

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ВЕСТНИК ТОМСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

БИОЛОГИЯ

Tomsk State University Journal of Biology

Научный журнал

2020

№ 52

Зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере
массовых коммуникаций, связи и охраны культурного наследия
(свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-29499 от 27 сентября 2007 г.)

Подписной индекс в объединённом каталоге «Пресса России» 44024

Журнал включен в «Перечень рецензируемых научных изданий, входящих
в международные реферативные базы данных и системы цитирования, в которых должны
быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание
ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук»
Высшей аттестационной комиссии

Учредитель – Томский государственный университет

Научный журнал «Вестник Томского государственного университета. Биология» публикует результаты завершенных оригинальных исследований (теоретические и экспериментальные статьи) в различных областях современной биологии, ранее нигде не публиковавшиеся и не представленные к публикации в другом издании; публикуются описания принципиально новых методов исследования, обзорные статьи по отдельным проблемам. Основные требования к представляемым рукописям: новизна и обоснованность фактического материала, ясность, сжатость изложения, воспроизводимость экспериментальных данных. Решение о публикации принимается редколлегией после рецензирования, учитывая соответствие материала тематике журнала, актуальность проблемы, научную и практическую новизну и значимость, профессионализм выполнения работы. Принимаются статьи на русском и английском языках. Средний срок публикации 3–6 месяцев. Журнал выходит ежеквартально. Публикации осуществляются на некоммерческой основе. Все опубликованные материалы находятся в свободном доступе.

Индексируется: SCOPUS; Web of Science (Biological Abstracts, BIOSIS Previews, Emerging Sources Citation Index, Zoological Record, RSCI); Google Scholar; eLIBRARY.RU; CYBERLENINKA. Внесен в Ulrich's Periodicals Directory.

Адрес издателя и редакции: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Биологический институт; сайт: <http://journals.tsu.ru/biology/>

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Кулижский С.П. – гл. редактор (Томский государственный университет, Томск, Россия)

E-mail: kulizhskiy@yandex.ru

Покровский О.С. – зам. гл. редактора (Национальный центр научных исследований, Тулуза, Франция)

Баранова О.Г. – отв. редактор (Ботанический институт им. В.Л. Комарова РАН, Санкт-Петербург, Россия)

Бобровский М.В. – отв. редактор (Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пушкино, Россия)

Громовых Т.И. – отв. редактор (Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова Министерства здравоохранения Российской Федерации, Москва, Россия)

Денисов Е.В. – отв. редактор (НИИ онкологии Томского НИМЦ РАН, Томск, Россия)

Зверев А.А. – отв. редактор (Томский государственный университет, Томск, Россия)

Иванов Ю.В. – отв. редактор (Институт физиологии растений им. К.А. Тимирязева РАН, Москва, Россия)

Литвяков Н.В. – отв. редактор (НИИ онкологии Томского НИМЦ РАН, Томск, Россия)

Лойко С.В. – отв. редактор (Томский государственный университет, Томск, Россия)

Тарасов В.В. – отв. редактор (Институт экологии растений и животных УрО РАН, Екатеринбург, Россия)

Шефтель Б.И. – отв. редактор (Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, Москва, Россия)

Акимов Е.Е. – отв. секретарь (Томский государственный университет, Томск, Россия)

E-mail: biotsu@rambler.ru, biotsu@mail.ru

Волокитина А.В. (Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, Красноярск); **Воробьев Д.С.** (Томский государственный университет, Томск); **Дюкарев А.Г.** (Институт мониторинга и климатических систем РАН, Томск); **Кривец С.А.** (Институт мониторинга и климатических систем РАН, Томск); **Минсеев Н.М.** (Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанова РАН, пос. Борок); **Штерншис М.В.** (Всероссийский научно-исследовательский институт биологической защиты растений, Краснодар).

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Александровский А.Л. (Институт географии РАН, Москва, Россия); **Ананьева Н.Б.** (Зоологический институт РАН, Санкт-Петербург, Россия); **Афтанас Л.И.** (НИИ физиологии и экспериментальной медицины СО РАМН, Новосибирск, Россия); **Васильев В.П.** (Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, Москва, Россия); **Васильева Е.Д.** (Зоомузей МГУ, Москва, Россия); **Дюбуа А.** (Национальный музей естественной истории, Париж, Франция); **Зеллер Б.** (Национальный институт агрономических исследований, Нанси, Франция); **Зинченко Т.Д.** (Институт экологии Волжского бассейна РАН, Тольятти, Россия); **Кингма Г.** (Маастрихтский университет, Маастрихт, Нидерланды); **Крюков В.Ю.** (Институт систематики и экологии животных СО РАН, Новосибирск, Россия); **Кузнецов В.В.** (Институт физиологии растений им. К.А. Тимирязева РАН, Москва, Россия); **Лодыгин Е.Д.** (Институт биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Коми научный центр УрО РАН, Сыктывкар, Россия); **Лушакин В.В.** (Университет Арканзаса медицинских наук, Арканзас, США); **Максимов Т.Х.** (Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, Якутск, Россия); **Носов А.М.** (Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия); **Оленников Д.Н.** (Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН, Улан-Удэ, Россия); **Пердиссес А.** (Национальный Музей естественных наук, Мадрид, Испания); **Смирнова О.В.** (Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, Москва, Россия); **Соколова Ю.Я.** (Университет Луизианы, Батон Руж, Луизиана, США); **Степанов В.А.** (НИИ медицинской генетики Томского НИЦ СО РАМН, Томск, Россия); **Шарахов И.В.** (Политехнический университет Вирджинии, Вирджиния, США).

Издательство: Издательство ТГУ. Редактор К.Г. Шилько; редактор-переводчик М.Б. Кузьменко; оригинал-макет А.И. Лелюор; дизайн обложки Л.Д. Кривоноса

Подписано в печать 29.12.2020 г. Формат 70x108¹/₁₆. Усл. печ. л. 13,3. Тираж 50 экз. Заказ № . Цена свободная.

Дата выхода в свет 14.01.2021 г.

Журнал отпечатан на полиграфическом оборудовании Издательства ТГУ. 634050, Ленина, 36, Томск, Россия. Тел. 8+(382-2)-52-98-49. Сайт: <http://publish.tsu.ru>. E-mail: rio.tsu@mail.ru

**About Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Biologiya =
Tomsk State University Journal of Biology**

Founder – Tomsk State University

Tomsk State University Journal of Biology is a quarterly international and peer-reviewed scientific journal publishing the results of the completed experimental research, reviews and novel methods of research in Agricultural & Biological Sciences on the basis of its originality, importance, scientific character, validity, precision and clarity. The Journal is intended for a broad range of scientists and experts in biology, agriculture and ecology.

The editorial board of the *Tomsk State University Journal of Biology* commits to the internationally accepted principles of publication ethics expressed.

International standard serial edition number: EISSN 2311-2077, ISSN 1998-8591

Language: Russian, English

Publications are on non-commercial basis (FREE)

Open access

Publication timeframe: 3-6 months

All manuscripts are to be reviewed: double blind peer review (2-10-weeks)

Abstracting and Indexing: SCOPUS; Web of Science (Biological Abstracts, BIOSIS Previews, Emerging Sources Citation Index, Zoological Record, RSCI); Google Scholar; eLIBRARY.RU; CYBERLENINKA; Ulrich's Periodicals Directory

Contact the Journal

Tomsk State University, Institute of Biology, 36 Lenin Ave., Tomsk 634050, Russian Federation

<http://journals.tsu.ru/biology/en/>

Editor-in-Chief - Sergey P Kulizhskiy, Dr. Sci. (Biol.), Professor, Tomsk State University (Tomsk, Russia), kulizhskiy@yandex.ru

Co Editor-in-Chief - Oleg S Pokrovsky, National Centre for Scientific Research (Toulouse, France).

EDITORIAL COUNCIL

Akimova EE - Associate Editor, Tomsk State University, Tomsk, Russia

biojournaltsu@gmail.com, biotsu@mail.ru

Baranova OG - Editor, Komarov Botanical Institute, RAS, St. Petersburg, Russia

Bobrovsky MV - Editor, Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science, RAS, Pyshchino, Russia

Gromovykh TI - Editor, IM Sechenov First Moscow State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia

Denisov EV - Editor, Cancer Research Institute of Tomsk NRC, Tomsk, Russia

Zverev AA - Editor, Tomsk State University, Tomsk, Russia

Ivanov Yu V - Editor, Timiryazev Institute of Plant Physiology, RAS, Moscow, Russia

Litviakov NV - Editor, Cancer Research Institute of Tomsk NRC, Tomsk, Russia

Loyko SV - Editor, Tomsk State University, Tomsk, Russia

Tarasov VV - Editor, Institute of Plant and Animal Ecology, RAS, Yekaterinburg, Russia

Sheftel BI - Editor, AN Severtsov Institute of Ecology and Evolution, RAS, Moscow, Russia

Volokitina AV (Sukachev Institute of Forest, SB RAS, Krasnoyarsk, Russia); **Vorobiev DS** (Tomsk State University, Tomsk, Russia); **Dukarev AG** (Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, SB RAS, Tomsk, Russia);

Krivets SA (Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, SB RAS, Tomsk, Russia); **Mineeva NM** (Papanin Institute for Biology of Inland Waters, RAS, Borok, Russia); **Shternshis MV** (All-Russian Research Institute of Biological Plant Protection, Krasnodar, Russia).

EDITORIAL BOARD [In Russian Alphabetical order]

Alexandrovskiy AL, Institute of Geography RAS (Moscow, Russia); **Ananjeva NB**, Zoological Institute RAS (St. Petersburg, Russia); **Aftanas LI**, State Research Institute of Physiology SB RAMS (Novosibirsk, Russia); **Vasil'ev VP**, A.N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution RAS (Moscow, Russia); **Vasil'eva ED**, Zoological Museum, MV Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia); **Dubois A**, French National Museum of Natural History (Paris, France); **Zeller B**, French National Institute for Agricultural Research (Nancy, France); **Zinchenko TD**, Institute of Ecology of the Volga River Basin RAS (Togliatti, Russia); **Kingma H**, Maastricht University (Maastricht, Netherlands); **Kryukov VY**, Institute of Systematics and Ecology of Animals SB RAS (Novosibirsk, Russia); **Kuznetsov VIV**, Timiryazev Institute of Plant Physiology RAS (Moscow, Russia); **Lodygin ED**, Institute of Biology of Komi Scientific Centre UB RAS (Syktyvkar, Russia); **Lupashin VV**, University of Arkansas for Medical Sciences (Arkansas, USA); **Maximov TC**, Institute for Biological Problems of the Cryolithozone SB RAS (Yakutsk, Russia); **Nosov AM**, MV Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia); **Olennikov DN**, Institute of General and Experimental Biology SB RAS (Ulan-Ude, Russia); **Perdices A**, National Museum of Natural Sciences (Madrid, Spain); **Smirnova OV**, Center of Ecology and Productivity of Forests RAS (Moscow, Russia); **Sokolova YY**, Louisiana State University (Baton Rouge, Louisiana, USA); **Stepanov VA**, Research Institute of Medical Genetics SB RAMS (Tomsk, Russia); **Sharakhov IV**, Virginia Polytechnic Institute and State University (Blacksburg, Virginia, USA)

PUBLISHER: TSU Press (Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). Editor KG Shilko; Translator/Editor MB Kuzmenko; camera-ready copy AI Leloyur; cover design LD Krivtsova.

Passed for printing 29.12.2020. Format 70x108^{1/16}. Conventional printed sheets 18.6. Circulation is 50 copies. Orders No. Open price. Date of publication 14.01.2021.

36 Lenin Ave, Tomsk 634050, Russian Federation. Tel. +7 (382-2)-52-98-49. <http://publish.tsu.ru>. E-mail: rio.tsu@mail.ru

СОДЕРЖАНИЕ

АГРОХИМИЯ И ПОЧВОВЕДЕНИЕ

- Polyakov V, Abakumov EV, Tembotov RKh** Black carbon as a factor in deglaciation
in polar and mountain ecosystems: A Review6

БИОТЕХНОЛОГИЯ И МИКРОБИОЛОГИЯ

- Urazova M, Zakarya K, Sarmurzina Z, Bissenova G, Abitayeva G, Shevtsov A,
Tekebayeva Zh, Abzhalelov A.** Diversity and characterization of lactic acid bacteria
from Common Carp (*Cyprinus carpio* L.) intestine in winter (Northern Kazakhstan)34

БОТАНИКА

- Боярских И.Г., Волкова Л.Р.** Изменчивость репродуктивной способности
Lonicera caerulea (Carpifoliaceae) в сейсмоактивной зоне Горного Алтая
(Северо-Чуйский хр., р. Кызыл-Ярык)48
- Коновалова М.Е., Собачкин Д.С.** Структура ценопопуляций ключевых видов
горно-таежных кедровников Восточного Саяна71
- Санданов Д.В., Дугарова А.С., Селютина И.Ю.** Хорология и особенности
пространственного распределения видов секции *Xerobia* Bunge рода *Oxytropis* DC.....85
- Чепинога В.В., Аненхонов О.А., Софронова Е.В., Софронов А.П., Коротяев Б.А.,
Махов И.А.** Растительные сообщества с *Ulmus japonica* (Ulmaceae) в Западном Забайкалье:
распространение, значение для сохранения биоразнообразия и перспективы охраны105

ЭКОЛОГИЯ

- Frank Y.A., Vorobiev E.D., Babkina I.B., Antsiferov D.V., Vorobiev D.S.** Microplastics
in fish gut, first records from the Tom River in West Siberia, Russia130
- Копытина Н.И.** Микобиота пелагиали Одесского региона северо-западной части
Чёрного моря140

TABLE OF CONTENTS

AGROCHEMISTRY & SOIL SCIENCE

Polyakov VI, Abakumov EV, Tembotov RKh. Black carbon as a factor in deglaciation in polar and mountain ecosystems: A Review.....	6
---	---

BIOTECHNOLOGY & MICROBIOLOGY

Urazova M, Zakarya K, Sarmurzina Z, Bissenova G, Abitayeva G, Shevtsov A, Tekebayeva Zh, Abzhalelov A. Diversity and characterization of lactic acid bacteria from Common Carp (<i>Cyprinus carpio</i> L.) intestine in winter (Northern Kazakhstan)	34
--	----

BOTANY

Boyarskykh IG, Volkova LR. Variability of the reproductive ability of <i>Lonicera caerulea</i> (Caprifoliaceae) in the seismically active zone of the Altai Mountains (Severo-Chuisky range, Kyzyl-Yaryk valley).....	48
Konovalova ME, Sobachkin DS. Cenopopulation structure of the key species in Siberian Pine mountain-taiga forests of the East Sayan mountains.....	71
Sandanov DV, Dugarova AS, Selyutina IYu. Species distribution modeling for the section <i>Xerobia</i> Bunge of the genus <i>Oxytropis</i> DC. on the territory of Central Asia under past and future climate change	85
Chepinoga VV, Anenkhonov OA, Sofronova EV, Sofronov AP, Korotyaev BA, Makhov IA. <i>Ulmus japonica</i> (Ulmaceae) communities in Western Transbaikalia: Distribution, value for biodiversity conservation and perspectives of protection.....	105

ECOLOGY

Frank YA, Vorobiev ED, Babkina IB, Antsiferov DV, Vorobiev DS. Microplastics in fish gut, first records from the Tom River in West Siberia, Russia.....	130
Kopytina NI. Mycobiota of the pelagic zone of Odessa region in the northwestern Black Sea	140

АГРОХИМИЯ И ПОЧВОВЕДЕНИЕ

UDC 631.48

doi: 10.17223/19988591/52/1

Vyacheslav I. Polyakov¹, Evgeny V. Abakumov¹, Rustam Kh. Tembotov²

¹ St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russian Federation

² Tembotov Institute of Ecology of Mountain Territories, Russian Academy of Sciences, Nalchik, Russian Federation

Black carbon as a factor in deglaciation in polar and mountain ecosystems: A Review

Black carbon is considered a product of the incomplete combustion of fossil fuels and materials that originated from volcanic eruptions or were emitted during wildfires. It is a strong light-absorbing component that has many atmospheric and surface effects in terrestrial and glacial ecosystems. Normally, black carbon is presented as a solid particle, consisting mainly of pure carbon, which absorbs solar radiation at all wavelengths. Some black carbon particles are amended by a mineral compound, though black carbon substances are normally dark or greyish dark. Black carbon is the most active part of suspended particles in the atmosphere and on glacial surfaces, absorbing solar radiation, the main component of ash, which consists of carbon particles with impurities in the form of mineral particles and also contains carbon of biogenic origin. In this paper, we have analyzed the literature on black carbon and its effect on deglaciation processes in the Earth's polar and mountainous regions. The physical, chemical, and microbiological composition of black carbon accumulations were studied using the examples of the Arctic, the Antarctic, and the Central Caucasus. Potential sources and conditions of the transportation of black carbon into the polar zone and their effect on ice and snow have also been discussed.

The paper contains 7 Figures, 3 Tables and 110 References.

Key words: Organic carbon; Climate crisis; Central Caucasus; Arctic; Antarctic.

Funding: This work was supported by the Grant of the Russian Foundation for Basic Research (Project No 19-05-50107).

Introduction

The Arctic polar biome is a native and the most vulnerable environment in the world. At the end of the 19th century, unconfirmed evidence was obtained, indicating that the Arctic is contaminated by particles transported from boreal and subboreal latitudes [1]. In the 1950s, US military pilots observed layers of pollutants in Arctic ecosystems [2]. Later, it was discovered that this was the so-called “Arctic haze,” which consists of ash, dust, and sulfate-containing compounds emitted by industrial complexes located in Eurasia and transported to the

Arctic [3-4]. In the 1980s, a gas and aerosol sampling program was conducted in the Arctic [5-6] and showed high concentrations of light-absorbing aerosols in the upper atmosphere. Studies conducted during the second Arctic stratospheric aero-expedition in 1992 showed an accumulation of ash-containing aerosols at an altitude of 1.5 km [7]. Many authors consider light-absorbing aerosols to be the most important factor leading to the rapid melting of Arctic snow and ice [8-11]. In studies of light-absorbing aerosols that cause changes in the Arctic climate, black carbon (BC) is most often mentioned. Clarke and Noone (1985) [11] believe that the deposition of black carbon causes a darkening of the surface, which, in turn, begins to absorb more solar radiation. This leads to the heating of the lower atmosphere and the melting of snow and ice. Other studies indicate a decrease in Arctic sea ice, which they explain by the deposits of black carbon on ice and snow [9, 12-13]. Flanner et al. (2007) [9] indicated that the darkening of snow and ice surfaces as a result of the deposition of black carbon could lead to warming from 0.5 to 1°C at the surface in the Arctic. In their opinion, this was due to the earlier melting of snow or ice, which leads to a warming of the atmosphere due to a decrease in albedo.

Black carbon (BC) is the most strongly light-absorbing component of particulate matter (PM) and is formed by the incomplete combustion of fossil fuels, biofuels, and biomass [14]. This term refers to climate-forming substances that are located in the atmosphere for a short amount of time - from several days to several years [15-19]. According to authors [20-22], black carbon is the second largest artificial contributor to global warming (after carbon dioxide) and has sped up the melting of glaciers. Because carbon dioxide is chemically passive, its life expectancy in the atmosphere is relatively long - about 100 years. Therefore, actions taken to reduce anthropogenic carbon dioxide emissions, even if they are very successful, will not have an effect until decades have passed. In this regard, the idea of reducing emissions of other gases and aerosols, including black carbon, which also have a significant impact on the radiation regime and climate, but that remain in the atmosphere for a shorter period of time, is considered an alternative [23-24]. It has been established that black carbon traps several hundred times more heat than carbon dioxide does. Therefore, worldwide, taking into account melting glaciers, rising sea levels, shrinking polar ice caps, and their associated negative effects, reducing emissions is one of the main tasks for addressing climate change [14, 25]. Black carbon, when it falls on the snow and ice cover, causes it to heat, thereby increasing the amount of absorbed solar energy and reducing its albedo, which, in turn, leads to melting. Changes in surface albedo due to atmospheric deposition, and especially black carbon, are an important factor in the acceleration of glacier deglaciation. It is extremely important for polar regions and mountainous regions, as the albedo value on snowy surfaces in uncontaminated conditions is 98%. When these surfaces are contaminated, only 90 to 97% is reflected. It would seem that this is not a big change, but even this increase in the amount of absorbed solar energy will accelerate the melting of ice and snow [16-26].

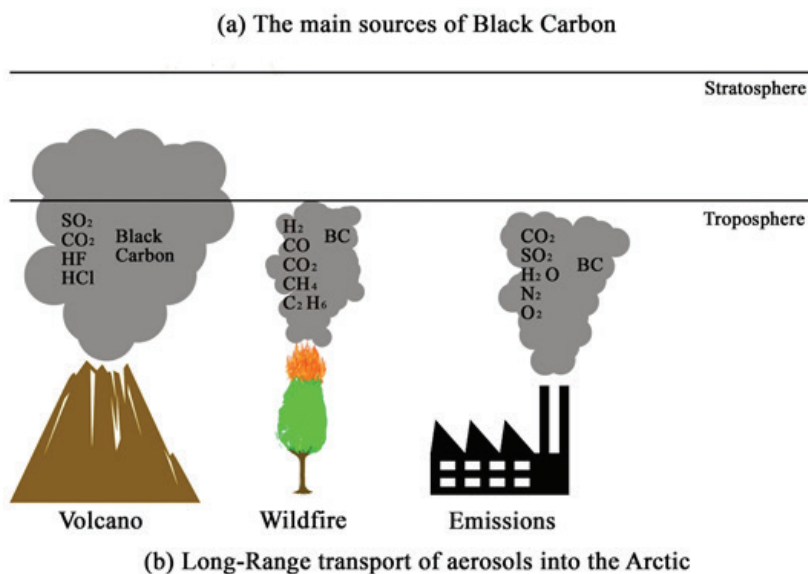


Fig. 1. (a) The main source of black carbon in the atmosphere; (b) Long-range transport of aerosols by the wind. The primary high- and low-pressure centers are indicated and designated as follows: Siberian High (SH), Aleutian Low (AL), Beaufort Anticyclone (BA), North American High (NAH), Icelandic Low (IL), Central Arctic Low (CAL), and Greenland High (GH). Source: Stone et al. (2014) [30]

Black carbon is formed as a result of the incomplete combustion of fossil fuels, biomass, bio sediments and other organic compounds. Mainly, these are emissions from diesel engines for transport and industrial purposes; emissions from

the combustion of wood and coal; emissions from industrial production processes (metallurgy and petrochemicals); emissions from oil and gas production; and forest fires and the burning of agricultural waste (Figure 1, *a*) [27-29].

According to meteorological observations in the Arctic since the 1990s, an average increase by 3 °C has occurred in the winter temperature [31]. Changes taking place in the Arctic have a strong impact on the climate of the entire Northern Hemisphere [31-32]. In recent decades, the area of distribution and the volume of Arctic ice has been steadily declining [33]. Studies show that the current decline in glaciers is unprecedented in the Arctic and that their degradation rates are very high. Many studies have shown that Arctic snow and ice covers began to thaw very quickly, as did sea ice [34-37], while a decrease in snow cover [38-40] and black carbon is one of the many factors that has influenced the Arctic. Figure 1b presents the long-range transport of aerosols by wind in the Arctic region.

Numerous international and intergovernmental bodies and agencies, including the United Nations Environment Programme (UNEP), the World Meteorological Organization (WMO), the Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution (CLRTAP), and the Arctic Council, have identified BC as a potentially important influence on climate change. Each of these bodies recently prepared an assessment of black carbon that included a consideration of the impacts of BC on climate, the potential benefits to the climate of reducing BC emissions, and/or the mitigation opportunities that appear to be most promising. These assessments have identified several additional actions - from improvements in inventories to the evaluation of specific mitigation opportunities - that could be taken to help gather more information about BC and address emissions from key sectors [14, 41].

Thus, the main aim of this study was to characterize the direct effect, ice/snow albedo effect and chemical pollution effect of black carbon in polar and mountain regions.

Materials and methods

The study sites

The samples of cryoconites were collected during the 65th Russian Antarctic Expedition in 2020. We investigated cryoconites from Livingston and King George Islands (Figure 2). The studied cryoconites are of volcanic origin. Organo-mineral substances accumulate in ice cracks and wind shelters and form cryoconites. During thawing, cryoconite substances become located deeper in relation to the initial surface, which results in the additional accumulation of organic matter in microdepressions. They become wider and deeper. The spatial web of cryoconite became more developed, which resulted in the degradation of the glacier surface. This cryoconite formation results in the degradation of upper layers of ice and increases deglaciation rates [42]. Samples were taken from the ice, delivered to the field laboratory, dried and transported by ship to the Department of Applied Ecology of St. Petersburg State University, St. Petersburg.

The studied cryoconites of West Antarctica were formed in various climatic conditions. The average annual air temperature at Bellingsausen station is -2.8°C (King George Island).



Fig. 2. Study area. Livingston Isl. ($62^{\circ}34'49.1''\text{S}$ $60^{\circ}13'11.5''\text{W}$) and King-George Isl. ($62^{\circ}00'49.5''\text{S}$ $58^{\circ}19'19.5''\text{W}$)

The average annual rainfall is 729 mm. A characteristic feature of this region of Antarctica is precipitation in liquid form, in contrast to the eastern part of Antarctica. King George Island is composed of volcanic rocks, mainly Paleogene-Neogene andesites, basalts, and various tuffs. Most of the coastline is steep, in some places sheer and even overhanging an abrasion cliff. The height of the cliff is 30 m and more. The relief of the peninsula is a typical hummock with absolute heights of up to 150 m. The outlines of large relief forms are evidently determined by faults and tectonically weakened zones. Along them, the hills are grouped into several elongated chains with a sublatitudinal direction, and are separated by through depressions of the same strike that cross the entire peninsula [43]. Livingston Island is a part of the South Shetland Islands archipelago and is fundamentally different from King George Island we studied earlier. Therefore, the differences in elevation and the dissection of the relief are much bigger here and play a significant role in soil formation in comparison with the Fildes Peninsula. Soil formation is spatially concentrated in the coastal parts of the island, on rocky and sea terraces. The investigated cryoconites are shown in Figure 3.

There are several ways to select BC, they depend on the source from which they are taken (snow, ice and water). Small drills are used to extract BC from ice, it is important to use mechanical or electrical devices in order to eliminate an additional source of exhaust gases that could affect the study results. After collection, such samples are defrosted, the water is filtered and the filter residue is analyzed. Snow and water analysis is also similar to ice analysis. A standard BC isolation method is described by Hegg et al. [44].

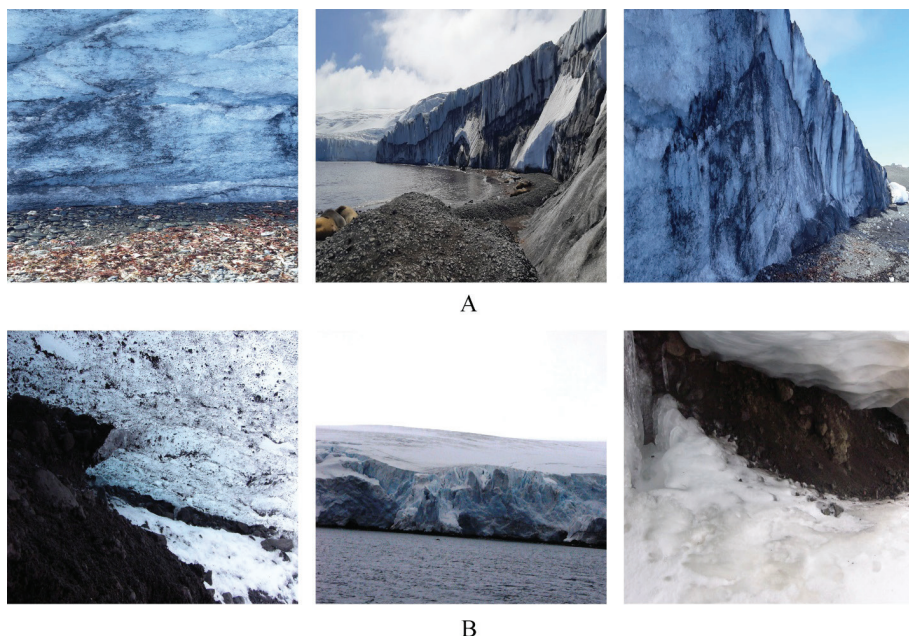


Fig. 3. Cryoconites of the western part of Antarctica:
A - Livingstone Isl.; *B* - King George Isl. Photos by Evgeny Abakumov

The chemical methods of black carbon determination

A total of 10 cryoconite samples were taken from King George and Livingstone isl., Antarctica. The contents of heavy metals and nutrients were determined. The content of heavy metals was determined according to the standard ISO method [45] at AAS Kvant 2M (Moscow, Russia). The content of nitrate and ammonium nitrogen took place according to the method [46] using potassium chloride solution. The content of mobile potassium and phosphorus was determined by the Kirsanov method [47].

Results and discussion

The study of black carbon in the Arctic zone using the example of the Svalbard archipelago

In recent years, along with an increase in interest in the Arctic sector, there has been an increase in interest in Arctic aerosols, associated with a rapid reduction of ice in the Arctic Ocean since 1979. Until the 1970s, practically no measurements were taken of the content and properties of black carbon in the Arctic zone. Decades after the creation of observatories in various areas of the Arctic, monitoring carried out by aviation, and the operation of satellite-based observation systems, reliable information about the accumulation of black carbon was obtained [48-50]. Moreover, to the present day, the issue of the influence of aerosols in the Arctic on deglaciation has not been sufficiently studied. The temporal and spatial distribution of aerosols in the atmosphere varies quite a bit based on the systematics of emissions and the air mass circulation patterns that determine the transfer of microparticles from source regions [50].

Studies in the Arctic show that at the current level of temperature increase, the Arctic Ocean may be ice-free throughout the summer within the next 30-40 years [48-50]. This will have a significant effect on sources and atmospheric aerosols, as well as on the properties and distribution of clouds in the Arctic. Aerosols are key components of the atmosphere and belong to a group of trace elements called short-lived pollutants (SLPs). The concentration of aerosols in the Arctic varies greatly throughout the year [51]. The period with the maximum concentration of aerosols in the atmosphere occurs in the spring, when elevated levels of aerosols and trace gases largely determine the matrix of the components of atmospheric trace elements. Microparticles consist mainly of sulfates and organic components, as well as ash and other trace elements resulting from anthropogenic impact. The high spring concentration of aerosols in the Arctic sector is the result of biomass burning, mainly in Russia and Kazakhstan [52].

The distribution of the mass, size, and specific surface area of aerosols is highly dependent on the season, and this seasonality is repeated annually. During the Arctic haze period (late winter and spring), particles prevail that are transported there from low latitudes, while there are no particles that form locally above Svalbard. The highest concentration of aerosols is transported from Central Europe and Russia. Throughout the year (except for June through August), most of the transported aerosols travel to the Arctic at a vector of 120 degrees, then stretch eastward to Alaska and west to the north of Siberia [1]. Only a small fraction of aerosols entering the Arctic is associated with East and Central Asia. During the summer months (June through August), a much larger fraction of aerosol-saturated airflows forms over the Atlantic Ocean; the summer season is characterized by a larger proportion of small particles [49].

The air mass transportation saturated with aerosols during periods of Arctic haze is accompanied by a low amount of precipitation (2-3 mm in 10 days), while in the summer there is a greater amount of precipitation (on average 7-8 mm in 10 days) [49]. There is a relationship between the mass of aerosols and the estimated amount of precipitation; the fall of wet precipitation largely controls the properties of the aerosol and the size of the microparticles falling on Svalbard. In the winter,

precipitation gradually reduces the accumulation of microparticles. In the summer, the amount of the increase in rainfall also affects the decrease in aerosol volume and promotes the formation and growth of new microparticles. Photochemical reactions play a key role in the formation of microparticles; the formation of new particles occurs only when the balance between the formation and removal of new particles is favorable (high photochemical activity at a low level of condensation).

During the Arctic haze, the amount of precipitation is minimal, which leads to the efficient transfer of aerosols and microparticles to the Arctic system. At this time, photochemical reactions are rather low and a large volume of previously formed aerosols prevents the formation of new particles [49, 53]. Annual and average black carbon concentrations at Svalbard in the Zeppelin station area from 1998–2010 were 39 and 27 ng*m³, respectively [49, 53], while the monthly average fluctuated from a maximum of 80 ng*m³ in February/March (the Arctic haze period) to a minimum of 0–10 ng*m³ from June to September (a period with high rainfall). Continuous data, available since 2001, indicate a trend toward a decrease in CD concentration (9.5 ng*m³ per decade) until mid-2007 [53]. The vertical distribution of aerosols in the Arctic varies greatly depending on their sources.

The work of Hegg et al. [54] also shows higher concentrations of BC particles in the spring. In the North Pole area (5±2 ng*m³), in Arctic Canada (8±3 ng*m³), as well as in Greenland (4±2 ng*m³), these concentrations are noticeably lower than those obtained in the area of the Spitsbergen archipelago. Hegg et al. [54] also notes that the highest concentrations were obtained from the Arctic sector of Eastern Eurasia (21±30 ng*m³), which correlates with the data from the Spitsbergen archipelago and confirms the idea that one of the global sources of BC in the Arctic is the consequences of the wildfires in Asia.

Investigation of black carbon in Antarctica

Intensive investigation of Antarctica in terms of the ice sheet began in the early 1950s. In 1956–1958, active research resulted in new information about the regime of the Antarctic ice sheet. According to some results, it was clear that there is an excess of snow accumulation on the Antarctic ice sheet over its discharge [55, 56]. Thus, the first snow accumulation map in Antarctica, compiled in 1961, convincingly showed the excess of snow arrival over ice consumption [55]. The work of Kotlyakov et al. [57] showed that in the 1960s and the 1970s, the total ice accumulation in Antarctica was 823.3 km³/year, while in the 1990s it was already 997.1 km³/year. Thus, it increased by 173.8 km³/year. The authors of this research indicated that in the period under review in East Antarctica, the mass balance remained positive and the positive component even increased by the end of the century. The work shows that the situation in West Antarctica is different. Thus, over the past 25–30 years, the balance of masses in Pine Island and Thwaite ice basins changed from a positive (54.2 km³/year) to a negative (–27 km³/year). Thus, from this work, it can be seen that the general regimes of the eastern and western parts of the Antarctic ice sheet are far from identical.

Other researchers have agreed that the Antarctic ice sheet is increasing. For example, in Zwally et al. [58], analysis using NASA satellite data from 1992–2008 showed that net growth was 112 billion tons of ice per year from 1992–2001. Subsequently, this net increase slowed down from 2003–2008 and amounted to 82 billion tons of ice per year. The authors estimated that the mass increase in East Antarctica remained stable from 1992–2008 and amounted to 200 billion tons per year, while ice losses in the coastal areas of Western Antarctica and the Antarctic Peninsula increased by only 65 billion tons per year. The authors say that in the eastern part of Antarctica and inland regions in the west, ice growth exceeds losses in other parts. However, this data contradict the official conclusions of the assessment reports of the Intergovernmental Panel on Climate Change at the United Nations (IPCC), which states that the average rate of decrease in ice mass of the Antarctic ice sheet increased from 30 Gt*year⁻¹ in 1992–2001 and went up to 147 Gt* year⁻¹ in 2002–2011 [31].

A group of authors in Shepherd et al. [59] also disagreed with the findings of Zwally et al. [58]. The co-authors noted that between 1992–2011, the ice sheets of Greenland, East Antarctica, West Antarctica, and the Antarctic Peninsula changed in mass by –142, +14, –65, and –20 Gt*year⁻¹, respectively. Thus, the authors argued that Antarctica's ice sheet is experiencing, in general, a constant and accelerating loss of ice. Other authors have claimed the same [59–62]. Satellite observations of the changing volume of ice balance showed that ice sheet lost 2.720 billion tons of ice between 1992–2017. During this period, ice loss in West Antarctica increased from 53 billion to 159 billion tons per year. The collapse of the ice shelf led to an increase in the rate of ice loss on the Antarctic Peninsula from 7 to 33 billion tons per year. Other works have also indicated the accelerated melting of the glaciers of West Antarctica [63–64]. Thus, the Pine Island Glacier and Thwaites glaciers are currently the largest contributors to global sea-level rise. From the mid-1990s through 2010, the mass ice balance in these territories decreased from 33.5 to 98.8 Gt*year⁻¹, almost tripling its imbalance [65]. Work on the ice sheets of Greenland and Antarctica showed that in 2006 they lost 475 Gt*year⁻¹ in total, which is equivalent to a 1.3 mm*year⁻¹ increase in sea level. It is noteworthy that the acceleration of ice cover losses over the past 18 years amounted to 21.9 Gt*year⁻¹ for Greenland and 14.5 Gt*year⁻¹ for Antarctica, which totaled 36.3 Gt*year⁻¹. This acceleration is three times greater than that for mountain glaciers and ice caps (12 Gt*year⁻¹) [61]. Thus, although there are contradictions in the issue of reducing or increasing the ice mass balance in Antarctica, most scientists believe that Antarctica is melting. However, if the temperature rise is less than 2°C relative to pre-industrial values, glaciers continue to lose mass [66]. After all, as mentioned above, the melting of snow and ice occurs not only due to a temperature increase but also due to various light-absorbing substances on the surface.

