Koshheenko K.A. Immobilized microorganism cells. *Biotekhnologiya*. 1984. No. 5. Pp. 70–77. (In Russ.)]

Способ получения желатиновых микроносителей для культивирования клеток: А.с. № 1486515 СССР: МКИ С12 N 5/00, 11/00 / Туркин С. И., Лукин Ю. В., Марквичева Е.А. и др.; Заявл. 06.10.87 г.; Опубл. 15.06.89 г. Бюлл. № 22. [Sposob polucheniya zhelatinovykh mikronositelej dlya kultivirovaniya kletok [A method of producing gelatin microcarriers for cell culture]: Copyright certificate for an invention No. 1486515 USSR: MKI S12 No. 5/00, 11/00.Turkin S.I., Lukin Yu.V., Markvicheva E.A. et al. Stated 06.10.1987; Publ. 15.06.1989. Bull. 22.]

Старостина Н.Г., Луста К.А., Фихте Б.А. Защитное действие антиоксидантов на *E. coli* при иммобилизации клеток в полиакриламидном геле // Микробиология. 1985. Вып. 54. № 5. С. 730–734. [Starostina N.G., Lusta K.A., Fikhte B.A. The protective effect of antioxidants on *E. coli* during cell immobilization

in polyacrylamide gel. *Mikrobiologiya*. 1985. Vol. 54. No. № 5. Pp. 730–734. (In Russ.)]

Ткачук Н.Г. Влияние электрического тока на рост и ферментативную активность микроорганизмов активного ила // Электронная обработка материалов. 1978. № 4. С. 78–79. [Tkachuk N.G. The influence of electric current on the growth and enzymatic activity of microorganisms of activated sludge. *Elektronnaya obrabotka materialov*. 1978. No. 4. Pp. 78–79. (In Russ.)]

Экологическая биотехнология / Под ред. К.Ф. Форстера, Д.А. Вейза; Пер. с англ. Л., 1990. [Ekologicheskaya biotekhnologiya [Environmental biotechnology]. C.F. Forster, D.A.J. Wase (ed.). Leningrad, 1990.]

Burns M.A., Kresitadze G.J., Graves D.J. Dried calcium alginate magnetite spheres: A new support for chromatographic separation and enzyme immobilization. *Biotechnol. and Bioeng*. 1985. Vol. 27. No. 2. Pp. 137–145.

Статья поступила в редакцию 20.03.2020, принята к публикации 30.04.2020
The article was received on 20.03.2020, accepted for publication 30.04.2020

Сведения об авторах/ About the authors

Владимцева Ирина Владимировна – доктор биологических наук, профессор; профессор кафедры промышленной экологии и безопасности жизнедеятельности, Волгоградский государственный технический университет

Irina V. Vladimtseva – Dr. Biol. Hab.; Professor at the Department of Industrial Ecology and Life Safety, Volgograd State Technical University

E-mail: alexvlad32@yandex.ru

Могилевская Ирина Владимировна – кандидат биологических наук; доцент кафедры промышленной экологии и безопасности жизнедеятельности, Волгоградский государственный технический университет

Irina V. Mogilevskaya – PhD in Biology; Associate Professor at the Department of Industrial Ecology and Life Safety, Volgograd State Technical University

E-mail: mogi-irina@yandex.ru

Колотова Ольга Владимировна – кандидат технических наук, доцент; доцент кафедры промышленной экологии и безопасности жизнедеятельности, Волгоградский государственный технический университет

Olga V. Kolotova – PhD in Technical Science; Assistant professor at Department of Industrial Ecology and Life Safety, Volgograd State Technical University

E -mail: olgakolotova@mail.ru

Древин Валерий Евгеньевич – кандидат химических наук, доцент; заведующий кафедрой химии, пищевой и санитарной микробиологии, Волгоградский государственный аграрный университет

Valery E. Drevin – PhD in Chemistry; Head at the Department of Chemistry, Food and Sanitary Microbiology, Volgograd State Agricultural University

E-mail: himvgsxa@mail.ru

Заявленный вклад авторов

И.В. Владимцева – общее руководство исследованием, планирование экспериментов, проведение опытов по культивированию иммобилизованных клеток, анализ и обработка результатов, подготовка текста статьи.

И.В. Могилевская – проведение экспериментов по иммобилизации бактериальных клеток в полиакриламидные и альгинатные микрогранулы.

О.В. Колотова – проведение экспериментов по изучению влияния ЭМП на микроорганизмы.

В.Е. Древин – конструирование прибора для определения влияния ЭМП на микроорганизмы, оформление графического материала.

Contribution of the authors

I.V. Vladimtseva – general management of the research, planning experiments, conducting experiments on the cultivation of immobilized cells, analysis and processing of the results, preparation of the text of the article.

I.V. Mogilevskaya – conducting experiments on the immobilization of bacterial cells into polyacrylamide and alginate microgranules.

O.V Kolotova – conducting experiments to study the effect of electromagnetic fields on microorganisms.

V.E. Drevin – the design of the device to determine the effect of electromagnetic fields on microorganisms, the design of graphic material.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи
All authors have read and approved the final manuscript

Оригинальное исследование

DOI: 10.31862/2500-2961-2020-10-2-201-225

М.В. Шабанов, М.С. Маричев

**Санкт-Петербургский государственный аграрный университет,
196601 г. Пушкин, Санкт-Петербург, Российская Федерация**

Тяжелые металлы в почвах геохимически сопряженных ландшафтов Красноуральского промышленного узла

Представлены результаты исследования валового содержания тяжелых металлов в почвах в зоне действия медеплавильного комбината ОАО «Святогор», расположенном в Свердловской области. В ходе исследований производилась закладка разрезов на различном расстоянии и направлении от источника эмиссии. В отобранных почвенных образцах измерялась валовая концентрация Zn, Cd, Pb, Cu. По результатам анализа проводилось ранжирование с подсчетами: суммарного коэффициента загрязнения, латеральной и радиальной дифференциации тяжелых металлов, показателя техногенности. Для подтверждения путей поступления тяжелых металлов с аэропромышленными выбросами рассчитывалась максимально разовая приземная концентрация в атмосферном воздухе с подсчетом расстояния, на котором данная концентрация достигнет максимального значения. В ходе расчетов суммарного коэффициента загрязнения следует, что районы, находящиеся в непосредственной близости от источника эмиссии, имеют чрезвычайно опасную категорию загрязнения почвы. Также данные участки имеют долю техногенного вовлечения элемента более 90%. Полученные значения коэффициента радиальной дифференциации тяжелых металлов в меридиональном и широтном направлениях свидетельствует о наличии ряда физико-химических геохимических барьеров. Миграция тяжелых металлов между сопряженными системами подтверждается коэффициентами латеральной дифференциации. В ходе работы были выявлены основные источники поступления тяжелых металлов в почву, такие как аэропромышленные выбросы комбината и эоловый перенос с нарушенных земель. Среди выявленных закономерностей распространения

© Шабанов М.В., Маричев М.С., 2020
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International License
The content is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

тяжелых металлов основными являются наличие высокой степени сопряженности нарушенных земель с автономными естественными областями и периодическая смена направления и мощности аэротехногенных потоков комбината.

Ключевые слова: тяжелые металлы, техногенез, аэропромышленные выбросы, загрязнения почв, сопряженные ландшафты

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Шабанов М.В., Маричев М.С. Тяжелые металлы в почвах геохимически сопряженных ландшафтов Красноуральского промышленного узла // Социально-экологические технологии. 2020. Т. 10. № 2. С. 201–225. DOI: 10.31862/2500-2961-2020-10-2-201-225

Original research

DOI: 10.31862/2500-2961-2020-10-2-201-225

M.V. Shabanov, M.S. Marichev

Saint Petersburg State Agrarian University,
Pushkin, St. Petersburg, 196601, Russian Federation

Heavy metals in the soils of geochemically coupled landscapes of the Krasnouralsk Industrial Centre

The results of a study of the gross content of heavy metals in soils in the area of operation of the Svyatogor copper smelter located in the Sverdlovsk region are presented. In the course of the research, sections were laid at different distances and directions from the emission source. The gross concentration of Zn, Cd, Pb, and Cu was measured in the selected soil samples. According to the results of the analysis, a ranking was carried out with the calculations of the total pollution coefficient, lateral and radial differentiation of heavy metals, and the technogenicity index. In order to confirm the routes of the arrival of heavy metals with airport emissions, the maximum single surface concentration in atmospheric air was calculated with the calculation of the distance at which this concentration reaches its maximum value. In the calculation of the total pollution coefficient, it follows that areas located in the immediate vicinity of the emission source have an extremely dangerous category of soil pollution. Also, in these areas, the proportion of technogenic

involvement of the element is more than 90%. The obtained values of the coefficient of radial differentiation of heavy metals in the meridional and latitudinal directions, indicates the presence of a number of physical and chemical geochemical geochemical barriers. The migration of heavy metals between conjugated systems is confirmed by the lateral differentiation coefficients. In the course of the work, the main sources of heavy metals entering the soil were identified, such aero-industrial emissions of the plant and aeolian transfer from technogenic disturbed lands. Among the identified patterns of distribution of heavy metals, the main ones are the presence of a high degree of relations of disturbed lands with autonomous natural areas and periodic changes in the direction and power of aero-technogenic flows of the plant.

Key words: heavy metals, technogenesis, airport emissions, soil pollution, related landscapes

FOR CITATION: Shabanov M.V., Marichev M.S. Heavy metals in the soils of geochemically coupled landscapes of the Krasnouralsk Industrial Centre. *Environment and Human: Ecological Studies*. 2020. Vol. 10. № 2. Pp. 201–225. (In Russ.) DOI: 10.31862/2500-2961-2020-10-2-201-225

Введение

Во все среды, в том числе и почвы, могут проникать различные химические элементы. Формирование почв в ландшафте обусловлено сложными разнонаправленными потоками вещества. Наряду с вертикальной миграцией, большую роль играет латеральный (горизонтальный) транспорт вещества по поверхности почвы [Геннадиев, Касимов, 2004].

Предприятия цветной металлургии вносят огромный вклад в принос и вовлечение в геохимическую миграцию элементов, не типичных для областей, сопряженных с ними [Лянгузова, Гольдвирт, Фадеева, 2016; Barkan, Lyanguzova, 2018]. Большинство таких элементов являются потенциальными токсикантами, среди которых весомую долю составляют тяжелые металлы. Как в процессе обработки месторождений, так и при деятельности перерабатывающих комбинатов, формируются нарушенные техногенные ландшафты с высоким содержанием тяжелых металлов, концентрация которых в пределах одной функциональной ландшафтной зоны будет не одинакова. Данное распространение зависит не только от интенсивности поступления техногенных потоков, но и перераспределения поллютантов, их поведения в геохимических барьерах. Особенности формирования процессов поведения будут обуславливать радиальную и латеральную дифференциацию элементов и их соединений.

Так, в районе г. Красноуральск Свердловской области в результате активной деятельности медеплавильного комбината ОАО «Святогор» почвенный покров подвержен высокому техногенному воздействию. В окрестностях образуются почвенные геохимические аномалии тяжелых металлов с нетипично высокими концентрациями для данных областей. Как отмечал Ю.Г. Тютюнник, наблюдается тесная корреляция концентрации тяжелых металлов в атмосферном воздухе и поверхностном почвенном слое почвы [Тютюнник, 1997]. Выявление данных закономерностей свидетельствует о высокой степени влияния аэропромышленных выбросов на формирование прилегающих ландшафтов, что также отмечается рядом исследователей [Liu, Liu, 2018].

В связи с вышесказанным, целью данной работы является изучение валового содержания тяжелых металлов в почвах сопряженных ландшафтов в районе техногенной активности медеплавильного комбината. Для осуществления поставленной цели решались следующие задачи:

1) определить концентрацию тяжелых металлов в почвах района техногенеза;

2) выявить содержание тяжелых металлов в разных типах ландшафта;

3) проследить степень влияния сопряженных систем.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования является почвенный покров в окрестностях города Красноуральск. На различном расстоянии от действующего медеплавильного комбината ОАО «Святогор», на одинаковых формах рельефа, закладывались почвенные разрезы (рис. 1). Исследуемые почвы классифицированы как подзолистые и дерново-подзолистые тяжелосуглинистые, с различной степенью оподзоленности и мощностью гумусового горизонта, залегающие на делювии с щебнем местных пород [Классификация и диагностика почв России, 2004]. Рельеф территории сформирован холмисто-волнистой равниной с незначительными перепадами высот [Шабанов, Маричев, 2018].

Для отбора проб на определение содержания тяжелых металлов закладывались полноценные почвенные разрезы на различном расстоянии от источника эмиссии. Определение валового содержания тяжелых металлов (цинка, кадмия, свинца и меди) проводилось методом инверсионной вольтамперометрии по методике МУ 31-11/05, внесенной в Федеральный реестр методик измерений под номером ФР.1.31.2005.02119. Для извлечения валовых форм Zn, Cd, Pb, Cu воздушно-сухая навеска почвы заливалась 50-процентной азотной кислотой в соотношении 1 : 10

(почва : раствор), с дальнейшим кипячением и добавлением 37-процентного раствора пероксида водорода.