Currently, there are more than 800 active volcanoes on Earth; most of them are located in the Northern Hemisphere [67]. Volcanic ash falling on snow and

ice-covered areas, including Antarctica, increases the absorption of solar radiation by reducing reflectivity, which in turn, as mentioned above, contributes to intensive snow melting. The eruption of Chaitén volcano in Chile, which was its first major eruption, characterized by significant destruction of the dome, occurred on February 19, 2009. At the same time, a significant amount of black carbon was observed in the atmosphere above the coast near Maitri station in East Antarctica [68]. Based on this, the authors [69] suggested that the eruption of Mount Chaitén was a source of black carbon that moved from the volcanic front to the border of East Antarctica along with the near-polar current. In general, the primary sources of black carbon in the Southern Hemisphere are biomass burning in Australia, South America and Africa [70].

Many authors have studied black carbon in Antarctica. Mukunda et al. [71] examined the role of black carbon deposition in the darkening of polar snow in different seasons and estimated the coefficient of black carbon purification in the Arctic and Antarctic based on simultaneous measurements of its concentrations in the atmosphere and on the snow. The study revealed a distinct spatial and temporal variability of black carbon in the snow, although concentrations were generally low. It was found that during the summer seasons, black carbon in snow in the Arctic was higher than it was in Antarctica. At the same time, the absorption coefficient was calculated, which also showed great variability in the compared territories. The relatively higher values of the absorption coefficient over Antarctica as compared to the values over the Arctic, according to the authors, clearly indicate the difference in the mechanisms of the removal of black carbon from the atmosphere in different polar environments. A measurement of the spectral input and reflected radiation revealed albedo values that varied from 0.64 to 0.79.

The work of Khan et al. [72] showed that black carbon brought to Antarctica from other parts of the world does not significantly affect the melting of glaciers. The authors of the article studied the influence of black carbon—both brought by the wind from other continents and produced by stations and the transport of polar explorers—on the melting of ice in Antarctica. Scientists were particularly interested in how air pollution affects the conservation of the Dry Valleys—areas in the territory of Victoria Land, in which there is almost no snow or ice due to strong winds. The Dry valleys are separated by glaciers. Samples taken from one of these glaciers showed that the content of black carbon brought from other continents is too low to significantly reduce the ice-albedo. Researchers noted that local sources of black carbon pose a significant danger, as its concentration in the air near the stations reaches quite high values in strong winds.

The fact that human activity in Antarctica itself makes a significant contribution to black carbon pollution is indicated in a study on eight sections along a 1.7-km-long transect from Palmer Station, Antarctica [73]. Concentrations of black carbon increased from 1.2 to 16.5 mg due to the proximity to Palmer Station and were higher, than the concentrations in other studies of black carbon in snow, for example, in the dry McMurdo valleys. Elevated concentrations of red blood

cells around the station, according to the authors of the work, show that the local effect of the station extends for at least 1 km, similar to detection in the wind from the South Pole Station [74-75].

The fact that black carbon is present in ice and snow in Antarctica is also confirmed by the studies listed above. The fact that the content of black carbon on the snowy and icy surfaces of Antarctica affects the change in albedo and the deglaciation of the cover is noted in Casey et al. [74]. Their work presents a quantitative dataset of the *in situ* reflectivity of snow and measured and modeled albedo, as well as concentrations of black carbon and trace elements from natural to heavily polluted by snow emissions on Antarctica. More than 380 snow reflection spectra and 28 surface snow samples were collected at seven sites during the 2014-2015 summer season. The data obtained showed a variation in the concentration of black carbon in snow, from 0.14 to 7000 ppb. Albedo ranged from 0.85 in pristine snow to 0.62 in contaminated snow. The authors found that light-absorbing particles enhance surface absorption due to black carbon and trace elements, from 1 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ for pure snow to 70 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ for snow with a high content of black carbon and trace elements, and that there is intensive melting of snow and ice.

The impact of black carbon on mountain systems using the example of the Caucasus

The Caucasus is the only mountain system in Russia, information about the glaciers of which are available from the 19th, beginning of the 20th and the end of the 20th century, i.e. almost during one century. In the Caucasus, as in other mountain-glacial regions, stable deglaciation has been observed over the last few thousand years, resulting in a change in the number, area, and volume of glaciers.

Elbrus, the largest mountain-glacial massif of Russia, includes 16 major glacial streams. The glaciers on the southern slope are Big Azau, Small Azau, Garabashi, Terskol, Irik, and Irikchat. The northern slopes include Ulluchiran, Karachaul, Ullumalgenderk, Ullukol, Mikelchiran, Berjalychiran, and Chungurchatchiran. Three glaciers are on the western slopes: Byutk-tyube, Kyukyurtlu, and Ulluk. According to 2007 data, the total ice sheet area was 120 km^2 ; the largest glacier - Big Azau, 9.35 km long and 20.2 km^2 in area - are located on the southern slope. The vast Dzhikiugankez ice field, formed by the Birjalychiran and Chungurchatchiran glaciers, with a total area of 23.4 km^2 , is located on the northern slope. The Elbrus ice cap extends over a huge range of heights—from the peaks (5642 m) to the end of the Bolshoi Azau glacier (2542 m) [76].

The glaciers of the Caucasus reached their maximum borders in the middle of the 19th century. Then the volume of glaciation of Elbrus was only 20% less than it was at the height of the small ice age in the middle of the 17th century [76]. Then began a constant reduction of glaciers. Although this process was uneven, its rate as a whole gradually decreased. The first instrumental survey of the entire Elbrus glaciation was carried out in 1887-1890. It produced a topographic map compiled at a scale of 1:42,000 [77]; this map became the basis for the study of

the dynamics of glaciation in this region. Over these 50 years, the glacier area of Elbrus decreased by 12.5 km², or an average of 0.25 km² per year. In general, for the entire period from 1887-2007, the area of the Elbrus glaciers decreased from 147.5 km² to 120 km² and amounted to 27.5 km²; the average reduction in intensity was 0.23 km² per year [77].

Over the past 20 years, the mass balance of the glacier on the southern slope of Elbrus was two times lower than the norm for the entire observation period and amounted to 63 cm CE. For eight years, since 2010, its average value was already 90.4 cm CE. Currently, the reserves of ice and perennial ferns that accumulated in the second half of the 20th century are melting at an unprecedented speed. They are almost exhausted over a considerable area in the zone of 3.700-4.000 m. The cumulative mass balance has reached its minimum value over the past 50 years [78]. Degradation of the glaciation of the Caucasus is noted over the entire observation period by almost all authors [76, 79].

Basically, modeling is used to estimate the concentration of aerosols in snow mass and pollution sources [21, 80-81]. However, in addition to this, ice cores are used in studies that store information about the content of various contaminants in them, both now and in the past [82-83]. Aerosols, transported by air masses to the polar regions and in the highlands form layers with an increased concentration on the surface of the glaciers. As a result, information about the level of aerosol content is stored in the glacial core. This information can be used to identify pollution sources and atmospheric circulation features and to estimate the change in emissions over time.

For the high mountain glaciers of the Caucasus, data on the content of microparticles were first published by Davitaya [84]. From the 1970s to the 1990s, on the glaciers of the Central Caucasus and Elbrus, studies were conducted on the concentration of anthropogenic and natural aerosols, chemical compounds, and trace elements. The content of microparticles and trace elements was determined in snow, fern, and ice [85-87]. Most of this work was carried out on samples obtained from snow pits and ice cores. Kutuzov et al. [88] studied samples from snow pits on Elbrus in 2009, 2012 and 2013, in which it was found that contaminated horizons form on the glaciers of the Caucasus due to the transfer of mineral particles. Dust transfer sources were identified by using satellite images. It was found that dust was brought to the glaciers of Elbrus from the Middle East and North Africa. Dust also determined that the amount of solid matter falling from the atmosphere to the surface at high altitudes was 264 µg/cm² per year. The chemical analysis, carried out in their work with snow samples from contaminated horizons, showed a high content of nitrates, ammonium and sulfates, which was associated with the influx of dust from agricultural areas into Mesopotamia. An increased content of Cu, Zn, and Cd was found in comparison to the natural background; this fact was associated with an increased regional background of these elements in North Africa and the Middle East, as well as the probable contribution of anthropogenic aerosols. Analysis of the content of trace elements in

snow on the southern slope of Elbrus in the altitude range of 3700-5621 meters showed that snowfall in the summer enriches snow with trace elements two to three times more than winter and spring snowfalls do. In this case, the impurity of anthropogenic metals in the near-surface region increases due to long-distance transport.

During black carbon studies on the glaciers of the Caucasus, Lim et al.'s [89] obtained data from ice cores drilled at the high altitude (5115 meters above sea level) of Elbrus. The paper presents data, showing changes in the mass concentrations and sizes of black carbon, covering the period from 1825-2013. It was found that the greatest impact on the amount of black carbon was emissions in Eastern Europe. The work shows that in the first half of the 20th century, anthropogenic emissions from Europe led to an increase in the concentration of black carbon on Elbrus 1.5 times in relation to its level in the pre-industrial era (until 1850). Large temporal variability of mass concentrations of size particles was observed both seasonally and annually. Studies showed that summer concentrations increased five times, while winter concentrations increased 3.3 times between 1960 and 1980. There was a recession through 2000, and then a slight increase occurred again after 2000. Interesting data were obtained from the core layer for 2003; they showed the presence of the maximum concentration and larger particles of black carbon that year. In turn, other researchers [90], who also worked with this core, noted that snow melted in 2003. Based on this fact, it can be assumed that other authors agree [9, 91] that information about particle concentrations and sizes can provide important data needed to determine the melting of ice and snow on glaciers under the influence of black carbon.

The role of black carbon in deglaciation of terrestrial environments

Air pollution, caused by human activity normally contributes significantly to the intensive deglaciation process, as well as speeds up the process of climate change and leads to environmental degradation. Members of the UN Economic Commission for Europe adopted the "Protocol to Combat Acidification, Eutrophication and Ground-level Ozone," known as the Gothenburg Protocol. It sets emission limits for four pollutants: sulfur, nitrogen oxides, polyaromatic organic compounds and ammonia. Amendments to the Protocol indicated which countries in the region should correct their national levels of emissions of harmful substances. As part of these amendments, on October 7, 2019, international standards limited national emissions of black carbon. Additional measures are being taken to reduce black carbon emissions. For example, the Coalition for the Conservation of Climate and Air Cleanliness takes measures to improve air quality and mitigate the effects of climate change, in particular, by limiting black carbon emissions. Also, the Arctic Contaminants Action Program (ACAP) under the Arctic Council has created local projects to reduce black carbon emissions [92]. Much attention has been paid to the role of black carbon in global climate change over the past 10 years [10, 20, 93].

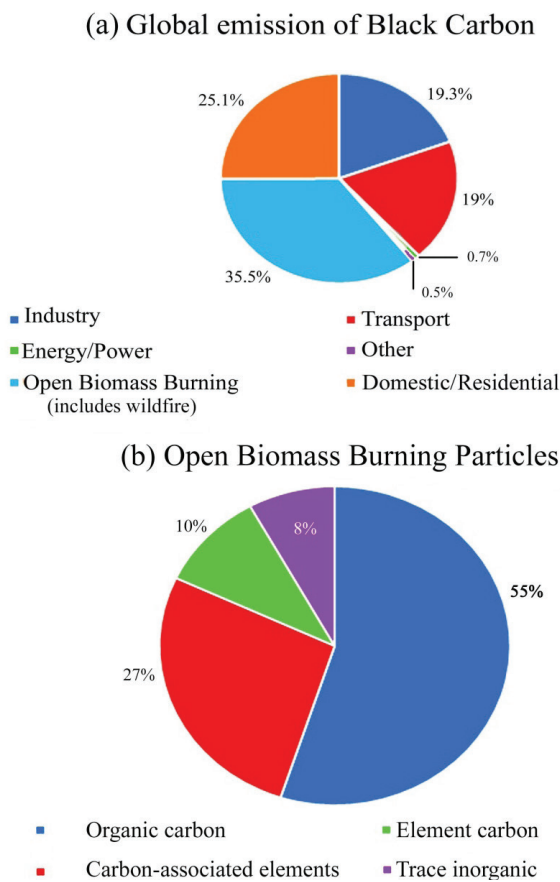


Fig. 4. (a) Global emission of black carbon; (b) Open biomass burning particles. Source: Long et al. (2013) [95]

Shindell et al. [94] researched the status of various source regions in terms of the total mass of black carbon deposits on the surface of various regions of the Arctic. This work revealed that, with the exception of Greenland, most of the black carbon throughout the year comes to the Arctic from Europe.

Of the total amount of black carbon that settles on the surface of the Arctic, pollution from Europe contributes 68%, followed by emissions from Asia, which account for 22%. As for Greenland, in contrast to other regions of the Arctic, the main role is played by pollution from North America. However, the share of Arctic pollution in different regions depends on the time of year. Flanner et al. (2007) [9] revealed that the sedimentation of black carbon on island surfaces in the spring leads to the greatest change in the albedo of snowy and icy surfaces. Shindell et al. [94] showed that the black carbon deposited in Greenland in the spring is brought in mainly by emissions from North America and East Asia.

According to the estimates of some experts, in Russia, there are two main sources of black carbon emissions: forest wildfires and the burning of firewood, coal, and liquid fuels by individuals and small plants. These two sources account for about two-thirds of ash emissions (Figure 4) [25].

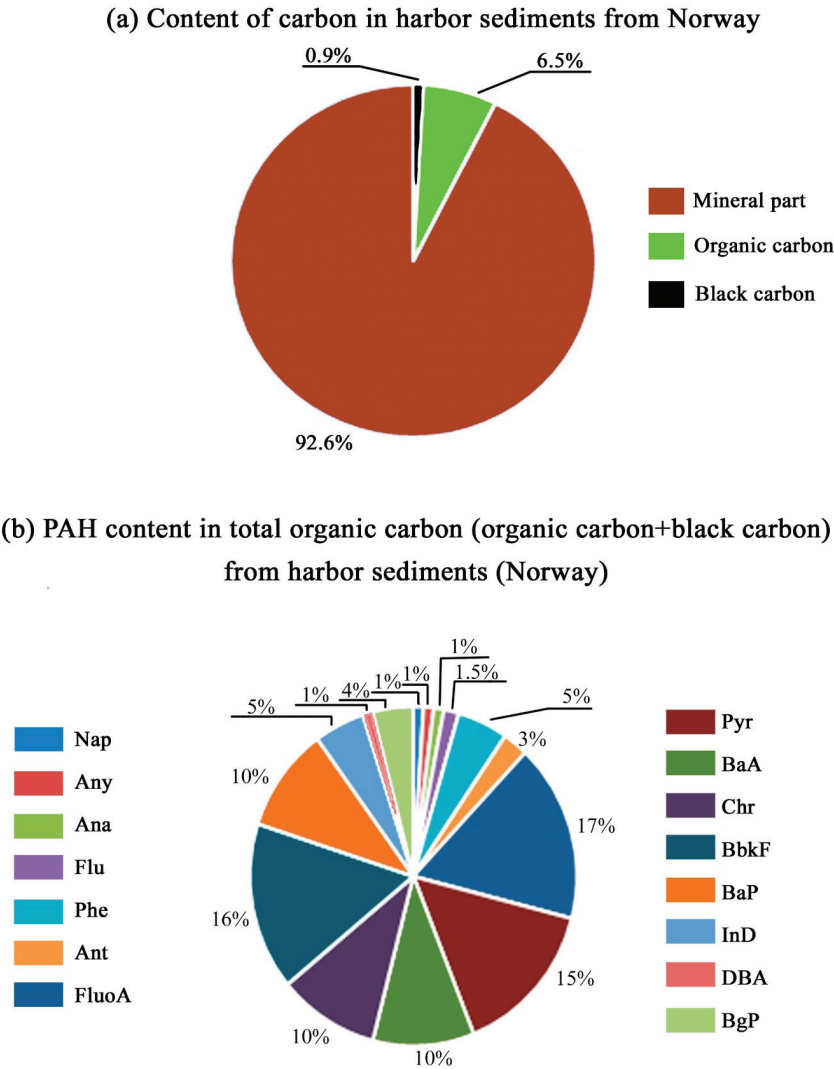


Fig. 5. Content of carbon in harbor sediments from Norway (a); PAH content in total organic carbon (organic carbon + black carbon) from harbor sediments (Norway) (b). Source: Oen et al. [103]. Nap, naphthalene; Any, acenaphthylene; Ana, acenaphthene; Flu, fluorene; Phe, phenanthrene; Ant, anthracene; FluoA, fluoranthene; Pyr, pyrene; BaA, benzo[a]anthracene; Chr, chrysene; BbkF, benzo[b,k]-fluoranthene; BaP, benzo[a]pyrene; Ind, indeno[1,2,3-cd]pyrene; DBA, dibenz[a,h]anthracene; BgP, benzo[ghi]perylene

Black carbon concentrations on the snowy and icy surfaces of Arctic environments vary greatly [96] depending on the distance to the regions from which they came and on the time of year. Warren and Wiscombe [75] estimated that when concentrations reached $15 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, the albedo is reduced by 1%. In the work that Doherty et al. [96] conducted in 1998 and from 2005-2009 in different regions of the Arctic, it was shown that according to the average values in the central Arctic, the concentration of black carbon was much lower than it was in areas close to emission sources in Russia. The lowest concentrations were measured in Greenland at an altitude of over 2000 m. Therefore, it can be argued that the farther an Arctic location is from human activity, the lower the concentration of black carbon there is, which is confirmed by several other authors [9, 97]. Regarding the influence of the season on the concentration of black carbon, it was found that in winter-spring time, a higher level of pollution in the Arctic is observed [98-100]. However, some researchers claim that the concentration is still higher in the summer [101-102].

Black carbon is also a sorbent and can accumulate various pollutants, such as trace elements and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) (Figure 5).

As it was mentioned above, black carbon is obtained as a result of industrial activities, as well as of wildfire, which determines its chemical composition. According to Oen et al. [103], black carbon, unlike elementary or organic carbon, can accumulate high levels of PAH. The data, also confirm the pyrogenic origin of PAHs in the studied sediments. From the diagram in Figure 3b, we can also observe the content of 15 priority PAHs in the composition of the pyrogenic organic matter. Thus, black carbon may form as a result of fires and industrial activity and may be a priority toxicant entering the soil or surface water.

As a result of industrial activity, trace elements also enter the atmosphere and can bind to black carbon (Figure 6).

According to Vinogradova and Kotova [104], black carbon as an aerosol can transfer trace elements to the Arctic region. The largest amount is observed near industrial centers (Kola Peninsula, Yamal-Nenets Autonomous Area). Throughout the year, aerosol concentrations change; the peak occurs at the beginning of the year (January-February) while the minimum values are observed in the summer. The transfer process is associated with the sedimentation and absorption of the aerosol molecules of black carbon and trace elements. Aerosols can accumulate together with dust in ice and snow, and form cryoconites. The dark color of black carbon and dust absorbs sunlight and go to melting of ice and snow. When ice and snow melt, there is an increase in the size of cryoconites, which become a wind shelter for soil particles and black carbon, which is carried by the wind. Thus, cryoconites are a place of accumulation of trace elements and nutrients, and specific soil-like bodies with their bacterial community are formed here. Volcanic cryoconites from King George and Livingston Islands have been analyzed (Table 1).

From the data obtained from King George and Livingstone Islands (Western Antarctica) (Table 2), one can note that mainly copper and zinc accumulate in black carbon particles.

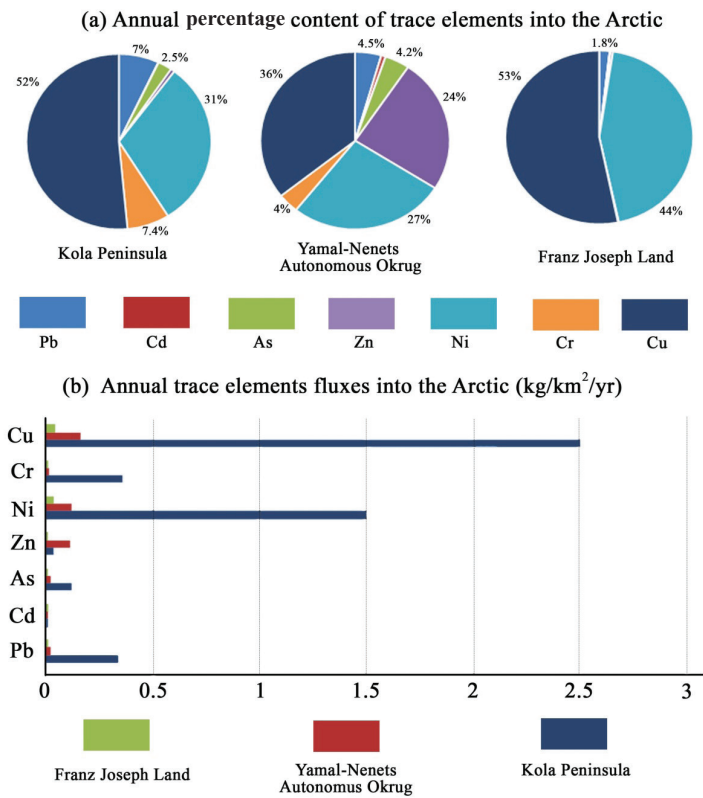


Fig. 6. Content of trace elements in the Arctic: *a* - Annual percentage; *b* - Annual trace elements fluxes in the Arctic. Source: Vinogradova and Kotova [104]

Table 1

Description of the study area in King George and Livingston Islands

Sample	Coordinates	Description of sites
1	62°9.2'S	King-George Island, cryoconites from the dome of the volcano
2	58°47.9'W	
3		
4	62°39.2' S 60° 36.4' W	Livingstone Island, glacier of Walker Bay (Hanna Point)
5	62°9.2'S 58°47.9'W	King-George Island, cryoconites from the dome of the volcano
6	62°38.3' S 60° 21.8' W	
7	62°39.2' S 60° 36.4' W	Livingstone Island, glacier of Walker Bay (Hanna Point)
8	62°37.9' S 60°20.2' W	Livingstone Island, cryoconite from the pebble beach
9	62°38.5' S 60° 36.4' W	Livingstone Island, glacier of Walker Bay (Hanna Point)
10	62°38.3' S 60°21.8' W	Livingstone Island, glacier of Walker Bay (Hanna Point)

The main source of black carbon in this part of the Antarctic is emissions from volcanic eruptions. Taking into account, the high scatter of values in the studied data sample, we can conclude that there is turbulent mixing of aerosols in the atmosphere from various sources (volcanoes, human activity, wildfires), which affects their qualitative composition.

Table 2

Content of trace elements of black carbon from cryoconite of Livingstone and King George Islands (Samples correspond to Table 1)

No	Cu, mg*kg ⁻¹	Pb, mg*kg ⁻¹	Zn, mg*kg ⁻¹	Cd, mg*kg ⁻¹	Ni, mg*kg ⁻¹	Cr, mg*kg ⁻¹
1	20.30	7.55	27.50	<0.005	9.34	4.5
2	21.00	7.05	28.90	<0.005	9.61	3.89
3	7.31	<0.01	11.70	<0.005	5.33	1.89
4	13.60	8.61	47.40	<0.005	24.2	10.60
5	9.59	2.00	17.40	<0.005	7.08	3.67
6	6.20	3.95	30.80	0.009	5.99	5.05
7	12.90	10.30	63.40	0.028	12.30	10.40
8	6.35	0.98	11.40	<0.005	4.01	1.10
9	6.28	0.19	13.00	0.024	5.17	<0.005
10	8.04	4.83	27.50	0.032	7.25	4.88
Soil from Ferraz station (King-George isl.) ^a	44	12	52	-	5.1	40
Soils from Robert isl. ^b	47.8	7.3	43.9	<0.2	40.4	52

^aSantos et al. [105].

^bDe Lima Neto et al. [106].

From the data on trace elements from the Antarctic snow cover, we can conclude that the composition of the prevailing toxicants is similar to the data we obtained: Zinc, copper, and chromium predominate [107-108], as does nickel in some areas [109].

We analyzed the amount of nutrients of black carbon (Table 3).

Table 3

Amount of nutrients of black carbon from cryoconite from Livingstone and King George Islands

№	P ₂ O ₅ , mg*kg ⁻¹	K ₂ O, mg*kg ⁻¹	N-NH ₄ , mg*kg ⁻¹	N-NO ₃ , mg*kg ⁻¹
1	22	450	122	0.3
2	21	450	147	0.3
3	27	147	23	0.1
4	552	360	45	32.7
5	38	221	74	0.3
6	143	90	44	18.2
7	280	82	2	0.3
8	160	147	0.5	2.3
9	145	147	13	2.1
10	235	172	0.2	0.1
Leptosols from King-George isl. ^a	2336	1848	461.1	155.6
Technic Cryosol from King-George isl. ^a	435	465	36.2	9.4

^aAbakumov [43].

It should be noted that mobile forms of potassium accumulate, and high concentrations of potassium may be associated with the presence of potassium in feldspars and mica; oases of eastern Antarctica are comprised of these minerals. During wind erosion, mica and feldspars can release potassium, which is a chemically active element and which, when interacting with aerosols, can move to the western part of Antarctica.

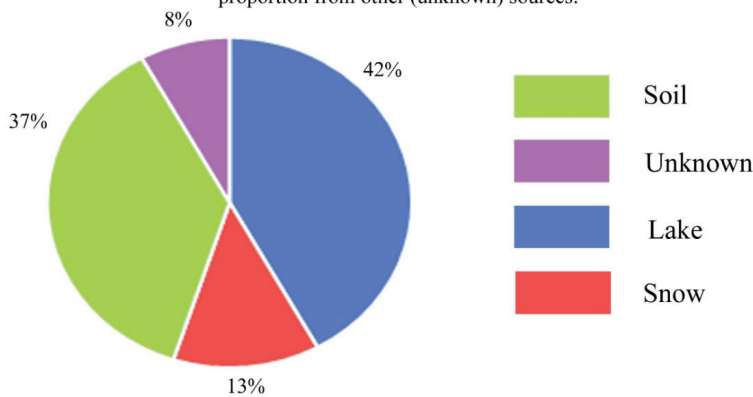
The source of phosphorus and nitrogen compounds may be associated with the avifauna of the island part of Antarctica. Birds are the main source of nutrients in Antarctica. An increase in the nutrient content of soil-like bodies can lead to the formation of a green vegetation cover, which absorbs fewer sun rays than black particles and reduce the rate of deglaciation. According to previous studies of ornithogenic soils, the content of mobile forms of nutrients is much higher, which is associated with the direct accumulation of nutrients and low rates of microbiological activity in Antarctic soils [43]. In terms of the background nutrient content in soils from King George Island, there is a high nutrient content compared to cryoconite samples. This distribution of nutrients is associated with the atmospheric accumulation of organo-mineral substances in cryoconite from the local soil region. The most similar nutrient content of cryoconite is found in the technogenic soils from the same area. Based on this, it can be concluded that the organo-mineral substances that accumulate in cryoconite are the least suitable ones for the development of plants and soil microbiota. The low content of nutrients in cryoconite is due to the fact that birds (the main source of nutrients in this region) prefer to nest on rock baths and natural soils.

The main problem associated with PAHs and trace elements is that, when the albedo and deglaciation take place, the contaminated black carbon enters the soil. In glacier regions, this solution of black carbon in water can damage fragile Arctic aquatic ecosystems. The cryoconites, where black carbon accumulates, are soil-like bodies and the threshold concentrations of trace elements and PAHs do not apply to them. Also, depending on the region, the background values of the concentrations change. Cross-border transport between continents is another problem in terms of limiting emissions. Therefore, at the moment, there is another problem in determining the status of black carbon as an environmental pollutant.

In the polar zone, black carbon, together with dust, can accumulate in cryoconite; in such a place, similar to soil-like bodies, a specific microbial community can form. Figure 7 shows the microbial community forming in cryoconite in Antarctica. According to Lutz et al. [110], bacterial communities form in cryoconite depending on objects that are at some distance (soil cover, lakes, snow). Bacteria do not die but can exist for years in an isolated state and sustain their community.

Black carbon harms not only the Arctic ice but also mountain glaciers. The effect of warming due to the pollution of snow and ice is manifested more in mountainous areas such as the Himalayas, Tibet, and other regions with a large area of glaciers. This is stated by the United Nations Environment Program and the World Meteorological Organization [93].

(a) The relative contributions of lake, soil and snow habitats as potential sources for the composition of the bacterial community in the cryoconite hole samples, as well as the proportion from other (unknown) sources.



(b) The bacterial community composition of all cryoconite hole samples with the nine most abundant bacterial classes

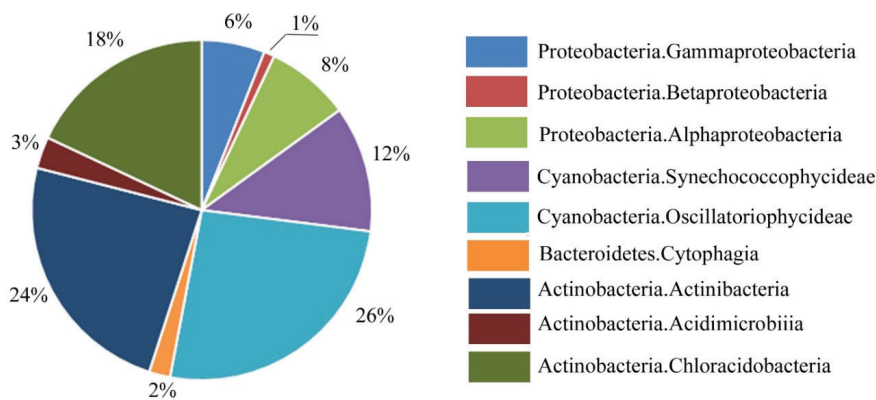


Fig. 7. Bacterial community in North Antarctica. (a) The relative contributions of lake, snow and soil habitats as potential sources of the composition of the bacterial community in the cryoconite hole samples, as well as the proportion from other (unknown) sources; (b) The bacterial community composition of all cryoconite hole samples with the nine most abundant bacterial classes. Source: Lutz et al. [110].

The relative contributions of lake, snow and soil habitats as potential sources.

Conclusions

Black carbon plays a key role in deglaciation in particular, and climate change, in general. Thus, its comprehensive study is necessary, especially in the Arctic, the Antarctic and mountain regions. Black carbon in the Arctic accumulates main-

ly in the spring (February-March); its concentration in the air can reach $80 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$. Black carbon is a short-lived climatic factor, determined mainly by natural activities (volcanic eruptions, fires), and can contribute to the deglaciation of ice and snow in polar regions. During the transfer of microparticles, BC to aerosol macromolecules are capable of being transported tens of thousands of kilometers from their source. It was noted that most of the Arctic BC is transferred there from Europe, Russia and Kazakhstan. In the Antarctic, black carbon arises from the activities of research stations located around the continent's perimeter, while the wind stream from New Zealand and Australia transfers BC here from low latitudes. In mountainous regions, for example, the Central Caucasus, it is rather difficult to assess the sources of pollution. Mountains are a barrier through which air masses practically do not pass, and most precipitation falls at the foot. It is also rather difficult to predict the effect of black carbon on deglaciation, as this depends on several factors (climatic parameters, emissions from industrial centers, the activity of volcanoes, fires, etc.). Currently, it is not possible to create reliable models of the accumulation of black carbon on the surface of ice and snow. A further study of the qualitative and quantitative composition of BC in the atmosphere and on glaciers will contribute to the parameterization of the global carbon cycle, as well as will prevent the pollution of the water and soil of the polar regions. Together with black carbon, PAHs and trace elements, which can get into the waters and soils of the polar systems during the melting of snow and ice, fall into the Arctic.

References

1. Hirdman D, Sodemann H, Eckhardt S, Burkhardt JF, Jefferson A. Source identification of short-lived air pollutants in the Arctic using statistical analysis of measurement data and particle dispersion model output. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2010;10:669-693. doi: [10.5194/acp-10-669-2010](https://doi.org/10.5194/acp-10-669-2010)
2. Mitchell JM. Visual range in the polar regions with particular reference to the Alaskan Arctic. *J Atmospheric and Terrestrial Physics*. 1957;17:195-211.
3. Shaw GE. Evidence for a central Eurasian source area of Arctic haze in Alaska. *Nature*. 1983;299:815-818.
4. Shaw GE. The Arctic haze phenomenon. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 1995;76:2403-2413.
5. Schnell RC, Watson TB, Bodhaine BA. NOAA WP-3D instrumentation and flight operations on AGASP-II. *J Atmospheric Chemistry*. 1989;9:1-16.
6. Schnell RC. Arctic haze and the Arctic gas and aerosol sampling program (AGASP). *Geophysical Research Letters*. 1984;11(5):361-364.
7. Quinn PK, Bates TS, Baum E, Bond T, Burkhardt JF, Fiore AM, Flanner M, Garrett TJ, Koch D, McConnell J, Shindell D, Stohl A. The Impact of Short-Lived Pollutants on Arctic Climate. AMAP Technical Report No. 1. Oslo, Norway: Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP) Publ.; 2008. 23 p.
8. Dumont M, Brun E, Picard G. Contribution of light-absorbing impurities in snow to Greenland's darkening since 2009. *Nature Geoscience*. 2014;7:509-512. doi: [10.1038/ngeo2180](https://doi.org/10.1038/ngeo2180)
9. Flanner M, Zender C, Randerson J, Rasch P. Present-day climate forcing and response from black carbon in snow. *J Geophysical Research*. 2007;112:D11202. doi: [10.1029/2006JD008003](https://doi.org/10.1029/2006JD008003)

10. Quinn PK, Stohl A, Arnold S, Baklanov A, Berntsen TK, Christensen JH, Eckhardt S, Flanner M, Klimont Z, Korsholm US, Kupiainen K, Langner J, Law K, Monks S, Salzen von K, Sand M, Schmale J, Vestreng V. AMAP Assessment 2015: Black carbon and ozone as Arctic climate forcers. Oslo, Norway: Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP) Publ.; 2015. 116 p.
11. Clarke AD, Noone KJ. Soot in the Arctic snowpack: a cause for perturbations in radiative transfer. *Atmospheric Environment*. 1985;19:2045-2053. doi: [10.1016/j.atmosenv.2007.10.059](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.10.059)
12. Stroeve J, Serreze M, Holland M, Kay J, Maslanik J. The Arctic's rapidly shrinking sea ice cover: A research synthesis. *Climatic Change*. 2012;110(3-4):1005-1027. doi: [10.1007/s10584-011-0101-1](https://doi.org/10.1007/s10584-011-0101-1)
13. Hansen J, Nazarenko L. Soot climate forcing via snow and ice albedos. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2004;101(2):423-428. doi: [10.1073/pnas.2237157100](https://doi.org/10.1073/pnas.2237157100)
14. *Report to Congress on Black Carbon*. Sasser E, editor. EPA-450/R-12-001. USA: Department of the Interior, Environment, and Related Agencies Appropriations Act, 2010; 2012. 388 pp. Available at: https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?Lab=OA&QPS&count=10000&dirEntryId=240148&searchall=&showcriteria=2&simplesearch=0&imstype (access 15.09.2020)
15. Bond TC, Zarzycki C, Flanner MG, Koch DM. Quantifying immediate radiative forcing by black carbon and organic matter with the Specific Forcing Pulse. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2011;11:1505-1525. doi: [10.5194/acp-11-1505-2011](https://doi.org/10.5194/acp-11-1505-2011)
16. Vinogradova AA, Smirnov NS, Korotkov VN. Anomalous wildfires in 2010 and 2012 on the territory of Russia and supply of black carbon to the Arctic. *Atmospheric and Oceanic Optics J*. 2016;29:545-550. doi: [10.1134/S1024856016060166](https://doi.org/10.1134/S1024856016060166)
17. Bachmann J. Black Carbon: A Science-Policy Primer. Arlington, USA: Pew Center on Global Climate Change; 2009. 47 p.
18. Gorchakova IA. Radiation and temperature effects of smoke aerosol in the Moscow region during the summer fires of 2010. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2012;48:496-503. doi: [10.1134/S0001433812050039](https://doi.org/10.1134/S0001433812050039)
19. Twomey S. The influence of pollution on the shortwave albedo of clouds. *J Atmospheric Sciences*. 1977;34:1149-1152. doi: [10.1175/1520-0469\(1977\)034<1149:TIOPOT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1977)034<1149:TIOPOT>2.0.CO;2)
20. Bond TC, Doherty SJ, Fahey DW, Forster PM, Berntsen T, DeAngelo BJ, Flanner MG, Ghan S, Kärcher B, Koch D, Kinne S, Kondo Y, Quinn PK, Sarofim MC, Schultz MG, Schulz M, Venkataraman C, Zhang H, Zhang S, Bellouin N, Guttikunda SK, Hopke PK, Jacobson MZ, Kaiser JW, Klimont Z, Lohmann U, Schwarz JP, Shindell D, Storelvmo T, Warren SG, Zender CS. Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment. *J Geophysical Research*. 2013;118(11):5380-5552. doi: [10.1002/jgrd.50171](https://doi.org/10.1002/jgrd.50171)
21. Jacobson MZ. Strong radiative heating due to the mixing state of black carbon in atmospheric aerosols. *Nature*. 2001;409:695-697. doi: [10.1038/35055518](https://doi.org/10.1038/35055518)
22. Makarov VI, Popova SA. Mnogoletnie issledovaniya dinamiki kontsentratsii chernogo (elementnogo) ugleroda v atmosfere novosibirskoy oblasti [Long term trends in black (elemental) carbon concentrations in the ambient air of Novosibirsk region]. *Interesko Geo-Sibir = Interexpo Geo-Siberia*. 2016;4(2):141-144. In Russian
23. Molina M, Zaelke D, Madhava Sarma K, Andersen AO, Ramanathan V, Kaniaru D. Reducing abrupt climate change risk using the Montreal Protocol and other regulatory actions to complement cuts in CO₂ emissions. *Proceedings of National Academy of Sciences*. 2009;106(49):20616-20621. doi: [10.1073/pnas.0902568106](https://doi.org/10.1073/pnas.0902568106)
24. Karol IL, Kiselev AA. Klimat budushchego: vzglyad iz nastoyashchego [Climate of the future: A look from the present]. *Priroda*. 2011;1:3-9. In Russian