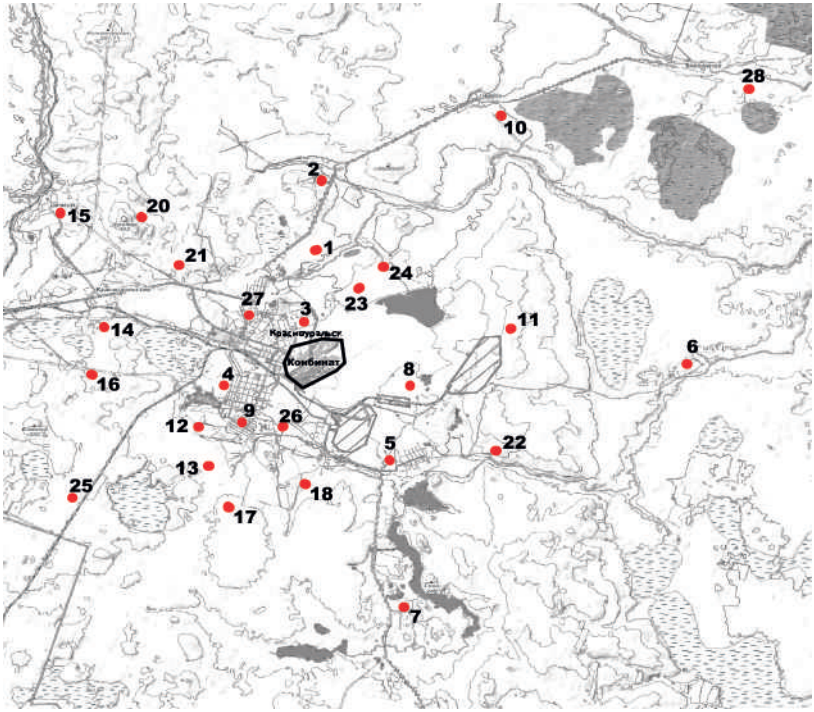


Рис 1. Точки отбора проб на территории исследуемого участка. Масштаб 1 : 20 000.

Fig. 1. Sampling points in the study area, the number of selection points. Scale 1 : 20 000.

Для прослеживания влияния техногенной нагрузки аэропромышленных выбросов комбината как основного источника техногенеза исследуемого района производились расчеты суммарного коэффициента загрязнения в поверхностном слое почвы 0–15 см, который концентрирует в себе компоненты воздушной среды приземного слоя.

Расчет коэффициента суммарного загрязнения (Z_c) производился по формуле:

$$Z_c = \left(\sum_{i-1}^{n} K_c \right) - (n-1), \quad (1)$$

где n – число, равное количеству химических элементов; $K_с$ – коэффициент концентрации i-го химического элемента, расчитываемый по формуле

$$K_с = C_i / C_{фон}, \quad (2)$$

где C_i – фактическое содержание элемента; $C_{фон}$ – геохимический фон.

За геохимический фон принимались средние значения валового содержания элементов в материнской породе исследуемой территории на различных участках исследования.

Для полной оценки влияния техногенной деятельности комбината, наличия аккумуляции и миграции тяжелых металлов в профиле почв проводился подсчет коэффициента радиальной (R) и латеральной (L) дифференциации тяжелых металлов [Гаврилова, Касимов, 1989] в меридиональном и широтном направлениях, рассчитываемые по формулам (3) и (4).

$$R = C_n / C_с, \quad (3)$$

где C_n – содержание элемента в горизонте n; $C_с$ – содержание элемента в материнской породе.

Значения R более 1 свидетельствуют о закреплении элемента генетическом горизонте и наличии барьеров, R менее 1 – о его подвижности (слабоконтрастные барьеры: R = 1,3–1,5; контрастные барьеры: R = 1,5–3,0; сильноконтрастные барьеры: $R > 3$).

$$L = C / C_{авт}, \quad (4)$$

где C – содержание тяжелых металлов в почве геохимически подчиненного ландшафта; $C_{авт}$ – содержание элемента в почве автономного ландшафта.

При выявлении доли техногенного элемента в почве от валового его содержания использовался показатель техногенности элемента (T_g; %), расчитываемый по формуле (5) [Baron, 2006]:

$$T_g = 100\,(R - 1) : R, \quad (5)$$

где R – коэффициент радиальной миграции (3).

Для выявления нагрузки и поступления тяжелых металлов с аэропромышленными выбросами комбината производились расчеты максимально разовой концентрации металлов по средним данным, указанным в исследованиях А.И. Бичукиной [Бичукина, 2008; Бичукина, Парфенова, Копенкина, 2008]. Общие объемы выбросов комбината ОАО «Святогор» составляют 57 282,125 т/год. Характеристика выбросов:

– температура выбросов колеблется от 15 до 380 °С;
– объем отходящих газов от 0,00138 до 61,11 м^3/с;
– высоты источников выбросов от 1,3 до 120 м;
– скорость газо-воздушной смеси от 0,00488 до 49,515 м/с [Бичукина, 2008].

Согласно вышеперечисленным параметрам, производился расчет[1] средних максимально разовой приземной концентрации ($C_М$) в атмосферном воздухе с поправками на 2019 г.

Расчет производился по формуле:

$$C_М = \frac{AMFmn\eta}{H^2 \sqrt[3]{V_i \Delta T}}, \quad (6)$$

где A – коэффициент, определяющий условия вертикального и горизонтального рассеивания вредных веществ в атмосферном воздухе; M – количество вредного вещества, выбрасываемого в атмосферу, г/с; F – безразмерный коэффициент, учитывающий скорость оседания вредных веществ в атмосфере; m и n – безразмерные коэффициенты, учитывающие условия выхода газовоздушной смеси из устья источника выброса; η – безразмерный коэффициент, учитывающий влияние рельефа местности; H – высота источника выброса, м; V – объемный расход газовоздушной смеси, м^3/с; ΔT – разность между температурой выбрасываемой газовоздушной смеси и температурой окружающего атмосферного воздуха, °С.

Расстояние (X_m) от источника выброса, на котором приземная концентрация загрязняющих веществ при неблагоприятных метеорологических условиях достигает максимального значения $C_М$, определяется по формуле:

$$X_m = \frac{5-F}{4} dH. \quad (7)$$

Безразмерный коэффициент d рассчитывается при условии $f < 100$ по формуле:

$$d = 7\sqrt{V_m}\left(1 + 0,28\sqrt[3]{f}\right). \quad (8)$$

Таким образом, в результате расчетов максимально разовая концентрация ($C_М$) для Zn – 0,0118 мг/м^3, в приземном слое, в расчете на 1 час составляет 42,48 мг/м^3. Концентрация ($C_М$) Cd – 0,00018 мг/м^3, в расчете

[1] Методы расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе. Утв. приказом Минприроды России от 6 июня 2017 г. № 273.

на 1 час – 0,0648 мг/м^3. Концентрация (C_M) Pb – 0,011 мг/м^3, в расчете на 1 час – 3,96 мг/м^3. Концентрация (C_M) Cu – 0,0076 мг/м^3, в расчете на 1 час – 2,16 мг/м^3.

Результаты и обсуждение

Расстояние от источника эмиссии до участка, где максимальная концентрация при учитываемой средней скорости ветра 1,9 м/с и нормальных условиях, определялась по формуле (2). Для исследуемых элементов при C_M расстояние будет 1951 м. В дальнейших расчетах изменения параметров концентрации от количества выбросов при той же скорости ветра 1,9 м/с данные изменяются согласно кривой (рис. 2). Произведенные расчеты проводились при условии средней постоянной скорости ветра 1,9 м/с, без учета циркуляции атмосферных потоков и изменения температурного режима. Таким образом, данная расчетная модель показывает наличие постоянного приноса тяжелых металлов с аэрогенными потоками. В связи с интенсивной связью приземного атмосферного воздуха с почвенным покровом происходит обмен из-за диффузионных сил и накопление поллютантов в почвенном покрове. Дальнейшая их миграция в почвенном профиле происходит из-за естественных геохимических процессов и миграцией с инфильтрационными водами.

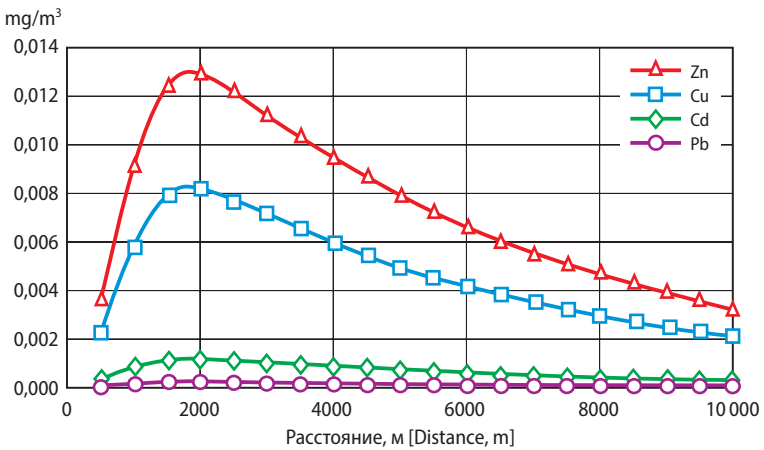


Рис. 2. Изменение максимально разовой приземной концентрации металлов (в газовоздушной смеси в пределах 1,5 м от поверхности почвы) с отдалением от источника эмиссии

Fig. 2. Change in the maximum single surface concentration of metals (in the gas-air mixture within 1.5 m from the soil surface) with distance from the emission source

В связи с изменением количества нагрузки и неоднородности распределения тяжелых металлов с отдалением от источника эмиссии производился учет их валового содержания в 0–15 см толщи исследуемых почв на различном расстоянии. На рис. 3 представлено содержание тяжелых металлов с сравнении с предельно допустимыми концентрациями (ПДК даны по Мукатанову [Мукатанов, 1999]).

Участки, имеющие наибольшую концентрация цинка, кадмия, свинца и меди, располагаются в районах в непосредственной близости от комбината (см. рис. 1). В местах отбора проб № 3, 5, 8, 9, 11, 23, 24, 26, 27 концентрация исследуемых металлов превышает ПДК по Мукатанову (см. рис. 3).

По исследованиям зарубежных ученых, кларк цинка в земной коре составляет 76 мг/кг [Гринвуд, Эрншо, 2008]. Отечественный ученый А.Х. Мукатанов установил предельно возможную концентрацию веществ в почве, делая упор на Уральский регион. По его мнению, для цинка ПДК равен 100 мг/кг [Мукатанов, 1999]. В исследуемых нами образцах на территории в радиусе 6–8 км от источника эмиссии концентрация цинка превышает ПДК по Мукатанову в 5 раз и более.

Для кадмия кларк в земной коре по Виноградову составляет 0,13 мг/кг. ПДК в почвах по Мукатанову 3,0 мг/кг [Там же]. В районе интенсивной нагрузки Красноуральского промузла, в местах отбора проб № 3, 11, 20, 24, превышение ПДК – в 1,5–2 раза (см. рис. 3).

Кларк свинца в земной коре по Гринвуду и Эрниго составляет 13,0 мг/кг [Гринвуд, Эрншо, 2008], ПДК в почвах 32,0 мг/кг [Мукатанов, 1999]. На участках, имеющих высокую степень техногенной нагрузки, концентрация свинца выше ПДК в 10–50 раз (см. рис. 3).

Кларк меди в земной коре 47,0 мг/кг [Гринвуд, Эрншо, 2008], ПДК 55,0 мг/кг [Мукатанов, 1999]. В районе исследования, в радиусе 6–8 км от источника выбросов (см. рис. 1), концентрация меди выше ПДК в 20–50 раз (см. рис. 3).

Все вышеописанные районы исследования с концентрациями тяжелых металлов, превышающими ПДК, относятся к участкам, приуроченным к нестабильному функционированию ландшафтных систем. Данные территории являются аллохтонными ландшафтными областями. За счет относительного понижения участков вблизи расположения комбината и его окраин в радиусе порядка 8 км происходит дополнительное подчинение указанных территорий с автохтонными ландшафтами, распределенными в отдаленных районах. Тем самым прослеживается латеральная дифференциация тяжелых металлов в областях, распределенных на границе данных структурных единиц ландшафтов, служащих буферной зоной на пути распространения поллютантов аэропромышленных выбросов.