25. *National report on the actions on black carbon and methane emissions reduction*. The Arctic Council Framework for Action on Enhanced Black Carbon and Methane Emissions Reductions. Canada: Iqaluit. Publ.; 2015. 34 pp. Available at: <https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/corporate/international-affairs/partnerships-organizations/arctic-reducing-black-carbon-methane.html> (access at 20.07.2020)
26. Vinogradova AA, Smirnov NS, Korotkov VN, Romanovskaya AA. Forest fires in Siberia and the Far East: Emissions and atmospheric transport of black carbon to the Arctic. *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2015;28(6):566-574. doi: [10.1134/S1024856015060184](https://doi.org/10.1134/S1024856015060184)
27. Lamarque JF, Bond C, Eyring V, Granier C, Heil A, Klimont Z, Lee D, Liousse C, Mieville A, Owen B, Schultz MG, Shindell D, Smith SJ, Stehfest E, Aardenne JV, Cooper OR, Kainuma M, Mahowald N, McConnell JR, Naik V, Rishi K, Vuuren DP. Historical (1850-2000) gridded anthropogenic and biomass burning emissions of reactive gases and aerosols: methodology and application. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2010;10:7017-7039. doi: [10.5194/acp-10-7017-2010](https://doi.org/10.5194/acp-10-7017-2010)
28. Stier P, Seinfeld JH, Kinne S, Feichter J, Ouchterlony OB. Impact of nonabsorbing anthropogenic aerosols on clear-sky atmospheric absorption. *J Geophysical Research: Atmospheres*. 2006;111:D18201. doi: [10.1029/2006JD007147](https://doi.org/10.1029/2006JD007147)
29. Smirnov NS, Korotkov VN, Romanovskaya AA. Black carbon emissions from natural fires on the lands of the forest fund of the Russian Federation in 2007-2012. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2015;40:435-442. doi: [10.3103/S1068373915070018](https://doi.org/10.3103/S1068373915070018)
30. Stone RS, Sharma S, Herber A, Eleftheriadis K, Nelson DW. A characterization of Arctic aerosols on the basis of aerosol optical depth and black carbon measurements. *Elementa: Science of the Anthropocene*. 2014;2:000027. doi: [10.12952/journal.elementa.000027](https://doi.org/10.12952/journal.elementa.000027)
31. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of IPCC the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Stocker TF, Qin D, Plattner G.-K., Tignor MMB, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V and Midgley PM, editors. Cambridge: Cambridge University Press, 2014. Available at: <https://boris.unibe.ch/71452> (access 15.10.2020)
32. Alekseev GV. The Arctic dimension of Global Warming. *Ice and Snow*. 2014;54(2):53-68. doi: [10.15356/2076-6734-2014-2-53-68](https://doi.org/10.15356/2076-6734-2014-2-53-68) In Russian
33. Antoniades D, Francus P, Pienitz R, St-Onge G, Vincent WF. Holocene dynamics of the Arctic's largest ice. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2011;108(47):18899-18904. doi: [10.1073/pnas.1106378108](https://doi.org/10.1073/pnas.1106378108)
34. Comiso JC, Parkinson CL, Gersten R, Stock L. Accelerated decline in the Arctic sea ice cover. *Geophysical Research Letters*. 2008;35:L01703. doi: [10.1029/2007GL031972](https://doi.org/10.1029/2007GL031972)
35. Stroeve JC, Kattsov V, Barrett A. Trends in Arctic sea ice extent from CMIP5, CMIP3 and observations. *Geophysical Research Letters*. 2012;39:L16502. doi: [10.1029/2012GL052676](https://doi.org/10.1029/2012GL052676)
36. Stroeve JC, Serreze MC, Holland MM. The Arctic's rapidly shrinking sea ice cover: A research synthesis. *Climate Change*. 2012;110:1005-1027. doi: [10.1007/s10584-011-0101-1](https://doi.org/10.1007/s10584-011-0101-1)
37. Overland JE, Wang M. When will the summer arctic be nearly sea ice free. *Geophysical Research Letters*. 2013;40(10):2097-2101. doi: [10.1002/grl.50316](https://doi.org/10.1002/grl.50316)
38. Brown R, Derksen C, Wang LB. A multi-data set analysis of variability and change in Arctic spring snow cover extent. *J Geophysical Research: Atmospheres*. 2010;115:D16111. doi: [10.1029/2010JD013975](https://doi.org/10.1029/2010JD013975)
39. Derksen C, Brown R. Spring snow cover extent reductions in the 2008-2012 period exceeding climate model projections. *Geophysical Research Letters*. 2012;39:L19504. doi: [10.1029/2012GL053387](https://doi.org/10.1029/2012GL053387)
40. Brown RD, Mote PW. The response of Northern Hemisphere snow cover to a changing climate. *J Climate*. 2009;22:2124-2145. doi: [10.1175/2008JCLI2665.1](https://doi.org/10.1175/2008JCLI2665.1)

41. *Expert Group on Black Carbon and Methane*. Expert Group on Black Carbon and Methane - Summary of Progress and Recommendations 2019. Norway: Arctic Council; 2019. 88 pp. Available at: <http://hdl.handle.net/11374/2411> (access 10.10.2020)
42. Polyakov V, Zazovskaya E, Abakumov V. Molecular composition of humic substances isolated from selected soils and cryconite of the Grøn fjorden area. Spitsbergen. *Polish Polar Research*. 2019;40(2):105-120. doi: [10.24425/ppr.2019.128369](https://doi.org/10.24425/ppr.2019.128369)
43. Abakumov E. Content of available forms of nitrogen, potassium and phosphorus in ornithogenic and other soils of the Fields Peninsula (King George Island, Western Antarctica). *Biological Communications*. 2018;63(2):109-116. doi: [10.21638/spbu03.2018.203](https://doi.org/10.21638/spbu03.2018.203)
44. Heg DA, Warren SG, Grenfell TC, Doherty SJ, Larson TV, Clarke AD. Source attribution of black carbon in arctic snow. *Environmental Science & Technology*. 2009;43:4016-4021. doi: [10.1021/es803623f](https://doi.org/10.1021/es803623f)
45. *ISO 11047-1998*. Soil quality - Determination of cadmium, cobalt, copper, lead, manganese, nickel and zinc in aqua regia extracts of soil - Flame and electrothermal atomic absorption spectrometric methods. Moscow: Standardinform Publ.; 1998. 18 p. Available at: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/6e5c2955-71f9-48de-be0b-58c161f04894/sist-iso-11047-1999> (access 10.02.2020)
46. *DIN ISO/TS 14256-1-2003*. Soil quality - Determination of nitrate, nitrite and ammonium in field moist soils by extraction with potassium chloride solution – Pt. 1: Manual method. Moscow: Standardinform Publ.; 2003. 14 p. Available at: <https://www.iso.org/standard/36706.html> (access 10.02.2020)
47. *GOST R 54650-2011*. Soils. Determination of mobile phosphorus and potassium compounds by Kirsanov method modified by CINAQ. Moscow: Standardinform Publ.; 2011. 14 p. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/gost-r-54650-2011> (access 10.02.2020)
48. Serreze MC, Holland MM, Stroeve J. Perspectives on the Arctic's shrinking sea-ice cover. *Science*. 2007;315:1533-1536. doi: [10.1126/science.1139426](https://doi.org/10.1126/science.1139426)
49. Tunved P, Strom J, Krejci R. Arctic aerosol life cycle: linking aerosol size distributions observed between 2000 and 2010 with air mass transport and precipitation at Zeppelin station, Ny-Alesund, Svalbard. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2013;13:3643-3660. doi: [10.5194/acp-13-3643-2013](https://doi.org/10.5194/acp-13-3643-2013)
50. Wang MY, Overland JE. A sea ice free summer Arctic within 30 years? *Geophysical Research Letters*. 2009;36:L18501. doi: [10.1029/2009GL037820](https://doi.org/10.1029/2009GL037820)
51. Strom J, Umegard J, Torseth K, Tunved P, Hansson HC, Holmen K, Wismann V, Herber A, Konig-Langlo G. One year of particle size distribution and aerosol chemical composition measurements at the Zeppelin Station, Svalbard, March 2000-March 2001. *Physics and Chemistry of the Earth*. 2001;28:1181-1190. doi: [10.1016/j.pce.2003.08.058](https://doi.org/10.1016/j.pce.2003.08.058)
52. Warneke C, Bahreini R, Brioude J, Brock CA, de Gouw JA, Fahey DW, Froyd KD, Holloway JS, Middlebrook A, Miller L, Montzka S, Murphy DM, Peischl J, Ryerson TB, Schwarz JP, Spackman JR, Veres P. Biomass burning in Siberia and Kazakhstan as an important source for haze over the Alaskan Arctic in April 2008. *Geophysical Research Letters*. 2009;36:L02813. doi: [10.1029/2008GL036194](https://doi.org/10.1029/2008GL036194)
53. Eleftheriadis K, Vratolis S, Nyeki S. Aerosol black carbon in the European Arctic: Measurements at Zeppelin station, Ny-Ålesund, Svalbard from 1998-2007. *Geophysical Research Letters*. 2009;36:L02809. doi: [10.1029/2008GL035741](https://doi.org/10.1029/2008GL035741)
54. Hegg DA, Warren SG, Grenfell TC, Doherty SJ, Clarke AD. Sources of light-absorbing aerosol in arctic snow and their seasonal variation. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2010;10:10923-10938, doi: [10.5194/acp-10-10923-2010](https://doi.org/10.5194/acp-10-10923-2010)
55. Kotlyakov VM. Intensivnost' pitaniya lednikovogo pokrova Antarktidy [Nutritional intensity of the Antarctic ice sheet]. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy. Chronicle, discussion*. 1961;1:53-58. In Russian

56. Kotlyakov VM. O sovremennom uvelichenii massy lednikovogo pokrova Antarktidy [On the current increase in the mass of the ice sheet of Antarctica]. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy. Chronicle, discussion*. 1962;5:39-44. In Russian
57. Kotlyakov VM, Glazovsky AF, Moskalevsky MY. Dynamics of the ice mass in Antarctica in the time of warming. *Ice and Snow*. 2017;57(2):149-169. doi: [10.15356/2076-6734-2017-2-149-169](https://doi.org/10.15356/2076-6734-2017-2-149-169) In Russian
58. Zwally JH, Li J, Robbins JW, Saba JL, Yi D, Brenner AC. Mass gains of the Antarctic ice sheets exceeded losses. *J Glaciology*. 2015;61(230):1019-1036. doi: [10.3189/2015JoG15J071](https://doi.org/10.3189/2015JoG15J071)
59. Shepherd A, Ivins ER, Geruo F, Barletta VR, Bentley MJ, Bettadpur S, Briggs KH, Bromwich DH, Forsberg R, Galin N, Horwath M, Jacobs S, Joughin I, King MA, Lenaerts JTM, Li J, Ligtenberg SRM, Luckman A, Luthcke SB, McMillan M, Meister Rakia MG, Mouginot J, Muir A, Nicolas JP, Paden J, Payne AJ, Pritchard H, Rignot E, Rott H, Sorensen LS, Scambos TA, Scheuchl B, Schrama EJO, Smith B, Sundal AV, van Angelen JH, van de Berg WJ, van den Broeke MR, Vaughan DG, Velicogna I, Wahr J, Whitehouse L, Wingham DJ, Yi D, Young D, Zwally HJ. A reconciled estimate of ice-sheet mass balance. *Science*. 2012;338(6111):1183-1189. doi: [10.1126/science.1228102](https://doi.org/10.1126/science.1228102)
60. Dickens WA, Kuhn G, Leng MJ. Enhanced glacial discharge from the eastern Antarctic Peninsula since the 1700s associated with a positive Southern Annular Mode. *Scientific Reports*. 2019;9:14606. doi: [10.1038/s41598-019-50897-4](https://doi.org/10.1038/s41598-019-50897-4)
61. Rignot E, Velicogna I, van den Broeke MR, Monaghan A, Lenaerts J. Acceleration of the contribution of the Greenland and Antarctic ice sheets to sea level rise. *Geophysical Research Letters*. 2011;38:L05503. doi: [10.1029/2011GL046583](https://doi.org/10.1029/2011GL046583)
62. Shepherd A, Ivins E, Rignot E. Mass balance of the Antarctic Ice Sheet from 1992 to 2017. *Nature*. 2018;558:219-222. doi: [10.1038/s41586-018-0179-y](https://doi.org/10.1038/s41586-018-0179-y)
63. Dutrieux P, Vaughan DG, Corr HFJ, Jenkins A, Holland PR, Joughin I, Fleming AH. Pine Island glacier ice shelf melt distributed at kilometre scales. *The Cryosphere*. 2013;7:1543-1555. doi: [10.5194/tc-7-1543-2013](https://doi.org/10.5194/tc-7-1543-2013)
64. Feldmann J, Levermann A, Mengel M. Stabilizing the West Antarctic ice sheet by surface mass deposition. *Science Advances*. 2019;5(7):4132. doi: [10.1126/sciadv.aaw4132](https://doi.org/10.1126/sciadv.aaw4132)
65. Medley B, Joughin I, Smith BE, Das SB, Steig EJ, Conway H, Gogineni S, Lewis C, Criscitiello AS, McConnell JR, van den Broeke MR, Lenaerts JTM, Bromwich DH, Nicolas JP, Leuschen C. Constraining the recent mass balance of Pine Island and Thwaites glaciers, West Antarctica, with airborne observations of snow accumulation. *The Cryosphere*. 2014;8:1375-1392. doi: [10.5194/tc-8-1375-2014](https://doi.org/10.5194/tc-8-1375-2014)
66. Pattyn F, Ritz C, Hanna E. The Greenland and Antarctic ice sheets under 1.5 °C global warming. *Nature Climate Change*. 2018;8:1053-1061. doi: [10.1038/s41558-018-0305-8](https://doi.org/10.1038/s41558-018-0305-8)
67. Girina OA, Gordeev EI. Proekt KVERT - snizhenie vulkanicheskoy opasnosti dlya aviatsii pri eksplozivnykh izverzheniyakh vulkanov kamchatki i severnykh kuril [KVERT Project: Reduction of volcanic hazards for aviation from explosive eruptions of Kamchatka and Northern Kuriles volcanoes]. *Vestnik Dal'nevostochnogo Otdeleniya Rossiyskoy Akademii Nauk = Vestnik of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences*. 2007;2:100-109. In Russian
68. Chaubey JP, Moorthy KK, Babu SS, Nair VS, Tiwari A. Black carbon aerosols over Antarctica and its scavenging by snow during the southern hemispheric summer. *J Geophysical Research*. 2010;115:D10210. doi: [10.1029/2009JD013381](https://doi.org/10.1029/2009JD013381)
69. Akilan A, Abdul Azeez KK, Schuh H, Padhy S, Kumar Kotluri S. Perturbations in atmospheric gaseous components over coastal Antarctica detected in GPS signals and its natural origin to volcanic eruption. *Polar Science*. 2019;19:69-76. doi: [10.1016/j.polar.2018.11.009](https://doi.org/10.1016/j.polar.2018.11.009)
70. Hara K, Sudo K, Ohnishi T, Osada K, Yabuki M, Shiobara M, Yamanouchi T. Seasonal features and origins of carbonaceous aerosols at Syowa Station, coastal Antarctica. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2019;19:7817-7837. doi: [10.5194/acp-19-7817-2019](https://doi.org/10.5194/acp-19-7817-2019)

71. Mukunda MS, Suresh BK, Pandey VN, Aditya VA, Girach NK. Scavenging ratio of black carbon in the Arctic and the Antarctic. *Polar Science*. 2018;16:10-22. doi: [10.1016/j.polar.2018.03.002](https://doi.org/10.1016/j.polar.2018.03.002)
72. Khan AL, McMeeking GR, Schwarz JP, Xian P, Welch KA, Berry Lyons W, McKnight DM. Near-surface refractory black carbon observations in the atmosphere and snow in the McMurdo Dry Valleys, Antarctica, and potential impacts of foehn winds. *J Geophysical Research: Atmospheres*. 2018;123:2877-2887. doi: [10.1002/2017JD027696](https://doi.org/10.1002/2017JD027696)
73. Khan AL, Klein AG, Katich JM, Xian P. Local emissions and regional wildfires influence refractory black carbon observations near Palmer Station, Antarctica. *Frontiers in Earth Science*. 2019;7:49. doi: [10.3389/feart.2019.00049](https://doi.org/10.3389/feart.2019.00049)
74. Casey KA, Kaspari SD, Skiles SM, Kreutz K, Handley MJ. The spectral and chemical measurement of pollutants on snow near South Pole, Antarctica. *J Geophysical Research: Atmospheres*. 2017;122:6592-6610. doi: [10.1002/2016JD026418](https://doi.org/10.1002/2016JD026418)
75. Warren S, Wiscombe W. A model for the spectral albedo of snow. 2. Snow containing atmospheric aerosols. *J the Atmospheric Sciences*. 1980;37:2734-2745. doi: [10.1175/1520-0469\(1980\)037<2734:AMFTSA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1980)037<2734:AMFTSA>2.0.CO;2)
76. Zolotarev EA, Seliverstov YG, Kharkovets EG. Evolyutsiya oledeneniya El'brusa s nachala malogo lednikovogo perioda [Evolution of the glaciation of Elbrus from the beginning of the small ice age]. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy. Data of Glaciological Studies*. 1999;87:112-118. In Russian
77. Pastukhov AV. Soobshchenie o voskhozhdenii na El'brus 31 iyulya 1890 goda [Report of the ascent of Elbrus on July 31, 1890]. *Zapiski Kavkazskogo otdela Russkogo geograficheskogo obshchestva* [Notes of Caucasian Department of Russian Geography Society]. Tiflis. 1893. Book 15. 22-37 pp.
78. Rototaeva OV, Nosenko GA, Kerimov AM, Kutuzov SS, Lavrentiev II, Nikitin SA, Kerimov AA, Tarasova LN. Changes of the mass balance of the Garabashy Glacier, Mount Elbrus, at the turn of 20th and 21st centuries. *Ice and Snow*. 2019;59(1):5-22. doi: [10.15356/2076-6734-2019-1-5-22](https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-1-5-22) In Russian
79. Rototaeva OV, Nosenko GA, Khmelevskoy IF, Tarasova LN. Balansovoe sostoyanie lednika Garabashi (El'brus) v 80-ki i 90-ki godakh XX stoletiya [The balance state of the Garabashi glacier (Elbrus) in the 80s and 90s of the XX century]. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. 2003;95:111-121. In Russian
80. Bond TC, Streets DG, Yarber KF, Nelson SM, Woo JH, Klimont Z. A technology-based global inventory of black and organic carbon emissions from combustion. *J Geophysical Research*. 2004;109:D14203. doi: [10.1029/2003JD003697](https://doi.org/10.1029/2003JD003697)
81. Koch D, Schulz M, Kinne S. Evaluation of black carbon estimations in global aerosol models. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2009;9:9001-9026. doi: [10.5194/acp-9-9001-2009](https://doi.org/10.5194/acp-9-9001-2009)
82. McConnell JR, Edwards R, Kok GL, Flanner MG, Zender CS, Saltzman ES, Banta JR, Pasteris DR, Carter MM, Kahl JDW. 20th-century industrial black carbon emissions altered arctic climate forcing. *Science*. 2007;317:1381-1384. doi: [10.1126/science.1144856](https://doi.org/10.1126/science.1144856)
83. Mikhalevko V, Sokratov S, Kutuzov S, Ginot P, Legrand M, Preunkert S, Lavrentiev I, Kozachek A, Ekaykin A, Faïn X, Lim S, Schotterer U, Lipenkov V, Toropov P. Investigation of a deep ice core from the Elbrus western plateau, the Caucasus, Russia. *The Cryosphere*. 2015;9:2253-2270. doi: [10.5194/tc-9-2253-2015](https://doi.org/10.5194/tc-9-2253-2015)
84. Davitaya FF. Dust content as a factor affecting glaciation and climatic change. *Annals of the American Association of Geographers*. 1969;59(3):552-60. doi: [10.1111/j.1467-8306.1969.tb00690.x](https://doi.org/10.1111/j.1467-8306.1969.tb00690.x)
85. Rototaeva OV, Khmelevskoi IF, Bazhev AB, Heintzenberg I, Stenberg M, Pinglo J. Stroenie i khimicheskii sostav deyatel'nogo sloya lednika Bol'shoy Azau (El'brus) v oblasti pitaniya [The structure and chemical composition of the active layer of the Bolshoi Azau glacier

- (Elbrus) in the nutrition area]. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. 1998;84:25-33. In Russian
86. Rototaeva OV, Kerimov AM, Khmelevskoi IF. Soderzhanie makroelementov v lednikakh yuzhnogo sklona El'brusa [The content of macronutrients in the glaciers of the southern slope of Elbrus]. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. 1999;87:98-105. In Russian
 87. Zalikhanov MC, Kerimov AM, Stepanov GV, Chernyak MM. Zagryaznenie lednikov Tsentral'nogo Kavkaza [Pollution of glaciers of the Central Caucasus]. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. 1992;75:15-22. In Russian
 88. Kutuzov SS, Mikhaleiko VN, Shahgedanova MV, Ginot P, Kozachek AV, Kuderina TM, Lavrentiev II, Popov GV. Ways of far-distance dust transport onto Caucasian glaciers and chemical composition of snow on the Western plateau of Elbrus. *Ice and Snow*. 2014;54(3):5-15. doi: [10.15356/2076-6734-2014-3-5-15](https://doi.org/10.15356/2076-6734-2014-3-5-15) In Russian
 89. Lim S, Faïn X, Ginot P, Mikhaleiko V, Kutuzov S, Paris JD, Kozachek A, Laj P. Black carbon variability since preindustrial times in the eastern part of Europe reconstructed from Mt. Elbrus, Caucasus, ice cores. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2017;17:3489-3505. doi: [10.5194/acp-17-3489-2017](https://doi.org/10.5194/acp-17-3489-2017)
 90. Kozachek A, Mikhaleiko V, Masson-Delmotte V, Ekaykin A, Ginot P, Kutuzov S, Legrand M, Lipenkov V, Preunkert S. Large-scale drivers of Caucasus climate variability in meteorological records and Mt Elbrus ice cores. *Climate of the Past Discussions*. 2016; 1-30. doi: [10.5194/cp-2016-62](https://doi.org/10.5194/cp-2016-62)
 91. Schwarz JP, Gao RS, Perring AE, Spackman JR, Fahey DW. Black carbon aerosol size in snow. *Scientific Reports*. 2013;3:1356. doi: [10.1038/srep01356](https://doi.org/10.1038/srep01356)
 92. Hilden M, Kupiainen K, Forsius M, Salonen R. Curbing black carbon emissions slows warming in the Arctic. Finland: SYKE Policy Brief Publ.; 2017. 4 p.
 93. UNEP and WMO. Integrated Assessment of Black Carbon and Tropospheric Ozone, Nairobi, Kenya. 2011. [Electronic resource]. Available at: <https://www.ccacoalition.org/en/resources/marrakech-communicue> (accessed 29.04.2020)
 94. Shindell DT, Chin M, Dentener F, Doherty RM, Faluvegi G, Fiore AM, Hess P, Koch DM, MacKenzie IA, Sanderson MG, Schultz MG, Schulz M, Stevenson DS, Teich H, Textor C, Wild O, Bergmann DJ, Bey I, Bian H, Cuvelier C, Duncan BN, Folberth G, Horowitz LW, Jonson J, Kaminski JW, Marmer E, Park R, Pringle KJ, Schroeder S, Szopa S, Takemura T, Zeng G, Keating TJ, Zuber A. A multi-model assessment of pollution transport to the Arctic. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2008;8:5353-5372. doi: [10.5194/acp-8-5353-2008](https://doi.org/10.5194/acp-8-5353-2008)
 95. Long CM, Nascarella MA, Valberg PA. Carbon black vs. black carbon and other airborne materials containing elemental carbon: Physical and chemical distinctions. *Environmental Pollution*. 2013;181:271-286. doi: [10.1016/j.envpol.2013.06.009](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.06.009)
 96. Doherty S, Warren S, Grenfell T, Clarke A, Brandt R. Light Absorption from Impurities in Arctic Snow. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2010;10:1647-11680. doi: [10.5194/acp-10-11647-2010](https://doi.org/10.5194/acp-10-11647-2010)
 97. Ming J, Xiao C, Cachier H. Black carbon (BC) in the snow of glaciers in west China and its potential effects on albedo. *Atmospheric Research*. 2009;92:114-123. doi: [10.1016/j.atmosres.2008.09.007](https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2008.09.007)
 98. Hansen ADA, Rosen H, Novakov T. The aethalometer- An instrument for the real-time measurement of optical absorption by aerosol particles. *Science of the Total Environment*. 1984;36:191-196. doi: [10.1016/0048-9697\(84\)90265-1](https://doi.org/10.1016/0048-9697(84)90265-1)
 99. Barrie LA. Arctic air pollution: An overview of current knowledge. *Atmospheric Environment*. 1986;20:643-663. doi: [10.1016/0004-6981\(86\)90180-0](https://doi.org/10.1016/0004-6981(86)90180-0)
 100. Barrie LA. Occurrence and trends of pollution in the Arctic troposphere. In: *Chemical exchange between the atmosphere and polar snow*. NATO ASI Series (Series I: Global Environmental Change). Wolff EW and Bales RC, editors. Berlin, Heidelberg: Springer; 1996. Vol. 43. pp. 93-130. doi: [10.1007/978-3-642-61171-1_5](https://doi.org/10.1007/978-3-642-61171-1_5)

101. Doherty SJ, Grenfell TC, Forsström S. Observed vertical redistribution of black carbon and other insoluble light-absorbing particles in melting snow. *J Geophysical Research: Atmospheres*. 2013;118:5553-5569. doi: [10.1002/jgrd.50235](https://doi.org/10.1002/jgrd.50235)
102. He C, Li QB, Liou KN. Black carbon radiative forcing over the Tibetan Plateau. *Geophysical Research Letters*. 2014;41:7806-7813. doi: [10.1002/2014gl062191](https://doi.org/10.1002/2014gl062191)
103. Oen AMP, Cornelissen G, Breedveld GD. Relation between PAH and black carbon content in size fractions of Norwegian harbor sediments. *Environmental Pollution*. 2006;141:370-380. doi: [10.1016/j.envpol.2005.08.033](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2005.08.033)
104. Vinogradova AA, Kotova EI. Assessment of heavy metal fluxes from the atmosphere to the Barents Sea. *Trudy Fersmanovskoy nauchnoy sessii GI KNTS RAN* 2019;16:63-67. doi: [10.31241/FNS.2019.16.013](https://doi.org/10.31241/FNS.2019.16.013) In Russian, English Summary
105. Santos IR, Silva-Filho EV, Schaefer CEGR, Albuquerque-Filho MR, Campos LS. Heavy metal contamination in coastal sediments and soils near the Brazilian Antarctic Station, King George Island. *Marine Pollution Bulletin*. 2005;50(2):185-194. doi: [10.1016/j.marpolbul.2004.10.009](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2004.10.009)
106. De Lima Neto E, Guerra MBB, Thomazini A, Daher M, de Andrade AM, Schaefer CEGR. Soil contamination by toxic metals near an Antarctic Refuge in Robert Island, Maritime Antarctica: A monitoring strategy. *Water, Air, & Soil Pollution* 2017;228(2):66. doi: [10.1007/s11270-017-3245-4](https://doi.org/10.1007/s11270-017-3245-4)
107. Hong S, Boutron CF, Edwards R, Morgan VI. Heavy metals in Antarctic ice from Law Dome: Initial Results. *Environmental Research*. 1998;78(2):94-103. doi: [10.1006/enrs.1998.3849](https://doi.org/10.1006/enrs.1998.3849)
108. Görlach U, Boutron CF. Variations in heavy metals concentrations in Antarctic snows from 1940 to 1980. *J Atmospheric Chemistry*. 1992;14(1-4):205-222. doi: [10.1007/BF00115234](https://doi.org/10.1007/BF00115234)
109. Sheppard DS, Deely JM, Edgerley WHL. Heavy metal content of meltwaters from the Ross Dependency, Antarctica. *New Zealand J Marine and Freshwater Research*. 1997;31(3):313-325. doi: [10.1080/00288330.1997.9516769](https://doi.org/10.1080/00288330.1997.9516769)
110. Lotz S, Ziolkowski LA, Benning LG. The biodiversity and geochemistry of cryoconite holes in Queen Maud Land, East Antarctica. *Microorganisms*. 2019;7:160. doi: [10.3390/microorganisms7060160](https://doi.org/10.3390/microorganisms7060160)

Received 08 May 2020; Revised 07 September 2020;

Accepted 27 October 2020; Published 29 December 2020

Author info:

Polyakov Vyacheslav I, Engineer, Department of Applied Ecology, Faculty of Biology, Saint Petersburg State University, 13B Universitetskaya Emb., St. Petersburg 199034, Russian Federation.

ORCID iD: <http://orcid.org/0000-0001-6171-3221>

E-mail: slavon6985@gmail.com

Abakumov Evgeny V, Dr. Sci. (Biol.), Professor, Department of Applied Ecology, Saint Petersburg State University, 13B Universitetskaya Emb., St. Petersburg 199034, Russian Federation.

ORCID iD: <http://orcid.org/0000-0002-5248-9018>

E-mail: e_abakumov@mail.ru

Tembotov Rustam Kh, PhD. (Biol.), Senior Researcher, Laboratory for Soil and Ecological Research, Federal State Budget Scientific Institution Tembotov Institute of Ecology of Mountain Territories, Russian Academy of Sciences, 37-a I. Armand Str., Nalchik 360051, Russian Federation.

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-2342-4653>

E-mail: tembotov.rustam@mail.ru

For citation: Polyakov VI, Abakumov EV, Tembotov RKh. Black carbon as a factor in deglaciation in polar and mountain ecosystems: A Review. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya* = *Tomsk State University Journal of Biology*. 2020;52:6-33. doi: [10.17223/19988591/52/1](https://doi.org/10.17223/19988591/52/1)

Для цитирования: Polyakov V.I., Abakumov E.V., Tembotov RKh. Black carbon as a factor in deglaciation in polar and mountain ecosystems: A Review // Вестн. Том. гос. ун-та. Биология. 2020. № 52. С. 6–33. doi: [10.17223/19988591/52/1](https://doi.org/10.17223/19988591/52/1)

БИОТЕХНОЛОГИЯ И МИКРОБИОЛОГИЯ

UDC 579.64, 639.3.09

doi: 10.17223/19988591/52/2

**Maira Urazova¹, Kunsulu Zakarya¹, Zinigul Sarmurzina¹,
Gulmira Bissenova¹, Gulyaim Abitayeva¹,
Alexandr Shevtsov², Zhanar Tekebayeva¹, Akhan Abzhalelov¹**

¹*Republican Collection of Microorganisms, Nur-Sultan, Kazakhstan*

²*National Center for Biotechnology, Nur-Sultan, Kazakhstan*

Diversity and characterization of lactic acid bacteria from Common Carp (*Cyprinus carpio* L.) intestine in winter (Northern Kazakhstan)

*Currently, in Kazakhstan, chemical agents and antibiotics are widely used for treatment and prevention of fish diseases at fish farms. The use of probiotics as an alternative to antibiotics can help reduce the spread of antibiotic resistance in this area. The aim of the present study was to isolate the intestinal lactic acid bacteria of wintering carps. We assume that such bacteria can have more adaptive properties and can be used as probiotics for growing carp juveniles at fish farms. A probiotic characteristic of 22 lactic acid bacteria isolated from Common carp intestines was studied. Universal primers were used to determine the sequence of 16S rRNA gene fragments of lactic acid bacteria (LAB). Phylogenetic relationships of the isolates were estimated using the neighbor-joining (NJ) method in Mega 6.0. All identified isolates can grow in temperature range from 10° C to 37° C and in presence of bile salt. The isolated bacteria were screened for antibacterial activity, resistance to bile, resistance to antibiotics and growth at low temperatures. All isolates were tested in vitro for their ability to inhibit the growth of *Shewanella xiamenensis*, *Pseudomonas taiwanensis*, *Ps. aeruginosa* and *Aeromonas punctata*. As a result, 7 isolates with strong antagonistic activity were selected. 16S rDNA gene sequencing identified 4 isolates as *Lactobacillus fermentum*, 2 - as *L. casei/paracasei* and 1 - as *Pediococcus pentosaceus*. Antibiotic resistance profile of selected strains was studied, too. This study is the first attempt for Kazakhstan to isolate and study the representatives of the normal intestinal microflora of commercial fish species. Selective strains could be potential probiotics for freshwater aquaculture practices in Kazakhstan.*

The paper contains 3 Figures, 3 Tables and 36 References.

Key words: *Cyprinus carpio*; lactic acid bacteria (LAB); pathogen; aquaculture; probiotics.

Acknowledgments: The authors thank the staff of Maybalyk (50°59'25"N, 71°30'11"E) fish farm and, particularly, Dmitry Gudyno, its General Director.

Funding: This work was supported by the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan (Research Project No AP05131929).

The Authors declare no conflict of interest.

Introduction

Potential probiotic bacteria for use in aquaculture should exert antimicrobial activity and be regarded as safe not only for their hosts, but also for aquatic environment [1-3]. However, there is still no consensus on the species and generic composition of probiotic for aquaculture. Wu S. et al studied the taxonomic composition of intestine bacterial community of grass carp, based on OTU-s analysis [4]. As a result, they supposed that using the members of *Lactobacillus* genera in creation of a new probiotic for aquaculture is not rational, because *Lactobacillus* species have low abundance in the intestinal microbiota of carps. Their research shows that a better candidate can be antagonistic strains of *Pseudomonas* genera, which were highly abundant in the intestinal community. However, the authors did not deny that *Pseudomonas* spp. could be potential pathogens [4]. Therefore, most probiotics proposed for aquaculture now as biocontrollers and bioremediators belong to safe lactic acid bacteria (LAB) group [5-7]. Antagonistic strains of LAB can be good defense against infectious fish diseases and, probably, can replace antibiotics and chemotherapeutics in aquaculture [8-12]. Picchietti (2009) showed that the effectiveness of probiotics in fish is higher if the strains were previously isolated from the host belonging to the same species [13].

The basis of freshwater fisheries in Kazakhstan consists of various commercial species of carp family (*Cyprinidae*). The Caspian Sea in the west of Kazakhstan is the only location where carps loose commercial importance in comparison with valuable sturgeon species. Most of freshwater reservoirs of Northern and Central Kazakhstan are landlocked and shallow, and during cold seasons, fish have low survival rate. In order to maintain fisheries on these reservoirs, various measures must be taken, one of them is fish stocking. Common carp due to its good adaptability and high growth rate is a preferred species for stocking. There are several fish farms focused on the cultivation and maintenance of Common carp broodstock in Kazakhstan.

The aim of the research was to study the probiotic potential of LAB from the intestines of carps at the end of wintering period.

Materials and methods

Maybalyk farm, located on the Nura, tributary of the Ishim river, uses only natural feeding base of the river for fish growing without any commercial feed and additives. Therefore, the presence of LAB in carp intestines is original and not associated with feed additives and any human activity.

Fish and isolation of lactic acid bacteria

22 males of Common carp (*Cyprinus carpio* L.) from Maybalyk farm, weighing from 850 grams to 1.2 kilograms, were transferred to the laboratory in 20-liter containers with river water in March 2019. After transporting, the fish were placed

in the freezer (-20° C) for a night, and we started isolation of LAB from the intestine next day. To do this, three segments of the intestine with a length of one centimeter from each fish were placed in saline solution and thoroughly shaken; after this, decimal dilutions were made. Next, 100 µl of the serial 10-dilution of homogenate were spread on Man, Rogosa, Sharp (MRS, HiMedia) agar, a medium selective for *Lactobacillus* spp. The plates were incubated at 37 °C for 2 days. Pure cultures were obtained after following streaking technique again on plates with MRS agar and incubation. As a result, gram-positive bacteria, in the form of sticks and cocci, which gave circular colonies of white and cream colors, did not grow on meat-peptone agar, and did not produce catalase. These gram-positive bacteria were selected and stored in 25 % glycerol at -80 °C.

Test of Antagonistic activity of LAB

Agar well diffusion assay was used to determine the antagonistic activity of putative probiotic bacteria against the four indicator bacteria *Shewanella xiamenensis* AU 2R-1 B-RKM 0724, *Pseudomonas taiwanensis* CB 2R-1 B-RKM 0726, *Pseudomonas aeruginosa* G13 B-RKM 0427 and *Aeromonas punctata* G30 B-RKM 0287 which were deposited in the Republican Collection of Microorganisms, Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan (Astana, Kazakhstan). Culture density was determined using the colony-forming unit (CFU) method. After 24 hours of incubation in Nutrient Broth (NB, HiMedia, Mumbai, India) at 37 °C, 1 ml of indicator culture (10⁸ CFU/ml) (McFarland standard set, HiMedia) was added to 15 ml of melted MRS agar (HiMedia) cooled to 43-44 °C. After solidification and drying for 15-20 min, wells were punched (diameter, 3 mm) and 50 µl of MRS-broth, containing a 2-day-old supposed probiotic culture, were added to wells in triplicates. Plates were incubated at 37 °C for 48 hours. After incubation, all plates were examined for the presence of the zone of inhibition around the wells [11, 14].

Bacteriocin-producing activity of LAB

The antimicrobial activity of supernatants of isolated lactic acid bacteria grown in MRS broth at 37 °C for 24 hours was determined also by an agar well-diffusion test as previously described with the same indicator strains. After cultivation, cell-free supernatants were obtained by centrifugation 4000×g at 4 °C for 5 min (Eppendorf Centrifuge 5810 R, Germany). Following this, the supernatants were passed through 0.22 µm filters (Millipore corp., USA). Approximately 35 µl of supernatant was placed into the first well of 3 mm in diameter cut into plates with cooled agar, previously seeded with pathogenic bacteria 0.1 ml (10⁸ CFU/ml) (McFarland standard set, HiMedia). To eliminate inhibitory activity due to organic acids, the pH of the supernatant was adjusted to pH 6.0 with 1 M NaOH and that solution was added to the second well in the same volume. The plates were incubated for 1 day [15]. A positive result confirming the presence of bacteriocin in the supernatant was the appearance of inhibition zone of the target strain around the second well.

Identification of LAB and phylogenetic analysis

DNA was isolated from the 24-h cultures incubated at 37 °C on the MRS medium with reagent kit for DNA extraction “DNA-sorb-AM” (AmpliSens,

Russia) following the recommendations of the manufacturer (DNA-sorb-AM Manual). DNA concentration in the resulting samples was measured via Nano-Drop 2000 (Thermo Scientific, USA). Sequence analysis was performed in the Laboratory of Applied Genetics (National Center for Biotechnology, Astana, Kazakhstan). Briefly, the sequencing reaction was performed by using Big Dye® v 3.1 and primers. Universal primers 5'-AGAGTTTGATCCTGGCTCAG-3' (10F) and 5'-GGACTACCAGGTATCTAAT3' (806R) were used to determine the sequence of 16S rRNA gene fragments of antagonistic LAB. The obtained sequences were compared with the previously published data in GenBank and aligned with previously characterized sequences of closely related members of the genus, using ClustalW in Mega 6.0 multiple sequence alignments [16]. Phylogenetic relationships of the isolates were estimated using the neighbor-joining (NJ) method in Mega 6.0. Confidence in the NJ trees was determined by analyzing 1.000 bootstrap replicates using the Mega program.

Assessment of antibiotic susceptibility

Antibiotic resistance of the isolated LAB was studied by agar disk diffusion method according to the CLSI [17-18]. Antibiotic resistance profiles were obtained using amoxicillin (AMO, 10 mg), ampicillin (AM, 10 mg), cefazolin (CF, 30 mg), kanamycin (K, 30 mg), gentamycin (GE, 10 mg), vancomycin (VA, 30 mg) and tetracycline (TE, 30 mg). The bacterial suspension (10^7 CFU/ml) was inoculated into MRS agar (HiMedia, India) plates using swabbing technique. Then, antibiotics disks were deposited on the plates. To check the quality of the disks, 2 reference microorganisms *E.coli* ATCC 25922 and *S. aureus* ATCC 25923 were tested for susceptibility to the respective antibiotics.

Bile Tolerance

The modified method of Arihara et al. (1998) method, described by Buntin et al. (2008) was used to determine bile tolerance of LAB. Before testing for bile tolerance, LAB strains were grown at 37 °C for 24 hours in MRS broth [19-20]. After this, 1 ml of the culture broth was poured onto MRS agar with bile salt (HiMedia, India) concentrations of 2000, 3000 and 4000 ppm. Bacterial growth was determined after incubation at 37 °C for 48 hours [20].

Growth tests

Antagonistic active isolates were inoculated into 10 ml of MRS liquid medium, and then incubated for 24 hours at 37 °C. One hundred microliters of the culture (about 10^6 - 10^7 CFU/ml) was then inoculated into 10 ml fresh MRS liquid medium and incubated at 10, 15, 20, 30 and 37 °C. The growth was monitored by measuring optical density (OD) 600 nm after 24 hours of incubation [21].

Statistical analysis

Experiments of this study were performed in triplicate and the results developed as mean $\pm$ standard deviation ($M \pm SD$). Statistical significance was assessed by Student's $\frac{1}{4}$ s *t* test. Results are considered significant at $p \leq 0.05$.

Results and Discussion

Isolation and identification of antagonistic LAB strains

The intestinal microbiome of fish has a great scientific interest now. In several reviews based on metagenome analysis, the composition, features and formation of intestinal microflora of various commercial fish species of North America, East and Southeast Asia and Europe have been presented. The results of all these studies showed that lactic acid bacteria (LAB) are a common microbial group of intestinal microbiota of fish [24-30]. Earlier studies, based on isolation of LAB from the intestines of fish, did not give a complete picture of their appearance and role in this ecosystem [31, 32].

For the isolation of potential probiotic bacteria, the basic and common selection methods and medium were used. It was essential for us to obtain strains, whose cultivation and production will not require excessive efforts and costs in the future. A total number of bacterial isolates obtained from the intestines of carps was 22. All isolates presumptively corresponded to LAB based on phenotypic characteristics. It is known that LAB can produce several antimicrobial compounds, such as organic acids, diacetyl, hydrogen peroxide, ethanol, reuterin and other bacteriocins [22]. By the investigation of total antagonistic activity of 22 isolates, seven were tolerant for two (*Ps. aeruginosa* G13 B-RKM 0427, *A. punctata* G30 B-RKM 0287) of four test microorganisms and eight isolates showed a low level of antagonistic activity (diameter of the zone ≤ 10 mm). Only seven isolates had a high ability to inhibit all indicator bacteria (clear zones around the wells were larger than 10 mm). Bacteriocin-producing activity of cell-free culture supernatants of seven active antagonistic isolates was studied next. For this experiment, the same test microorganisms were used. As a result, bacteriocins providing inhibitor activity of cell-free supernatants of all tested isolates against 3 (*Sh. xiamenensis* AU 2R-1 B-RKM 0724, *Ps. taiwanensis* CB 2R-1 B-RKM 0726, *Ps. aeruginosa* G13 B-RKM 0427) out of 4 indicator bacteria were proven. The results of the experiments are shown in Table 1.

Several researchers mentioned that the isolation of LAB from various organs of fish was linked with some difficulties: from preparation of composite mediums to prolongation of the primary cultivation period to seven or even more days [29]. In our studies, we used simple techniques and commercial mediums MRS (agar and broth) which are selective for lactobacilli (solid and liquid), and the cultivation period did not exceed 48 hours. According to our observations, when the cultivation period was up to 96 hours on broth, the species diversity of LAB was poor due to the elimination of one type of microorganisms by another, and coccal lactobacteria were dominant in this case.

Strong antagonistic properties of LAB allow them to be considered as an alternative to antibiotics and chemotherapeutic agents of disease control. The pathogenic inhibitory effect of LAB, in general, is due to the action of either acid or bacteriocins, as well as their combination.

Table 1
Diameter of the inhibition zone (mm) caused by antimicrobial activity of LAB strains against test microorganisms ($M \pm SD$)

Test micro-organisms LAB strains	<i>Pseudomonas aeruginosa</i> G13 B-RKM 0427			<i>Shewanella ximenensis</i> AU 2R-1 B-RKM 0724			<i>Pseudomonas taiwanensis</i> CB 2R-1 B-RKM 0726			<i>Aeromonas punctata</i> G30 B-RKM 0287	
	LC	CFS	CFH	LC	CFS	CFH	LC	CFS	CFH	LC	CFS CFH
<i>Lactobacillus fermentum</i> 22-1c	18.0±2.0	17.7 ±1.6	0	24.7±3.2	21.7±2.1	0	19.2±1.3	17.7±1.2	0	11.0±1.7	0 0
<i>L. fermentum</i> 24 c	19.4±1.6	18.3±1.2	17.3±2.1	31.2±1.0	29.7±2.5	19±1.0	21.2±1.5	19.7±1.5	16±1.0	11.3±2.1	0 0
<i>L. fermentum</i> 13-1c	20.0±3.6	19.7±1.5	15.0±1.7	24.7±3.2	24.7±1.1	19.4±1.6	18.4 ±1.8	16.8±1.7	16.3±2.5	15.3±1.2	0 0
<i>L. fermentum</i> 2c	15.3±1.2	14.0±1.0	13.6±0.6*	18.0±2.0	16.8±1.2	16.3±2.1	16.8±1.7	15.3±2.5	13.3±2.5	11.7±2.5	0 0
<i>L. casei</i> 9c	17.3±2.1	15.0±1.7	14.3±0.6*	26.5±0.29*	25.3±1.5	18.0±2.0	21.2±1.5	20±1.7	16.8±1.7	18.7±2.1	0 0
<i>L. casei</i> 12-2c	15.3±2.5	13.3±1.5	11.3±1.5	17.8±0.75*	16.3±2.1	14.7±0.6*	15.3 ±1.2	14.7±1.2	12.3±2.1	11.3±1.2	0 0
<i>Pediococcus pentosaceus</i> 10-9k	18.4±1.8	16.3±2.1	14.3±2.0	23.0±0.41*	21.2±1.5	18.0±2.0	19.2±1.3	16.8±1.7	15.7±1.2	10.6±1.3	0 0

Note. LC - Live culture; CFS - Culture cell free supernatant; CFH - Culture cell free supernatant adjusted to pH 6.5-7 with 1M NaOH

Inhibition zones: 0 mm - No activity; ≤ 5mm - Doubtful; 5-15mm - Weak; 15-20 mm - Moderate; 20-25 mm - Strong; ≥ 25 mm - Very strong. *p < 0.05

The absence of the antibacterial activity of hydrogen peroxide produced by LAB has been confirmed experimentally in some studies [20, 31]. We selected seven isolates because of the data of total antagonistic activity against fish pathogens, as well as the antibacterial activity of cell-free culture supernatants of isolates. The detection of the antibacterial activity of cell-free supernatants showed inhibitory effect of three out four test strains. Inhibitory activity of cell-free supernatants of 7 selected isolates both pure and neutralized by NaOH against *Aeromonas punctata* G30 B-RKM 0287 were not detected. On the contrary, live cultures of isolates showed good inhibition of growth of *A. punctata* G30 B-RKM 0287. Neutralization of the acid with NaOH in the supernatants removes its antibiotic ability; however we cannot explain the ineffectiveness of the pure supernatant in this case (Table 1).

Based on analysis of the 16S rRNA gene sequence, six of active LAB strains were assigned to the genus *Lactobacillus* (2c, 9c, 12-2c, 13-1c, 22-1 c, 24c) (Fig.1) and one to *Pediococcus* (10-9k) (Fig. 2).

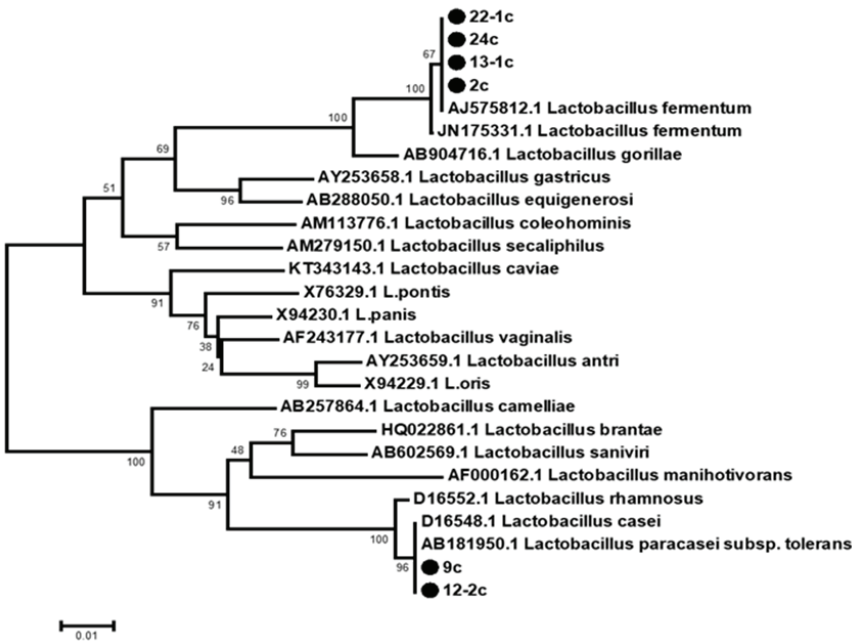


Fig. 1. Neighbor-joining Tree based on 16S rRNA Gene Sequences of Strains 22-1c, 24c, 13-1c and 2c (*Lactobacillus fermentum*), 9c and 12-2c (*L. casei*) and Other Related Taxa. (Bar, 0.01 substitutions per nucleotide position)

The 16S rRNA gene sequence from isolates 22-1c, 24c, 13-1c and 2c showed $\geq 99.9\%$ sequence similarity with *Lactobacillus fermentum* (GenBank acc #AJ5758121, JN1753311), isolates 9c and 12-2c showed 100% similarity with

Lactobacillus casei/paracasei (GenBank acc #D165481, AB1819501), and isolate 10-9k showed 100% similarity with *Pediococcus pentosaceus* (GenBank acc #KP1198191) (Fig. 1 and 2)

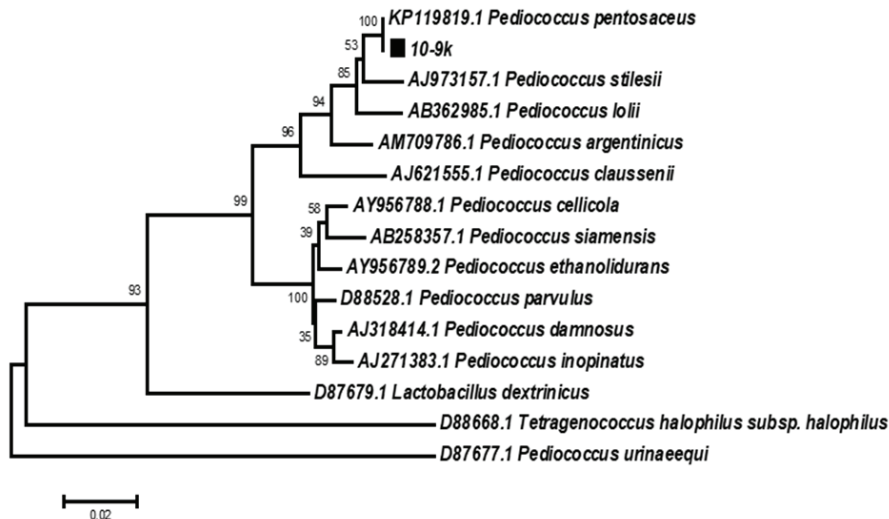


Fig. 2. Neighbor-joining Tree based on 16S rRNA Gene Sequences of Strain 10-9k (*Pediococcus pentosaceus*) and Other Related Taxa. (Bar, 0.02 substitutions per nucleotide position)

In earlier studies, LAB of the genera *Lactobacillus*, *Lactococcus*, *Streptococcus*, *Enterococcus*, *Pediococcus* and *Carnobacterium* were isolated from carp intestines [14, 28, 30]. The genetic identification of our isolates has determined that they belong to three species of *L. fermentum*, *L. casei/paracasei* and *P. pentosaceus*. It is low rate for species diversity. Perhaps, it is due to the fact that we made isolation of LAB in winter and used only MRS-broth and MRS-agar for bacteria isolation.

Assessment of antibiotic susceptibility

All test microorganisms showed resistance to glycopeptide vancomycin and to aminoglycoside antibiotic kanamycin. *Lactobacilli* strains were resistant to aminoglycoside gentamycin. *P. pentosaceus* 10/9k were susceptible to this antibiotic. All strains showed susceptibility to β -lactam group (amoxicillin, ampicillin, carbenicillin and cefazolin) and tetracycline. The pictures of susceptibility and resistance of all *lactobacilli* strains to examined antibiotics are the same. They are resistant to three of eight checked antibiotics. One strain *P. pentosaceus* 10/9k have resistance to two of eight antibiotics (Table 2).

Recent studies have revealed the presence and expression of antibiotic resistant genes in the probiotics used in food and aquaculture [33-36]. It is accepted that the possibility of transfer is related to the genetic basis of the resistance mechanism,

whether the resistance is acquired as a result of chromosomal mutations (intrinsic) or by horizontal gene transfer. The good example of intrinsic mechanisms is vancomycin resistance of LAB. In addition, it was shown that 70% of LAB were intrinsically resistant to gentamycin when the Minimal Inhibition Concentration (MIC) breakpoints of the Scientific Committee of Animal Nutrition (SCAN) were used [34].

Table 2

The assessment of antibiotic susceptibility in LAB

Antibiotic LAB strain	AMO	AM	CB	CF	GE	K	VA	TE
<i>Lactobacillus fermentum</i> 22-1c	S	S	S	S	R	R	R	S
<i>L. fermentum</i> 24 c	S	S	S	S	R	R	R	S
<i>L. fermentum</i> 13-1c	S	S	S	S	R	R	R	S
<i>L. fermentum</i> 2c	S	S	S	S	R	R	R	S
<i>L. casei</i> 9c	S	S	S	S	R	R	R	S
<i>L. casei</i> 12-2c	S	S	S	S	R	R	R	S
<i>Pediococcus pentosaceus</i> 10-9k	S	S	S	S	S	R	R	S

Note. Antibiotics: AMO - Amoxicillin (10 mg), AM - Ampicillin (10 mg), CB - Carbenicillin (25 mg), CF - Cefazolin (30 mg), GE - Gentamycin (10 mg), K - Kanamycin (30 mg), VA - Vancomycin (30 mg), TE - Tetracycline (30 mg). S - Susceptible, diameter of the zone of inhibition ≥ 17 mm; R - Resistant, diameter of the zone of inhibition ≤ 13 ; Intermediate, diameter of the zone of inhibition 13-17 mm.

Opposite, *tet* genes responsible for resistance of lactobacilli to tetracycline have a high transfer risk, which can be carried within plasmids. In the present study intrinsic susceptibility of all tested LAB toward the inhibitors of cell wall synthesis, such as ampicillin, amoxicillin, cefazolin and inhibitors of protein synthesis, such as tetracycline was in accordance with bibliographic data [35, 36]. Vancomycin, kanamycin, gentamycin resistant phenotype had been obtained for all tested lactobacilli. It was mentioned that commercial feed additives that may contain antibiotics are not used at Maybalyk fish farm. This strategy allowed to limit the spectrum of antibiotic resistance in representatives of normal microflora of fish intestines.

Bile tolerance and growth temperature

Potential probiotic strains for using in aquaculture should possess certain characteristics such as bile tolerance and ability to grow in a wide range of temperatures. To select bile-tolerant strains, antagonistic active isolates 2c, 9c, 12-2c, 13-1c, 22-1 c, 24c, 10-9k were tested for their abilities to grow at the bile salt levels of 2000, 3000 and 4000 ppm. All of them were able to grow in the presence of bile salt in concentration 2000 ppm and 3000 ppm, too. Only one isolate 10-9k (*P. pentosaceus*) was able to grow in 4000 ppm bile salt concentration (Table 3).

Table 3

Bile salt tolerance of LAB isolated from Common Carp

Bile Salt Concentration (ppm)	<i>Lactobacillus fermentum</i> 22-1c	<i>L. fermentum</i> 24 c	<i>L. fermentum</i> 13-1c	<i>L. fermentum</i> 2c	<i>L. casei</i> 9c	<i>L. casei</i> 12-2c	<i>Pediococcus pentosaceus</i> 10-9k
2000	++	++	++	++	++	++	++
3000	+	+	+	+	+	+	++
4000	-	-	-	-	-	-	+

Note. ++ Good growth; + Visible growth; - No growth.

In addition, all isolates were able to grow in temperature range from 10 °C to 37 °C. Better growth was observed in all isolates beginning from 20 °C to 37 °C (Fig. 3). It should be noted that spring in Northern Kazakhstan can be cold, even in May, and water temperature can be lower than 10 °C.

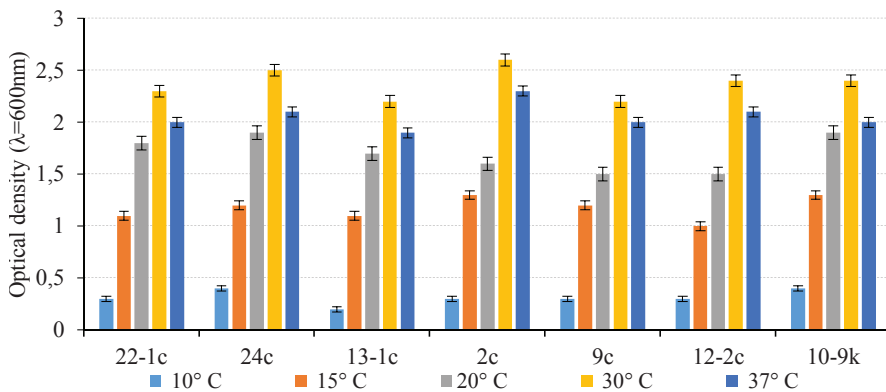


Fig. 3. Growth of lactic acid bacteria strains at different temperatures after 24h of incubation ($M \pm SD$)

The selection of different types of LAB depending on different seasons was well shown in the works of Hagi et al. (2004, 2009) on carps from Ibaraki Fisheries Station on Kasumigaura lake. Authors showed that such species as *Lactococcus lactis* and *Lactobacillus fuchuensis* dominate during the summer period, while *Lactobacillus raffinolactis*, *Lactobacillus sakei*, *Leuconostoc gelidum* are dominant in winter. They also revealed that not only the composition of predominant LAB but also the composition of cholic acid-resistant LAB changed seasonally [21, 32]. The climate of Central and Northern Kazakhstan is severe and it is characterized by a cold winter lasting 5.5-6 months, sometimes rivers are covered with ice until the end of April. Long wintering is a stress for the whole organism of an animal, including its microflora. During the wintering period, Common Carp does not feed; the composition of their intestinal microflora becomes poorer. The dominance of the species *L. fermentum*, *L. casei/paracasei*

and *P. pentosaceus* among intestinal LAB during this period should be due to their specific characteristics, such as resistance to low temperatures and unfavorable environmental factors.

Conclusion

In this work, the composition and probiotic characteristics of representatives of lactic acid bacteria from the intestines of cultured carps in winter were studied. Despite the extremely adverse environmental conditions in winter in Northern Kazakhstan, lactic acid bacteria in the intestines of carps show high viability and retain most of their properties. The study showed the dominance of three species of lactic acid bacteria in this period: *Lactobacillus fermentum*, *L. casei/paracasei* and *Pediococcus pentosaceus*. The profiles of antibiotic resistance, resistance to bile and various temperatures of cultivation were studied in seven strains with high antagonistic activity. All strains showed growth at 10 °C and on the mediums with high concentrations of bile salt. These factors make them optimal candidates for use as probiotics in aquaculture of Kazakhstan.

References

1. Wanka KM, Damerau T, Costas B, Krueger A, Schulz C, Wuertz S. Isolation and characterization of native probiotics for fish farming. *BMC Microbiology*. 2018;18:e119. doi: [10.1186/s12866-018-1260-2](https://doi.org/10.1186/s12866-018-1260-2)
2. Banerjee G, Ray AK. The advancement of probiotics research and its application in fish farming industries. *Res. Vet. Sci*. 2017;115:66-77. doi: [10.1016/j.rvsc.2017.01.016](https://doi.org/10.1016/j.rvsc.2017.01.016)
3. Chauhan A, Singh R. Probiotics in aquaculture: A promising emerging alternative approach. *Symbiosis*. 2019;77:99-113. doi: [10.1007/s13199-018-0580-1](https://doi.org/10.1007/s13199-018-0580-1)
4. Wu S, Wang GR, Angert E, Wang W, Li W, Zou H. Composition, diversity, and origin of the bacterial community in Grass Carp intestine. *Plos ONE*. 2012;7(2):e30440. doi: [10.1371/journal.pone.0030440](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0030440)
5. Akhter N, Wu B, Memon AM, Mohsin M. Probiotics and prebiotics associated with aquaculture: A review. *Fish Shellfish Immunol*. 2015;45:733-741. doi: [10.1016/j.fsi.2015.05.038](https://doi.org/10.1016/j.fsi.2015.05.038)
6. Kang CH, Shin Y, Kim Y, So JS. Isolation of *Lactobacillus* strains from shellfish for their potential use as probiotics. *Biotechnol Bioproc E*. 2016;21:46-52. doi: [10.1007/s12257-015-0518-x](https://doi.org/10.1007/s12257-015-0518-x)
7. Rauta PR, Dhupa M, Nayak B. Screening and characterization of potential probiotic lactic acid bacteria isolated from vegetable waste and fish intestine. *Int J Curr Microbiol Appl Sci*. 2013;2:234-244.
8. Ringo E, Hoseinifar SH, Ghosh K, Van Doan H, Ram Deck B, Kyo Song S. Lactic acid bacteria in finfish - An update. *Frontiers in Microbiology*. 2018;9:1818. doi: [10.3389/fmicb.2018.01818](https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.01818)
9. Dahia T, Gahlawat S, Sihag R. Elimination of pathogenic bacterium (*Micrococcus* sp.) by the use of probiotics. *Turk J Fish Aquat Sc*. 2012;12:185-187.
10. Kumaree KK, Akbar A, Anal AK. Bioencapsulation and application of *Lactobacillus plantarum* isolated from catfish gut as an antimicrobial agent and additive in fish feed pellets. *Ann Microbiol*. 2015;65:1439-1445. doi: [10.1007/s13213-014-0982-0](https://doi.org/10.1007/s13213-014-0982-0)

11. Didinen BI, Onuk EE, Metin S, Cayli O. Identification and characterization of lactic acid bacteria isolated from rainbow trout (*Onchorhynchus mykiss*, Walbaum 1792), with inhibitory activity against *Vagococcus salmoninarum* and *Lactococcus garvieae*. *Aquacult Nutr*. 2017;24:400-407. doi: [10.1111/anu.12571](https://doi.org/10.1111/anu.12571)
12. Amin M, Bolch CJS, Adams MB, Burke CM. Growth enhancement of tropical abalone, *Haliotis asinina* L., through probiotic supplementation. *Aquac Int*. 2020;28:463-475. doi: [10.1007/s10499-019-00473-4](https://doi.org/10.1007/s10499-019-00473-4)
13. Picchietti S, Fausto A, Randelli E, Carnevali O, Taddei A, Buonocore F, Scapigliati G, Abelli L. Early treatment with *Lactobacillus delbrueckii* strain induces an increase in intestinal T-cells and granulocytes and modulates immune-related genes of larval *Dicentrarchus labrax* (L.). *Fish Shellfish Immunol*. 2009;26:368-376. doi: [10.1016/j.fsi.2008.10.008](https://doi.org/10.1016/j.fsi.2008.10.008)
14. Maji UJ, Mohanty S, Mahapatra AS, Maiti NK. Diversity and probiotic potentials of putative lactic acid bacteria for application in freshwater aquaculture. *Turk J Fish Aquat Sc*. 2016;16:805-818.
15. Sarmurzina Z, Bissenova G, Zakarya K, Dospaeva R, Shaikhin S, Abzhalelov A. Characterization of probiotic strains of *Lactobacillus* candidates for development of symbiotic product for kazakh population. *J Pure Appl Microbiol*. 2017;11(1):151-161.
16. Clayton RA, Sutton G, Hinkle PS, Bult Jr C, Fields C. Intraspecific variation in small-subunit rRNA sequences in GenBank: Why single sequences may not adequately represent prokaryotic taxa. *Int J Syst Bacteriol*. 1995;45:595-599.
17. CLSI. *Methods for antimicrobial dilution and disk susceptibility testing of unfrequently isolated or fastidious bacteria*. Approved guideline. 2nd ed. CLSI document M45-A2. Wayne, PA: Clinical and Laboratory Standards Institute; 2010. 80 p.
18. CLSI. *Performance Standards for Antimicrobial Susceptibility Testing*. 26th ed. CLSI supplement M100S [Electronic resource]. Wayne, PA: Clinical and Laboratory Standards Institute; 2016. 251 p.
19. Arihara K, Ota H, Itoh M, Kondo Y, Sameshima T, Yamanaka H, Akimoto M, Kanai S, Miki T. *Lactobacillus acidophilus* group lactic acid bacteria applied to meat fermentation. *J Food Sci*. 1998;63(3):544-547.
20. Buntin N, Chanthachum S, Hongpattarakere T. Screening of lactic acid bacteria from gastrointestinal tracts of marine fish for their potential use as probiotics. *Songklanakarin J Sci Technol*. 2008;30 (1):141-148.
21. Hagi T, Hoshino T. Screening and characterization of potential probiotic lactic acid bacteria from cultured Common Carp intestine. *Biosci Biotechnol Biochem*. 2009;73(7):1479-1483. doi: [10.1271/bbb.80746](https://doi.org/10.1271/bbb.80746)
22. Ibrahim MD. Evolution of probiotics in aquatic world: Potential effects, the current status in Egypt and recent perspectives. *J Adv Res*. 2015;6:765-791. doi: [10.1016/j.jare.2013.12.004](https://doi.org/10.1016/j.jare.2013.12.004)
23. Van Kessel M, Dutilh BE, Neveling K, Kwint M, Veltman JA, Flik G, Jetten M, Klaren P, Op den Camp H. Pyrosequencing of 16S rRNA gene amplicons to study the microbiota in the gastrointestinal tract of carp (*Cyprinus carpio* L.). *AMB Express*. 2011;1:41:1-9. doi: [10.1186/2191-0855-1-41](https://doi.org/10.1186/2191-0855-1-41)
24. Li X, Yan Q, Xie S, Hu W, Yu Y, Hu Z. Gut microbiota contributes to the growth of fast-growing transgenic Common Carp (*Cyprinus carpio* L.) *Plos ONE*. 2013;8(5):e64577. doi: [10.1371/journal.pone.0064577](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0064577)
25. Ye L, Amberg J, Chapman D, Gaikowski M, Liu WT. Fish gut microbiota analysis differentiates physiology and behavior of invasive Asian carp and indigenous American fish. *ISME*. 2014;8:541-551. doi: [10.1038/ismej.2013.181](https://doi.org/10.1038/ismej.2013.181)
26. Liu H, Guo X, Gooneratne R, Lai R, Zeng C, Zhan F, Wang W. The gut microbiome and degradation enzyme activity of wild freshwater fishes influenced by their trophic levels. *Sci Rep*. 2016;6:e243440. doi: [10.1038/srep24340](https://doi.org/10.1038/srep24340)

27. Borsodi AK, Szabo A, Krett G, Felfoldi T, Specziar A, Boros G. Gut content microbiota of introduced bigheaded carps (*Hypophthalmichthys* spp.) inhabiting the largest shallow lake in Central Europe. *Microbiol Res.* 2017;195:40-50. doi: [10.1016/j.micres.2016.11.001](https://doi.org/10.1016/j.micres.2016.11.001)
28. Wang R, Ran Ch, Ringo E, Zhou ZG. Progress in fish gastrointestinal microbiota research. *Rev Aquacult.* 2018;10:626-640. doi: [10.1111/raq.12191](https://doi.org/10.1111/raq.12191)
29. Ringo E, Gatesoupe FJ. Lactic acid bacteria in fish: A review. *Aquaculture.* 1998;160:177-203.
30. Bucio A, Hartemink R, Schrama JW, Verreth J, Rombouts FM. Presence of lactobacilli in the intestinal content of freshwater fish from a river and from a farm with recirculation system. *Food Microbiol.* 2006;23:476-482. doi: [10.1016/j.fm.2005.06.001](https://doi.org/10.1016/j.fm.2005.06.001)
31. Aroutcheva A, Gariti D, Simon M, Shott S, Faro J, Simoes J, Gurguis A, Faro S. Defence factors of vaginal lactobacilli. *Am J Obstet Gynecol.* 2001;185:375-379.
32. Hagi T, Tanaka D, Iwamura Y, Hoshino T. Diversity and seasonal changes in lactic acid bacteria in the intestinal tract of cultured freshwater fish. *Aquaculture.* 2004;234:335-346. doi: [10.1016/j.aquaculture.2004.01.018](https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2004.01.018)
33. Noor Uddin GM, Larsen MH, Christensen H, Aarestrup FM, Phu TM, Dalsgaard A. Identification and antimicrobial resistance of bacteria isolated from probiotic products used in shrimp culture. *PLoS ONE.* 2015;10(7):e0132338. doi: [10.1371/journal.pone.0132338](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0132338)
34. Nagyzbekkyzy E, Abitayeva G, Anuarbekova S, Shaikhina D, Li K, Shaikhin S, Saduakhassova S, Kushugulova A, Marotta F. Investigation of acid and bile tolerance, antimicrobial activity and antibiotic resistance of *Lactobacillus* strains isolated from Kazakh dairy foods. *Asian J Applied Sci.* 2016;9:143-158. doi: [10.3923/ajaps.2016.143.158](https://doi.org/10.3923/ajaps.2016.143.158)
35. Sharma P, Tomar SK, Goswami P, Sangwan V, Singh R. Antibiotic resistance among commercially available probiotics. *Food Res. Int.* 2014;57:176-195. doi: [10.1016/j.foodres.2014.01.025](https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.01.025)
36. Jose NM, Bunt CR, Hussain MA. Implications of antibiotic resistance in probiotics. *Food Rev. Int.* 2015;31:52-62. doi: [10.1080/87559129.2014.961075](https://doi.org/10.1080/87559129.2014.961075)

Received 31 July 2020; Revised 04 November 2020;

Accepted 27 November 2020; Published 29 December 2020

Author Info:

Urazova Maira, Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher, Laboratory of Microbiology, Republican Collection of Microorganisms, 13/1 Sh.Ualichanov Str., Nur-Sultan, Z01B6F7, Kazakhstan.

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-7481-7692>

E-mail: maira_01@mail.ru

Zakarya Kunsulu, Dr. Sci. (Biol.), Professor, Deputy Director of Republican Collection of Microorganisms, 13/1 Sh.Ualichanov Str., Nur-Sultan, Z01B6F7, Kazakhstan.

E-mail: rkm_kz@mail.ru

Sarmurzhina Zinigul, Cand. Sci. (Biol.), Head of the Laboratory of Microbiology, Republican Collection of Microorganisms, 13/1 Sh.Ualichanov Str., Nur-Sultan, Z01B6F7, Kazakhstan.

E-mail: sarmurzhina@list.ru

Bissenova Gulmira, Cand. Sci. (Agric.), Senior Researcher, Laboratory of Microbiology, Republican Collection of Microorganisms, 13/1 Sh.Ualichanov Str., Nur-Sultan, Z01B6F7, Kazakhstan.

E-mail: bissenova84@mail.ru

Abitayeva Gulyaim, PhD, Senior Researcher, Laboratory of Genetic and Biochemistry, Republican Collection of Microorganisms, 13/1 Sh.Ualichanov Str., Nur-Sultan, Z01B6F7, Kazakhstan.

E-mail: gulyaim_as@mail.ru

Shevtsov Alexandr, Cand. Sci. (Biol.), Head of the Laboratory of Applied Genetic, National Center for Biotechnology, 13/5 Kurgalzhynskoye road, Nur-Sultan, Z01B6F7, Kazakhstan.

E-mail: ncbshevtsov@gmail.com

Tekebayeva Zhanar, Researcher, Laboratory of Microbiology, Republican Collection of Microorganisms, 13/1 Sh.Ualichanov str., Nur-Sultan, Z01B6F7, Kazakhstan.

E-mail: j.tekebaeva@mail.ru

Abzhalelov Akhan, Dr. Sci. (Biol.), Professor, RSE Republican Collection of Microorganisms, 13/1 Sh.Ualichanov Str., Nur-Sultan, Z01B6F7, Kazakhstan.

E-mail: ab_akhan@mail.ru

For citation: Urazova M, Zakarya K, Sarmurzina Z, Bissenova G, Abitayeva G, Shevtsov A, Tekebayeva Zh, Abzhalelov A. Diversity and characterization of lactic acid bacteria from Common Carp (*Cyprinus carpio* L.) intestine in winter (Northern Kazakhstan). *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya = Tomsk State University Journal of Biology*. 2020;52:34-47. doi: 10.17223/19988591/52/2

Для цитирования: Urazova M., Zakarya K., Sarmurzina Z., Bissenova G., Abitayeva G., Shevtsov A., Tekebayeva Zh., Abzhalelov A. Diversity and characterization of lactic acid bacteria from Common Carp (*Cyprinus carpio* L.) intestine in winter (Northern Kazakhstan) // Вестн. Том. гос. ун-та. Биология. 2020. № 52. С. 34–47. doi: 10.17223/19988591/52/2

БОТАНИКА

УДК 581.145.21:582.971.+581.52

doi: 10.17223/19988591/52/3

И.Г. Боярских, Л.Р. Волкова

Центральный сибирский ботанический сад СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Изменчивость репродуктивной способности *Lonicera caerulea* (Caprifoliaceae) в сейсмоактивной зоне Горного Алтая (Северо-Чуйский хр., р. Кызыл-Ярык)

Работа выполнена в рамках государственного задания № АААА-А17-117012610053-9.