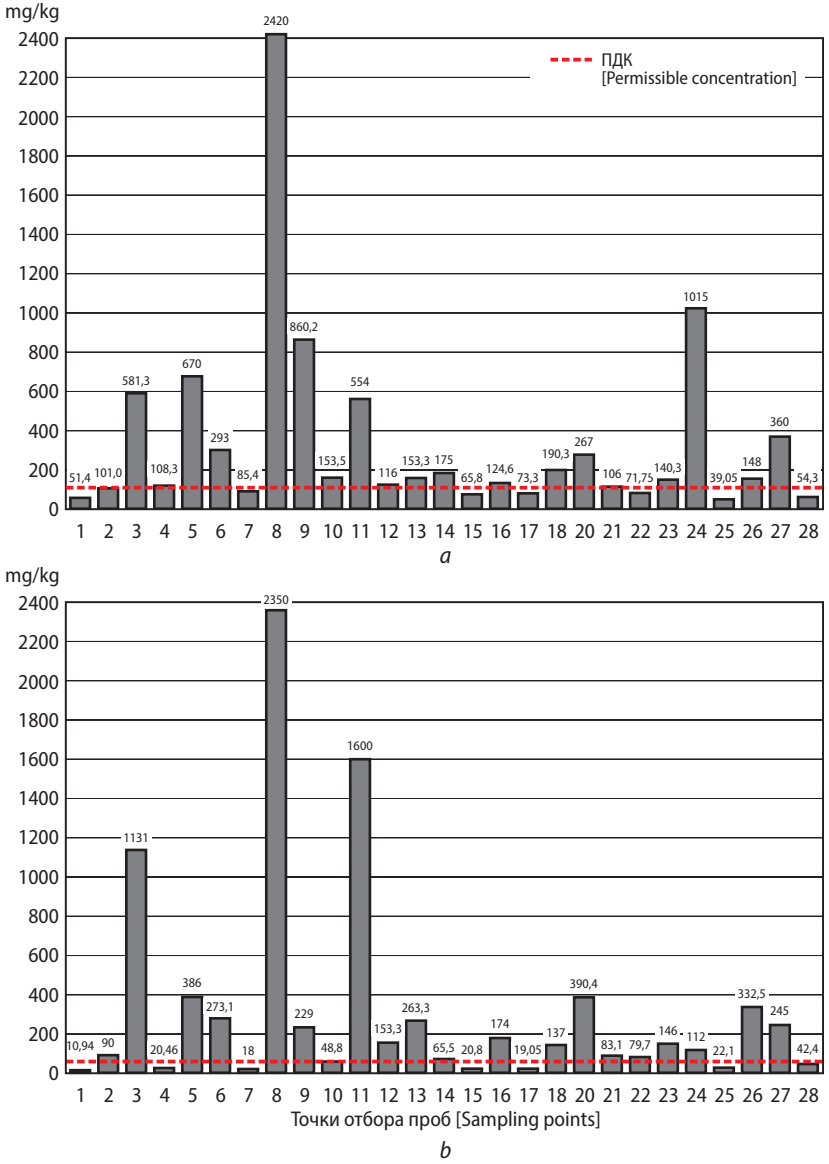
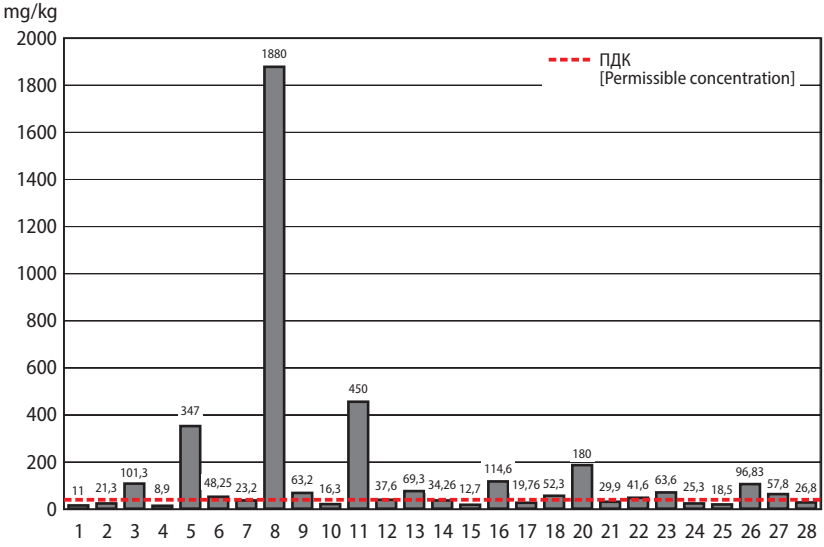


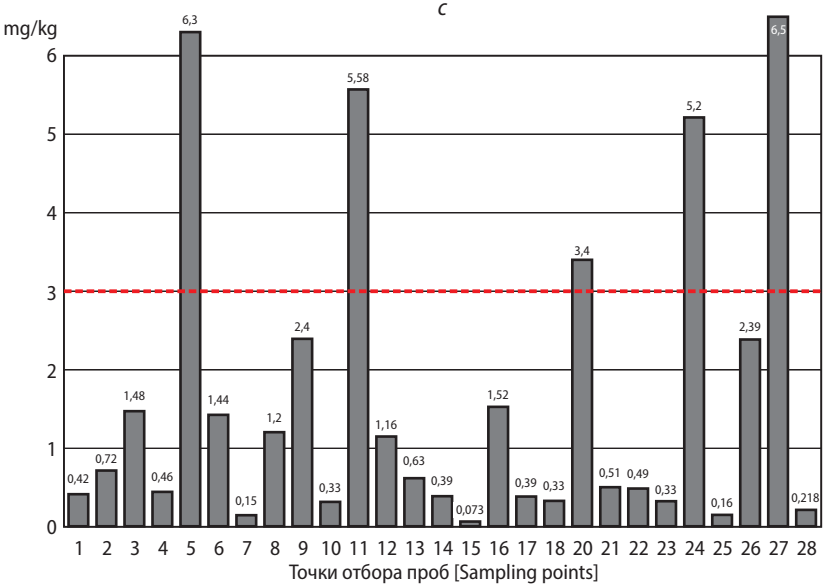
Рис. 3. Содержание тяжелых металлов в верхней минеральной (0–15 см) толще почв исследуемого района:

a – цинк; *b* – медь; *c* – свинец; *d* – кадмий.

ПДК по [Мукатанов, 1999]



c



d

Fig. 3. The content of heavy metals in the upper mineral 0–15 cm thick soils of the study area:

a – Zn; *b* – Cu; *c* – Pb; *d* – Cd.

Permissible concentration for [Mukatanov, 1999]

Автохтонные территории являются автономными за счет наибольшей стабилизации компонентов ландшафтного комплекса. Лесные провинции, функционирующие в полном объеме, обладают высокой способностью к самовосстановлению. Тем самым участки, расположенные на границе между данными комплексами, перераспределяют компоненты техногенных потоков рассеивания в подчиненные системы.

Для подтверждения вовлечения цинка, кадмия, свинца и меди в геохимический круговорот именно за счет аэрогенного поступления и перераспределения компонентов между ландшафтными комплексами, учитывалась доля техногенности элементов, т.е. процент каждого из исследуемых тяжелых металлов на участках отбора проб (табл. 1). Участки в местах отбора № 3, 5, 8, 9, 11, 20, 24, 26, 27 имеют долю техногенности более 90% (см. табл. 1). Данные районы, помимо прямого поступления поллютантов с аэропромышленными выбросами, имеют дополнительный поток тяжелых металлов с прилегающих ландшафтов, что описывалось выше. Общая картина распределения тяжелых металлов по доле техногенности имеет следующий вид: $Cd_{92,7} > Zn_{88,8} > Cu_{88,6} > Pb_{77,1}$. В данном ряду распределения большая доля вовлечения кадмия определяется за счет своего наименьшего содержания в материнских породах исследуемого района с относительно высоким содержанием в поверхностном слое почвы. В свою очередь, высокие фоновые значения свинца уменьшают долю его техногенного вовлечения.

Общие закономерности распределения и наличия тяжелых металлов в поверхностном слое почвы обуславливаются наличием такого мощного геохимического барьера, как гумусовый. Значительная часть среди различных форм меди и свинца входит в состав комплексных соединений с органическим веществом [Фоновое содержание и состав соединений, 2015]. Значительное накопление кадмия в гумусово-элювиальных горизонтах происходит за счет вымывания обменных катионов кальция и магния [Шабанов, Маричев, 2018] и вследствие меньшей конкурентной сорбцией с данными ионами [Путилина, 2009].

При подсчете суммарного коэффициента загрязнения (Z_c) (см. рис. 4), почвы районов отбора № 7, 15, 25, 28 имеют допустимую категорию загрязнения. Чрезвычайно опасную категорию загрязнения имеют почвы районов отбора № 3, 5, 8, 9, 11, 20, 26, 27. Данные районы наиболее подвержены техногенной деятельности. Происходит поступление поллютантов не только с аэропромышленными выбросами, но и с приносом с техногенно-поверхностных образований, складируемых в окрестностях комбината и Сорьинского хвостохранилища. Остальные участки относятся к опасной категории.

Таблица 1

Доля техногенности элементов в почвах, %
[The percentage of technogenic elements in soils, %]

Точки отбора проб [Sampling points]	Zn	Cd	Pb	Cu
1	70,21	92,62	21,82	43,33
2	84,84	95,69	59,62	93,11
3	97,37	97,91	91,51	99,45
4	85,86	93,26	99,16	69,70
5	97,71	99,51	97,52	98,39
6	94,77	97,85	82,18	97,73
7	82,07	79,33	62,93	65,56
8	99,37	97,42	99,54	99,74
9	98,22	98,71	86,39	97,29
10	90,03	90,61	47,24	87,30
11	97,24	99,44	98,09	99,61
12	86,80	97,33	77,13	95,96
13	90,01	95,08	87,59	97,65
14	91,25	92,05	74,90	90,53
15	76,73	57,53	32,28	70,19
16	87,71	97,96	92,50	96,44
17	79,11	92,05	56,48	67,45
18	91,95	90,61	83,56	95,47
20	94,27	99,09	95,22	98,41
21	85,56	93,92	71,24	92,54
22	84,61	94,83	82,61	93,71
23	89,09	90,61	86,48	95,75
24	97,21	96,90	95,74	94,96
25	60,79	80,63	53,51	71,95
26	89,66	98,70	91,12	98,14
27	95,75	99,57	85,12	97,47
28	71,80	85,78	67,91	85,38

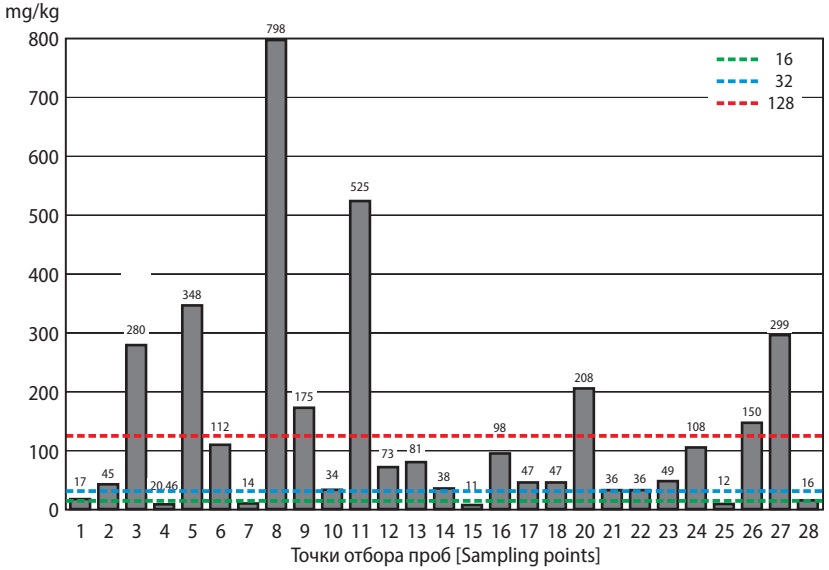


Рис. 4. Коэффициент суммарного загрязнения.
Менее 16 – низкий уровень, 16–32 – средний, 32–128 – высокий, более 128 – очень высокий

Fig. 4. The coefficient of total pollution.
Up to 16 – low, 16–32 – medium, 32–128 – high, more 128 – very high

Для более детального анализа и прослеживания путей распространения и поведения исследуемых тяжелых металлов в почве рассчитывался коэффициент радиальной дифференциации, отражающий наличие закрепления или миграции тяжелых металлов и присутствие геохимических барьеров.

В меридиональном направлении в северной и южной сторонах от источника эмиссии (рис. 5) коэффициент радиальной дифференциации тяжелых металлов больше единицы, что свидетельствует о накоплении их в профиле почв. Особо высокие значения коэффициента отмечены в южном направлении в гумусово-иллювиальных горизонтах. За счет высокой функциональной активности гумусовых кислот происходит образование комплексных гетерополярных соединений с металлами. Далее вниз по профилю отмечается уменьшение коэффициента, что свидетельствует о миграции и наличии иллювиальных процессов в профиле. В северном направлении с отдалением от комбината коэффициент миграции уменьшается в гумусово-элювиальных горизонтах (см. рис. 5).