Проведено изучение гетерогенности природной популяции жимолости синей по комплексу характеристик репродуктивной сферы растений в локальной сейсмоактивной зоне Горного Алтая. Выделены 5 микропопуляций *Lonicera caerulea* subsp. *altaica* в долине р. Кызыл-Ярык (Северо-Чуйский хр.) на участках, различающихся по объемной активности эманационного поля радона (262–1162 Бк/м³). Получены данные о влиянии места произрастания растений на морфометрические признаки плодов ($p \leq 0,05$ и $p \leq 0,01$) и их семенную продуктивность ($p \leq 0,01$). В микропопуляциях, находящихся под воздействием более высокого уровня объемной активности почвенного радона, увеличивалось разнообразие формы плодов и их вкусовых вариаций, в том числе проявление рецессивного признака – безгоречности плодов ($p \leq 0,05$). Семена, собранные в микропопуляции с самым низким уровнем объемной активности эманационного поля радона, отличались наименьшей всхожестью ($p \leq 0,05$ и $p \leq 0,01$) и самым коротким периодом прорастания. Установленная гетерогенность популяции *L. caerulea* subsp. *altaica* по комплексу признаков генеративной сферы позволяет предположить влияние недифференцированного комплекса факторов, связанных с активными тектоническими процессами, на формирование и развитие репродуктивных органов растений.

Ключевые слова: *Lonicera caerulea* subsp. *altaica*; морфометрия; семенная продуктивность; радон; активный тектонический разлом.

Введение

Изучение репродуктивной способности растений считается одним из путей оценки состояния биосистем [1], поскольку стрессовое состояние растений, вызванное изменением условий произрастания, приводит к функциональным расстройствам и нарушениям генеративных процессов. Известно, что наиболее существенным условием стабильности природных популяций

является устойчивостью во времени такого параметра, как семенное воспроизводство [2]. Однако противоречивые результаты исследований не дают возможности в полном объеме оценить влияние загрязнений окружающей среды на репродуктивную способность растений [3]. Например, Е.А. Мазная и И.В. Лянгузова [4] установили, что в условиях аэротехногенного загрязнения у представителей рода *Vaccinium* не происходило линейного снижения или увеличения семенной продуктивности, массы и всхожести семян в градиенте аэротехногенного загрязнения. Однако для других дикорастущих видов с увеличением индекса техногенной нагрузки наблюдалось снижение или увеличение показателей репродуктивной способности [5–8]. В обзоре, посвященном оценке влияния тяжелых металлов на прорастание семян [9], показано ингибирующее влияние свинца, никеля, кадмия, меди, кобальта, хрома и ртути на всхожесть семян различных видов растений. Различия в реакции репродуктивной сферы растений на загрязнение окружающей среды могут быть связаны не только с их видовыми особенностями, но и с формированием устойчивых популяций [10].

Несмотря на высокий интерес исследователей к изучению влияния внешних факторов на биоту на разных уровнях её организации, практически отсутствуют исследования реакции репродуктивной сферы растений на природные геофизические и геохимические аномалии. В природных условиях эколого-климатические, геохимические и геофизические факторы формируют некоторую экологическую мозаику среды обитания растительных популяций, определяя тем самым их структуру. Контрастными по комплексу геолого-геофизических характеристик могут быть условия произрастания в зонах активных тектонических разломов. Активные глубинные разломы литосферы представляют собой системы, проводящие к поверхности потоки вещества и энергии, в том числе обуславливают поступление радионуклидов и тяжелых металлов в окружающую среду и способны воздействовать на биологические природные компоненты [11].

В результате сравнительной оценки изменчивости признаков репродуктивной сферы жимолости синей – *Lonicera caerulea* s.l. L. (семейство Caprifoliaceae Juss.) в различных по геоэкологическим характеристикам районах Горного Алтая (долины рек Ак-Туру и Джазатор), в локальных зонах активных тектонических разломов отмечали увеличение дисперсии наиболее стабильных признаков этого вида [12–14]. В пределах подножия Катунского хребта выявлена популяция алтайского подвида *L. caerulea*, где наблюдали значительное увеличение полиморфизма морфологических признаков цветков, а также нарушение их функционального состояния [15], здесь отмечали растения с различными типами фасциированных цветков, нехарактерным расположением андроеца и гинецея, аномалиями в строении пыльников и пыльцевых зерен. У отдельных образцов выявлены аномалии в микроспорогенезе, впервые у этого вида отмечен цитомиксис. Получены данные о значимом влиянии недифференцированного комплекса геоэколо-

гических аномалий, связанных с активными тектоническими процессами, на массу плодов, их семенную продуктивность, всхожесть и энергию прорастания семян [16].

Цель данной работы – изучение гетерогенности популяции *L. caerulea* по характеристикам репродуктивной сферы на локальном участке одной из сейсмоактивных зон Горного Алтая в долине р. Кызыл-Ярык (Северо-Чуйский хребет).

Материалы и методики исследования

Объект исследований – алтайский подвид жимолости синей – *Lonicera caerulea* subsp. *altaica* Pall., широко распространённый в горных районах центральной Евразии как доминирующий подвид в кустарниковом лесном ярусе.

Исследования проведены в 2017 г. в долине р. Кызыл-Ярык (Республика Алтай, Кош-Агачский р-он, 50°05' с.ш., 87°57' в.д., 1 976–2 030 м над ур. м.), сформировавшейся в зоне сочленения активных в голоцене сейсмогенерирующих разломов – границ Северо-Чуйского хребта, Курайской межгорной впадины и Чаган-Узунского массива, разделяющего Курайскую и Чуйскую впадины [17].

На данном участке, на основании данных радоновой съемки, выбрано 5 микропопуляций *L. caerulea* subsp. *altaica* на 1,5-километровом профиле в долине р. Кызыл-Ярык (рис. 1). Радоновая съемка – надежный метод выявления разломных зон, их картирования и определения размеров, поскольку по зонам трещиноватости и разломным зонам осуществляется эманирование радона из глубин, активность эманационного поля радона отчетливо отображает расположение разломных зон и изменение сейсмической активности на данной территории [18]. Регистрация объемной активности радона проведена с помощью детектора-индикатора радона SIRAD M106N (ООО «СИНМОП», Россия). Поскольку временные вариации объемной активности радона имеют периодичность ~12, 24 ч и ~14 сут [18], для сравнительного анализа использовали максимальное показание суточных измерений. Уровень активности подпочвенного радона на участке исследования достаточно высокий по сравнению с верхней границей нормы (50 Бк/м³) и изменяется в пределах 262–1162 Бк/м³. Микропопуляции для проведения сравнительного анализа изменчивости признаков репродуктивных органов *L. caerulea* subsp. *altaica* выбраны на площадках с различным уровнем эманаций радона. Микропопуляция 3 (М3) выделена в зоне повышения активности подпочвенного радона до 1168 Бк/м³, микропопуляция 1 (М1) – до 707 Бк/м³, микропопуляция 5 (М5) – до 646 Бк/м³, микропопуляция 4 (М4) – до 391 Бк/м³, самые низкие эманации радона регистрировались в микропопуляции 2 (М2) – 262 Бк/м³, которую мы приняли как условный контроль.

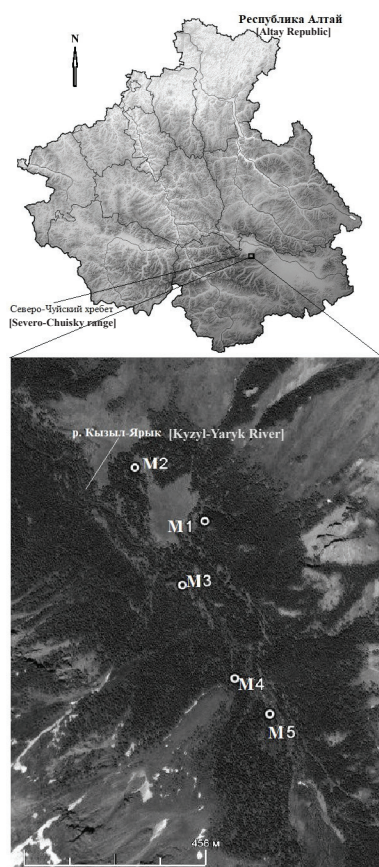


Рис. 1. Участок проведения исследований долина р. Кызыл-Ярык: M1–M5 – микропопуляции *Lonicera caerulea* subsp. *altaica* в зонах с различным уровнем эманаций радона, 50°05' с. ш., 87°57' в. д., 1 976–2 030 м над ур. м.

[Fig. 1. The study site in the valley of the Kyzyl-Yaryk River: M1-M5-micropopulations of *Lonicera caerulea* subsp. *altaica* in the zones characterized by a different radon emanation level, 50°05'N, 87°57'E, 1976-2030 m a.s.l.]

В каждой микропопуляции с 20–24 растений отобрано по 50 нормально развитых зрелых соплодий (плодов) для анализа популяционной изменчивости характеристик генеративных структур [19]. У образцов оценивали морфометрические признаки и вкусовые качества плодов, число выполненных семян в плоде, неразвившиеся семязачатки и семяношение (отношение числа выполненных семян к суммарному числу семян и семязачатков). Вкус плодов оценивали органолептическим методом по 5-балльной шкале вкусовых вариаций, основанной на степени горечи в плодах [20]. Описание формы плодов проводили по М.Н. Плехановой [21] (рис. 2). Реальную семенную продуктивность (РСП) определяли как количество нормально развитых

семян на одно соплодие [22]. Из каждого плода извлекали выполненные семена и неразвившиеся семязачатки.

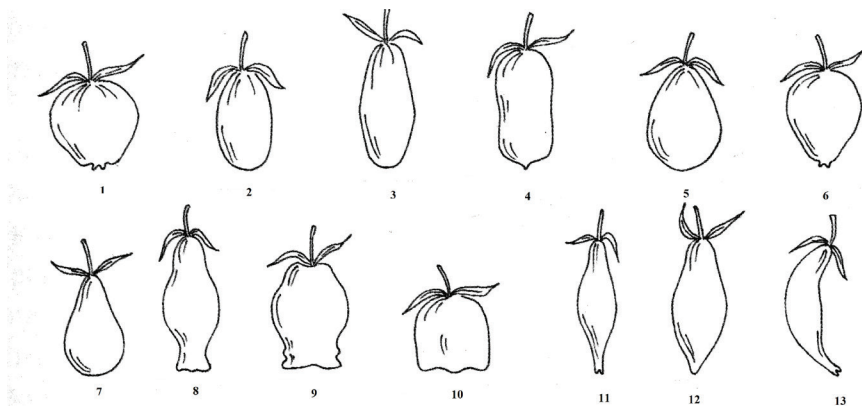


Рис. 2. Форма плодов *Lonicera caerulea* по М.Н. Плехановой [21]: 1 – круглая; 2 – овальная; 3 – удлинённо-овальная; 4 – цилиндрическая; 5 – яйцевидная; 6 – обратно яйцевидная; 7 – каплевидная; 8 – кувшиновидная; 9 – широко-кувшиновидная; 10 – колокольчатая; 11 – веретеновидная; 12 – широко-веретеновидная; 13 – стручковидная

[Fig. 2. Typical shapes of *Lonicera caerulea* fruits according to Plekhanova [21]: 1 - Round; 2 - Oval; 3 - Elongated oval; 4 - Cylinder; 5 - Obovoid; 6 - Obovate; 7 - Drop-shaped; 8 - Pitcher-shaped; 9 - Wide pitcher-shaped; 10 - Bell-shaped; 11 - Spindle-shaped; 12 - Wide spindle-shaped; 13 - Pod-like]

Определение лабораторной всхожести и энергии прорастания семян *L. caerulea* subsp. *altaica* проводили в августе 2017 г. Проращивание проводили в чашках Петри при температуре 25 °С, по 30 семян в чашке, в двух повторностях с каждого растения, по 20 растений из каждой микропопуляции. Всего исследовано 6 000 семян. Семена считали проросшими при формировании корешка размером с семя. При закладке опытов учитывали требования ГОСТ 13056.6-97 [23] и результаты исследований по экофизиологии прорастания семян *L. caerulea* [24]. В ходе исследования учитывали энергию прорастания семян (% на 5-е сут) и всхожесть (% на 30-е сут).

При изучении изменчивости репродуктивных характеристик высчитывали среднее значение, ошибку среднего значения, минимальное и максимальное значение и коэффициент вариации (CV). Для каждой микропопуляции проведен анализ данных на внутригрупповую гомогенность методом χ^2 [25]. Для проверки статистической значимости различий ($p \leq 0,05$) признаков репродуктивной сферы, а также оценки корреляционной зависимости между ними использовали критерии Стьюдента, Фишера и однофакторный анализ ANOVA [25].

Результаты исследования и обсуждение

Для изучения изменений, происходящих в растительном организме под воздействием неблагоприятных факторов среды, в основном используются

многочисленные морфологические характеристики. Анализ изменчивости позволяет узнать некоторые закономерности в распределении признаков среди особей, растущих в определенных условиях, и показывает степень их адаптации к этим условиям. В литературе часто отмечается, что увеличение вариабельности, лабильности морфологических свойств является результатом адаптивных реакций биологических систем на изменившиеся условия существования [19, 26].

Растения в микропопуляциях *L. caerulea* subsp. *altaica* в долине р. Кызыл-Ярык характеризовались высоким полиморфизмом по форме плодов. Наибольшим разнообразием формы плодов отличалась микропопуляция М1, наименьшим – микропопуляции с самым низким уровнем эманации радона М2 и М4 (рис. 3). Частота встречаемости растений с плодами овальной формы изменялась в пределах от 10 до 30%, это значительно ниже, чем в популяциях *L. caerulea* subsp. *altaica* на других участках Горного Алтая. Известно, что на территории Горного Алтая овальная (эллипсоидальная) форма плодов является преобладающей (до 60%) для *L. caerulea* subsp. *altaica* [20]. Согласно ранее проведенным нами исследованиям, увеличение варьирования формы плодов и снижение за счет этого частоты встречаемости растений с правильной овальной формой плодов до 20–25% отмечалось в зонах геомагнитных аномалий, связанных с сейсмотектонической активностью территории [12–14]. Увеличение формового разнообразия плодов на участках с повышенным уровнем эманации радона в долине р. Кызыл-Ярык согласуется с полученными ранее результатами.

Полученные морфометрические данные и семенную продуктивность плодов сравнивали между собой с помощью двух статистических методов: *t*-критерия Стьюдента и дисперсионного анализа ANOVA. С помощью *t*-критерия каждая из микропопуляций сравнивалась с микропопуляцией М2 (условный контроль). Анализ данных на внутригрупповую гомогенность показал отсутствие статистически значимых отличий по анализируемым признакам между растениями из одной микропопуляции. Это позволило определить статистическую значимость различий ($p \leq 0,01$) морфометрических характеристик и семенной продуктивности плодов растений из тестовых микропопуляций по сравнению с контрольной микропопуляцией.

По всем морфометрическим признакам плодов М4 статистически значимо ($p < 0,01$) отличается от условного контроля (М2) (рис. 4). У растений из М3 и М5 отличия существенны ($p \leq 0,05$) только по ширине плодов. Длина и ширина плодов с низким уровнем изменчивости. Коэффициент вариации в отдельных микропопуляциях для длины плодов изменяется от 11% в М4 до 14% (М2 и М5), для ширины плодов – от 8% (М1 и М5) до 10% в М3. Согласно исследованиям М.А. Шемберг и Е.Н. Шемберг [27], среди 13 морфологических и химических признаков жимолости синей в 3 природных популяциях Красноярского края размеры плодов – наиболее стабильные признаки.

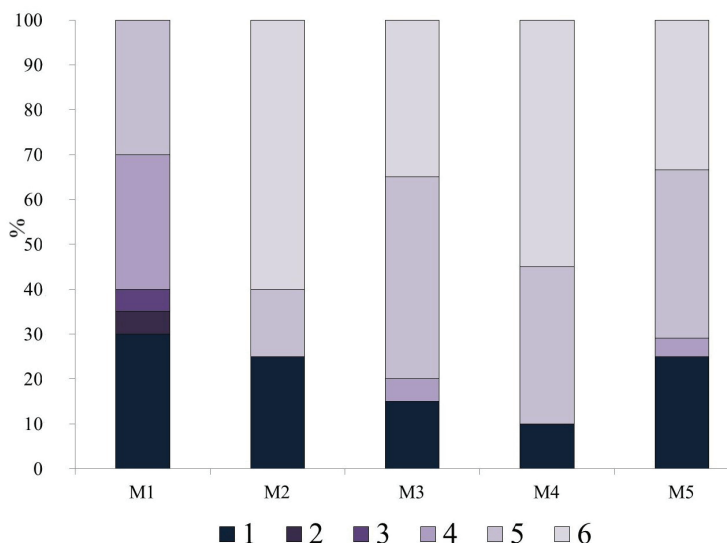


Рис. 3. Распределение растений в микропопуляциях *Lonicera caerulea* subsp. *altaica* долины р. Кызыл-Ярык по частоте встречаемости формы плодов.

По оси абсцисс – микропопуляции; по оси ординат – частота встречаемости признака, %:

1 – овальная; 2 – круглая; 3 – цилиндрическая; 4 – яйцевидная;

5 – кувшиновидная; 6 – веретеновидная

[Fig. 2. The distribution of plants in micropopulations of *Lonicera caerulea* subsp. *altaica* in the valley of the Kyzyl-Yaryk River according to the frequency of fruit shape occurrence.

On the X-axis - Micropopulations; on the Y-axis - The frequency of the trait occurrence, %.

1 - Oval, 2 - Round, 3 - Cylinder, 4 - Ovoid, 5 - Pitcher-shaped, 6 - Spindle-shaped]

Изменчивость показателей длины и ширины плода внутри популяций колебалась между разными удаленными друг от друга участками в пределах 9,8–14,0 и 8,8–10,4% соответственно. По данным Н.Ю. Теплюк с соавт. [28], длина и ширина плода также характеризовались очень низкими низкими уровнями изменчивости. Коэффициент вариации этих признаков на различающихся по экологии участках изменялся от 5,6 до 12,9 и от 4,1 до 8,6%, соответственно. На основании этих данных авторы делали выводы о том, что эти показатели не зависят от эколого-географической характеристики районов произрастания, что подтверждают и результаты данной работы. Однако ранее нами на территории Горного Алтая наблюдалось увеличение вариабельности морфометрии плодов *L. caerulea* до очень высокого уровня (41%) в период сейсмической активности в зоне магнитной аномалии, а также до повышенного уровня (21%) на верхней границе ареала распространения (в вертикальном градиенте) [12, 13].

С помощью дисперсионного анализа ANOVA сравнивали все исследуемые микропопуляции друг с другом. По результатам анализа установлено, что место произрастания существенно влияет на длину плодов критерий Фишера $F(4, 1034) = 22,225$; $p = 0,0000$, на ширину – $F(4, 1033) = 5,5614$;

$p = 0,00020$ и на индекс $F(4, 1033) = 7,9264$; $p = 0,0000$ (см. рис. 4). Стандартное значение критерия F на 1%-ном уровне значимости равно 13,5, на 5%-ном уровне – 5,6.

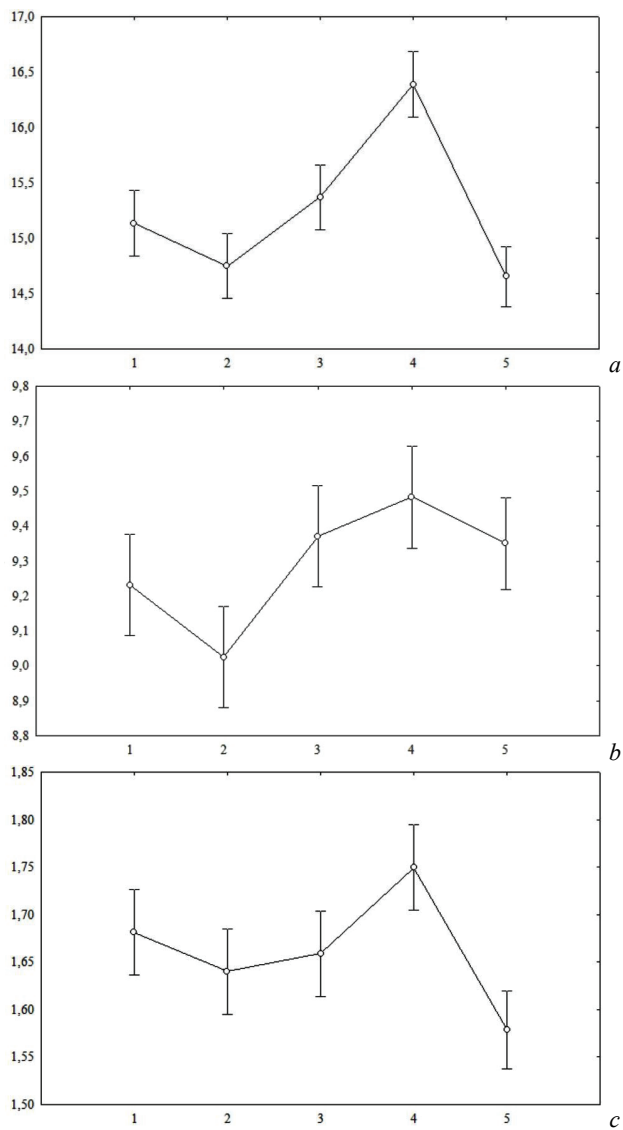


Рис. 4. Влияние места произрастания растений на *a* – длину, мм; *b* – ширину, мм; *c* – индекс плодов ($M \pm m_M$). 1 – M1; 2 – M2; 3 – M3; 4 – M4; 5 – M5

[Fig. 4. The influence of the plant habitat on *a* - The length of fruits, *b* - The width of fruits and *c* - The fruit index. On the X-axis – Micropopulations: 1 - M1, 2 - M2, 3 - M3, 4 - M4, 5 - M5; on the Y-axis: *a* - The length of fruits, mm; *b* - The width of fruits, mm; *c* - The fruit index ($M \pm m_M$)]

Плоды, собранные в контрольной микропопуляции, существенно (кроме М5) отличались от остальных наименьшей массой и наименьшим числом полноценных семян (рис. 5). По числу выполненных семян отличия статистически значимы ($p \leq 0,01$), кроме М3. Растения с самыми крупными плодами (до 1,1 г) (рис. 5, а) и наибольшей их семенной продуктивностью (до 27 шт.) (рис. 5, б) отмечены в М4.

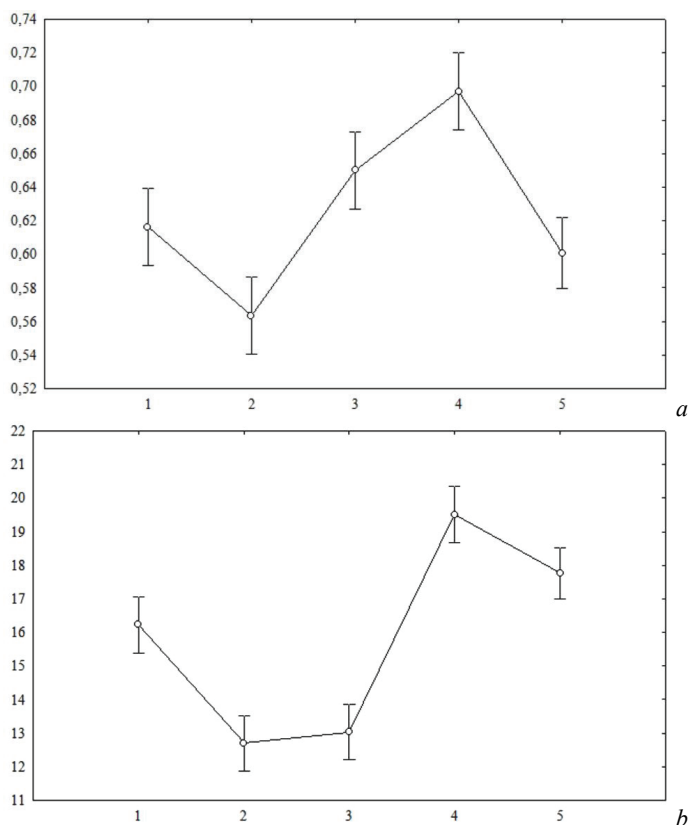


Рис. 5. Влияние места произрастания растений на: а – массу плодов, г; б – число полноценных семян, шт. ($M \pm m_M$). 1 – М1; 2 – М2; 3 – М3; 4 – М4; 5 – М5
[Fig. 5. The influence of the plant habitat on а) the weight of fruits and б) the number of full seeds.
 On the X-axis - Micropopulations: 1 - M1, 2 - M2, 3 - M3, 4 - M4, 5 - M5;
 on the Y-axis: а - The weight of fruits, g; б - The number of seeds, psc. ($M \pm m_M$)]

Результаты анализа ANOVA показали, что значения критерия Фишера для массы плодов $F(4, 1034) = 18,850$; $p = 0,0000$, числа полноценных семян – $F(4, 1034) = 49,881$; $p = 0,0000$ значительно превышают критические, что говорит о значимом влиянии места произрастания растений на эти признаки. Стандартное значение критерия F на 1%-ном уровне значимости равно 13,5.

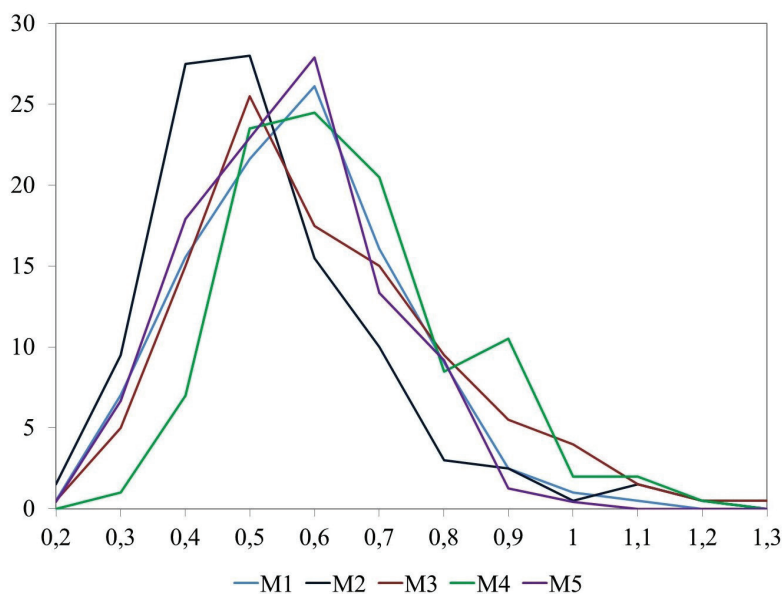
Анализ частоты встречаемости растений с различной массой плодов и семенной продуктивностью показал смещение распределения этих параме-

тров в сторону больших значений по сравнению с контрольной микропопуляцией. Так, например, в микропопуляциях М1 и М5 чаще всего (22–28%) встречаются плоды с массой 0,5–0,6 г, в М3 – 0,5 г, в микропопуляции М4 – 0,6–0,7 г, а в контрольной микропопуляции (по 28%) – 0,4 и 0,5 г (рис. 6, а). По частотному распределению семенной продуктивности: в контрольной микропопуляции чаще встречаются плоды с самым низким числом выполненных семян в плоде (0–3 семян), в микропопуляциях М4 и М5 наибольшая доля плодов имеет соответственно 22–24 и 16–18 семян, что больше, чем во всех остальных микропопуляциях (рис. 6, б). Высокой частотой встречаемости плодов с низким числом семян характеризовалась и микропопуляция М3, при этом здесь отмечался и самый высокий уровень варьирования по этому признаку.

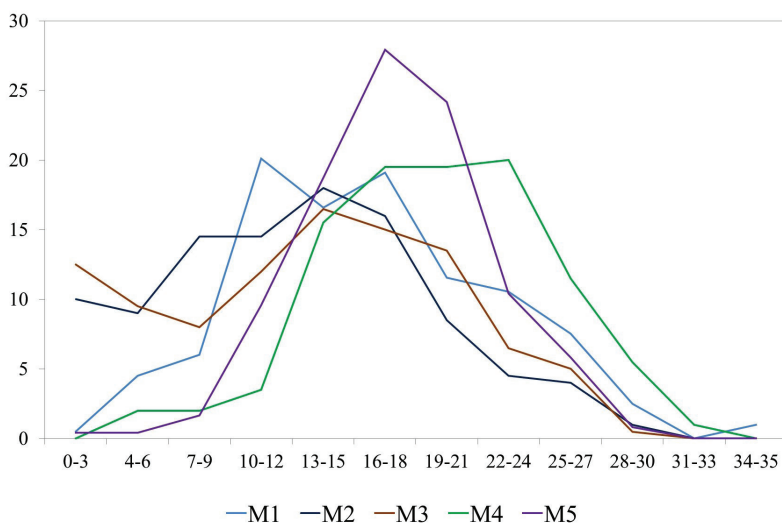
В микропопуляциях М1, М2 и М5 установлена средняя корреляционная зависимость между массой плодов и числом выполненных семян, равная соответственно 0,5; 0,6 и 0,3, статистически значимая ($p \leq 0,01$), в М3 отмечена тесная (0,7) зависимость между этими признаками. В М4 корреляционная зависимость между массой плодов и числом выполненных семян статистически не значима.

Известно, что процессы развития семян и околоплодника тесно связаны и синхронизированы, находятся под контролем фитогормонов – ауксина, гиббереллина и цитокинина. Начало развития плодов из завязи происходит после оплодотворения семязачатков и координируется сигналами от развивающихся семязачатков [29]. Согласно ранее проведенным исследованиям, в фоновых условиях у *L. caerulea* s.l. отмечено наличие тесной корреляционной зависимости между массой плодов и числом выполненных семян (0,73–0,98%, $p \leq 0,001$) [30]. Отсутствие тесной корреляции между массой плодов и числом завязавшихся семян установлено нами ранее в зоне геолого-геофизической аномалии [16]. Предполагалось, что нарушение известной закономерности может говорить о наличии экзогенного влияния на формирование плодов. Известно, что под воздействием внешних факторов может происходить изменение уровня фитогормонов в органах растений [31]. Возможно, разные комплексы геоэкологических аномалий могут оказывать влияние на нарушение сигнально-синхронизирующей функции фитогормонов. В наибольшей степени это воздействие проявляется на участке микропопуляции М4, где отсутствует линейная зависимость между массой плодов и числом семян.

В процессе изучения вкусовых качеств плодов выявлено полное отсутствие хинно-горьких плодов в исследуемых микропопуляциях *L. caerulea* subsp. *altaica*. Наибольшим вкусовым разнообразием плодов характеризуется М3 – микропопуляция с самым высоким уровнем эманации радона (рис. 7), в том числе частота встречаемости безгоречных (1–2 балла горечи) образцов здесь составляет 20% и статистически значимо ($p \leq 0,05$) положительно коррелирует с объемной активностью радона. Значимая отрицательная линейная зависимость ($p \leq 0,01$) установлена между объемной активностью радона и частотой встречаемости образцов с горькими плодами.



a



b

Рис. 6. Частотное распределение массы плодов (a) и их семенной продуктивности (b) в микропопуляциях *Lonicera caerulea* subsp. *altaica* в долине р. Кызыл-Ярык.

По оси абсцисс: a – масса плодов, г; b – число выполненных семян в плоде, шт.;

по оси ординат – частота встречаемости признака, %

[Fig. 6. Frequency distribution of the weight of fruits (a) and their seed production (b) in *Lonicera caerulea* subsp. *altaica* micropopulations in the Kyzyl-Yaryk river valley. On the X-axis: a - Weight of fruits, g; b - Number of developed seeds in the fruit, pcs.; on the Y-axis - The frequency of the trait occurrence, %]

Известно, что горькоплодность – доминантный признак *L. caerulea*, в большей части её ареала вкус плодов горький и они не съедобны. В то же время популяции Камчатки, Курил, Сахалина, Охотского побережья, Приамурья и Забайкалья характеризуются низким процентом встречаемости горькоплодных растений [20]. Согласно нашим исследованиям, высокий полиморфизм вкусовых вариаций плодов отмечался в зонах магнитных аномалий, связанных с активными тектоническими процессами, вследствие чего частота встречаемости растений с безгоречными плодами увеличивалась до 59 и 91% в разных районах исследований [12–14]. Сопоставление этих данных с приуроченностью популяций *L. caerulea* с безгоречными плодами к сейсмически активным районам даёт основание предположить о возможном влиянии факторов, связанных с активными тектоническими процессами, на массовое проявление рецессивного признака жимолости синей.

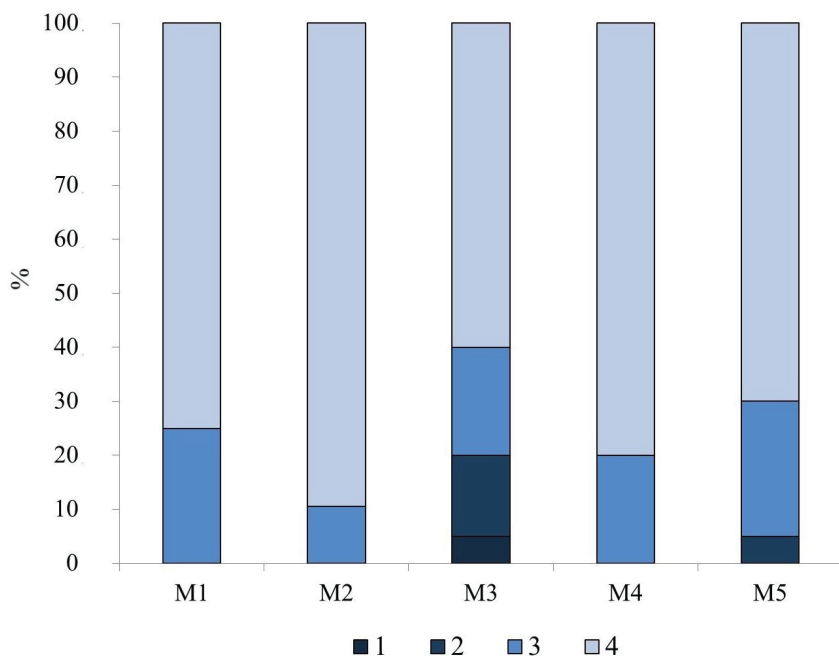


Рис. 7. Распределение растений в микропопуляциях *Lonicera caerulea* subsp. *altaica* в долине р. Кызыл-Ярык по вкусовым формам плодов (по баллу горечи). По оси абсцисс – микропопуляции; по оси ординат – частота встречаемости признака, %
[Fig. 7. Fruit taste variation at different sites (bitterness point). On the X-axis - Micropopulations; on the Y-axis - The frequency of the trait occurrence, %. 1-4 Bitterness point]

Оценку гетерогенности семенного потомства растений из выделенных микропопуляций проводили по критериям: лабораторная всхожесть и энергия прорастания семян. Лабораторная всхожесть семян, собранных в долине р. Кызыл-Ярык, составила 87–97% (рис. 8). Наименьшей всхожестью

(87%) отличались семена, собранные в контрольной микропопуляции (М2) и в микропопуляции под воздействием самого высокого уровня объемной активности радона – М3, наибольшей всхожестью (97%) отличались семена, собранные в М1. Для М1 характерна и самая высокая энергия прорастания семян (86%), самая низкая (55%) – для М5.

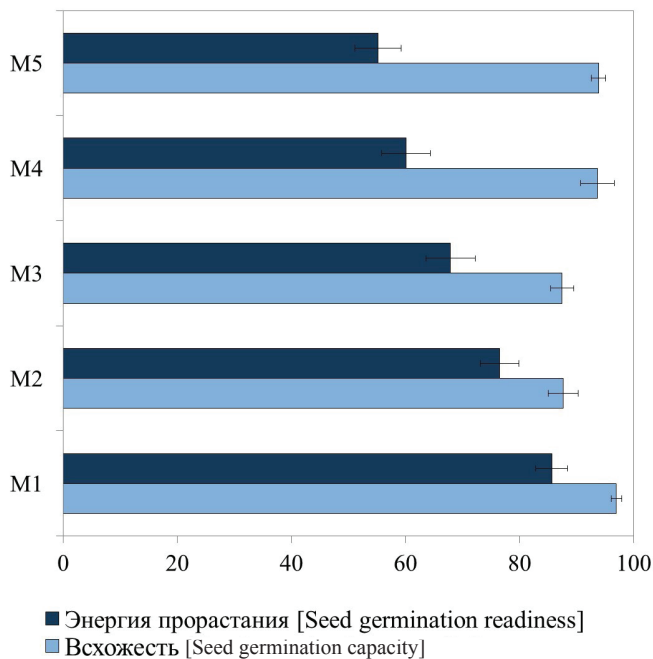


Рис. 8. Всхожесть и энергия прорастания семян в микропопуляциях *Lonicera caerulea* subsp. *altaica* долины р. Кызыл-Ярык. По оси абсцисс – % проросших семян, по оси ординат – микропопуляции

[Fig. 8. Seed germination capacity and germination readiness in *Lonicera caerulea* subsp. *altaica* micropopulations in the Kyzyl-Yaryk river valley. On the X-axis - Seed germination capacity and germination readiness, %; on the Y-axis - Micropopulations]

В изучаемых микропопуляциях массовое прорастание семян наблюдалось в М1 и М2 на 11-й день после посева, в М3 – на 11–12-й, М5 – на 13-й и в М4 – на 14-й день (рис. 9). Условия произрастания растений, вероятно, оказывали влияние и на длительность прорастания семян. Самым коротким (17 дней) этот период отмечен у семян, собранных в контрольной микропопуляции (М2). Семена из остальных микропопуляций всходили в течение 20 дней.

Известно, что для приспособления живых организмов к стрессовым воздействиям среды чрезвычайно важна изменчивость показателей репродуктивной способности. Именно воспроизводство является одним из основных факторов, определяющих стабильность природных популяций растений и

животных [2]. Показано усиление вариабельности морфологических признаков, снижение семенной продуктивности и формирование более жизнеспособного семенного потомства под воздействием техногенного загрязнения [32].

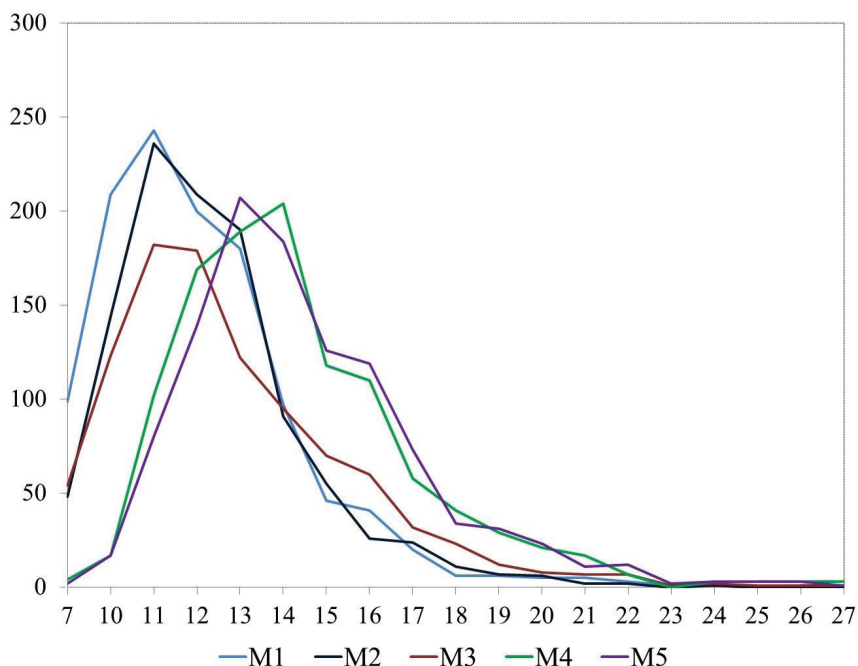


Рис. 9. Динамика прорастания семян *Lonicera caerulea* subsp. *altaica* из микропопуляций в зоне геолого-геофизической неоднородности в долине р. Кызыл-Ярык. По оси абсцисс – дни прорастания, по оси ординат – число проросших семян, шт.
[Fig. 9. Dynamics of seed germination from *Lonicera caerulea* subsp. *altaica* micropopulations in the area of geological heterogeneity in the Kyzyl-Yaryk river valley. On the X-axis - Seed germination, days; on the Y-axis - Number of germinated seeds, pcs.]

У растений, населяющих участки с повышенной концентрацией радионуклидов, фиксировалось снижение качества семян [33]. При совместном воздействии радионуклидов и нерадиоактивных токсичных элементов на биологические объекты возможно возникновение синергетических эффектов [34, 35]. Оценка влияния факторов нерадиационной (физико-химические характеристики почв и содержание в них нерадиоактивных элементов) и радиационной (удельная активность тяжелых естественных радионуклидов в почве) природы на снижение репродуктивной способности дикорастущего вида растений показала, что отдельные нерадиоактивные элементы наряду с радионуклидами значительно влияют на репродуктивную способность растений. Другие разнонаправленно (нивелируют или усиливают) модифи-

цируют биологические эффекты, обусловленные воздействием факторов радиационной природы [36].

Нам не удалось обнаружить связи морфометрических признаков плодов, семенной продуктивности, всхожести и энергии прорастания семян с уровнем emanации радона, вследствие чего логично предположить, что наблюдаемая нами изменчивость изученных параметров определяется влиянием других факторов. Поскольку микропопуляции расположены на 1,5-километровом профиле на одном макросклоне, в сходных условиях тепло- и влагообеспечения, то, вероятно, эти факторы могут быть связаны с сейсмо-тектонической активностью территории.

Тектонические процессы обуславливают дегазацию Земли, которая осуществляется непрерывно в пределах зон повышенной проницаемости. На интенсивную восходящую миграцию флюидов и emanацию газов в зонах активных тектонических разломов указывают локальные геохимические аномалии, оказывающие выраженное влияние на распределение химических элементов в почве, воздухе и растениях [37]. К глубинным тектоническим разломам приурочены также аномалии гравитационного, магнитного, электромагнитного, электростатического и акустического полей [38]. В зонах проявления трещинообразования и дробления пород выделяется значительная электрическая энергия, которая обуславливает газовые разряды, возрастание поверхностной проводимости и эмиссию электронов. С этими процессами связано формирование как локальных, так и региональных геофизических аномалий. Повышенной (даже по отношению к разломной зоне) трещиноватостью и проницаемостью горных пород характеризуются структурные узлы – участки сочленения разнонаправленных разломных зон различного иерархического уровня, которые создают специфические неоднородные условия обитания растительных популяций, определяя тем самым их структуру. Вопрос о влиянии активных тектонических процессов на биологические объекты поднимался исследователями неоднократно [39–42]. Поскольку выделенный для исследований участок находится в зоне сочленения активных в голоцене сейсмогенерирующих разломов [17], наряду с радоном возможно влияние на растения различных комплексов геохимических и геофизических факторов. Для проверки этого предположения в дальнейшем планируется проведение исследования содержания радионуклидов, микро- и макроэлементов в системе почва – растение, а также детальная геоморфологическая оценка территории.

Заключение

Исследования, проведенные в локальной сейсмически активной зоне Горного Алтая в долине р. Кызыл-Ярык, показали гетерогенность популяции *L. caerulea* subsp. *altaica* по репродуктивным характеристикам растений. Микропопуляции, находящиеся на участках с различным уровнем объемной

активности подпочвенного радона ($262\text{--}1162\text{ Бк/м}^3$), значимо различались по длине, массе, ширине и индексу плодов, числу выполненных семян, лабораторной всхожести и энергии прорастания растений, а также имели разную степень корреляционной зависимости ($0,3\text{--}0,7$) между массой плодов и числом выполненных семян. Анализ частоты встречаемости растений с различной массой плодов и семенной продуктивностью показал смещение распределения этих параметров в сторону больших значений по сравнению с контрольной микропопуляцией. Высокой частотой встречаемости растений с низким числом семян в плодах характеризовались микропопуляции как с самым высоким эманационным полем радона (1162 Бк/м^3), так и с самым низким (262 Бк/м^3). В микропопуляциях с самым высоким уровнем объемной активности подпочвенного радона увеличивалось разнообразие формы плодов, их семенной продуктивности и вкусовых вариаций, в том числе проявление рецессивного признака – безгоречности плодов. Установлена зависимость между уровнем эманации радона и частотой встречаемости растений с безгоречными (горькими) плодами. Влияние уровня объемной активности радона на изменчивость других показателей репродуктивной способности было несущественным. Возможно влияние недифференцированного комплекса факторов, связанных с активными тектоническими процессами, на формирование и развитие репродуктивных органов растений.

Литература

1. Биологический контроль окружающей среды: генетический мониторинг : учеб. пособие для студ. высш. проф. образования / С.А. Гераськин, Е.И. Сарапульцева, Л.В. Паценко и др. / ред. С.А. Гераськина, Е.И. Сарапульцевой. М. : Изд. центр «Академия», 2010. 208 с.
2. Батыгина Т.Б., Круглова Н.Н., Горбунова В.Ю., Титова Г.Е., Сельдиминова О.А. От микроспоры – к сорту / отв. ред. В.А. Вахитов. М. : Наука, 2010. 174 с.
3. Анисимова Г.М., Лянгузова И.В., Шамров И.И. Влияние условий загрязнения окружающей среды на репродукцию растений // Эмбриология цветковых растений. Терминология и концепции. Т. 3: Системы репродукции / ред. Т.Б. Батыгина. СПб. : Мир и семья, 2000. С. 532–535.
4. Мазная Е.А., Лянгузова И.В. Эколого-популяционный мониторинг ягодных кустарничков при аэротехногенном загрязнении. СПб. : ВВМ, 2010. 195 с.
5. Жуйкова Т.В., Позолотина В.Н., Безель В.С. Разные стратегии адаптации растений к токсическому загрязнению среды тяжелыми металлами (на примере *Taraxacum officinale* s.l) // Экология. 1999. № 3. С. 189–196.
6. Жуйкова Т.В., Безель В.С., Позолотина В.Н., Северюхина О.А. Репродуктивные возможности растений в градиенте химического загрязнения среды // Экология. 2002. № 6. С. 432–437.
7. Лянгузова И.В. Влияние аэротехногенного загрязнения на прорастание семян и рост проростков дикорастущих растений // Физиология растений. 2011. № 6. С. 844–852.
8. Титов А.Ф., Таланова В.В., Казнина Н.М. Физиологические основы устойчивости растений к тяжелым металлам: учеб. пособие; Институт биол. КарНЦ РАН. Петрозаводск : Карельский науч. центр РАН, 2011. 77 с.
9. Sethy S.K. Ghosh S. Effect of heavy metals on germination of seeds // J. Nat. Sci. Biol. Med. 2013. № 4(2). PP. 272–275. doi: [10.4103/0976-9668.116964](https://doi.org/10.4103/0976-9668.116964)

10. Алексеева-Попова Н.В., Игошина Т.И., Косицин А.В., Ильинская Н.Л. Устойчивость к тяжелым металлам (Pb, Zn, Cu) отдельных видов и популяций естественных фитоценозов из района медноколчеданных рудопоявлений // Растения в экстремальных условиях минерального питания. Л. : Наука, 1983. С. 22–42.
11. Handy M.R., Hirth G., Hovius N. (Eds.) Tectonic Faults: Agents of Change on a Dynamic Earth. Cambridge : MIT Press, 2007. 446 p.
12. Boyarskikh I.G., Shitov A.V. Intraspecific variability of plants: the impact of active local faults // Man and the Geosphere / ed. I.V. Florinsky. New York : Nova Science, 2010. PP. 145–167.
13. Боярских И.Г., Васильев В.Г., Кукушкина Т.А. Изменение метаболизма *Lonicera caerulea* L. (Caprifoliaceae) в тектонически активной зоне Горного Алтая (Северо-Чуйский хр.) // Растительный мир Азиатской России. 2011. № 2. С. 114–119.
14. Боярских И.Г., Шитов А.В. Особенности внутривидовой изменчивости плодов *Lonicera caerulea* L. в связи с активными геологическими процессами Горного Алтая // Вестник Томского государственного университета. 2011. № 348. С. 143–147.
15. Куликова А.И., Боярских И.Г. Особенности формирования репродуктивных структур у тератной формы *Lonicera caerulea* (Caprifoliaceae) // Ботанический журн. 2014. Т. 99, № 2. С. 193–205.
16. Куликова А.И., Боярских И.Г. Репродуктивная способность *Lonicera caerulea* (Caprifoliaceae) в локальной зоне геолого-геофизической неоднородности Горного Алтая // Сибирский экологический журнал. 2015. № 4. С. 608–616. doi: [10.15372/SEJ20150412](https://doi.org/10.15372/SEJ20150412)
17. Agatova A., Nepov R. Dating strong prehistoric earthquakes and estimating their recurrence interval applying radiocarbon analysis and dendroseismological approach – case study from SE Altai (Russia) // International Journal of Geohazards and Environment. 2016. № 2 (3). PP. 131–149. doi: [10.15273/ijge.2016.03.014](https://doi.org/10.15273/ijge.2016.03.014)
18. Spivak A.A. Manifestation of fault zones in geophysical fields // Geodynamics & Tectonophysics. 2014. № 5 (2). PP. 507–525. doi: [10.5800/GT-2014-5-2-0138](https://doi.org/10.5800/GT-2014-5-2-0138)
19. Мамаев С.А. Формы внутривидовой изменчивости древесных растений. М. : Наука, 1973. 283 с.
20. Сковрцов А.К., Куклина А.Г. Голубые жимолости: Ботаническое изучение и перспективы культуры в средней полосе России. М. : Наука, 2002. 160 с.
21. Плеханова М.Н. Классификатор рода *Lonicera* L. подсекции *Caeruleae* Rehd. (Жимолость). Л. : ВИР, 1988. 25 с.
22. Методические указания по семеноведению интродуцентов. М. : Наука, 1980. 64 с.
23. ГОСТ 13056.6-97. Семена деревьев и кустарников. Метод определения всхожести. Минск, 1998. 28 с.
24. Phartyal S., Kondo T., Hoshino Y., Baskin C., Baskin J. Morphological dormancy in seeds of the autumn-germinating shrub *Lonicera caerulea* var. *emphyllocalix* (Caprifoliaceae) // Plant Species Biology. 2009. Vol. 24. PP. 20–26. doi: [10.1111/j.1442-1984.2009.00232.x](https://doi.org/10.1111/j.1442-1984.2009.00232.x)
25. Glantz S.A. Primer of Biostatistics. 7th ed. New York : McGraw-Hill, 2012. 320 p.
26. Позолотина В.Н. Отдаленные последствия действия радиации на растения. Екатеринбург : Академкнига, 2003. 244 с.
27. Шемберг М.А., Шемберг Е.Н. Изменчивость и структура популяций *Lonicera pallasii* Ledeb. в средней Сибири // Растительные ресурсы. 1994. Т. 30, № 4. С. 29–35.
28. Теплюк Н.Ю., Евтухова О.М., Шемберг М.А. Индивидуальная изменчивость морфологических и химических признаков жимолости голубой Красноярского края // Химия растительного сырья. 2003. № 7 (1). С. 87–91.
29. Pandolfini T. Seedless fruit production by hormonal regulation of fruit set // Nutrients. 2009. № 1. PP. 168–177. doi: [10.3390/nu1020168](https://doi.org/10.3390/nu1020168)
30. Боярских И.Г. Биологические особенности представителей *Lonicera caerulea* L. s.l. : дис. ... канд. биол. наук. Новосибирск, 2004. 209 с.

31. Веселов Д.С. Веселов С.Ю., Высоцкая Л.Б., Кубярова Г.Р., Фархутдинов Р.Г. Гормоны растений: регуляция концентрации, связь с ростом и водным обменом / отв. ред. Ф.М. Шакирова. М. : Наука, 2007. 158 с.
32. Прокопьев И.А., Филиппова Г.В., Шеин А.А., Габышев Д.В. Влияние городского техногенного загрязнения на морфологические, биохимические характеристики и семенную продуктивность ромашки аптечной // Экология. 2014. № 1. С. 22–29. doi: [10.7868/S0367059713060097](https://doi.org/10.7868/S0367059713060097)
33. Евсеева Т.И., Гераськин С.А., Белых Е.С. Майстренко Т.А., Brown J.E. Оценка репродуктивной способности *Pinus sylvestris*, произрастающей в условиях хронического воздействия радионуклидов уранового и ториевого рядов // Экология. 2011. № 5. С. 355–360.
34. Heier L.S., Teien H.C., Oughton D., Tollefsen K.E., Olsvik P.A., Rosseland B.O., Lind O.C., Farmen E., Skipperud L., Salbu B. Sublethal effects in Atlantic salmon (*Salmo salar*) exposed to mixtures of copper, aluminium and gamma radiation // Journal of Environmental Radioactivity. 2012. PP. 33–34. doi: [10.1016/j.jenvrad.2012.04.004](https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2012.04.004)
35. Geras'kin S.A., Kim J.K., Dikarev V.G., Oudalova A.A., Dikareva N.S., Spirin Y.V. Cytogenetic effects of combined radioactive (¹³⁷Cs) and chemical (Cd, Pb, and 2, 4-D herbicide) contamination on spring barley intercalary meristem cells // Mutat. Res. 2005. Vol. 586. PP. 147–159.
36. Евсеева Т.И., Гераськин С.А., Вахрушева О.М. Оценка вклада факторов радиационной и химической природы в формирование биологических эффектов в популяции горошка мышиного с территории складирования отходов радиевого производства (пос. Водный, Республика Коми) // Радиационная биология. Радиоэкология. 2014. Т. 54, № 1. С. 85–95. doi: [10.7868/S0869803114010068](https://doi.org/10.7868/S0869803114010068)
37. Man and the Geosphere / ed. by I.V. Florinsky. New York : Nova Science Publishers Inc., 2010. 385 p.
38. Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б., Беляев В.В., Бурлаков П.С. Влияние тектонических нарушений (дегазация, наведенные токи, вариации геомагнитного поля) севера Русской плиты на окружающую среду (на примере Архангельской области) // Вестн. КРАУНЦ. 2009. № 2 (14). С. 77–89.
39. Trifonov V.G., Karakhanian A.S. Active faulting and human environment // Tectonophysics. 2004. Vol. 380, №3–4. PP. 287–294. doi: [10.1016/j.tecto.2003.09.025](https://doi.org/10.1016/j.tecto.2003.09.025)
40. Heads M. Biogeographical affinities of the New Caledonian biota: a puzzle with 24 pieces // Journal of Biogeography. 2010. № 37. PP. 1179–1201. doi: [10.1111/j.1365-2699.2010.02311.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2010.02311.x)
41. Syvoroitkin V.L. Hydrogen degassing of the Earth: Natural disasters and the biosphere // Man and the Geosphere / ed. Florinsky I.V. New York : Nova Science Publishers, 2010. PP. 307–347.
42. Вьюхина А.А., Омельченко Е.И., Шиманская Е.И., Чохели В.А., Вардуни Т.В. Применение методов биотестирования для индикации закономерностей варьирования фенотипических и цитогенетических изменений растений-индикторов в зависимости от степени тектонической нарушенности зоны произрастания // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2013. № 1. С. 45–51.

Поступила в редакцию 16.01.2020 г.; повторно 06.07.2020 г.;
принята 27.10.2020 г.; опубликована 29.12.2020 г.

Авторский коллектив:

Боярских Ирина Георгиевна – доцент, канд. биол. наук, с.н.с. лаборатории интродукции пищевых растений, Центральный сибирский ботанический сад СО РАН (Россия, 630090, г. Новосибирск, ул. Золотогорная, 101).

ORCID iD: <http://orcid.org/0000-0001-6212-0129>

E-mail: irina_2302@mail.ru

Волкова Людмила Романовна – ст. лаборант лаборатории интродукции пищевых растений, Центральный сибирский ботанический сад СО РАН (Россия, 630090, г. Новосибирск, ул. Золотолинская, 101).

E-mail: 97lyudmila-volk@mail.ru

Для цитирования: Боярских И.Г., Волкова Л.Р. Изменчивость репродуктивной способности *Lonicera caerulea* (Caprifoliaceae) в сейсмоактивной зоне Горного Алтая (Северо-Чуйский хр., р. Кызыл-Ярык) // Вестн. Том. гос. ун-та. Биология. 2020. № 52. С. 48–70. doi: 10.17223/19988591/52/3

For citation: Boyarskykh IG, Volkova LR. Variability of the reproductive ability of *Lonicera caerulea* (Caprifoliaceae) in the seismically active zone of the Altai Mountains (Severo-Chuisky range, Kyzyl-Yaryk valley). *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya* = *Tomsk State University Journal of Biology*. 2020;52:48-70. doi: 10.17223/19988591/52/3 In Russian, English Summary

Irina G. Boyarskykh, Lyudmila R. Volkova

Central Siberian Botanical Garden, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

Variability of the reproductive ability of *Lonicera caerulea* (Caprifoliaceae) in the seismically active zone of the Altai Mountains (Severo-Chuisky range, Kyzyl-Yaryk valley)

Seismically active areas of tectonic faults create specific inhomogeneous living conditions of plant populations and can thereby determine their structure. Studies of the reaction of plant reproductive structures to geoecological anomalies associated with active tectonic processes are practically absent. The aim of this work was to study the variability of the reproductive characteristics of *Lonicera caerulea* subsp. *altaica* plants in the local seismic zone of the Altai Mountains.

We carried out studies in 2017 in the valley of the Kyzyl-Yaryk river (Altai Republic, Kosh-Agachsky district) (See Fig. 1), which was formed in the junction zone of seismic-generating faults active in the Holocene that are the boundaries of the North Chuy Range, Kurai intermountain basin and Chagan-Uzun massif and separating the Kurai and Chuysky depressions. We isolated 5 micropopulations of the Altai subspecies of blue honeysuckle - *L. caerulea* subsp. *altaica* in areas differing in volumetric activity of the radon emanation field (262-1162 Bq / m³) for research. Fifty fruits were selected in each micropopulation of *L. caerulea* subsp. *altaica* from 20 plants. We examined the morphometric characteristics and taste of the fruits, the number of full seeds and immature ovules in the fruits, the ratio of the number of full seeds to the total number of seeds and ovules, the correlation between the characters, as well as the seed germination capacity and germination readiness. The taste of the fruits was evaluated by the organoleptic method on a 5-point scale of taste variations based on the degree of bitterness in the fruits. To determine seed germinating capacity and germination readiness, germination was performed in Petri dishes at room temperature. We evaluated germination readiness on the 5th day, where *n* is the number of seeds and *N* is the number of seeds germinated during this period. For each micropopulation, we analyzed data for intragroup homogeneity using the χ^2 method. Student's *t*-test, Fisher's exact test and one-way ANOVA analysis were used to test statistically significant differences in reproductive characteristics, as well as to assess the correlation between them.

The analysis of variance (ANOVA) showed that the values of the Fisher criterion for the length, width, index, weight of the fruit and the number of seeds in them considerably exceed the critical value, which indicates a reliable effect of the place of plant growth on all these parameters at a 95-99% probability level. For individual test

micropopulations, significant differences were found in the morphometric characteristics and seed productivity of plant fruits in comparison to the control micropopulation (the area with the lowest level of radon emanation field) (See Fig. 2, 3, 4 and 5). An analysis of the frequency of occurrence of plants with different weight and seed productivity of the fruits from the studied micropopulations showed a shift in the distribution of these parameters towards larger values, compared to the control micropopulation (See Fig. 6). The seeds collected in the control micropopulation were characterized by the least germination (See Fig. 8) and the shortest germination period (See Fig. 9). In the studied population, the average and close degree of correlation between the weight of the fruit and the number of full seeds was established; the reliability of the correlation varied depending on the place of plant growth. Plants in the *L. caerulea* subsp. *altaica* in the valley of the Kyzyl-Yaryk river were characterized by high polymorphism of the fruit shape. The frequency of occurrence of plants with oval fruits was significantly lower than in populations of *L. caerulea* subsp. *altaica* in other areas of the Altai Mountains. In micropopulations under the influence of a higher level of volumetric activity of subsoil radon, the variety of fruit shapes (See Fig. 3) and their taste variations (See Fig. 7) increased, including an increase in the expression of the recessive trait *L. caerulea*, the absence of bitter fruits (bitter-free fruits). The correlation between the level of radon emanation and the frequency of occurrence of plants with bitter fruits was significant at $p < 0.01$. The influence of the level of radon emanation on the variability of morphometric characteristics of the fruit, seed productivity, germination and germination energy of the seeds was not significant. The heterogeneity of the population of the *L. caerulea* subsp. *altaica*, according to the features of the generative sphere, suggests a possible influence of a complex of factors associated with active tectonic processes on the formation and development of plant reproductive organs.

The paper contains 9 Figures and 42 References.

Key words: *Lonicera caerulea* subsp. *altaica*; morphometry; seed productivity; germination capacity and readiness; radon; active tectonic fault.

References

1. *Biologicheskii kontrol' okruzhayushchey sredy: geneticheskii monitoring*: ucheb. Posobie [Biological control of the environment: Genetic monitoring. Textbook]. Geras'kin SA and Sarapul'tseva EI, editors. Moscow: Akademiya Publ.; 2010. 208 p. In Russian
2. Batygina TB, Gorbunova VYu, Titova GE, Sel'dimirova OA. Ot mikrospory – k sortu [From microspore to variety]. Vakhitov VA, editor. Moscow: Nauka Publ.; 2010. 174 p. In Russian
3. Anisimova GM, Lyanguzova IV, Shamrov II. Vliyanie usloviy zagryazneniya okruzhayushchey sredy na reproduksiyu rasteniy [Effects of environmental pollution on plant reproduction]. In: *Embriologiya tsvetkovykh rasteniy. Terminologiya i kontseptsii. T. 3. Sistemy reproduksii* [Embryology of flowering plants. Terminology and concepts. Vol. 3. Reproductive systems]. Batygina TB, editor. St. Petersburg: Mir & Sem'ya Publ.; 2000: pp. 532-535. In Russian
4. Maznaya EA, Lyanguzova IV. Ekologo-populyatsionnyy monitoring yagodnykh kustarnichkov pri aerotekhnogennom zagryaznenii [Ecological and population monitoring of berry shrubs under aerotechnogenic pollution]. St. Petersburg: VVM Publ.; 2010. 195 p. In Russian
5. Zhuykova TV, Pozolotina VN, Bezel' VS. Different strategies of plant adaptation to toxic environmental pollution with heavy metals: an example of *Taraxacum officinale* s.l. *Russian J Ecology*. 1999;30(3):166-173.
6. Zhuykova TV, Bezel' VS, Pozolotina VN, Severyukhina OA. The reproductive capacity of plants in a gradient of chemical environmen pollution. *Russian J Ecology*. 2002;33(6):407-412. doi: [10.1023/A:1020951514763](https://doi.org/10.1023/A:1020951514763)

7. Lyanguzova IV. Effect of industrial air pollution on wild plant seed germination and seedling growth. *Russian J Plant Physiology*. 2011;58(6):991-998. doi: [10.1134/S1021443711060136](https://doi.org/10.1134/S1021443711060136)
8. Titov AF, Talanova VV, Kaznina NM. Fiziologicheskie osnovy ustoychivosti rasteniy k tyazhelym metallam: uchebnoe posobie [The physiological basis of plant resistance to heavy metals. Textbook]. Petrozavodsk: Karel'skiy nauchnyy tsentr Rossiyskoy akademii nauk Publ.; 2011. 77 p. In Russian
9. Sethy SK, Ghosh S. Effect of heavy metals on germination of seeds. *J. Nat. Sci. Biol. Med.* 2013;4(2):272-275. doi: [10.4103/0976-9668.116964](https://doi.org/10.4103/0976-9668.116964)
10. Alekseeva-Popova NV, Igoshina TI, Kositsin AV, Il'inskaya NL. Ustoychivost' k tyazhelym metallam (Pb, Zn, Cu) otdel'nykh vidov i populyatsiy estestvennykh fitotsenozov iz rayona mednokolchedannykh rudoproyavleniy [Resistance to heavy metals (Pb, Zn, Cu) of certain species and populations of natural phytocoenoses from the area of copper-rock ores]. In: *Rasteniya v ekstremal'nykh usloviyakh mineral'nogo pitaniya* [Plants in extreme conditions of mineral nutrition]. Shkol'nik Mya and Alekseeva-Popova NV, editor. Leningrad: Nauka Publ.; 1983. pp. 22-42. In Russian
11. Handy MR, Hirth G, Hovius N. Tectonic faults: Agents of change on a dynamic Earth. Cambridge: MIT Press Publ.; 2007. 446 p.
12. Boyarskikh IG, Shitov AV. Intraspecific variability of plants: The impact of active local faults. In: *Man and the Geosphere*. Florinsky IV, editor. New York: Nova Science Publ.; 2010:145-167.
13. Boyarskikh IG, Vasil'ev VG, Kukushkina TA. Change of metabolism *Lonicera caerulea* L. (Caprifoliaceae) in tectonic active zone of the Mountain Altai (North Chuya range). *Rastitel'nyy Mir Aziatskoj Rossii*. 2011;2(8):114-119. In Russian
14. Boyarskikh IG, Shitov AV. Peculiarities of intrapopulation variability of fruit of *Lonicera caerulea* L. in connection with active geological processes of Gorny Altai. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2011;348:143-147. In Russian
15. Kulikova AI, Boyarskikh IG. Peculiarities of reproductive structures formation in the abnormal form of *Lonicera caerulea* subsp. *altaica* (Caprifoliaceae). *Botanicheskiy zhurnal = Botanical J.* 2014;99(2):193-205. In Russian, English Summary
16. Kulikova AI, Boyarskikh IG. Reproductive ability of *Lonicera caerulea* (caprifoliaceae) in the local area of geological and geophysical heterogeneity in the Altai mountains. *Contemporary Problems of Ecology*. 2015;4:503-511. doi: [10.15372/SEJ20150412](https://doi.org/10.15372/SEJ20150412)
17. Agatova A, Nepop R. Dating strong prehistoric earthquakes and estimating their recurrence interval applying radiocarbon analysis and dendroseismological approach – case study from SE Altai (Russia). *Int J Geohazards and Environment*. 2016;(3):131-149. doi: [10.15273/ijge.2016.03.014](https://doi.org/10.15273/ijge.2016.03.014)
18. Spivak AA. Manifestation of fault zones in geophysical fields. *Geodynamics & Tectonophysics*. 2014;5(2):507-525. doi: [10.5800/GT-2014-5-2-0138](https://doi.org/10.5800/GT-2014-5-2-0138)
19. Mamaev SA. Formy vnutrividovoy izmenchivosti drevesnykh rasteniy [Forms of intraspecific variability of woody plants]. Moscow: Nauka Publ.; 1973. 283 p. In Russian
20. Skvortsov AK, Kuklina AG. Golubye zhimolosti: Botanicheskoe izuchenie i perspektivy kul'tury v sredney polose Rossii [Blue honeysuckles: Botanical study and cultural prospects in the middle belt of Russia]. Moscow: Nauka Publ.; 2002. 160 p. In Russian
21. Plekhanova MN. Klassifikator roda *Lonicera* L. podsektzii Caeruleae Rehd. (Zhimolost') [Classifier of the genus *Lonicera* L. of the sub-section Caeruleae Rehd. (Honeysuckle)]. Leningrad: VIR Publ.; 1988. 25 p. In Russian
22. *Metodicheskie ukazaniya po semenovedeniyu introdutsentov* [Methodological guidelines for seed science of introducers]. Moscow: Nauka Publ.; 1980. 64 p. In Russian
23. *GOST 13056.6-97. Semena derev'ev i kustarnikov. Metod opredeleniya vskhozhesti* [Seeds of trees and shrubs. Germination method]. Minsk. 1998. 28 p. In Russian

24. Phartyal S, Kondo T, Hoshino Y, Baskin C, Baskin J. Morphological dormancy in seeds of the autumn-germinating shrub *Lonicera caerulea* var. *emphyllocalix* (Caprifoliaceae). *Plant Species Biology*. 2009;24:20-26. doi: [10.1111/j.1442-1984.2009.00232.x](https://doi.org/10.1111/j.1442-1984.2009.00232.x)
25. Glantz SA. Primer of Biostatistics. 7 th ed. New York: McGraw-Hill Publ.; 2012. 320 p.
26. Pozolotina VN. Otdalennye posledstviya deystviya radiatsii na rasteniya [Remote consequences of impact radiation on plants]. Yekaterinburg: Akademkniga Publ.; 2003. 244 p. In Russian
27. Shemberg MA, Shemberg EN. Izmenchivost' i struktura populyatsiy *Lonicera pallasii* Ledeb. v sredney Sibiri [Variability and structure of *Lonicera pallasii* Ledeb. populations in Central Siberia]. *Rastitel'nye resursy*. 1994;30(4):29-35. In Russian
28. Teplyuk NYu, Evtukhova OM, Shemberg MA. Individual'naya izmenchivost' morfologicheskikh i khimicheskikh priznakov zhimolosti goluboy Krasnoyarskogo kraya [Individual variability of morphological and chemical traits of the blue honeysuckle in Krasnoyarsk region]. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ya = Chemistry of Plant Raw Material*. 2003;7(1):87-91. In Russian
29. Pandolfini T. Seedless Fruit production by hormonal regulation of fruit set. *Nutrients*. 2009;1:168-177. doi: [10.3390/nu1020168](https://doi.org/10.3390/nu1020168)
30. Boyarskikh IG. *Biologicheskie osobennosti predstaviteley Lonicera caerulea L. s.l.*: [Biological features of *Lonicera caerulea* L. s.l. representatives. Cand Sci. Dissertation, Biology]. Novosibirsk: Central Siberian Botanical Garden SB RAS; 2004. 209 p. In Russian
31. Veselov DS, Veselov SYu, Vysotskaya LB, Kuboyarova GR, Farkhutdinov RG. Gormony rasteniy: regulyatsiya kontsentratsii, svyaz' s rostom i vodnym obmenom [Plant hormones: Concentration regulation, association with growth and water metabolism]. Shakirova FM, editor. Moscow: Nauka Publ.; 2007. 158 p. In Russian
32. Prokop'ev IA, Filippova GV, Shein AA, Gabyshev DV. Impact of urban anthropogenic pollution on seed production, morphological and biochemical characteristics of chamomile, *Matricaria chamomila* L. *Russian J Ecology*. 2014;1:18-23. doi: [10.7868/S0367059713060097](https://doi.org/10.7868/S0367059713060097)
33. Evseeva TI, Geras'kin SA, Belykh ES, Maystrenko TA, Brown JE. Assessment of the reproductive capacity of *Pinus sylvestris* growing under conditions of chronic exposure to radionuclides of uranium and thorium series. *Russian J Ecology*. 2011;5:355-360. doi: [10.1134/S1067413611050055](https://doi.org/10.1134/S1067413611050055)
34. Heier LS, Teien HC, Oughton D, Tollefsen KE, Olsvik PA, Rosseland BO, Lind OC, Farmen E, Skipperud L, Salbu B. Sublethal effects in Atlantic salmon (*Salmo salar*) exposed to mixtures of copper, aluminium and gamma radiation. *J Environmental Radioactivity*. 2012;33-34. doi: [10.1016/j.jenvrad.2012.04.004](https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2012.04.004)
35. Geras'kin SA, Kim JK, Dikarev VG, Oudalova AA, Dikareva NS, Spirin YV. Cytogenetic effects of combined radioactive (¹³⁷Cs) and chemical (Cd, Pb, and 2, 4-D herbicide) contamination on spring barley intercalary meristem cells. *Mutation Research*. 2005;586:147-159.
36. Evseeva TI, Geras'kin SA, Vakhrusheva OM. Evaluation of the partial contribution of naturally occurring radionuclides and nonradioactive chemically toxic elements in formation of biological effects within the Vicia Cracca population inhabiting the area contaminated with uranium-radium production wastes in the Komi Republic. *Radiation Biology. Radioecology*. 2014;1(54):85-95. doi: [10.7868/S0869803114010068](https://doi.org/10.7868/S0869803114010068) In Russian
37. *Man and the Geosphere*. Florinsky IV, editor. New York: Nova Science Publ.; 2010. 385 p.
38. Kutinov YuG, Chistova ZB, Belyaev VV, Burlakov PS. The Northern part of the Russian plate: effects of the tectonic structures on the environment (case study for Arkhangelsk region). *Bulletin of Rfychatka Regional. Association "Educational-Scientific Center". Earth Sciences*. 2009;2(14):77-89. In Russian

39. Trifonov VG, Karakhanian AS. Active faulting and human environment. *Tectonophysics*. 2004;3-4(380):287-294. doi: [10.1016/j.tecto.2003.09.025](https://doi.org/10.1016/j.tecto.2003.09.025)
40. Heads M. Biogeographical affinities of the New Caledonian biota: a puzzle with 24 pieces. *J Biogeography*. 2010;37:1179-1201. doi: [10.1111/j.1365-2699.2010.02311.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2010.02311.x)
41. Syvrotkin VL. Hydrogen degassing of the Earth: Natural disasters and the biosphere. In: *Man and the Geosphere*. Florinsky IV, editor. New York: Nova Science Publ.; 2010:307-347.
42. V'yukhina AA, Omel'chenko EI, Shimanskaya EI, Chokheli VA, Varduni TV. Application of biotesting methods for indicating patterns of phenotypic variation and cytogenetic changes plants-indicators depending on the extent of tectonic dislocation of growth zone. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Natural Sciences*. 2013;1:45-51. In Russian

*Received 16 January 2020; Revised 06 July 2020;
Accepted 27 October 2020; Published 29 December 2020.*

Author info:

Boyarskykh Irina G, Cand. Sci. (Biol.), Assoc. Professor, Senior Researcher, Laboratory of Food Plant Introduction, Central Siberian Botanical Garden, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 101 Zolotodolinskaia Str., Novosibirsk 630090, Russian Federation.

ORCID iD: <http://orcid.org/0000-0001-6212-0129>

E-mail: irina_2302@mail.ru

Volkova Lyudmila R, Senior Assistant, Laboratory of Food Plant Introduction, Central Siberian Botanical Garden, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 101 Zolotodolinskaia Str., Novosibirsk 630090, Russian Federation.

E-mail: 97lyudmila-volk@mail.ru

УДК 581.555.2:574.47
doi: 10.17223/19988591/52/4

М.Е. Коновалова, Д.С. Собачкин

*Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН – обособленное
подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, г. Красноярск, Россия*

Структура ценопопуляций ключевых видов горно-таежных кедровников Восточного Саяна

Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ КНЦ СО РАН
№ 0356-2019-0024 и 0356-2019-0027, а также при финансовой поддержке
Российского фонда фундаментальных исследований (18-05-00781 А).