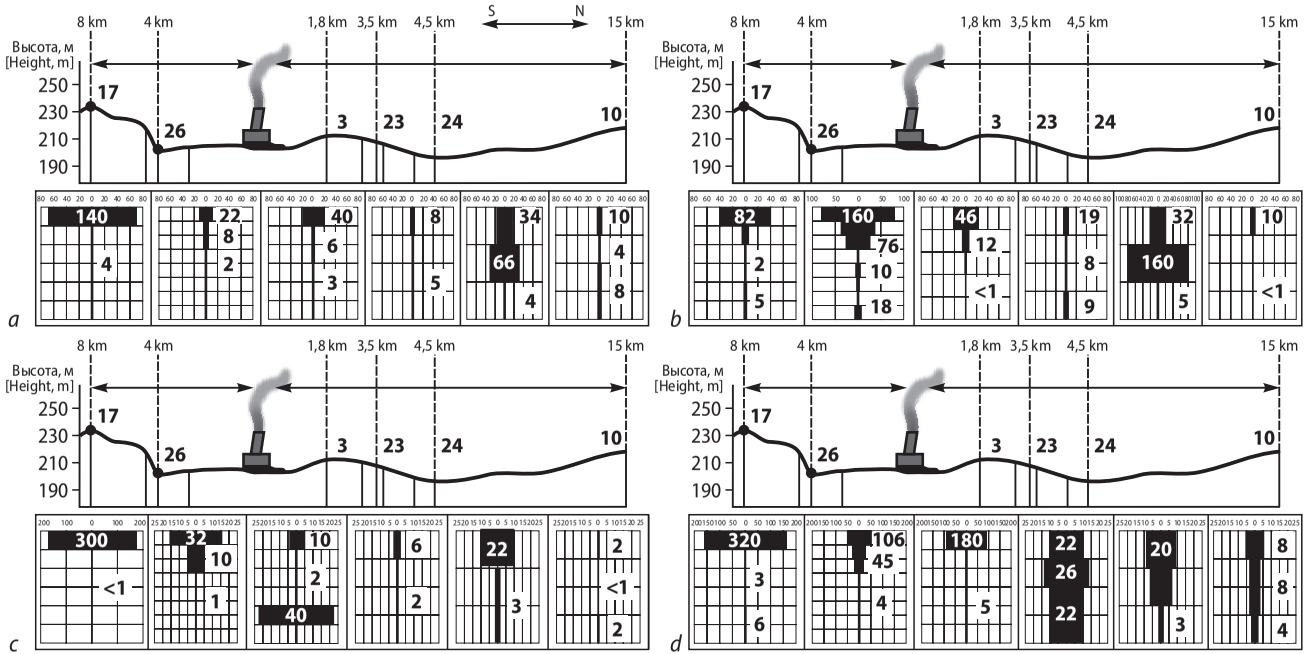


Рис 5. Радиальная дифференциация тяжелых металлов в почвах в меридиональном направлении:
a – цинк; *b* – кадмий; *c* – свинец; *d* – медь

Fig. 5. Radial differentiation of heavy metals in the meridional direction:
a – zinc; *b* – cadmium; *c* – lead; *d* – copper

ISSN 2500-2961

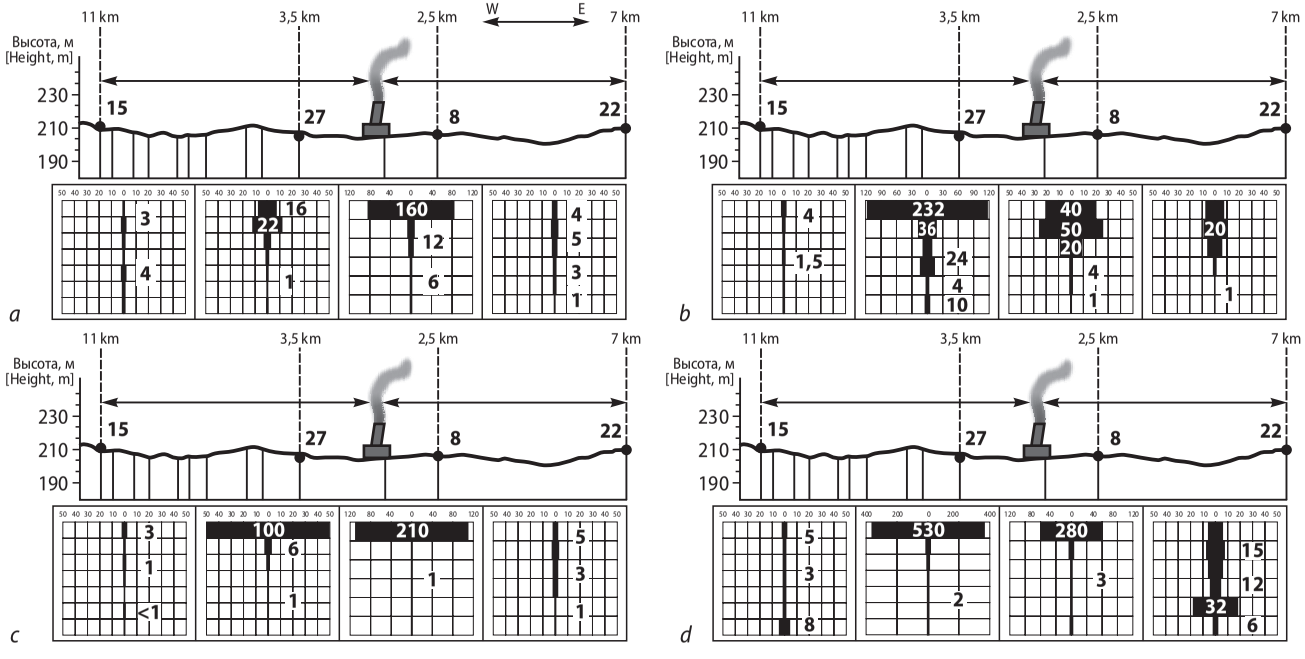


Рис. 6. Радиальная дифференциация тяжелых металлов в широтном направлении:

a – цинк; *b* – кадмий; *c* – свинец; *d* – медь

Fig. 6. Radial differentiation of heavy metals in the latitudinal direction:

a – zinc; *b* – cadmium; *c* – lead; *d* – copper

В широтном направлении относительно комбината (см. рис. 6), коэффициент радиальной дифференциации имеет аналогичную закономерность распределения по профилю относительно отдаления от комбината. Наибольшее закрепление тяжелых металлов приурочено к районам вблизи комбината (точки сбора № 8, 27). В дальних участках (точка 15) коэффициент распределен по профилю равномерно, с незначительным увеличением в верхних горизонтах. Данное обстоятельство свидетельствует о меньшем поступлении тяжелых металлов в почву на данном участке, в связи с чем степень накопления в горизонтах незначительная.

В меридиональном и широтном направлениях коэффициент радиальной дифференциации Zn, Cd, Pb, Cu зависит от степени поступления металлов с атмосферными потоками и наличию геохимических барьеров в почве. Вблизи комбината, из-за своей более высокой массы по сравнению с газовой частью, происходит оседание смеси аэрозольных фракций, содержащих взвешенные частицы. Данные компоненты аэрозоля в большей степени содержат медь и цинк [Геохимия окружающей среды, 1990]. За счет более быстрого оседания крупных аэрозольных фракций и более медленного перехода в подвижное состояние и поступления в почву происходит накопление тяжелых металлов, не свойственное для данных областей. С отдалением от эмиссии тяжелые металлы поступают с газовой фракцией в виде ионной формы, тем самым быстрее вовлекаются в геохимический круговорот, закрепляясь или мигрируя в почвенном профиле.

Наряду с внутрипочвенным потоком вещества, обусловленным физико-химическими параметрами, важную роль в формировании ландшафтов играет горизонтальный перенос веществ, или латеральная дифференциация. В зависимости от значений коэффициента латеральной дифференциации, равному отношению содержания элемента в подчиненном ландшафте к его содержанию в автономном, выделяются определенные виды и разновидности элементов (табл. 2).

В меридиональном направлении с южной стороны от источника эмиссии компоненты ландшафтов имеют транзитно-сопряженную разновидность в верхних горизонтах, где $L < 0{,}7$ (рис. 7), что обусловливается горизонтальной миграцией вещества к сопряженным ландшафтам. К нижним горизонтам происходит преобразование в монотонно-сопряженные комплексы, что свидетельствует о равномерном распределении тяжелых металлов относительно соседних компонентов ландшафтов.

ISSN 2500-2961

Таблица 2

Виды и разновидности латеральной дифференциации элементов [Геннадиев, Касимов, 2004]
[Types and varieties of lateral differentiation of elements [Gennadiev, Kasimov, 2004]]

Литогеохимическая дифференциация [Lithogeochemical differentiation]	**Латерально-миграционная дифференциация [Lateral migration differentiation]**		
	Аккумулятивный [Accumulative]	**Монотонный [Monotonous]**	**Транзитный [Transit]**
	$L^* > 1{,}3$	$0.7 < L < 1{,}3$	$L < 0{,}7$
Аккумулятивный (концентрация в подчиненных ландшафтах), $L > 1.3$ [Accumulative (concentration in subordinate landscapes)]	Аккумулятивный сопряженный [Accumulative conjugate]	Монотонно-аккумулятивный [Monotonically accumulative]	Транзитно-аккумулятивный [Transit-accumulative]
Монотонный (равномерное распределение) [Monotone (uniform distribution)]	Аккумулятивно-монотонный [Accumulative-monotonous]	Монотонно-сопряженный [Monotone-conjugate]	Транзитно-монотонный [Transit-monotonous]
Транзитный (рассеяние в подчиненных ландшафтах) [Transit (scattering in subordinate landscapes)]	Аккумулятивно-транзитный [Accumulative-transit]	Монотонно-транзитный [Monotone-transit]	Транзитный сопряженный [Transit conjugate]

Примечание: L – коэффициент латеральной дифференциации элементов.
[Note. L – the coefficient of lateral differentiation of elements.]

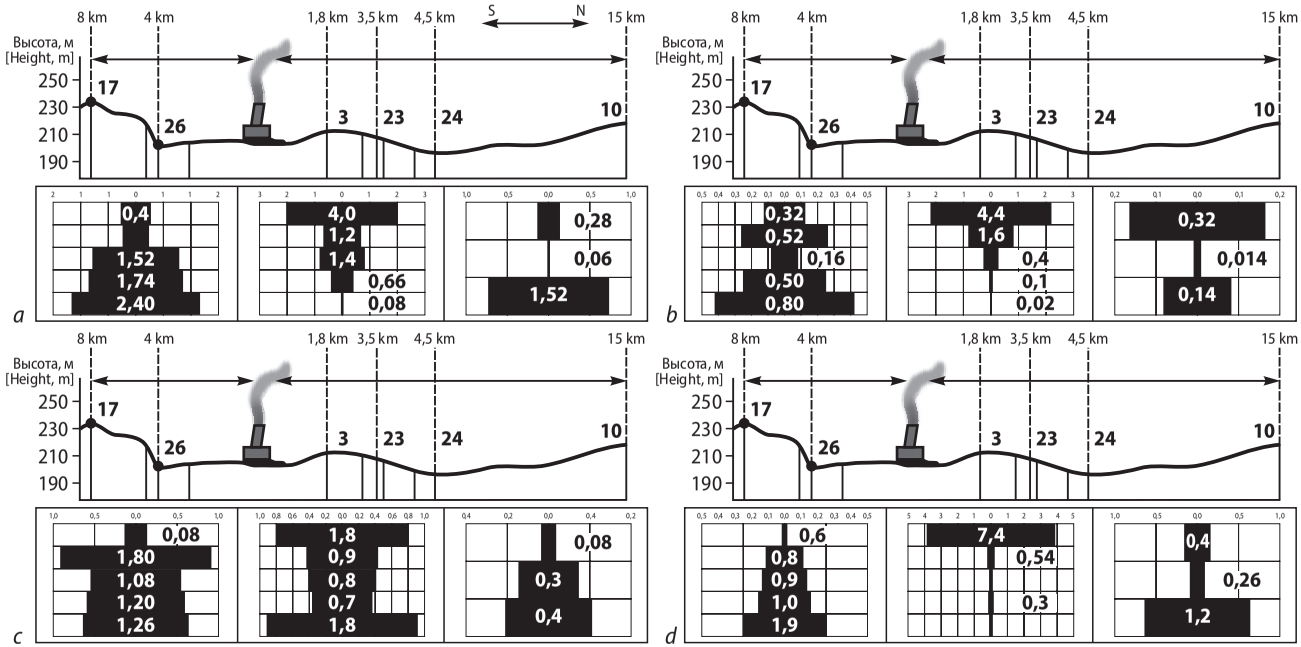


Рис. 7. Латеральная дифференциация тяжелых металлов в почве в меридиональном направлении:

a – цинк; *b* – кадмий; *c* – свинец; *d* – медь

Fig. 7. Lateral differentiation of heavy metals in the meridional direction:

a – zinc; *b* – cadmium; *c* – lead; *d* – copper

ISSN 2500-2961

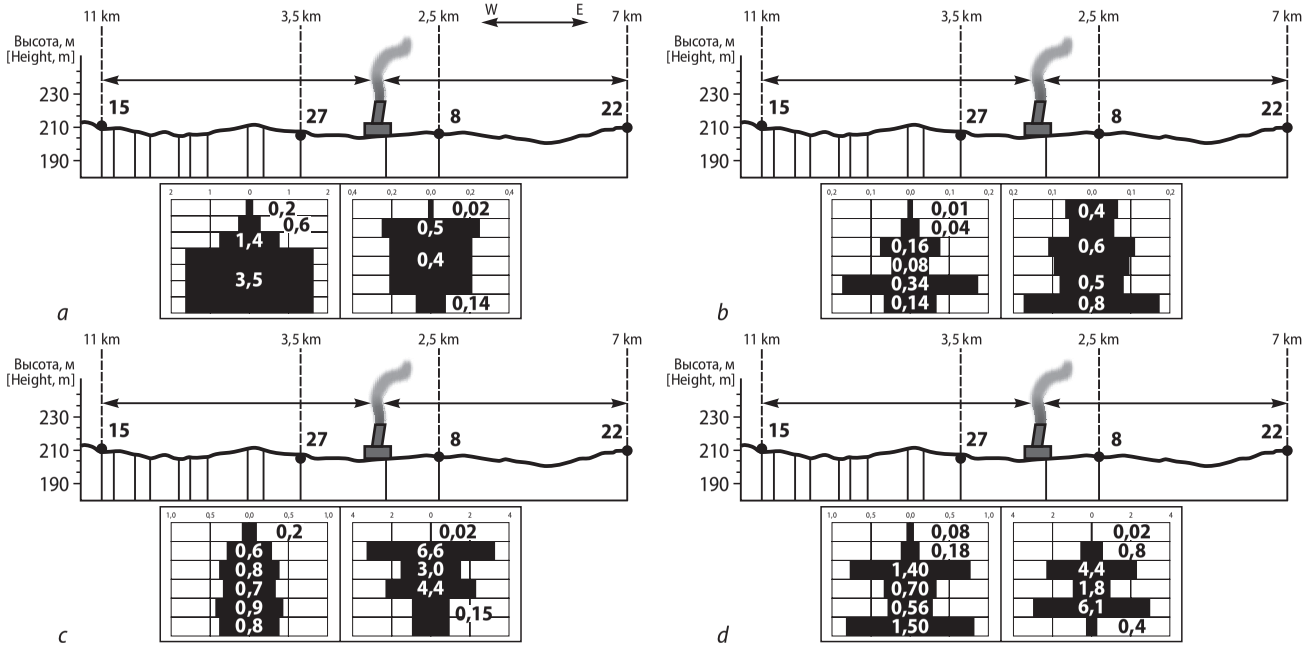


Рис. 8. Латеральная дифференциация тяжелых металлов в широтном направлении:

a – цинк; *b* – кадмий; *c* – свинец; *d* – медь

Fig. 8. Lateral differentiation of heavy metals in the latitudinal direction.

a – zinc; *b* – cadmium; *c* – lead; *d* – copper

Севернее комбината (районы отбора проб № 3 и 23) верхние горизонты имеют аккумулятивный сопряженный характер, где коэффициент $L > 1{,}3$ (см. рис. 7). В описываемых районах происходит накопление тяжелых металлов за счет преобладания воздушных масс в данном направлении и незначительной отдаленности от источника эмиссии, что также подтверждается наиболее высокой разовой приземной концентрацией исследуемых элементов (см. рис. 2). С глубиной коэффициент латеральной дифференциации изменяется до величины $L < 0{,}7$ (см. рис. 7), что свидетельствует о переносе веществ в сопряженные районы. С отдалением от комбината в северном направлении латерально-миграционная дифференциация имеет транзитный сопряженный тип. В районах отбора проб № 24 и 10 коэффициент $L < 0{,}7$ (см. рис. 7), что характеризует миграцию тяжелых металлов с сопряженных территорий.

В широтном направлении западнее комбината коэффициент латеральной дифференциации $L < 0{,}7$ в верхних горизонтах для Zn и Cu и по всему профилю – для Cd и Pb (рис. 8). Данные участки относятся к транзитным сопряженным разновидностям и характеризуются транспортом элементов в сопряженные районы. Вниз по профилю в местах отбора № 15 и 27 для Zn и Cu разновидность изменяется на аккумулятивную сопряженную, что свидетельствует о накоплении данных металлов в подчиненных районах № 27 (см. рис. 8). Восточнее источника эмиссии лишь средняя часть профиля для Pb и Cu характеризуется аккумуляцией в подчиненных ландшафтах. В остальных случаях происходит рассевание в подчиненные области по всем исследуемым элементам как в верхних горизонтах для Pb и Cu, так и по всему профилю для Zn и Cd. Так, в зависимости от изменений физико-химических процессов, происходит закрепление тяжелых металлов в разных частях почвенного профиля, как в виде прочных органоминеральных комплексов, так и в различных обменных формах с участием адсорбционных сил, что отмечается рядом зарубежных исследователей [Costa et al., 2014; Najafi, Jalali, 2016; Liu, Wang, Xue, 2017].

Выводы

Концентрация валового содержания тяжелых металлов в районе Красноуральского промузла в поверхностном слое почвы выше уровня ПДК (по Мукатанову). В среднем ПДК превышен для цинка – в 5 раз; для кадмия – в 1,5–2 раза; свинца – в 10–50 раз; меди – в 20–50 раз. Согласно расчетам суммарного коэффициента загрязнения почв, следует, что территории, наиболее подверженные техногенной нагрузке, находятся в непосредственной близости от комбината и нарушенных

земель и имеют чрезвычайно опасную категорию загрязнения почв. Отношение концентраций исследуемых тяжелых металлов распределяется в следующем порядке: Zn > Cu > Pb > Cd. Данный ряд подтверждается расчетами разовой приземной концентрацией исследуемых металлов, имеющей аналогичный порядок увеличения значений.

Основные пути поступления тяжелых металлов в почвенный покров происходят с аэропромышленными выбросами в атмосферу. Дальность распространения поллютантов зависит от климатических условий местности и будет отличаться от используемых модельных расчетов. Тем не менее, общая закономерность будет соответствовать полученным расчетам: на расстоянии 2 км от источника эмиссии размер максимально разовой приземной концентрации в атмосферном воздухе, поступающей в час, для Zn – 42,48 мг/м^3, Cd – 0,0648 мг/м^3, Pb – 3,96 мг/м^3, Cu – 2,16 мг/м^3. В результате наличия комплекса сопряженных ландшафтных зон общая картина распространения тяжелых металлов и вовлечения их в геохимический круговорот объясняется принципом латеральной и радиальной дифференциации внутри компонентов системы, согласно которым основные транзитные участки располагаются в районах вблизи комбината.

Сопряженные системы выступают в качестве обменных участков с автономными областями. Данные подчиненные территории находятся в пониженных участках местности в радиусе порядка 8 км от источника эмиссии. Тем самым поступление поллютантов происходит еще за счет дополнительных потоков с сопряженных областей и нарушенных территорий. Такой двойной вклад нагрузки на подчиненные системы ведет к еще большей доли техногенной напряженности на ландшафтные комплексы и аккумуляции тяжелых металлов в районах, не подчиняющихся основному аэрогенному принципу распределения масс.

Библиографический список / Reference

Бичукина И.А. Методологические основы системы комплексного экологичсекого мониторинга промышленной площадки медеплавильного комбината: на примере ОАО «Святогор»: Дис. … канд. геол.-мин. наук. Екатеринбург, 2008. [Bichukina I.A. Metodicheskie osnovy sistemy kompleksnogo ekologicheskogo monitoringa promyshlennoj ploshhadki medeplavil`nogo kombinata: na primere OAO “Svyatogor” [Methodical bases of system of complex ecological monitoring of an industrial site of copper-smelting combine: on the example of JSC Svyatogor]. PhD diss. Ekaterinburg, 2008.]

Бичукина А.И., Парфенова Л.П., Копенкина О.А. Факторы формирования геоэкологических условий территории Сорьинского хвостохранилища // Известия вузов. Горный журнал. 2008. № 8. С. 192–194. [Bichukina A.I., Parfenova L.P.,

Kopenkina O.A. Factors of formation of geoecological conditions of the territory Sor'inskogo tailings. *News of Higher Institutions*. *Mining Journal*. 2008. No. 8. Pp. 192–194. (In Russ.)]

Гаврилова И.П., Касимов Н.С. Практикум по геохимии ландшафта. М., 1989. [Gavrilova I.P., Kasimov N.S. Praktikum po geohimii landshafta [Workshop on landscape geochemistry]. Moscow, 1989.]

Геннадиев А.Н., Касимов Н.С. Латеральная миграция вещества в почвах и почвенно-геохимические катены // Почвоведение. 2004. № 12. С. 1447–1461. [Gennadiev A.N., Kasimov N.S. Lateral migration of substances in soils and soil-geochemical catenas. *Soil Science*. 2004. No. 12. Pp. 1447–1461. (In Russ.)]

Геохимия окружающей среды / Сает Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П. и др. М., 1990. [Saet Yu.E., Revich B.A., Yanin E.P. et al. Geohimiya okruzhayushhej sredy [Geochemistry of the environment]. Moscow, 1990.]

Гринвуд Н., Эрншо А. Химия элементов. М., 2008. Т. 1. [Greenwood N., Earnshaw A. Himiya elementov [Chemistry of the elements]. Translated from English. Moscow, 2008. Vol. 1.]

Классификация и диагностика почв России / Шишов Л.Л., Тонконогова В.Д., Лебедева И.И. и др. Смоленск, 2004. [Shishov L.L., Tonkonogova V.D., Lebedeva I.I. et al. Klassifikatsiya i diagnostika pochv Rossii [Classification and diagnostics of soils in Russia]. Smolensk, 2004.]

Лянгузова И.В., Гольдвирт Д.К., Фадеева И.К. Пространственно-временная динамика загрязнения Al–Fe-гумусового подзола в зоне влияния комбината цветной металлургии // Почвоведение. 2016. № 10. С. 1261–1276. [Lyanguzova I.V., Goldwirt D.K., Fadeeva I.K. Spatio-temporal dynamics of Al–Fe-humus podzol contamination in the zone of influence of the nonferrous metallurgy plant. *Soil Science*. 2016. No. 10. Pp. 1261–1276. (In Russ.)]

Мукатанов А.Х. Вопросы эволюции и районирования почвенного покрова Республики Башкортостан. Уфа, 1999. [Mukatanov A.H. Voprosy evolyucii i rajonirovaniya pochvennogo pokrova Respubliki Bashkortostan [The evolution and zonation of soil cover of the Republic of Bashkortostan]. Ufa, 1999.]

Путилина В.С., Галицкая И.В., Юганова Т.И. Адсорбция тяжелых металлов почвами и горными породами. Характеристики сорбента, условия, параметры и механизмы адсорбции: Аналитический обзор. Новосибирск, 2009. [Putilina V.S., Galitskaya I.V., Yuganova T.I. Adsorbtsiya tyazhelykh metallov pochvami i gornymi porodami. Kharakteristiki sorbenta, usloviya, parametry i mekhanizmy adsorbtsii [Adsorption of heavy metals by soils and rocks. Characteristics of the sorbent, conditions, parameters, and mechanisms of adsorption]. Analytic review. Novosibirsk, 2009.]

Тютюнник Ю.Г. Зависимость содержания тяжелых металлов в урбаноземах от уровня загрязнения атмосферного воздуха // География и природные ресурсы. 1997. № 2. С. 63–67. [Tyutyunnik Yu.G. Dependence of the content of heavy metals in urbanozems on the level of atmospheric air pollution. *Geography and Natural Resources*. 1997. No. 2. Pp. 63–67. (In Russ.)]

Фоновое содержание и состав соединений цинка, меди и свинца в черноземе обыкновенном естественных ландшафтов Ростовской области / Бауэр Т.В., Минкина Т.М., Манджиева С.С. и др. // Научный журнал Российского научно-исследовательского института проблем мелиорации. 2015. № 4 (20). С. 186–199. [Bauer T.V., Minkina T.M., Mandzhieva S.S. et al. Background content and composition of zinc, copper and lead compounds in ordinary chernozem of natural

landscapes of Rostov region. *Scientific Journal of the Russian Research Institute of Reclamation Problems*. 2015. No. 4 (20). Pp. 186–199. (In Russ.)]