*Изучены демографические структуры ценопопуляций *Pinus sibirica* Du Tour и *Abies sibirica* Ledeb. – ключевых видов горно-таежных чернично-зеленомошных кедровников. Проанализированы особенности их онтогенетического развития в лесорастительных условиях фонового типа леса Восточносаянской горной лесорастительной провинции кедровых лесов. *P. sibirica* демонстрирует все признаки конкурентной популяционной стратегии. Установлено, что ценопопуляция *P. sibirica* имеет широкую возрастную амплитуду (от 1 до 200 лет) и абсолютно-разновозрастную структуру, массовое возобновление (более 3 500 шт./га⁻¹), крупные размеры зрелых особей (максимальные диаметр – 58 см, высота – 21,5 м), доминирует по численности (70% от общей густоты древостоя) и запасу (95%). Онтогенетический спектр *P. sibirica* отнесен к нормальному типу. Выявлено, что ценопопуляция *A. sibirica* проявляет признаки фитоценотической толерантности, не оказывая существенного влияния на динамику ценопопуляции *P. sibirica*. *A. sibirica* уступает по численности возобновления (1500 шт./га⁻¹), продолжительности жизни (до 110 лет) и достигаемым размерам деревьев (максимальные диаметр – 22,7 см, высота – 16 м). Показано, что *P. sibirica* формирует устойчивые лесные экосистемы в относительно суровых условиях горно-таежного лесного пояса при отсутствии антропогенных нарушений.*

Ключевые слова: *Pinus sibirica*; *Abies sibirica*; онтогенетические спектры; возрастная структура; чернично-зеленомошные кедровники.

Введение

На юге Сибири горно-таежные кедровники представляют собой наиболее распространенный вариант продуктивных кедровых лесов, занимая высотный диапазон от 600–900 до 1 400–1 500 м над ур. м. [1]. Масштабные лесозаготовки до введения запрета на рубку *Pinus sibirica* Du Tour в 1989 г., а также крупные лесные пожары нарушили значительную часть этих горно-таежных лесов [2, 3]. Устойчивое ведение лесного хозяйства и сохранение

биоразнообразия требуют разработки критериев оценки состояния и прогноза динамики нарушенных экосистем [4, 5]. Оно должно основываться на изучении структуры (возрастной, размерной, онтогенетической, виталитетной и т.д.) ценопопуляций ключевых видов позднесукцессионных лесных сообществ, развивающихся в сходных лесорастительных условиях [6–10]. Так, все большее внимание исследователей уделяется выявлению структурной организации ценопопуляций ключевых видов бореальных лесов [11–14]. Однако подобные исследования до настоящего времени не проводились в горно-таежных кедровниках. Эталонные для влажной климатической фации Алтае-Саянской горной области кедровники, поддерживающие динамически равновесное состояние в условиях минимальной антропогенной нагрузки, обнаружены нами на территории комплексного заказника Красноярского края «Тайбинский», организованного в 1987 г.

Цель исследования – анализ демографической структуры ценопопуляций видов-ценозообразователей позднесукцессионного чернично-зеленомошного кедровника.

Материалы и методики исследования

Обследованы ценопопуляции видов *P. sibirica* и *Abies sibirica* Ledeb. в чернично-зеленомошном кедровнике горно-таежного высотно-поясного комплекса типов леса (ВПК) Манско-Канского округа [15]. Такие кедровники образуют типологический фон всей Восточносаянской горной лесорастительной провинции кедровых лесов. Исследования проведены в среднегорном рельефе северо-восточной части хребта Идарское белогорье (Восточный Саян). Климат района резко континентальный.

В ходе полевых работ 2018 г. заложена постоянная пробная площадь (53×60 м) в средней части склона западной экспозиции, крутизной 2°, на высоте 1000 м над ур. м. (54°44' с.ш., 96°07' в.д.). Насажение имело характерную для горно-таежных кедровников Восточного Саяна [16] низкую продуктивность (V класс бонитета), высокую сомкнутость крон (около 1,0) и относительную полноту (1,1), сложную вертикальную структуру и смешанный состав (таблица). В нижнем ярусе растительности преобладают зеленые мхи (*Rhytidiadelphus triquetrus* (Hedw.) Warnst., *Hylocomium splendens* (Hedw.) Schimp. in B. S. G., *Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt., *Dicranum scoparium* Hedw.), черника (*Vaccinium myrtillus* L.) и в меньшей степени осочка (*Carex iljinii* V.I. Krecz). Подлесок разреженный (*Sorbus sibirica* Hedl., *Lonicera altaica* Pall.). Распределение растительных группировок носит диффузный характер, повторяя микрорельеф, образованный ветровальными комплексами разных лет. Смешение древесных пород и их поколений равномерно по площади.

На пробной площади выполнено общее геоботаническое описание по методике В.Н. Сукачева [17]. Номенклатура сосудистых растений и мхов при-

ведена в соответствии со сводками С.К. Черепанова [18] и М.С. Ignatov et al. [19]. У каждого дерева (виргинильного, молодого, зрелого, старого генеративного и сенильного состояний) измерены диаметр ствола на высоте 1,3 м (с точностью до 0,5 см) и высота (с точностью до 0,5 м). Особи ювенильно-го и имматурного состояний подсчитаны на 30 учетных площадках (каждая размером 4 м²). Учетные площадки размещены равномерно по всей пробной площади. Численность особей рассчитана на единицу площади (1 га).

Основные таксационные показатели древостоя
[Basic mensuration forest stand parameters] ($M \pm m_M$)

Показатели [Parameters]	Доминирующие древесные виды [Dominant tree species]		
	<i>Pinus sibirica</i> Du Tour	<i>Abies sibirica</i> Ledeb.	<i>Betula pubescens</i> Roth.
Число деревьев, шт./га ⁻¹ [Stem density, n./ha ⁻¹]	217	94	25
Абсолютная полнота, м ² /га ⁻¹ [Basal area, m ² /ha ⁻¹]	16,9	1,1	1,0
Средний возраст, лет [Stand age, years]	165±4,3	62±3,9	46±5,2
Средний диаметр, см [Stem diameter, cm]	30±1,3	11±0,8	22±2,1
Средняя высота, м [Stand height, m]	15±0,4	12±0,6	16±0,6

Онтогенетическое состояние особей древесных видов установлено по качественным признакам, уточненным для *P. sibirica* по С.А. Николаевой с соавт. [20], а для *A. sibirica* – по И.Д. Махаткову [21]. Оценка онтогенетической структуры ценопопуляций ключевых видов выполнена по соотношению особей различного состояния [22].

Возраст деревьев установлен на основании кернов, взятых возрастным буравом у каждого дерева на пробной площади (69 шт. *P. sibirica* и 30 шт. *A. sibirica*). Возраст молодых особей древесных видов определен по мутовкам (*P. sibirica* – 45 шт.) и спилам модельных особей (*A. sibirica* – 18 шт.). Тип возрастной структуры древостоя выявлен на основании анализа формы распределения возрастного ряда [23].

Оценка санитарного состояния особей древесных видов проведена по шкале В.А. Алексеева [24]: 1-я категория – здоровые деревья; 2-я – ослабленные; 3-я – сильно ослабленные; 4-я – усыхающие; 5-я – свежий сухостой; 6-я – старый сухостой.

Статистическая обработка данных полевых исследований включала расчет показателей формы распределения возрастных и онтогенетических рядов [25. С. 187] в среде StatSoft STATISTICA 10. Расчеты выполнены на общепринятом в биологических науках уровне статистической значимости ($\alpha = 0,05$).

Результаты исследования и обсуждение

Горно-таежные леса с участием *P. sibirica*, как правило, представляют собой этапы послепожарных восстановительно-возрастных смен [1]. В связи с режимом особой охраны заповедника «Тайбинский» и как следствие сниженной пирогенной нагрузки на его территории сформировались кедровники, обладающие всеми признаками позднесукцессионных экосистем. В обследованном фитоценозе наличие в почвенном разрезе следов пожаров прошлых лет (угли на глубине 17–20 см) указывало на его пирогенное происхождение. О позднесукцессионном состоянии свидетельствовали абсолютная разновозрастность древостоя, сложная мозаика ключевых и подчиненных видов, многочисленный валеж различной степени разложения, отсутствие следов пирогенных повреждений на древостое и валеже.

Древесный ценоз слагался *P. sibirica* и *A. sibirica* с незначительным участием *Betula pubescens* Roth. По численности и запасу древесины доминирующее положение в нем занимала ценопопуляция *P. sibirica* с густотой древостоя 460 шт./га⁻¹ и запасом древесины 200 м³/га⁻¹. *A. sibirica* имела второстепенные позиции (густота – 200 шт./га⁻¹; запас – 11 м³/га⁻¹), проникая в фоновые кедровники зеленомошной группы типов леса с вогнутых участков пологих склонов, где произрастают крупнотравно-папоротниковые кедрово-пихтовые насаждения [15].

Ценопопуляция *P. sibirica* включала особи полного онтогенетического спектра с варьированием абсолютного возраста от 1 до 220 лет. Онтогенетическая структура ценопопуляции *P. sibirica* (рис. 1) характеризовалась нормальным состоянием, островершинным распределением с левосторонней асимметрией (коэффициент асимметрии – 2,0; эксцесс – 4,1). В численности преобладали иматурные (60%) и ювенильные (24%) особи. Суммарная численность молодых, зрелых и старых генеративных особей составляла 7% от общей численности особей ценопопуляции. Наименьшую численность имели особи сенильного (2,4%) и виргинильного (1,6%) состояний.

Возрастная структура ювенильных и иматурных особей *P. sibirica* имела волновой характер распределения (рис. 2, а, б), что объясняется циклическостью обильного семеношения. По данным учета урожайности «кедрового ореха», проводимого КГБУ «Ирбейское лесничество» (Министерство лесного хозяйства Красноярского края) на постоянном лесосеменном участке в непосредственной близости от объекта исследования, урожайные годы *P. sibirica* продолжались, как правило, в течение 3 лет, повторяющихся через 5 лет. Все особи ювенильного состояния (750 шт. га⁻¹) в возрасте от 1 до 8 лет имели здоровое состояние или незначительные признаки ослабления и довольно равномерно распределялись по площади фитоценоза. Амплитуда возраста иматурных особей шире: от 6 до 50 лет. Из них 67% относились к здоровому состоянию (2000 шт./га⁻¹), 25% имели признаки сильного ослабления или усыхания (750 шт./га⁻¹) и 8% – погибшие.

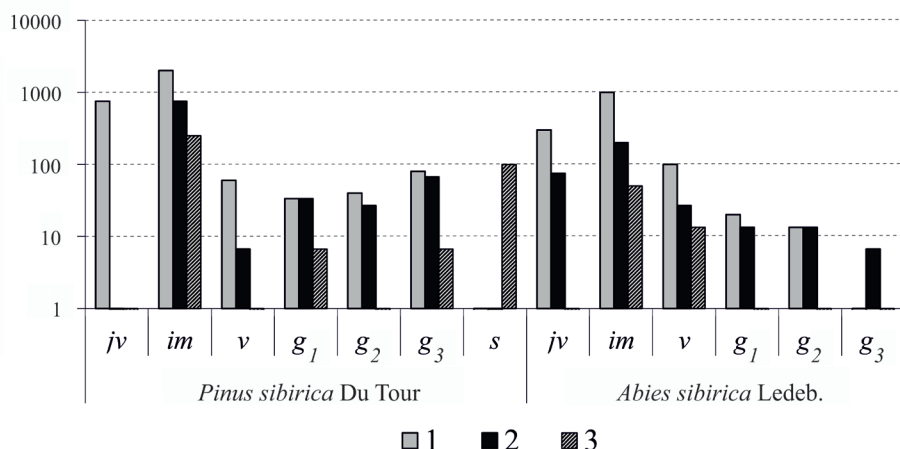


Рис. 1. Онтогенетические спектры ценопопуляций ключевых видов в чернично-зеленомошном кедровнике. По оси X – онтогенетическое состояние: *jv* – ювенильное; *im* – имматурное; *v* – виргинильное; *g₁* – молодое генеративное; *g₂* – зрелое генеративное; *g₃* – старое генеративное; *s* – сенильное; по оси Y – число деревьев, шт./га. Санитарное состояние особей: 1 – здоровые и ослабленные; 2 – сильно ослабленные и усыхающие; 3 – свежий и старый сухостой.

[Fig. 1. Ontogenetic spectra of the key species cenopopulations in the Siberian pine forest with *Vaccinium myrtillus* and green hypnum mosses. On the X-axis - Ontogenetic states: *jv* - juvenile; *im* - immature; *v* - virginile; *g₁* - young reproductive; *g₂* - mature reproductive; *g₃* - old reproductive; *s* - senile; on the Y-axis - Numbers per hectare. Sanitary state of plants: 1 - Healthy and weakened; 2 - Strongly weakened and drying; 3 - Fresh and old dead-standing]

Ослабление санитарного состояния имматурных особей с возрастом под пологом довольно равномерно сомкнутого древостоя связано со снижением теневыносливости *P. sibirica* к возрасту 60 лет [26]. Этим же объясняется и малая численность виргинильных особей (3% от численности имматурных) в возрасте от 60 до 150 лет (рис. 2, c). Внедрение молодых особей *P. sibirica* в древостой на переходе из имматурного в виргинильное состояние происходило в местах образования световых «окон» при частичном (дигрессивном) распаде полога древостоя. В дальнейшем темпы изреживания снижались и в виргинильном состоянии уже 90% особей имели здоровое состояние, остальные – ослабленное (сухостойных нет). Санитарное состояние деревьев генеративного периода немного ухудшалось на фоне широкого варьирования возраста деревьев каждого онтогенетического состояния (рис. 2, d, e, f). Из молодых генеративных деревьев (1,7% от численности ценопопуляции) в возрасте 110–183 лет только 45% относились к здоровым и 45% – к ослабленным. Из зрелых генеративных (1,6% от численности ценопопуляции) в возрасте 120–190 лет 60% относились к здоровым и 40% – к ослабленным. Из старых генеративных (3,6% от численности ценопопуляции) в возрасте 164–213 лет 52% относились к здоровым и 43% – к ослабленным. Таким образом, небольшое увеличение суммарного числа деревьев на ста-

диях онтогенетического развития генеративного периода (см. рис. 1) связано с достаточно широкой амплитудой их абсолютного возраста (около 100 лет). Все деревья постгенеративного периода усыхали в возрасте 170–220 лет (рис. 2, g). Распределение возрастного ряда вошедших в древостой особей (виргинильного, молодого, зрелого, старого генеративного и сенильного состояний) отличалось от онтогенетического спектра всей ценопопуляции правосторонней асимметрией и плоской вершиной (коэффициент асимметрии – $-0,7$; эксцесс – $-0,6$; медиана – 180) вследствие небольшого увеличения числа деревьев в возрасте 160–200 лет (рис. 2, h). Возрастная структура древостоя *P. sibirica* относилась к абсолютно разновозрастному типу, сформированному слабоциклическим восстановительным процессом. Это соответствует представлениям о непрерывном лесообразовательном процессе и устойчивости древесных видов на климаксовой стадии развития лесных сообществ [11].

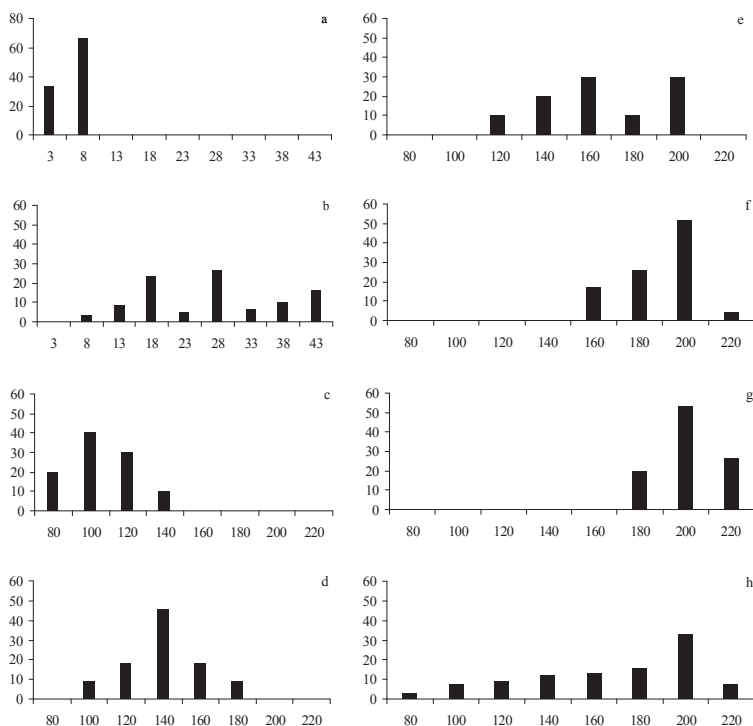


Рис. 2. Возрастная структура ценопопуляции *Pinus sibirica* Du Tour:

a – ювенильных особей; *b* – имматурных; *c* – виргинильных; *d* – молодых генеративных; *e* – зрелых генеративных; *f* – старых генеративных; *g* – сенильных; *h* – всего древостоя. По оси X – возраст, лет; по оси Y – численность, %
[Fig. 2. Age and ontogenetic structure of stands of *P. sibirica* Du Tour cenopopulations: *a* - juvenile; *b* - immature; *c* - virginile; *d* - young reproductive; *e* - mature reproductive; *f* - old reproductive; *g* - senile; *h* - total stand; on the X-axis - Age, years; on the Y-axis - Relative numbers, %]

Ценопопуляция *A. sibirica* имела более узкий в сравнении с *P. sibirica* возрастной ряд (от 1 до 110 лет), но формировала полночленный онтогенетический спектр (см. рис. 1), характеризующийся выраженным островершинным распределением с левосторонней асимметрией (коэффициент асимметрии – 2,2; эксцесс – 5,1). В численности также преобладали имматурные (69%) и ювенильные (21%) особи. По мере перехода между стадиями онтогенетического развития численность особей постепенно снижалась: виргинильное состояние имели 7% особей, молодое, зрелое и старое генеративное – 1,8; 1,5 и 0,4% соответственно. Особи сенильного состояния не обнаружены.

Абсолютная разновозрастность ювенильных и имматурных особей *A. sibirica* (от 1 до 40 лет) подтверждает известные данные о том, что ее семенная продуктивность в горно-таежных лесах Южной Сибири может периодически снижаться, но никогда не прекращается полностью [27]. Примечательно, что, несмотря на это, преимущество в цикличности инспермации, в численности возобновления *A. sibirica* уступала *P. sibirica*. В ценопопуляции *A. sibirica* насчитывалось всего 1 500 шт./га⁻¹ жизнеспособных ювенильных и имматурных особей в сравнении с *P. sibirica* – 3 750 шт./га⁻¹. Санитарное состояние имматурных и ювенильных особей *A. sibirica* удовлетворительное (80% тех и других находилось в здоровом и незначительно ослабленном состоянии и только 4% имматурных особей – в сухостойном). Виргинильные особи в возрасте от 40 до 65 лет имели (рис. 3, с) аналогичное санитарное состояние (79% – в здоровом и незначительно ослабленном состоянии, остальные имели значительные признаки ослабления, сухостойных нет). С дальнейшим увеличением «биологического» (онтогенетического) возраста снижалась не только численность особей, но и ухудшалось их санитарное состояние. Только 60% молодых генеративных деревьев в возрасте 70–76 лет относились к здоровым и 40% – к значительно ослабленным, 50% зрелых генеративных в возрасте 86–100 лет – к здоровым и 50% – к значительно ослабленным и уже 100% старых генеративных в возрасте 105–110 лет – к значительно ослабленным. В целом возрастной ряд (рис. 3, g) вошедших в древостой особей *A. sibirica* (виргинильного, молодого, зрелого и старого генеративного состояний), как и онтогенетический спектр всей ценопопуляции, сохраняет левостороннюю асимметрию, но имеет плоскую вершину (коэффициент асимметрии – 0,5; эксцесс – –0,8). Отсутствие «всплеска» численности особей генеративного периода развития и особей сенильного состояния, а также снижение санитарного состояния по мере онтогенетического развития деревьев объясняется довольно низкой продолжительностью жизни деревьев *A. sibirica* (до 120 лет) в неблагоприятных для нее условиях относительно бедных почв и резкой континентальности климата.

В целом онтогенетические спектры ключевых видов климаксовых горно-таежных чернично-зеленомошных кедровников Восточного Саяна (*P. sibirica* и *A. sibirica*) относились к типу с «нормальным состоянием», способных к спонтанному восстановлению ценопопуляций.

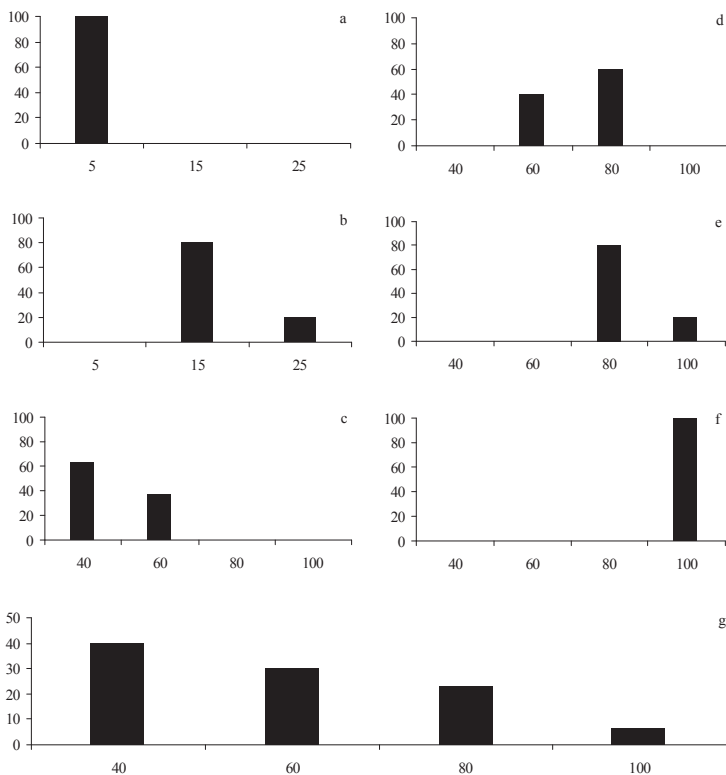


Рис. 3. Возрастная структура ценопопуляций ключевых видов *Abies sibirica* Ledeb.: а – ювенильных особей; б – имматурных; в – виргинильных; д – молодых генеративных; е – зрелых генеративных; ф – старых генеративных; г – всего древостой. По оси X – возраст, лет; по оси Y – численность, % [Fig. 3. Age and ontogenetic structure of stands of *Abies sibirica* Ledeb. cenopopulations: а - juvenile; б - immature; в - virginile; д - young reproductive; е - mature reproductive; ф - old reproductive; г - total stand; on the X-axis - Age, years; on the Y-axis - Relative numbers, %]

Однако с позиции демографического подхода структура ценопопуляции *P. sibirica* оценена как более устойчивая, так как имеет более массовое возобновление, большую продолжительность жизни особей, достигающих больших размерных показателей (максимальный диаметр – 58 см, максимальная высота – 21,3 м), доминируя в древостое как по численности, так и по запасу. Примечательно, что по предельным достигаемым размерам ствола и продолжительности жизни дерева *P. sibirica* в суровых природно-климатических условиях горно-таежных лесов существенно уступали аналогичным показателям, достигаемым деревьями *P. sibirica* в равнинных южно-таежных [20] и низогорных черневых лесах [28]. Это свидетельствует о существенном лимитировании развития *P. sibirica* лесорастительными условиями изученного района. Однако *P. sibirica* в типичных горно-таежных

условиях имеет выраженную конкурентную популяционную стратегию, во многом формируя среду горно-таежных кедровников.

При этом структура ценопопуляций *P. sibirica* в изученных условиях в большей степени схожа с таковой, описанной на примере северо-таежных древостоев [11], чем со структурой зеленомошных кедровников западносибирской тайги [29] или черневых кедровников Западного Саяна [28]. В последнем случае устойчивость ценопопуляций *P. sibirica* во многом зависит от динамики ценопопуляций *A. sibirica*, образования ветровальных комплексов и, как следствие, имеет выраженную циклично-разновозрастную возрастную структуру и бимодальную форму распределения онтогенетического спектра [28]. Напротив, в горно-таежных чернично-зеленомошных кедровниках Восточного Саяна, несмотря на существенно меньшую и непостоянную урожайность семян по сравнению с черневыми кедровниками [1], ценопопуляция *P. sibirica* демонстрирует устойчивую структуру «непрерывного потока поколений» [по 22], не зависящую от динамики других ценоэлементов. *A. sibirica* в большей степени проявляет признаки конкурентно-толерантного вида, уступая *P. sibirica* по численности подроста и деревьев, запасу древесины, продолжительности жизни и достигаемым размерам деревьев (максимальный диаметр – 22,7 см, максимальная высота – 16 м).

Заключение

Онтогенетическая и возрастная структуры ценопопуляций *P. sibirica* в фоновом для горно-таежного пояса Восточного Саяна чернично-зеленомошном типе леса характеризуют стабильность кедровой формации в условиях минимальных антропогенных нарушений. Устойчивое существование ценопопуляции *P. sibirica* горно-таежных кедровников в довольно суровых природно-климатических условиях обеспечивается массовым, почти непрерывным возобновлением и такой же перманентной сменой возрастных поколений. Ценопопуляция *A. sibirica* не оказывает существенного влияния на динамику ценопопуляции *P. sibirica*.

Литература

1. Кедровые леса Сибири / отв. ред. А.С. Исаев. Новосибирск : Наука, Сиб. отд-ние, 1985. 225 с.
2. Бондарев А.И., Онучин А.А., Читоркин В.В., Соколов В.А. О концептуальных положениях использования и воспроизводства лесов в Сибири // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2015. № 6. С. 25–34.
3. Furyaev V.V., Vaganov E.A., Tchebakova N.M., Valendik E.N. Effects of fire and climate on successions and structural changes in the siberian boreal forest // Eurasian Journal of Forest Research. 2001. Vol. 2. PP. 1–15.
4. Chang C.C., Turner B.L. Ecological succession in a changing world // Journal of Ecology. 2019. Vol. 107. PP. 503–509. doi: 10.1111/1365-2745.13132
5. Hertzog L.R., Boonyarittichaikij R., Dekeukeleire D., de Groote S.R.E., van Schroyen Lantman I.M., Sercu B.K., Smith H.K., de la Peña, E., Vandegheuchte M.L., Bonte D.,

- Martel, A., Verheyen K., Lens L., (...), Baeten, L. Forest fragmentation modulates effects of tree species richness and composition on ecosystem multifunctionality // *Ecology*. 2019. Vol. 100, № 4. e02653. PP. 1–9. doi: 10.1002/ecy.2653
6. Prach K., Walker L.R. Four opportunities for studies of ecological succession // *Ecology and Evolution*. 2011. Vol. 26, № 3, PP. 119–123. doi: 10.1016/j.tree.2010.12.007
 7. Lithgow D., Martínez M.L., Gallego-Fernández J.B., Hesp P.A., Flores P., Gachuz S., Rodríguez-Revelo N., Jiménez-Orocio O., Mendoza-González G., Álvarez-Molina L.L. Linking Restoration and Ecological Succession // *Geomorphology*. 2013. Vol. 199. PP. 214–224. doi: 10.1016/j.geomorph.2013.05.007
 8. Walker L.R., Wardle D.A. Plant succession as an integrator of contrasting ecological time scales // *Ecology and Evolution*. 2014. Vol. 29, № 9. PP. 504–510. doi: 10.1016/j.tree.2014.07.002
 9. Maren I.E., Kapfer J., Aarrestad P.A., Grytnes J.-A., Vandvik V. Changing contributions of stochastic and deterministic processes in community assembly over a successional gradient // *Ecology*. 2018. Vol. 99, № 1. PP. 148–157. doi: 10.1002/ecy.2052
 10. Silveira A.P., Martins F.R., Araujo F.S. Are tree ontogenetic structure and allometric relationship independent of vegetation formation type? A case study with *Cordia oncocalyx* in the Brazilian caatinga // *Acta Oecologica*. 2012. Vol. 43. PP. 126–133. doi: 10.1016/j.actao.2012.06.005
 11. Дыренков С.А. Структура и динамика таежных ельников. Л. : Наука, 1984. 174 с.
 12. Angulo O., Bravo de la Parra R., López-Marcos J.C., Zavala M.A. Stand dynamics and tree coexistence in an analytical structured model: The role of recruitment // *Journal of Theoretical Biology*. 2013. Vol. 333. PP. 91–101. doi: 10.1016/j.jtbi.2013.05.012
 13. Ухваткина О.Н., Омелько А.М. Особенности жизненной стратегии сосны корейской (*Pinus koraiensis* Sieb. et Zucc.) в позднесукцессионном хвойно-широколиственном лесу на территории южного Сихотэ-Алиня // *Вестник Томского государственного университета. Биология*. 2016. № 4 (36). С. 164–179. doi: 10.17223/19988591/36/10
 14. Zhang L., Dieckmann U., Brännström A. On the performance of four methods for the numerical solution of ecologically realistic size-structured population models (Article) // *Methods in Ecology and Evolution*. 2017. Vol. 8. PP. 948–956. doi: 10.1111/2041-210X.12741
 15. Типы лесов гор Южной Сибири / отв. ред. В.Н. Смагин. Новосибирск : Наука, 1980. 336 с.
 16. Соколов В.А., Аткин А.С., Фарбер С.К. Структура и динамика таежных лесов. Новосибирск: Наука, 1994. 168 с.
 17. Сукачев В.Н., Зонн С.В. Методические указания к изучению типов леса. М. : Изд-во АН СССР, 1961. 144 с.
 18. Черепанов С.К. Сосудистые растения России и сопредельных государств. СПб. : Мир и семья-95, 1995. 991 с.
 19. Ignatov M.S., Afonina O.M., Ignatova E.A., Abolina A., Akatova T.V., Baisheva E.Z., Bardunov L.V., Baryakina E.A., Belkina O.A., Bezgodov A.G., Boychuk Ya., Cherdantseva V.M.A., Czernyadjeva I.V., Doroshina G.Ya., Dyachenko A.P., Fedosov V.E., Goldberg I.L., Ivanova E.I., Jukoniene I., Kannukene L., Kazanovsky S.G., Kharzinov Z. Kh., Kurbatova L.E., Maksimov Mamatkulov U.K.A.I., Manakyan V.A., Maslovsky O.M., Napreenko M.G., Otnyukova T.N., Partyka L.Ya., Pisarenko O.Yu., Popova N.N., Rykovsky G.F., Tubanova D.Ya., Zheleznova G.V., Zolotov V.I. Check-list of mosses of East Europe and North Asia // *Arctoa*. 2006. Vol. 15. PP. 1–130.
 20. Николаева С.А., Велисевич С.Н., Савчук Д.А. Онтогенез кедр сибирского в условиях Кеть-Чулымского междуречья // *Вестник Томского государственного университета. Биология*. 2008. № 3 (4). С. 35–41.
 21. Махатков И.Д. Поливариантность онтогенеза пихты сибирской // *Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел биологический*. 1991. Т. 96, № 4. С. 79–88.

22. Восточноевропейские леса: история в голоцене и современность / отв. ред. О.В. Смирнова. М. : Наука, 2004. 575 с.
23. Семечкин И.В. Структура и динамика кедровников Сибири. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2002. 253 с.
24. Алексеев В.А. Диагностика жизненного состояния деревьев и древостоев // Лесоведение. 1997. № 4. С. 51–57.
25. Legendre P., Legendre L. Numerical ecology. 3rd English edition. Amsterdam: Elsevier, 2012. 990 p.
26. Поликарпов Н.П., Чебакова Н.М., Назимова Д.И. Климат и горные леса Южной Сибири. Новосибирск: Наука, 1986. 226 с.
27. Tretyakova I.N., Bazhina E.V. Seed productivity of macrostrobili and the quality of seeds in *Abies Sibirica* in disturbed forest ecosystems of the mountains of Southern Siberia // Russian journal of ecology. 1996. Vol. 27, № 6. PP. 411–416.
28. Konovalova M.E., Danilina D.M. Cenopopulation structure of key species in climax Siberian pine forest of the Western Sayan mountains // *Ekologiya*. 2019. Vol. 50, № 3. PP. 234–240. doi: 10.1134/S1067413619030081
29. Николаева С.А. Онтогенетическая структура ценопопуляций кедра сибирского в сообществах восстановительно-возрастного ряда кедровников зеленомошных Кеть-Чулымского междуречья // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2009. № 1 (5). С. 71–81.

*Поступила в редакцию 02.05.2020 г.; повторно 31.08.2020 г.;
принята 27.10.2020 г.; опубликована 29.12.2020 г.*

Авторский коллектив:

Коновалова Мария Евгеньевна – канд. биол. наук, н.с. лаборатории фитоценологии и лесного ресурсоведения, Институт леса им. В.Н. Сукачева Сибирского отделения Российской академии наук – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН (Россия, 660036, г. Красноярск, Академгородок, д. 14, кв. 50).

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-8883-0540>

E-mail: markonovalova@mail.ru

Собачкин Денис Сергеевич – канд. биол. наук, н.с. лаборатории лесоведения и почвоведения, Институт леса им. В.Н. Сукачева Сибирского отделения Российской академии наук – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН (Россия, 660036, г. Красноярск, Академгородок, д. 14, кв. 50).

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-9496-8888>

E-mail: don.375@yandex.ru

Для цитирования: Коновалова М.Е., Собачкин Д.С. Структура ценопопуляций ключевых видов горно-таежных кедровников Восточного Саяна // Вестн. Том. гос. ун-та. Биология. 2020. № 52. С. 71–84. doi: 10.17223/19988591/52/4

For citation: Konovalova M.E., Sobachkin D.S. Cenopopulation structure of the key species in Siberian Pine mountain-taiga forests of the East Sayan mountains. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya = Tomsk State University Journal of Biology*. 2020;52:71-84. doi: 10.17223/19988591/52/4 In Russian, English Summary

Mariya E. Konovalova, Denis S. Sobachkin

Sukachev Institute of Forest, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, Russian Federation

**Cenopopulation structure of the key species in Siberian Pine
mountain-taiga forests of the East Sayan mountains**

Understanding of the key species coenopopulations structure of late-successional forest communities serve as a model of the forest ecosystems state and stability in the

organization of sustainable forest management and conservation of biological diversity. The ontogenetic and age structures of cenopopulations of the key species, *Pinus sibirica* DuRoi and *Abies sibirica* Ledeb., were studied in a climax S Siberian pine forest with *Vaccinium myrtillus* L. and green hypnum mosses (the most common forest type among taiga forests of the East Sayan mountains). The permanent sample plot (50×50 m) was located in the northeastern part of the Idarskoe Belogorye ridge of the East Sayan in the middle part of a westerly slope with a steepness of 2 degrees, at an elevation of 1000 m a.s.l. (54°44'N, 96°07'E). The forest stand had low productivity (quality class V), high closeness of crowns (about 1.0) and mixed composition with predominance of *P. sibirica*, which are characteristic of the mountain-taiga cedar forests of the Eastern Sayan (See Table.). We performed general geobotanical description, measurement of size and age, assessment of ontogenetic and sanitary states of each tree, as well as assessment of reforestation on the sample plot.

P. sibirica coenopopulation had a wide age amplitude (from 1 to 200 years) and absolutely uneven-aged structure, mass reforestation (more than 3000 ind./ha), large sizes of mature individuals (maximum diameter - 58 cm, height - 21.3 m), predominance of the number (70% of the total density of the forest stand) and timber stock (95%). The ontogenetic structure of *P. sibirica* cenopopulation was characterized by a normal state (See Fig. 1 and 2) with a sharp peak of the distribution and distinct left-handed skewness (coefficient of asymmetry - 2.0; kurtosis - 4.1). This corresponds with the concept of consistent self-reproduction and stability of forest ecosystems. *A. sibirica* was inferior in terms of the reforestation number (1575 ind./ha), life expectancy (up to 110 years) and the size of mature trees (maximum diameter - 22.7 cm, height - 16 m). The ontogenetic structure of *A. sibirica* cenopopulation (See Fig. 1 and 3) is characterized by a complete spectrum and more distinct left-handed skewness.

Thus, *P. sibirica* had a clearly expressed competitive population strategy. *A. sibirica* showed indications of phytocenotic tolerance. It is obvious that sustainable forest ecosystems in the absence of anthropogenic pressure in the mountain-taiga forest belt conditions is formed in the process of continuous change of *P. sibirica* age generations.

The paper contains 3 Figures, 1 Table and 29 References.

Key words: *Pinus sibirica*; *Abies sibirica*; ontogenetic spectra; age structure; Siberian pine forests with *Vaccinium myrtillus* and green hypnum mosses.

Funding: This work was partially conducted within the framework of Basic Projects of Sukachev Institute of Forest, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (No 0356-2019-0024 and No 0356-2019-0027) and supported by the Russian Foundation for Basic Research (Project No18-05-00781 A).

The Authors declare no conflict of interest.