Шабанов М.В., Маричев М.С. Характер изменения кислотно-основных свойств почв в зоне техногенеза (на примере Красноуральского промузла) // Известия Уральского горного геологического университета. 2018. № 1 (49). С. 55–61. [Shabanov M.V., Marichev M.S. The nature of the change of acid-base properties of soils in the zone of technogenesis (on the example of Krasnouralskiy promote)]. *News of the Ural State Mining University*. 2018. No. 1 (49). Pp. 55–61. DOI: 10.21440/2307-2091-2018-1-55-61 (In Russ.)]

Шабанов М.В., Маричев М.С. Изменение физико-химических свойств почв, подверженных техногенной нагрузке (на примере Красноуральского промузла) // Агрохимический вестник. 2018. № 6. С. 19–25. [Shabanov M.V., Marichev M.S. Change of physico-chemical properties of soils subjected to technogenic load (on the example of Krasnouralsk industrial). *Agrochemical Herald*. 2018. No. 6. Pp. 19–25. DOI: 10.24411/0235-2516-2018-10054 (In Russ.)].

Barkan V.Sh., Lyanguzova I.V. Concentration of heavy metals in dominant moss species as an indicator of aerial technogenic load. *Russian Journal of Ecology*. 2018. Vol. 49. No. 2. Pp. 128–134. DOI: 10.1134/S1067413618020030

Baron S., Carignan J., Ploguin A. Dispersion of heavy metals (metalloids) in soil from 800-year-old pollution (Mont-Lozeve, France). *Environ Sci. Technol*. 2006. Vol. 40. Pp. 5319–5326.

de Costa S.E.T., Guilherme L.R.G., Lopes G. et al. Effect of equilibrium solution ionic strength on the adsorption of Zn, Cu, Cd, Pb, As, and P on aluminum mining by-product. *Water Air Soil Pollut*. 2014. No. 225. P. 1894. DOI: 10.1007/s11270-014-1894-0

Liu G., Wang J., Xue W. et al. Effect of the size of variable charge soil particles on cadmium accumulation and adsorption. *Soils Sediments*. 2017. Vol. 17. P. 2810. DOI: 10.1007/s11368-017-1712-6

Liu Z., Liu Y. Does anthropogenic land use change play a role in changes of precipitation frequency and intensity over the Loess Plateau of China. *Remote Sens*. 2018. No. 10. P. 1818. DOI: 10.3390/rs10111818

Najafi S., Jalali M. Effect of heavy metals on pH buffering capacity and solubility of Ca, Mg, K, and P in non-spiked and heavy metal-spiked soils. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2016. Vol. 188. P. 342. DOI: 10.1007/s10661-016-5329-9

Статья поступила в редакцию 25.11.2019, принята к публикации 20.01.2020
The article was received on 25.11.2019, accepted for publication 20.01.2020

Сведения об авторах / About the authors

Шабанов Михаил Викторович – кандидат сельскохозяйственных наук; доцент кафедры почвоведения и агрохимии им. Л.Н. Александровой факультета агротехнологий, почвоведения и экологии, Санкт-Петербургский государственный аграрный университет

Mikhail V. Shabanov – PhD in Agricultural Sciences; Associate Professor at the Department of Soil Science and Agrochemistry of the Faculty of Agrotechnology, Soil Science and Ecology, Saint Petersburg State Agrarian University

ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4725-3673
E-mail: geohim.spb@gmail.com

Маричев Максим Сергеевич – аспирант кафедры почвоведения и агрохимии им. Л.Н. Александровой факультета агротехнологий, почвоведения и экологии, Санкт-Петербургский государственный аграрный университет

Maksim S. Marichev – graduate student at the Department of Soil Science and Agrochemistry of the Faculty of Agrotechnology, Soil Science and Ecology, Saint Petersburg State Agrarian University

ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0429-2234
E-mail: m.s.marichev@yandex.ru

Заявленный вклад авторов

М.В. Шабанов – общее руководством направления исследования, планирование исследований, участие в полевых работах, проверка текста статьи.

М.С. Маричев – участие в полевых работах, лабораторный и математический анализ, написание и подготовка текста статьи.

Contribution of the authors

M.V. Shabanov – general direction of the research, research planning, participation in field work, checking the text of the article.

M.S. Marichev – participation in field work, laboratory and mathematical analysis, writing and preparing the text of the article.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи
All authors have read and approved the final manuscript

Антропоэкологические исследования

Оригинальное исследование

DOI: 10.31862/2500-2961-2020-10-2-226-239

И.А. Яковенко[1], Н.Е. Петренко[1], Е.А. Черемушкин[1], В.Б. Дорохов[1], З.В. Бакаева[2], Е.Б. Якунина[2], В.И. Торшин[2], Ю.П. Старшинов[2], Д.С. Свешников[2]

[1] Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, 117485 г. Москва, Российская Федерация

[2] Российский университет дружбы народов, 117198 г. Москва, Российская Федерация

Влияние недостатка ночного сна на когнитивную установку по показателям взаимодействия ритмов ЭЭГ

Цель исследования – изучение влияния продолжительности ночного сна на выполнение когнитивной установки по показателю взаимодействия ритмов ЭЭГ. На 120 испытуемых (возраст от 18 до 21 лет; 17 человек с кратковременным ночным сном и 15 с полноценным сном) изучалась взаимосвязь 5 ритмов: бета-1, бета-2, гамма, альфа и тета-ритмов ЭЭГ во время формирования и тестирования когнитивной установки. Регистрировалась многоканальная ЭЭГ. Оценка ЭЭГ осуществлялась путем непрерывного вейвлет-преобразования на основе "материнского" комплексного Morlet-вейвлета в диапазоне 1–35 Гц. Анализировали карты распределения значений модуля коэффициента вейвлет-преобразования, которые отражали амплитудные изменения потенциалов. Мерой, оценивающей взаимодействие ритмов ЭЭГ, являлся коэффициент корреляции Пирсона. На стадии формирования установки испытуемые с кратковременным ночным сном продемонстрировали практически все изучаемые связи ритмов ЭЭГ (8 пар). Студенты с полноценным ночным сном показали существенно меньшее количество достоверных связей пар ритмов: альфа–бета-1, альфа–гамма

© Яковенко И.А., Петренко Н.Е., Черемушкин Е.А., Дорохов В.Б., Бакаева З.В., Якунина Е.Б., Торшин В.И., Старшинов Ю.П., Свешников Д.С., 2020
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International License
The content is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

и бета-2–гамма. На стадии тестирования когнитивной установки студенты с кратковременным ночным сном продемонстрировали достоверные связи трех пар: альфа–бета-1, бета-1–гамма и бета-2–гамма. У хорошо выспавшихся студентов отмечен рост числа достоверных связей (6 пар) по отношению к стадии формирования когнитивной установки за счет прибавления связей ритмов с тета-ритмом. Полученные данные могут свидетельствовать о том, что таламо-кортикальное и кортико-гиппокампальное структурно-функциональные объединения работают по-разному в этих группах испытуемых.

Ключевые слова: взаимодействие ритмов ЭЭГ, когнитивная установка, депривация сна

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Российской академии наук и Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 19-29-06071.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Влияние недостатка ночного сна на когнитивную установку по показателям взаимодействия ритмов ЭЭГ / Яковенко И.А., Петренко Н.Е., Черемушкин Е.А., Дорохов В.Б., Бакаева З.В., Якунина Е.Б., Торшин В.И., Старшинов Ю.П., Свешников Д.С. // Социально-экологические технологии. 2020. Т. 10. № 2. С. 226–239. DOI: 10.31862/2500-2961-2020-10-2-226-239

Original research

DOI: 10.31862/2500-2961-2020-10-2-226-239

I.A. Yakovenko[1], N.E. Petrenko[1], E.A. Cheremoushkin[1], V.B. Dorokhov[1], Z.V. Bakaeva[2], E.B. Yakunina[2], V.I. Torshin[2], Yu.P. Starshinov[2], D.S. Sveshnikov[2]

[1]Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology of RAS, Moscow, 117485, Russian Federation

[2] Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, 117198, Russian Federation

Influence of lack of night sleep on the cognitive set by indicators of EEG rhythms coupling

The aim of the study is investigation of nighttime sleep effect on the performance of a cognitive setting in terms of the coupling of EEG rhythms. The coupling of 5 rhythm: beta-1, beta-2, gamma, alpha and theta rhythms of EEG during

the formation and testing of cognitive set was studied for 120 students (17 with short-term night sleep and 15 with a full night sleep). Multi-channel EEG was recorded. EEG evaluation was carried out by continuous wavelet transform based on the "mother" complex Morlet wavelet in the range of 1–35 Hz. Maps of the distribution of the values of the modulus of the wavelet transformation coefficient, which reflect amplitude changes of the potentials were analyzed. The Pearson correlation coefficient was a measure evaluating the coupling of EEG rhythms. The subjects with a short night's sleep showed almost all of the relations of EEG rhythms (8 couples) during the formation stage of presentation. Students with a full night's sleep showed statistically significant coupling of the following pairs of rhythms: alpha–beta-1, alpha–gamma and beta-2–gamma. Students with short-term night sleep demonstrated the 3 significant couples: alpha–beta-1, beta-1–gamma and beta-2–gamma during the testing stage. Well-slept students showed an increase in the number of connections (6 couples) in relation to the stage of formation of the set due to the addition of connections with the theta rhythm. The obtained data could indicate that the thalamo-cortical and cortico-hippocampal structural-functional associations work differently in the groups of subjects.

Key words: coupling of EEG rhythms, cognitive set, sleep deprivation

Acknowledgments. This work was supported by the Russian Academy of Sciences and the Russian Foundation for Basic Research, grant No. 19-29-06071.

FOR CITATION: Yakovenko I.A., Petrenko N.E., Cheremoushkin E.A., Dorokhov V.B., Bakaeva Z.V., Yakunina E.B., Torshin V.I., Starshinov Yu.P., Sveshnikov D.S. Influence of lack of night sleep on the cognitive set by indicators of EEG rhythms coupling. *Environment and Human: Ecological Studies*. 2020. Vol. 10. № 2. Pp. 226–239. (In Russ.) DOI: 10.31862/2500-2961-2020-10-2-226-239

Введение

Полноценный сон имеет важное значение как для когнитивных, так и для физиологических функций человека. Недавние исследования показали, что он регулирует ключевые молекулярные механизмы (т.е. регуляторные транскрипционные белки [Пучкова, 2017]), и продемонстрировали, что сон играет неотъемлемую роль в метаболическом гомеостазе [Xie et al., 2013]. Соответственно, недостаток ночного сна, иначе говоря – его депривация, может привести к существенному ухудшению внимания, памяти, времени реакции, скорости принятия решений [Miller et al., 2014]. Это также ухудшает функциональное состояние человека: повышает артериальное давление, нарушает контроль уровня

глюкозы в крови и усиливает воспалительные процессы. Длительный период недостатка сна также может привести к возникновению серьезных соматических заболеваний – гипертонии, ожирению и сахарному диабету 2 типа [Sleep and Disease Risk]. Известно, что депривация сна является стрессогенным фактором, ведущим к метаболическим нарушениям. В исследованиях [Chee et al., 2008; Yoo et al., 2007] с использованием ПЭТ и фМРТ показано снижение метаболизма сетей регионов мозга, ответственных за осуществление различных когнитивных процессов. К таким регионам относятся префронтальная кора, таламус, базальные ганглии и мозжечок. Выявлено снижение гиппокампальной активности в заданиях по изучению эпизодической памяти в условиях депривации сна. Депривация сна существенно влияет на восприятие эмоционального выражения лица [Killgore et al., 2017]. Лица как с положительным, так и негативным выражением оцениваются правильно. Неправильно оценивается нейтральное выражение лица, оно воспринимается как негативное.

Когнитивная установка является неосознаваемым процессом, влияющим на сознательную деятельность человека. Она исследовалась с применением различных стимулов, как вербальных, так и невербальных, с введением дополнительных заданий между установочными стимулами, у лиц с нарушениями сна. На стадии формирования установки на лицевую экспрессию студенты с нарушениями сна совершали до 10 ошибок опознания, тогда как студенты с полноценным ночным сном ошибок не совершали. Стадия формирования установки у студентов с нарушениями сна характеризовалась отсутствием связей медленных ритмов, альфа и тета, с бета-ритмом [Функциональная роль связи бета-ритма…, 2018].

Существует довольно много работ по связи ритмов ЭЭГ [Schanze, Eckhorn, 1997; Niculin, Nolte, Curio, 2012; Rodriguez-Martinez, 2015]. Взаимодействие ритмов ЭЭГ вносит новое качество в описательный процесс различных функциональных состояний человека и животных. В настоящее время существует ряд теорий, объясняющих взаимодействие ритмов ЭЭГ. Объединение может обеспечиваться взаимодействием генераторов различных частот. Также это может быть нейрональным взаимодействием или коммуникацией нейронных популяций.

Нами получены факты, подтверждающие связи медленных и быстрых ритмов ЭЭГ при действии установки. Было высказано предположение о том, что объединение ритмов может являться доказательством объединения структур одной корково-подкорковой системы либо объединения двух или более корково-подкорковых систем [Yakovenko et al., 2019].

Задачей нашей работы являлось исследование взаимодействия быстрых и медленных ритмов ЭЭГ при действии установки на лицевую экспрессию у испытуемых с полноценным и кратковременным ночным сном.

Материалы и методы

В исследовании участвовали 120 человек. По результатам опросника были выбраны две крайние группы испытуемых: с малой продолжительностью сна накануне эксперимента (17 человек) и стандартной продолжительностью сна (15 человек). Средний возраст на момент исследования составил 19,4 ± 0,82 (от 18 до 21) лет.

Данное исследование соответствовало этическим стандартам, разработанным в соответствии с Хельсинской декларацией Всемирной медицинской ассоциации «Этические принципы проведения научных медицинских исследований с участием человека» с поправками 2000 г. и «Правилами клинической практики в Российской Федерации». Каждый участник был информирован о цели исследования, подписав согласие на участие в эксперименте.

Накануне эксперимента участники обследования заполняли дневник сна и отвечали на вопросы о продолжительности ночного сна перед экспериментом [Morin, 1993]. Выясняли время, когда испытуемый лег спать накануне и когда проснулся в день проведения эксперимента; уточняли, насколько типичной была такая продолжительность сна. Все испытуемые были ранжированы по длительности сна, в результате были выделены группы с кратковременным ночным сном, менее 4 часов (среднее время сна – 3,68 + 0,18 ч; 17 человек) и полноценным ночным сном, более 8 часов (среднее время сна – 8,77 + 0,16 ч; 15 человек). Уровень сонливости оценивался по опроснику «Каролинская шкала сонливости». В исследовании использована модель фиксированной установки, в которой испытуемый решал задачу опознания лицевой экспрессии. Установка формировалась путем двадцатикратного предъявления двух фотографий лица одного человека из атласа эмоций [Ekman, Friesen, 1976]: слева – с сердитым, справа – с нейтральным выражением; на стадии тестирования установки 40 раз экспонировали два лица с «нейтральным» выражением. Установка считалась сформированной, когда испытуемые продолжали оценивать одно из предложенной пары лиц с нейтральным выражением в том или ином числе проб как негативное.

Через 2 с от начала экспонирования лиц предъявляли пусковой стимул (точку белого цвета), при появлении которого испытуемый должен был нажать на кнопку джойстика и сказать – одинаково ли было выражение обоих лиц или же одно из них, левое или правое, более неприятно.

Время предъявления стимулов – 350 мс. Межстимульный интервал менялся в случайном порядке и составлял 4–7 с.

Производилась многоканальная регистрация электрической активности коры головного мозга. Предъявление стимулов и синхронизация их с ЭЭГ осуществляли с помощью программы системы «Неостимул» (“Neurobotics”). Для отведения, усиления и фильтрации ЭЭГ использовали систему Neocortex-Pro (“Neurobotics”). Частота дискретизации – 250 Гц. Полоса пропускания частот: 0,5–70 Гц. Регистрация ЭЭГ осуществлялась с помощью 20 хлорсеребряных электродов (“Micromed”, Венгрия) с сопротивлением, не превышающим 5 кОм, расположенных в соответствии с международной схемой 10–20% с дополнительными отведениями (F3, F4, F7, F8, Fz, FT7, FT8, C3, C4, Cz, FC3, FC4, T3, T4, P3, P4, T5, T6, O1, O2). Отведение ЭЭГ монополярное, референтный электрод – объединенный ушной.

Анализировали отрезки ЭЭГ длительностью 1 с: 1 отрезок – перед предъявлением целевого стимула и 1 секундный отрезок непосредственно после предъявления лиц. Осуществляли непрерывное вейвлет-преобразование на основе «материнского» комплексного Morlet-вейвлета в диапазоне 1–35 Гц. Анализировали карты распределения значений модуля коэффициента вейвлет-преобразования (КВП), которые отражали амплитудные изменения потенциалов. Карты строили в полосе 4–35 Гц с шагом 1 Гц с разрешением по времени 1 мс. Проводили усреднение значений коэффициента вейвлет-преобразования по стадиям эксперимента для каждого испытуемого: при формировании установки и тестировании ее эффекта по всем пробам. В частотных доменах 4–7, 8–14, 15–19, 20–24 и 25–35 Гц проводили усреднение по частотам. На каждом отрезке длительностью 1 с по всем выделенным частотным полосам и для всех областей определяли среднее значение коэффициента вейвлет-преобразования.

Мерой, оценивающей взаимодействие ритмов ЭЭГ, являлся коэффициент корреляции Пирсона. Он вычислялся на основе значений средних величин коэффициента вейвлет-преобразования соответствующих ритмов на 1-ой секунде непосредственно после предъявления целевого стимула по всем отведениям в целом. Статистическая обработка осуществлялась с помощью пакета программ “SPSS, v.11”.

Результаты

Исследование когнитивной установки на эмоциональное выражение лица выявило существенные различия в параметрах взаимодействия ритмов ЭЭГ у студентов с короткой продолжительностью сна и студентов с полноценным ночным сном накануне эксперимента.

Таблица 1

Корреляция ритмов ЭЭГ по коэффициенту вейвлет-преобразования на стадии формирования когнитивной установки у испытуемых с недостатком ночного сна и длительным ночным сном [Correlation of EEG rhythms by the wavelet transform coefficient at the stage of formation of the cognitive setting in subjects with a lack of night sleep and long night sleep]

Ритмы ЭЭГ [EEG rhythms]	Группы испытуемых [Subject groups]	Корреляция по среднему уровню коэффициента вейвлет-преобразования [Correlation of the average wavelet transform coefficient]
β-1–α	С недостатком сна	$r = 0{,}8$; $p = 0{,}000$
	Полноценный сон	$r = 0{,}68$; $p = 0{,}005$
β-2–α	С недостатком сна	$r = 0{,}67$; $p = 0{,}003$
	Полноценный сон	–
β-1 –θ	С недостатком сна	$r = 0{,}67$; $p = 0{,}003$
	Полноценный сон	–
β-2–θ	С недостатком сна	$r = 0{,}64$; $p = 0{,}006$
	Полноценный сон	–
β-1–γ	С недостатком сна	$r = 0{,}59$; $p = 0{,}012$
	Полноценный сон	–
β-2–γ	С недостатком сна	$r = 0{,}79$; $p = 0{,}000$
	Полноценный сон	$r = 0{,}8$; $p = 0{,}000$
β-1–β-2	С недостатком сна	$r = 0{,}92$; $p = 0{,}000$
	Полноценный сон	–
α–θ	С недостатком сна	$r = 0{,}8$; $p = 0{,}000$
	Полноценный сон	–
α–γ	С недостатком сна	–
	Полноценный сон	$r = 0{,}53$; $p = 0{,}043$
θ–γ	С недостатком сна	–
	Полноценный сон	–

Примечание. Испытуемые с недостатком сна: $n = 15$; испытуемые с полноценным сном: $n = 17$.
r – корреляция по коэффициенту Пирсона; p – уровень значимости.

[Note. Subjects with a lack of sleep: $n = 15$; subjects with full sleep: $n = 17$.
r – Pearson coefficient correlation; p – the significance level.]

На стадии формирования установки (табл. 1), когда предъявлялись пары лиц с разным выражением, испытуемые с кратковременным ночным сном продемонстрировали практически все изучаемые достоверные связи ритмов ЭЭГ (8 пар), за исключением пары альфа–гамма. При этом стоит отметить наличие подавляющего числа связей с тета-ритмом. Студенты с полноценным ночным сном показали достоверные связи следующих пар ритмов: альфа–бета, альфа–гамма и бета-2–гамма. В этой группе связи с тета-ритмом отсутствуют.

Стадия тестирования установки (предъявление пары одинаковых лиц) (табл. 2) также выявила различия во взаимодействии ритмов ЭЭГ у разных групп испытуемых. Студенты с кратковременным ночным сном продемонстрировали сокращение числа достоверных связей ритмов (3 пары) по сравнению со стадией формирования. Выявлены связи альфа–бета-1, бета-1–гамма и бета-2–гамма. Сокращение в основном произошло за счет купирования связей с тета-ритмом. У хорошо выспавшихся студентов отмечен рост числа достоверных связей (6 пар) по отношению к стадии формирования установки за счет прибавления связей ритмов с тета-ритмом. Сопоставление связей ритмов ЭЭГ у двух групп испытуемых показало наличие практически всего спектра изучаемых связей у студентов с полноценным ночным сном, тогда как у студентов с депривацией сна на этой стадии исследования сохранились только связи бета-1 и бета-2 с гамма-ритмом, а также связи альфа-ритма с бета-1. На этой стадии эксперимента оценивали количество ошибок опознания лицевой экспрессии, что позволяло судить о сформированности когнитивной установки. Выявлено, что число ошибок опознания лицевой экспрессии в группах было приблизительно одинаковым. Этот факт в сочетании с результатами энцефалографического исследования позволяет утверждать, что достижение одного и того же результата психической деятельности имеет под собой разную нейрофизиологическую основу.

Таким образом, выявлен разнонаправленный характер взаимодействия тета-ритма с более быстрыми ритмами на разных стадиях эксперимента у испытуемых с кратковременным ночным сном и студентов с полноценным сном.

Обсуждение

Исследование когнитивной установки на эмоциональное выражение лица в условиях разной продолжительности ночного сна накануне эксперимента показало ее влияние на нейрофизиологические основы изучаемой психической активности, в частности, на амплитудное взаимодействие ритмов ЭЭГ. В работе изучалось амплитудное взаимодействие ритмов ЭЭГ на основе коэффициента Пирсона, позволяющее судить о включенности разных мозговых структурно-функциональных объединений в единый процесс при осуществлении психической деятельности человека.

Таблица 2

Корреляция ритмов ЭЭГ по коэффициенту вейвлет-преобразования на стадии тестирования когнитивной установки у испытуемых с недостатком ночного сна и длительным ночным сном [Correlation of EEG rhythms by the wavelet transform coefficient at the stage of testing the cognitive setting in subjects with a lack of night sleep and long night sleep]

Ритмы ЭЭГ [EEG rhythms]	Группы испытуемых [Subject groups]	Корреляция по среднему уровню коэффициента вейвлет-преобразования [Correlation of the average wavelet transform coefficient]
β-1–α	С недостатком сна	$r = 0{,}655$; $p = 0{,}004$
	Полноценный сон	$r = 0{,}84$; $p = 0{,}000$
β-2–α	С недостатком сна	–
	Полноценный сон	$r = 0{,}63$; $p = 0{,}012$
β-1–θ	С недостатком сна	–
	Полноценный сон	–
β-2–θ	С недостатком сна	–
	Полноценный сон	–
β-1–γ	С недостатком сна	$r = 0{,}49$; $p = 0{,}048$
	Полноценный сон	$r = 0{,}63$; $p = 0{,}011$
β-2–γ	С недостатком сна	$r = 0{,}81$; $p = 0{,}000$
	Полноценный сон	$r = 0{,}80$; $p = 0{,}000$
β-1–β-2	С недостатком сна	$r = 0{,}75$; $p = 0{,}000$
	Полноценный сон	$r = 0{,}87$; $p = 0{,}000$
α–θ	С недостатком сна	–
	Полноценный сон	–
α–γ	С недостатком сна	–
	Полноценный сон	–
θ–γ	С недостатком сна	–
	Полноценный сон	$r = 0{,}54$; $p = 0{,}036$

Примечание. Испытуемые с недостатком сна: $n = 15$; испытуемые с полноценным сном: $n = 17$.
r – корреляция по коэффициенту Пирсона; p – уровень значимости.

[Note. Subjects with a lack of sleep: $n = 15$; subjects with full sleep: $n = 17$.
r – Pearson coefficient correlation; p – the significance level.]

У испытуемых с полноценным ночным сном накануне эксперимента на стадии формирования когнитивной установки (предъявление пар лиц с разным эмоциональным выражением) отсутствуют связи тета-ритма с быстрыми ритмами ЭЭГ, тогда как на стадии тестирования установки (предъявление пар лиц с одинаковым выражением), наоборот, возникает связь тета- и гамма-ритмов. Испытуемые с недостаточной продолжительностью сна накануне эксперимента продемонстрировали противоположные результаты: на стадии формирования установки показаны связи тета-ритма с быстрыми ритмами ЭЭГ, а на стадии тестирования – нет. Известно, что тета-ритм в определенной мере отражает работу кортико-гиппокампального круга. Таким образом, можно предположить, что структуры лимбической системы включаются в процесс переработки информации разнонаправленно на разных стадиях установки у двух групп испытуемых.

В работе была выявлена связь альфа- и гамма-ритмов в группе испытуемых с полноценным ночным сном только на стадии формирования установки на лицевую экспрессию. В работах [Uhlhaas et al., 2008; Roux, Uhlhaas, 2014] высказывается предположение о том, что связь альфа- и гамма-ритмов может отражать работу таламо-кортикальной структурно-функциональной системы. Связи альфа-ритма с бета-ритмом представлены в обеих группах на обеих стадиях эксперимента. Можно предположить, что таламо-кортикальный круг по-разному поддерживает уровень активации за счет включения различных быстрых ритмов ЭЭГ, которые могут быть связаны с функционированием различных структур мозга для осуществления текущей деятельности.

Выявлен разнонаправленный характер взаимодействия тета-ритма с более быстрыми ритмами на разных стадиях эксперимента у испытуемых с депривацией сна и студентов с полноценным ночным сном. Показана связь альфа-гамма у испытуемых с полноценным ночным сном. Полученные данные свидетельствуют о том, что таламо-кортикальное и кортико-гиппокампальное структурно-функциональные объединения работают по-разному в группах испытуемых с различной продолжительностью ночного сна накануне эксперимента.

Можно предположить, что связь медленных ритмов с быстрыми осуществляется тогда, когда вследствие влияния какого-то негативного фактора ослабляются внутренние ресурсы мозга. Для осуществления полноценной психической деятельности мозг использует резервные возможности. Такими ресурсами являются дополнительные связи медленных и быстрых ритмов, создавая оптимум активации структур мозга для выполнения деятельности.

Выводы

1. На стадии формирования установки испытуемые с кратковременным ночным сном продемонстрировали практически все изучаемые связи ритмов ЭЭГ (8 пар). Студенты с полноценным ночным сном показали существенно меньшее количество достоверных связей пар ритмов: альфа–бета-1, альфа–гамма и бета-2–гамма.

2. На стадии тестирования установки студенты с кратковременным ночным сном продемонстрировали достоверные связи трех пар: альфа–бета-1, бета-1–гамма и бета-2–гамма. У хорошо выспавшихся студентов отмечен рост числа достоверных связей (6 пар) по отношению к стадии формирования установки за счет прибавления связей ритмов с тета-ритмом.

Библиографический список / References

Пучкова А.Н. Генетика сна и суточных биологических ритмов человека: современные представления // Эффективная фармакотерапия. Неврология. Спецвыпуск «Сон и его расстройства – 5». 2017. № 35. С. 14–20. DOI: 10.13140/RG.2.2.10316.26241 [Puchkova A.N. Genetics of sleep and circadian biological rhythms in man: A contemporary view. *Effektivnaya farmakoterapiya*. *Nevrologiya Specvypusk «Son i ego rasstrojstva – 5»* 2017. No. 35. Pp. 14–20. DOI: 10.13140/RG.2.2.10316.26241 (In Russ.)]

Функциональная роль связи бета-ритма с медленными ритмами у студентов с нарушениями сна при формировании установки на лицевую экспрессию / Яковенко И.А., Петренко Н.Е., Черемушкин Е.А. и др. // Российский физиологический журнал им. И.М. Сеченова. 2018. Т. 104. № 10. С. 1238–1249. DOI: 10.7868/S0869813918100106 [Yakovenko I.A., Petrenko N.E., Cheremushkin E.A. et al. Functional role of beta-rhythm coupling with slow rhythms in students with sleep disorders in the forming of facial expression set. *Rossijskij fiziologicheskij zhurnal im. I.M. Sechenova*. 2018. Vol. 104. No. 10. Pp. 1238–1249. DOI: 10.7868/S0869813918100106 (In Russ.)]

Chee M.W., Tan J.C., Zheng H. et al. Lapsing during sleep deprivation is associated with distributed changes in brain activation. *Journal of Neuroscience*. 2008. Vol. 28. No. 21. Pp. 5519–5528. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.0733-08

Ekman P., Friesen W.V. Pictures of Facial Affect. Palo Alto, CA, 1976.

Killgore W.D.S., Balkin T.J., Yarnell A.M., Capaldi V.F. Sleep deprivation impairs recognition of specific emotions. *Neurobiology of Sleep and Circadian Rhythms*. 2017. Vol. 3. Pp. 10–16. DOI: 10.1016/j.nbscr.2017.01.001

Miller M., Wright H., Hough J., Cappuccio F. Sleep and cognition. *Sleep and its Disorders Affect Society*. 2014. Pp. 3–28. DOI: 10.5772/58735

Morin C.M. Insomnia, psychological assessment and management. New York, 1993.

Niculin V., Nolte G., Curio G. Cross-frequency decomposition. A novel technique for studying interactions between neuronal oscillation with different frequencies. *Clin. Neuriphysiol*. 2012. Vol. 123. No. 7. Pp. 1353–1360. DOI: 10.1016/j.clinph.2011.12.004

Rodriguez-Martinez E.I., Barriga-Paulino C.I., Rojas-Benjumea M.A., Gomez C.M. Co-maturation of theta and low-beta rhythms during child development. *Brain Topogr*. 2015. Vol. 28. No. 2. Pp. 250–260. DOI: 10.1007/s10548-014-0369-3

Roux F., Uhlhaas P.J. Working memory and neural oscillations: alpha – gamma versus theta – gamma codes for distinct WM information? *Trends in Cognitive Sciences*. 2014. Vol. 18. No. 1. Pp. 16–25. DOI: 10.1016/j.tics.2013.10.010

Schanze T., Eckhorn R. Phase correlation among rhythms present at different frequencies: Spectral method, application to microelectrode recording from visual cortex and functional implication. *Int. J. Psychophysiol*. 1997. Vol. 26. No. 1-3. Pp. 171–189. DOI: 10.1016/S0167-8760(97)00763-0

Sleep and Disease Risk. Healthy Sleep. Harvard Medical School. URL: http://healthysleep.med.harvard.edu/healthy/matters/consequences/sleep-and-disease-risk (accessed: 05.05.2020)

Uhlhaas P.J., Haenschel C., Nicolic D., Singer W. The role of oscillations and synchrony in cortical networks and their putative relevance for the pathophysiology of schizophrenia. *Schizophr. Bull*. 2008. Vol. 34. No. 5. Pp. 927–943. DOI: 10.1093/schbul/sbn062

Yakovenko I.A., Petrenko N.E., Cheremushkin E.A., Kozlov M.K. Interaction of EEG rhythms in a set to a facial expression. *Neuroscience and Behavioral Physiology*. 2019. Vol. 49. No. 4. Pp. 508–513. DOI: 10.1007/s11055-019-00763-7

Yoo S.-S., Hu P.T., Gujar N. et al. A deficit in the ability to form new human memories without sleep. *Nature Neuroscience*. 2007. Vol. 10. No. 3. Pp. 385–392. DOI: 10.1038/nn1851

Xie L., Kang H, Xu Q. et al. Sleep drives metabolite clearance from the adult brain. *Science*. 2013. Vol. 342. Pp. 373–377. DOI: 10.1126/science.124122

Статья поступила в редакцию 20.02.2020, принята к публикации 12.04.2020
The article was received on 20.02.2020, accepted for publication 12.04.2020

Сведения об авторах / About the authors

Яковенко Ирина Анатольевна – кандидат биологических наук; старший научный сотрудник лаборатории нейробиологии сна и бодрствования, Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, г. Москва

Irina A. Yakovenko – PhD in Biology; senior research fellow at the Laboratory of Sleep and Wakefulness Neurobiology, Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology RAS, Moscow

ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0391-7266
E-mail: irinayakovenko@mail.ru

Петренко Надежда Евгеньевна – кандидат биологических наук; научный сотрудник лаборатории нейробиологии сна и бодрствования, Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, г. Москва

Nadejda E. Petrenko – PhD in Biology; research fellow at the Laboratory of Sleep and Wakefulness Neurobiology, Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology RAS, Moscow

ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3639-8957
E-mail: xhto@yandex.ru

Черемушкин Евгений Алексеевич – кандидат биологических наук; старший научный сотрудник лаборатории нейробиологии сна и бодрствования, Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, г. Москва

Evgeniy A. Cheremoushkin – PhD in Biology; senior research fellow at the Laboratory of Sleep and Wakefulness Neurobiology, Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology RAS, Moscow

ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6902-8077; SPIN 3122-6227
E-mail: ivnd@mail.ru

Дорохов Владимир Борисович – доктор биологических наук; заведующий лабораторией нейробиологии сна и бодрствования, Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, г. Москва

Vladimir B. Dorokhov – Dr. Hab. in Biology; head at the Laboratory of Neurobiology of Sleep and Wakefulness, Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology RAS

ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3533-9496
E-mail: vbdorokhov@mail.ru

Бакаева Зарина Важикоевна – ассистент кафедры нормальной физиологии Медицинского института, Российский университет дружбы народов, г. Москва

Zarina B. Bakaeva – Assistant at the Department of Normal Physiology of the Medical Institute, RUDN University, Moscow

ORCID: https://orcid.org/0000-0001-7795-0897
E-mail: bakaeva@rudn.ru

Якунина Елена Борисовна – кандидат медицинских наук; ассистент кафедры нормальной физиологии Медицинского института, Российский университет дружбы народов, г. Москва

Elena B. Yakunina – PhD in Medicine; Assistant at the Department of Normal Physiology of the Medical Institute, RUDN University, Moscow

ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0922-900X
E-mail: dr.yakunina@gmail.com

Торшин Владимир Иванович – доктор биологических наук; заведующий кафедрой нормальной физиологии Медицинского института, Российский университет дружбы народов, г. Москва

Vladimir I. Torshin – Dr. Hab. in Biology; Head at the Department of Normal Physiology of the Medical Institute, RUDN University, Moscow

ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3950-8296
E-mail: torshin-vi@rudn.ru

Старшинов Юрий Петрович – кандидат медицинских наук; доцент кафедры нормальной физиологии Медицинского института, Российский университет дружбы народов, г. Москва

Yuri P. Starshinov – PhD in Medicine; associate professor at the Department of Normal Physiology of the Medical Institute, RUDN University, Moscow

ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1836-6209
E-mail: 1345301@mail.ru

Свешников Дмитрий Сергеевич – доктор медицинских наук; доцент кафедры нормальной физиологии Медицинского института, Российский университет дружбы народов, г. Москва

Dmitry S. Sveshnikov – Dr. Hab. in Medicine; Associate Professor of the Department of Normal Physiology of the Medical Institute, RUDN University, Moscow

ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1050-7871
E-mail: sveshnikov-ds@rudn.ru

Заявленный вклад авторов

И.А. Яковенко – существенный вклад в концепцию и дизайн исследования, автор идеи анализа ритмических взаимодействий ЭЭГ, участие в получении и анализе экспериментальных данных исследования, подготовка текста статьи.

Н.Е. Петренко – значимый вклад в концепцию и дизайн исследования, участие в проведении экспериментального исследования, статистическая обработка данных.

Е.А. Черемушкин – большой вклад в концепцию и дизайн исследования, автор идеи исследования лиц с нарушениями сна, организация экспериментального исследования и участие в его проведении, анализ электроэнцефалографических данных.

В.Б. Дорохов – участие в разработке дизайна исследования и обсуждении, подготовка статьи к публикации.

З.В. Бакаева – участие в организации экспериментального исследования и в его проведении.

Е.Б. Якунина – участие в организации экспериментального исследования и в его проведении.

В.И. Торшин – участие в обсуждении, подготовка статьи к публикации.

Ю.П. Старшинов – участие в организации экспериментального исследования и в его проведении.

Д.С. Свешников – участие в обсуждении, подготовка статьи к публикации.

Contribution of the authors

I.A. Yakovenko – made a major contribution to the concept and design of the study, authored the idea of analyzing rhythmic EEG interactions, participated in obtaining and analyzing experimental data of the study, preparation of the article for publication.

N.E. Petrenko – significantly contributed to the concept and design of the study, participated in experimental studies, and conducted statistical data processing.

Ye.A. Cheremushkin – contributed greatly to the concept and design of the study, offering to study patients with sleep disorders, organized and participated in the experimental study, conducted the analysis of electroencephalographic data.

V.B. Dorokhov – participated in the development of the research design, in the discussion and preparation of the article for publication.

Z.V. Bakaeva – organized and participated in the experimental study.

E.B. Yakunina – organized and participated in the experimental study.

V.I. Torshin – participated in the discussion and preparation of the article for publication.

Yu.P. Starshinov – organized and participated in the experimental study.

D.S. Sveshnikov – participated in the discussions and preparation of the article for publication.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи
All authors have read and approved the final manuscript

Издание подготовили к печати: редактор *А. А. Козаренко*, корректор *А. А. Алексеева*, обложка, макет, компьютерная верстка *Н. А. Попова*

СОЦИАЛЬНО-ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ
ТЕХНОЛОГИИ

2020. Т. 10. № 2

Сайт журнала: soc-ecol.ru
E-mail: izdat_mgopu@mail.ru

Авторы статей несут полную ответственность за точность приводимой информации, цитат, ссылок и списка литературы.

Перепечатка материалов, опубликованных в журнале, невозможна без письменного разрешения редакции.

Подписано в печать 29.06.2020 г.
Формат 60×90 1/16. Гарнитура «Times New Roman».
Объем 8 п. л. Тираж 1000 экз.