References

1. *Kedrovye lesa Sibiri* [Siberian pine forests]. Isaev AS, editor. Novosibirsk: Nauka, Siberian Branch Publ.; 1985, 257 p. In Russian
2. Bondarev AI, Onuchin AA, Chitorkin VV, Sokolov VA. O kontseptual'nykh polozheniyakh ispol'zovaniya i vosproizvodstva lesov v Sibiri [Conceptual approach to the of intensification of forests use and re-forestation in Siberia]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal = Lesnoy Zhurnal (Russian Forestry Journal)*. 2015;6:25-34. In Russian, English Summary
3. Furyaev VV, Vaganov EA, Tchepakova NM, Valendik EN. Effects of fire and climate on successions and structural changes in the siberian boreal forest. *Eurasian J Forest Research*. 2001;2:1-15. Available at: <http://hdl.handle.net/2115/22125>
4. Chang CC, Turner BL. Ecological succession in a changing world. *J Ecology*. 2019;107:503-509. doi: 10.1111/1365-2745.13132

5. Hertzog LR, Boonyarittichaikij R, Dekeukeleire D, de Groote SRE., van Schroyen Lantman IM, Sercu BK, Smith HK, de la Peña E, Vandegehuchte ML, Bonte D, Martel A, Verheyen K, Lens L, (...), Baeten L. Forest fragmentation modulates effects of tree species richness and composition on ecosystem multifunctionality. *Ecology*. 2019;100(4):e02653:1-9. doi: [10.1002/ecy.2653](https://doi.org/10.1002/ecy.2653)
6. Prach K, Walker LR. Four opportunities for studies of ecological succession. *Ecology and Evolution*. 2011;26(3):119-123. doi: [10.1016/j.tree.2010.12.007](https://doi.org/10.1016/j.tree.2010.12.007)
7. Lithgow D, Martínez ML, Gallego-Fernández JB, Hesp PA, Flores P, Gachuz S, Rodríguez-Revelo N, Jiménez-Orocio O, Mendoza-González G, Álvarez-Molina LL. Linking Restoration and Ecological Succession. *Geomorphology*. 2013;199:214-224. doi: [10.1016/j.geomorph.2013.05.007](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.05.007)
8. Walker LR., Wardle DA. Plant succession as an integrator of contrasting ecological time scales. *Ecology and Evolution*. 2014;29(9):504-510. doi: [10.1016/j.tree.2014.07.002](https://doi.org/10.1016/j.tree.2014.07.002)
9. Maren IE, Kapfer J, Aarrestad PA, Grytnes J-A, Vandvik V. Changing contributions of stochastic and deterministic processes in community assembly over a successional gradient. *Ecology*. 2018;99(1):148-157. doi: [10.1002/ecy.2052](https://doi.org/10.1002/ecy.2052)
10. Silveira AP, Martins FR, Araujo FS. Are tree ontogenetic structure and allometric relationship independent of vegetation formation type? A case study with *Cordia oncocalyx* in the Brazilian caatinga. *Acta Oecologica*. 2012;43:126-133. doi: [10.1016/j.actao.2012.06.005](https://doi.org/10.1016/j.actao.2012.06.005)
11. Dyrenkov SA. Структура и динамика таежных ел'ников [Structure and dynamics of the boreal spruce forest]. Leningrad: Nauka Publ.; 1984. 174 p. In Russian
12. Angulo O, De la Parra RB, Lopez-Marcos JC, Zavala MA. Stand dynamics and tree coexistence in an analytical structured model: The role of recruitment. *J Theoretical Biology*. 2013;333:91-101. doi: [10.1016/j.jtbi.2013.05.012](https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2013.05.012)
13. Ukhvatkina ON, Omelko AM. Life strategy of the Korean pine (*Pinus koraiensis* Sieb. et Zucc.) in the old-growth Korean pine-broadleaved forest, Southern part of the Sikhote-Alin Mountain Range. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya = Tomsk State University Journal of Biology*. 2016;4(36):164-179. doi: [10.17223/19988591/36/10](https://doi.org/10.17223/19988591/36/10) In Russian, English Summary
14. Zhang L, Dieckmann U, Brännström A. On the performance of four methods for the numerical solution of ecologically realistic size-structured population models (Article). *Methods in Ecology and Evolution*. 2017;8:948-956. doi: [10.1111/2041-210X.12741](https://doi.org/10.1111/2041-210X.12741)
15. *Tipy лесов гор Южной Сибири* [Forest Types of the Mountains of Southern Siberia]. Smagin VN, editor. Novosibirsk: Nauka, Siberian Branch Publ.; 1980. 336 p. In Russian
16. Sokolov VA, Atkin AS, Farber SK. Структура и динамика таежных лесов [Structure and dynamics of taiga forests]. Novosibirsk: Nauka, Siberian Branch Publ.; 1994. 168 p. In Russian
17. Sukachev VN, Zonn SV. Metodicheskie ukazaniya k izucheniyu tipov lesa [Manual for Analysis of Forest Types]. Moscow: Akad. Nauk SSSR Publ.; 1961. 144 p. In Russian
18. Cherepanov SK. Sosudistye rasteniya Rossii i sopredel'nykh gosudarstv [Vascular plants of Russia and adjacent states (the former USSR)]. St. Petersburg: Mir & Sem'ya-95 Publ.; 1995. 991 p. In Russian
19. Ignatov MS, Afonina OM, Ignatova EA, Abolina A, Akatova TV, Baisheva EZ, Bardunov LV, Baryakina EA, Belkina OA, Bezgodov AG, Boychuk Ya Cherdantseva VMA, Czernyadjeva IV, Doroshina GYa Dyachenko AP, Fedosov VE, Goldberg IL, Ivanova EI, Jukoniene I, Kannukene L, Kazanovsky SG, Kharzinov ZKh, Kurbatova LE, Maksimov Mamatkulov UKAI, Manakyan VA, Maslovsky OM, Napreenko MG, Otnyukova TN, Partyka LYa, Pisarenko OYu, Popova NN, Rykovsky GF, Tubanova DYa, Zheleznova GV, Zolotov VI. Check-list of mosses of East Europe and North Asia. *Arctoa*. 2006;15:1-130. doi: [10.15298/arctoa.15.01](https://doi.org/10.15298/arctoa.15.01)
20. Nikolaeva SA, Velisevich SN, Savchuk DA. Ontogeny of siberian stone pine in the Ket-Chulym divide. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya = Tomsk State University Journal of Biology*. 2008;3(4):35-41. In Russian

21. Makhatkov ID. Polivariantnost' ontogeneza pikhty sibirskoy [Multiversality of Siberian fir ontogeny]. *Byulleten' Moskovskogo Obshchestva Ispytatelei Prirody Otdel Biologicheskii*. 1991;96(4):79-88. In Russian
22. *Vostochnoevropeyskie lesa: istoriya v golotsene i sovremennost'* [Forests of Eastern Europe: Holocene History and Current State]. Smirnova OV, editor. Moscow: Nauka Publ.; 2004. 575 p. In Russian
23. Semechkin IV. Struktura i dinamika kedrovnikov Sibiri [The structure and dynamics of Siberian Stone Pine forests in Siberia]. Novosibirsk: SO RAN Publ.; 2002. 253 p. In Russian
24. Alekseev V.A. Diagnostika zhiznennogo sostoyaniya derev'ev i drevostoev [Diagnosis of the life state of trees and tree stands]. *Lesovedenie = Russian J Forest Science*. 1997;4: 51-57. In Russian
25. Legendre P, Legendre L. Numerical ecology. Vol. 24. 3rd edition. Amsterdam: Elsevier Publ.; 2012. 990 p.
26. Polikarpov NP, Chebakova NM, Nazimova DI. Klimat i gornye lesa Yuzhnoy Sibiri [The climate and mountain forests of Southern Siberia]. Novosibirsk: Nauka, Siberian Branch Publ.; 1986. 226 p. In Russian
27. Tretyakova IN, Bazhina EV. Seed productivity of macrostrobili and the quality of seeds in *Abies Sibirica* in disturbed forest ecosystems of the mountains of Southern Siberia. *Russian J Ecology*. 1996;27(6):411-416. In Russian
28. Konovalova ME, Danilina DM. Cenopopulation structure of key species in climax siberian pine chern forests of the Western Sayan Mountains. *Russian J Ecology*. 2019;50(3):234-240. doi: [10.1134/S1067413619030081](https://doi.org/10.1134/S1067413619030081)
29. Nikolaeva SA. Ontogenetic structure of siberian stone pine coenopopulations in communities of age and regeneration series of green mossy siberian stone pine forests in the Ket-Chulym divide. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya = Tomsk State University Journal of Biology*. 2009;1(5):71-81. In Russian

Received 02 May 2020; Revised 31 August 2020;

Accepted 27 October 2020; Published 29 December 2020

Author info:

Konovalova Mariya E, Cand. Sci. (Biol.), C. Researcher, Laboratory of Phytocenology and Forest Resources Science, V.N.Sukachev Institute of Forest, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk 660036, Russian Federation.

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-8883-0540>

E-mail: markonovalova@mail.ru

Sobachkin Denis S, Cand. Sci. (Biol.), Researcher, Laboratory of Forest and Soil Sciences, V.N.Sukachev Institute of Forest, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk 660036, Russian Federation.

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-9496-8888>

E-mail: don.375@yandex.ru

УДК 581.9+58.056

doi: 10.17223/19988591/52/5

Д.В. Санданов¹, А.С. Дугарова², И.Ю. Селютина³

¹Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН, г. Улан-Удэ, Россия

²Бурятский государственный университет, г. Улан-Удэ, Россия

³Центральный сибирский ботанический сад СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Моделирование распространения видов секции *Xerobia* Bunge рода *Oxytropis* DC. на территории Центральной Азии при климатических изменениях в прошлом и будущем

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (проект №19-54-53014)
и частично по бюджетной теме № АААА-А17-117011810036-3.

На основе разработанной базы данных локалитетов для 19 видов *Oxytropis* секции *Xerobia* проведено моделирование географического распространения секции *Xerobia* и ее отдельных видов. Установлено, что переменные ENVIREM проводят более корректное моделирование распространения изучаемых видов *Oxytropis* в сравнении с переменными BIOCLIM. Для видов центральноазиатской приуроченности более значимы показатели температуры, тогда как для маньчжуро-даурских видов важны параметры увлажнения. Ключевыми факторами, определяющими современное распространение видов секции, являются показатели потенциальной эвапотранспирации самой сухой четверти года, индекс континентальности и метрика относительной влажности и аридности. Эти переменные являются детерминирующими факторами для условий среднего голоцена и последнего ледникового максимума, что свидетельствует об относительной стабильности экологических условий в изучаемом регионе. По результатам моделирования составлены прогнозные карты ареалов для различных климатических сценариев, которые демонстрируют незначительные изменения ареалов видов секции *Xerobia*, даже при наибольшем потеплении климата. Можно предполагать, что при прогнозируемых климатических изменениях в будущем появятся потенциальные экологические ниши на юго-западе и северо-востоке ареала секции *Xerobia* и небольшое сокращение ее ареала на юго-востоке.

Ключевые слова: *Oxytropis*; моделирование ареала вида; экологические переменные; Maxent; Центральная Азия.

Введение

Современные исследования в ботанике, выявляющие особенности распространения видов растений, основываются на анализе больших массивов данных. Имеющаяся информация по распространению видов, различных групп растений и растительных сообществ в основном обрабатывается с использованием различных методов моделирования [1]. На современном этапе

исследований картографирование биоразнообразия вышло на новый виток развития в связи с методологическим и технологическим переоснащением [2]. Несмотря на множество опубликованных карт по разнообразию и видовому богатству растений на глобальном уровне и для ряда крупных регионов мира, территории Северной и Центральной Азии все еще остаются слабо изученными. Помимо общей оценки флористического разнообразия актуальными являются аспекты изучения распространения ценных видов (редкие и исчезающие, эндемики, лекарственные растения и т.д.), а также некоторых полиморфных родов, имеющих модельное значение для целей фитогеографии. В числе последних можно упомянуть род остролодка (или остролодочник) – *Oxytropis* DC. (сем. Fabaceae), так как хорологические центры видов рода соответствуют схемам ботанико-географического районирования Северной и Центральной Азии [3]. Виды рода в основном горные растения, весьма разнообразные в таксономическом отношении, их насчитывается не менее 400 видов. В России и сопредельных государствах (в пределах бывшего СССР) выявлено 375 видов, тогда как в Европе менее 30, а в Северной Америке – несколько более 30 видов. Высокое разнообразие видов р. *Oxytropis* (153 вида) отмечается в Центральной Азии [4]. А.В. Положий [5] отмечает, что этот регион является крупным вторичным центром видообразования в роде *Oxytropis*. На территории Центральной Азии наиболее представленной является секция *Xerobia* Bunge, одна из древних секций рода, которая включает 19 видов в Азиатской России, включая недавно описанный для Республики Тыва *Oxytropis sobolevskajae* Pyak [6, 7]. Секцию образуют стержнекорневые каудексовые травянистые многолетники с поликарпическими побегами розеточного типа [8].

В последние годы для видов секции *Xerobia* выявлено много новых местонахождений [9–11], проведена геопривязка распространения редких видов на территории Бурятии [12]. Эта информация в совокупности с ранее известными данными составляет основу настоящего исследования.

Цель исследования – моделирование распространения видов секции *Xerobia* для оценки влияния прошлого климата на современные ареалы и прогнозирования их динамики при будущих климатических изменениях.

Материалы и методики исследования

Нами разработана специализированная база данных, включающая информацию по распространению видов секции *Xerobia* (1 353 конкретных местонахождений 19 видов). База данных разработана только для видов секции, которые встречаются на территории Азиатской России. Для всех изученных видов проанализированы их полные ареалы, включая распространение видов на территориях сопредельных стран (Казахстан, Монголия, Китай). Остались неохваченными 13 центральноазиатских видов секции, распространение которых наиболее полно приведено лишь в сводке «Рас-

тения Центральной Азии» [4] и частично в монографии Н. Улзийхутага [13]. Большинство из этих видов (кроме *O. ciliata* Turcz. и *O. stracheyana* Benth. ex Baker) – эндемики и встречаются в небольших изолированных местообитаниях. Гербарные сборы этих видов (как и местонахождения в сводке «Распространения Центральной Азии») имеют слишком общие привязки, что не позволяет с определенной степенью точности обозначить географические точки их распространения. Оригинальные сведения по распространению других видов секции (эндемиков Китая и видов из Ближнего Востока) труднодоступны и в данной работе нами не анализировались. Данные о распространении этих видов, которые лишь частично доступны на портале Глобальной информационной системы о биоразнообразии (GBIF), нуждаются в корректировке и уточнении. Поэтому нами изучены 19 видов из данной секции (которые встречаются на территории Азиатской России), для которых имеется подробная информация по их распространению. Для выявления локалитетов видов секции *Xerobia* были использованы данные основных зарубежных и российских гербарных коллекций (PE, UB, LE, MW, TK, NS, NSK, KRAS, ALTB, HGU, IRK, IRKU, UUN, UUDE). При посещении гербариев образцы фотографировали, для цифровых гербариев проанализированы сканированные образцы. Информацию с гербарных этикеток (географическое положение пункта сбора, характеристика местообитания, коллектор, дата) вносили в базу данных. Большую часть точек сбора гербария привязывали с использованием имеющихся словесных описаний. Точки находок, которые не удавалось привязать, исключены. Всего обработано 559 изображений.

Проанализированные гербарные сборы датированы с 1869 по 2018 г. Основной объем гербарного материала собран в период 1960 по 1990 г. Для привязки образцов использованы карты в программе SAS.Planet, Яндекс. Карты и Google Планета Земля, онлайн-ресурс старых и современных карт (с 1600 по 2015 г.) «ЭтоМесто» (<http://www.etomesto.ru/>), сайт «Карты всего мира» с полным набором топографических карт Генштаба СССР и топографических карт ГГЦ (<http://loadmap.net/>). Дополнительно использованы онлайн-базы данных: Виртуальный гид по флоре Монголии Virtual Guide to the flora of Mongolia (<http://floragreif.uni-greifswald.de>), Плантариум (<http://www.plantarium.ru/>), данные полевых наблюдений авторов и информация из геоботанических описаний, любезно представленные Н.И. Макуниной и А.Ю. Королюком (ЦСБС СО РАН, г. Новосибирск). Карты распространения изучаемых видов на территории Монголии вручную оцифрованы по сводке Н. Улзийхутага [13]. В имеющемся виде база данных содержит детальную информацию по распространению видов, включая конкретные местонахождения, полученные с GPS-навигаторов (их доля составляет 50,3%). Эти данные представляют надежную основу для моделирования, что и является первоочередной целью наших исследований.

Разнообразие экологических и биоклиматических параметров местообитаний видов *Oxytropis* и секции *Xerobia* изучено с использованием совре-

менных методов. Моделирование географического распространения видов проведено с использованием программы Maxent 3.3.3k [14], так как в наличии имелись только данные по присутствию видов. В исследовании использована климатическая циркуляционная модель MIROC-ESM с разрешением 2,5 arc-minutes или ~5 км на пиксель. Применение данной циркуляционной модели дает более реалистичные прогнозы для территории Азии по сравнению с широко используемой моделью CCSM [15–16]. Анализ разных циркуляционных моделей показал, что модель MIROC-ESM может корректно использоваться для всех азиатских регионов, кроме Юго-Восточной Азии [17]. При проведении анализа в программе Maxent заданы следующие настройки: для статистического анализа точности полученные модели проверены случайной выборкой 25% местонахождений видов, для получения оптимальной модели использованы 1 500 шагов (итераций), на основе анализа разных моделей выбран параметр сложности (regularization multiplier), равный 0.9, случайные подвыборки выделены на основе кроссвалидации, доля ошибок оценена по величинам пороговых значений по показателю maximum training sensitivity plus specificity, проведен тест для измерения важности переменной «jackknife», на каждую переменную построены кривые отклика, выходные карты сформированы в логистической шкале от 0 до 1.

Проведен анализ 19 биоклиматических переменных BIOCLIM, усредненных за временной интервал 1960–1990 гг. (www.worldclim.org) [18] и 18 переменных ENVIREM [19]. Использованы различные климатические сценарии согласно 5-му докладу Межправительственной комиссии по изменению климата – IPCC AR5: RCP8.5 – вариант, предусматривающий в будущем наибольшую концентрацию диоксида углерода, RCP2.6 – вариант, предусматривающий в будущем наименьшую концентрацию диоксида углерода, RCP6.0 – умеренный вариант. Для оценки влияния каждого варианта климатического сценария на распространение видов использованы прогнозные данные на 2070 г., где наблюдаются максимальные потенциальные различия в концентрации диоксида углерода. Прогнозное моделирование проведено только для переменных BIOCLIM ввиду отсутствия растровых данных будущего климата для переменных ENVIREM. Пространственно-временные изменения оценены при помощи прогнозных данных на 2050 и 2070 гг. при климатическом сценарии RCP8.5. Данные по прошлому климату оценены на основе переменных ENVIREM для двух периодов: последнего ледникового максимума (~22 000 лет назад) и среднего голоцена (~6 000 лет назад).

Результаты исследования и обсуждение

Ареал изученных видов секции *Xerobia* в основном охватывает территорию Центральной Азии (рис. 1). Лишь небольшая часть видов, таких как *Oxytropis grandiflora* (Pall.) DC. и *O. leptophylla* (Pall.) DC., в большей степени встречаются на восточных рубежах ареала секции (Забайкальский

край, Восточный аймак Монголии, провинция Внутренняя Монголия Китая). В сводке «Растения Центральной Азии» [4] *O. grandiflora* отнесен к секции *Orobia* Bunge, позднее Л.И. Малышев [6] включил этот вид в секцию *Xerobia*. М.Г. Попов [20] отмечает, что этот вид морфологически близок к *O. nitens* Turcz. из секции *Xerobia*.

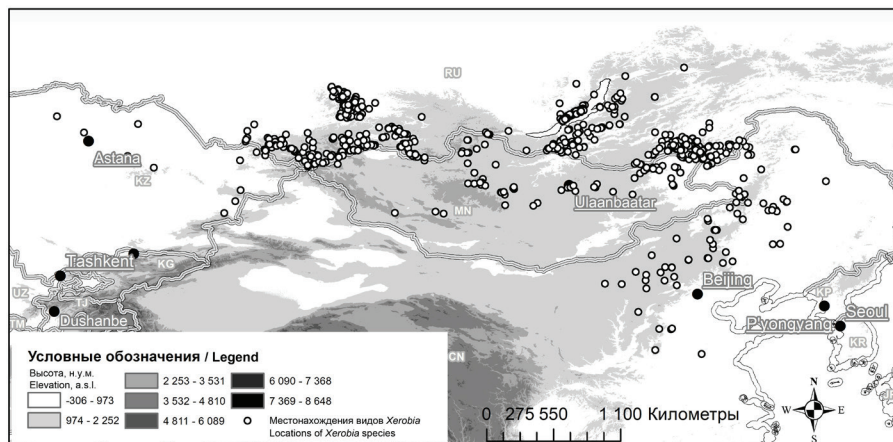
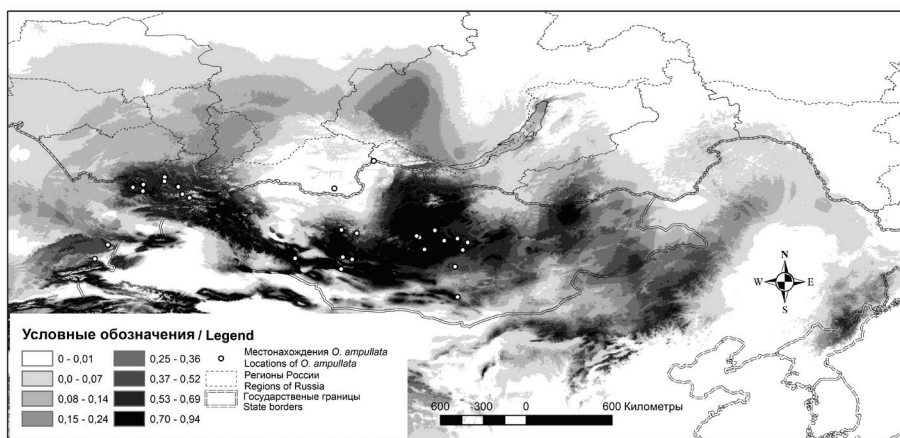


Рис. 1. Распространение видов секции *Xerobia* Bunge рода *Oxytropis* DC.

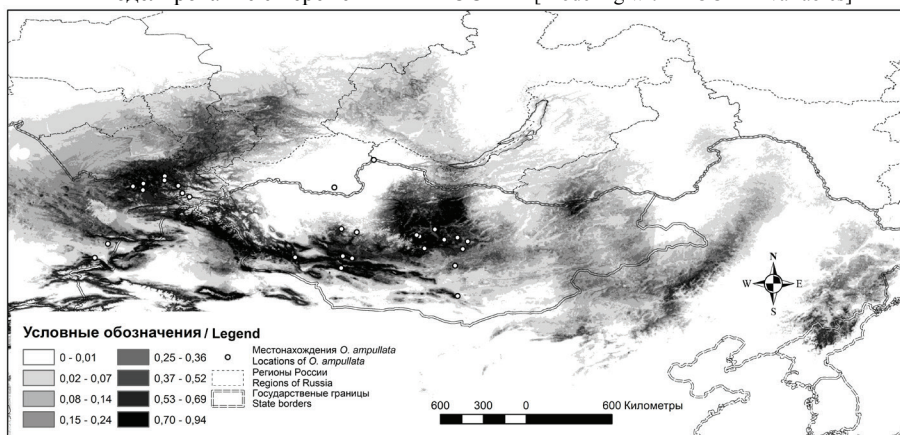
[Fig. 1. Species distribution of the section *Xerobia* Bunge of the genus *Oxytropis* DC.]

Большинство изученных видов секции *Xerobia* имеют ограниченное распространение и часто приурочены к специфическим экотопам. В этом случае моделирование распространения узколокальных эндемичных видов с использованием только биоклиматических данных является нецелесообразным. Поэтому нами выбраны виды центральноазиатской – *Oxytropis ampullata* (Pall.) Pers. (рис. 2) и маньчжуро-даурской приуроченности – *O. grandiflora* (рис. 3, A). Выбранные виды также различаются и по экологии местообитаний: *O. ampullata* – горный вид, тогда как большая часть местонахождений *O. grandiflora* приурочена к равнинам и среднегорью. Статистический анализ показал высокую точность моделей для двух наборов переменных. Величина показателя «площадь под кривой» (AUC) для тренировочных данных во всех случаях выше 0,9 (табл. 1).

Факторами, детерминирующими распространение *O. ampullata*, являются показатели температуры (среднегодовая температура и изотермичность) и потенциальной эвапотранспирации в самые сухие и холодные периоды года (см. табл. 1). Показатель изотермичности оценивает уровень флуктуации между дневными и ночными температурами относительно ежегодных флуктуаций летних и зимних температур. Например, значение показателя равного 100, показывает, что дневной диапазон температур является эквивалентным среднегодовому диапазону температур.



A – моделирование с переменными BIOCLIM [Modeling with BIOCLIM variables]



B – моделирование с переменными ENVIREM [Modeling with ENVIREM variables]

Рис. 2. Потенциальный ареал *Oxytropis ampullata* по результатам моделирования в Maxent на основе переменных BIOCLIM и ENVIREM. Цветом обозначена пригодность местообитаний согласно логистической шкале от 0 до 1. Более темным цветом показаны области с большей пригодностью местообитаний
[Fig. 2. Potential distribution of *Oxytropis ampullata* under Maxent modeling with BIOCLIM and ENVIREM variables. Colors show habitat suitability in logistic scale from 0 to 1. More dark colors show more suitable habitats]

Все значения ниже данного показателя являются индикатором более низкого уровня вариабельности температуры в среднем за месяц относительно вариабельности за год. Значения этой переменной при моделировании варьируют в пределах от 20 до 40, что свидетельствует о высокой контрастности между дневным и ежегодным диапазоном температур в изучаемом регионе. Это подтверждается различиями в потенциальной эвапотранспирации в разные периоды года. Показатели потенциальной эвапотранспирации в сухие и холодные периоды года имеют ключевое значение, так как в

аридных условиях растения получают основные запасы влаги в холодный период, когда нет интенсивного испарения, также важна сохранность влаги в наиболее засушливый сезон года.

Таблица 1 [Table 1]

Вклад ключевых экологических переменных в модель потенциального распространения изученных видов *Oxytropis* DC.
 [Contribution of the key environmental variables to the predictive model of distribution for the studied species of *Oxytropis* DC.]

Ключевые переменные [Key variables]	<i>Oxytropis ampullata</i>		<i>Oxytropis grandiflora</i>	
	Вклад [Contribution], %	Коэффициент пермутации [Permutation coefficient]	Вклад [Contribution], %	Коэффициент пермутации [Permutation coefficient]
BIOCCLIM				
Среднегодовая температура (Bio1) [Average annual temperature]	33,8	61,2	0,1	0,7
Изотермичность (Bio3) [Isothermality]	19,5	9,0	2,1	5,1
Сумма осадков в самой холодной четверти года (Bio19) [Precipitation of the coldest quarter]	15,6	1,3	11,9	1,4
Сезонность температуры (Bio4) [Temperature seasonality]	13,9	17,5	5,2	64,1
Сезонность осадков (Bio15) [Precipitation seasonality]	0,0	0,0	33,2	0,4
Годовая амплитуда температуры (Bio7) [Annual Temperature Range]	0,5	0,4	20,3	0,1
ENVIREM				
ПЭТ самого сухого периода года [PET of the driest quarter]	25,5	0,9	19,0	0,0
ПЭТ самого холодного периода года [PET of the coldest quarter]	24,8	50,5	3,0	0,0
Индекс неровности земной поверхности [Terrain Roughness Index]	20,7	2,3	7,6	0,2
Индекс континентальности [Continental Index]	11,3	0,0	9,9	16,1
Сезонность ПЭТ [PET seasonality]	1,7	5,6	20,8	0,1
Метрика относительной влажности и аридности [Climatic Moisture Index]	6,4	0,0	10,5	49,6
AUC BIOCLIM	0,992		0,994	
AUC ENVIREM	0,995		0,994	

Примечание. Анализ проведен отдельно для каждого набора переменных. ПЭТ – потенциальная эвапотранспирация. Полужирным шрифтом выделен вклад наиболее значимых переменных.

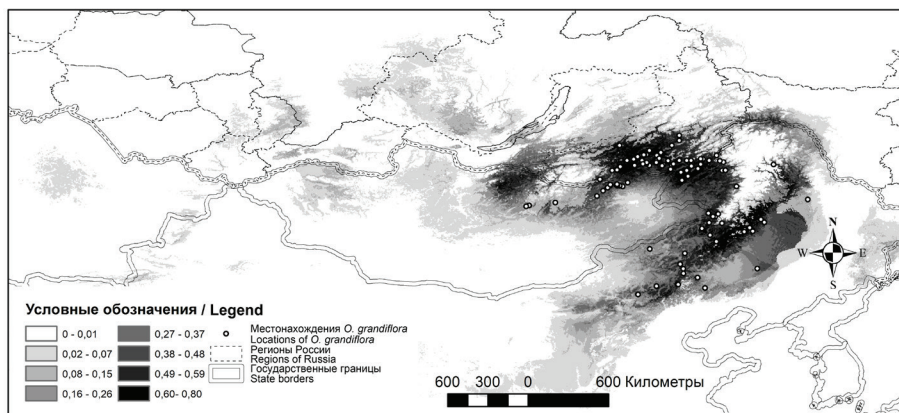
[Note. Analysis has been done separately for each group of variables. PET - Potential evapotranspiration. Contribution of more significant variables is in bold].

Распространение *O. grandiflora* лимитируется коэффициентом вариации осадков, годовой амплитудой температуры, сезонностью потенциальной эвапотранспирации и ее показателями в самый сухой период года. Отметим, что коэффициент вариации осадков в основном отображает континентальность климата, индекс которого в переменных ENVIREM также имеет высокие показатели вклада этой переменной (см. табл. 1). Можно отметить, что для распространения *O. ampullata* более значимы показатели температуры, тогда как для *O. grandiflora* важны параметры увлажнения. При этом для распространения обоих видов немаловажное значение имеют сходные переменные, такие как сумма осадков в самой холодной четверти года и потенциальная эвапотранспирация в самый сухой период года (см. табл. 1). Это, по-видимому, связано с тем, что местообитания изучаемых видов в центральной части Азии характеризуются дефицитом увлажнения, поэтому для растений важное значение имеют осадки в зимний период и высокая потенциальная эвапотранспирация летом (т.е. когда увлажнение в летний период при имеющемся режиме температуры и влажности является избыточным и может потенциально испаряться с почвы и растительности). Вклад ключевых переменных для более аридной части Азии [21] отличается от таковых для видов восточноазиатской приуроченности, где большей частью преобладали температурные показатели [22].

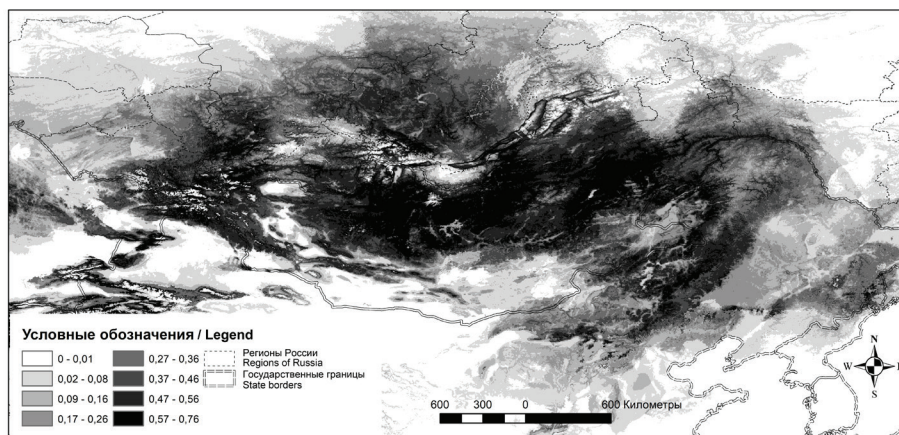
Анализ результирующих карт потенциального ареала изучаемых видов выявил лучшие результаты для набора переменных ENVIREM (рис. 2). Карты потенциального ареала на основе данных BIOCLIM прогнозируют возможные находки *O. ampullata* в довольно широких пределах местообитаний на большей части Центральной Азии, что в целом не соответствует экологии изучаемого вида. Моделирование на основе переменных ENVIREM характеризуется более корректными результатами. Это, по-видимому, связано с тем, что переменные ENVIREM подготовлены на основе дополнительно обработанных переменных BIOCLIM, а также включают различные индексы (индекс аридности, индекс континентальности и т.д.) и переменные, связанные с рельефом (индекс неровности земной поверхности, топографический индекс влажности). Разработчики ENVIREM отмечают, что данный пакет переменных в большей степени связан с экофизиологией видов и поэтому может выдавать лучшие результаты моделирования по сравнению с обобщенными климатическими показателями [19].

Проведенный анализ распространения *Oxytropis ampullata* на основе переменных ENVIREM показал, что существует несколько территорий, экологически подходящих для произрастания вида. В основном это горные массивы, такие как Хангай, Монгольский Алтай, горы Джунгарии, хребет Тарбагатай и Алтай. Изучаемый вид ранее был отмечен в данных местообитаниях. Дополнительно моделирование спрогнозировало высокую вероятность находок вида в долине р. Селенга (см. рис. 2). Поэтому будет интересно провести рекогносцировочные исследования и поисковые исследования

на этой территории. По материалам нашей базы данных вид встречается в горных степях (в том числе и криофитных) в высотных пределах от 500 до 2 800 м над у. м. Местонахождения этого вида в Казахстане и Монголии отмечаются на больших высотах, нижний предел высот начинается от 1 200 м над у. м.



A



B

Рис. 3. Потенциальный ареал *Oxytropis grandiflora* (A) и секции *Xerobia* (B) по результатам моделирования в Maxent на основе переменных ENVIREM.

Цветовые обозначения те же, что и на рис. 2

[Fig. 3. Potential distribution of *Oxytropis grandiflora* (A) and the section *Xerobia* (B) under Maxent modeling with ENVIREM variables. Figure captures are the same as in Fig. 2]

Современный ареал *O. grandiflora* изучен довольно подробно, подходящие экологические условия для произрастания вида, где возможны новые находки, выявляются только на Хэнтэе (рис. 3, A). Изучаемый вид встречается в диапазоне высот от 200 до 1 800 м над у. м., большая часть местонахождений вида отмечена на высотах 600–1 000 м над у. м. Высотные

характеристики хребта Хэнтэй в основном варьируют в пределах от 1 200 до 1 800 м над у. м., поэтому часть местообитаний действительно может быть благоприятной для произрастания данного вида.

Поскольку ареал секции *Xerobia* (совокупность ареалов видов секции) является довольно целостным (рис. 1; 3, В) и характеризуется рядом общих детерминирующих факторов для видов разных ареалогических групп (см. табл. 1), дальнейший анализ проводили для всей секции. Данный подход позволяет оценить отклик горных ксерофитных видов *Oxytropis* в центре Азии на параметры прошлого и будущего климата. В современный период ключевыми факторами распространения видов секции *Xerobia* по переменным ENVIREM являются потенциальная эвапотранспирация самой сухой четверти года, индекс континентальности и метрика относительной влажности и аридности (табл. 2). Данные переменные также имели важное значение в условиях среднего голоцена и последнего ледникового максимума. Это свидетельствует о том, что экологические условия на изучаемой территории оставались достаточно стабильными и в прошлые геологические эпохи. Территория Центральной Азии была в меньшей степени затронута оледенением по сравнению с более северными регионами. Однако большие площади оледенения наблюдались в ее северной части в различных горных массивах. Реконструкция оледенения массива Монгун-Тайга (северо-запад Внутренней Азии) в максимум малой ледниковой эпохи показала, что площадь оледенения в этот период превосходила современную почти на 50%. На изучаемой территории в голоцене наблюдалась активизация восходящих движений в большинстве районов Алтая и Саян. При этом предполагается, что на северо-западе Внутренней Азии количество осадков было не больше, чем в максимум оледенения [23]. Второй климатический оптимум голоцена (оптимальное сочетание теплообеспеченности и увлаженности, обеспечивающее максимальную биологическую продуктивность и видовое разнообразие растительности) наблюдался в промежутке 6,2–5,3 тыс. л.н. и более отчетливо выразился в приатлантических районах [24]. К середине голоцена количество осадков сильно сократилось, но условия были достаточно теплыми. Различия показателей летней температуры на юге Западной Сибири и на Алтае в оптимум голоцена в сравнении с современным климатом были небольшими и в среднем составили 0,5 °C [25]. Полученные нами результаты согласуются с вышеуказанными палеогеографическими исследованиями и отмечают, что в изучаемом регионе различия основных климатических показателей на довольно большом временном промежутке оставались достаточно стабильными.

Карты потенциального ареала секции *Xerobia* показывают большее распространение видов на северо-западе в период последнего ледникового максимума и сокращение их ареалов со среднего голоцена и до настоящего времени (рис. 4).

Таблица 2 [Table 2]

Вклад ключевых экологических переменных в модель потенциального распространения секции *Xerobia* в условиях прошлых климатических эпох
[Contribution of the key environmental variables to the predictive model of distribution for *Xerobia* section in conditions of the past climate]

Переменные ENVIREM [ENVIREM variables]	Современный климат [Current climate]		Средний голоцен [Mid-Holocene]		Последний ледни- ковый максимум [Last Glacial Maximum]	
	Вклад [Contribution], %	Коэффициент пер- мутации [Permutation coefficient]	Вклад [Contribution], %	Коэффициент пер- мутации [Permutation coefficient]	Вклад [Contribution], %	Коэффициент пер- мутации [Permutation coefficient]
ПЭТ самого сухо- го периода года [PET of the driest quarter]	28,4	8,8	25,7	6,7	14,9	6,3
Индекс континентальности [Continentality Index]	12,9	10,2	9,2	8,4	12,5	58
Метрика относительной влажно- сти и аридности [Climatic Moisture Index]	10,4	41,3	9,7	12,9	6	7,1
Сезонность ПЭТ [PET Seasonality]	9,7	0,3	23,7	3,2	17,5	2
Индекс неровности земной поверхности [Terrain Roughness Index]	9,6	1,4	7	2,6	8,7	4,1
ПЭТ самого влажного периода года [PET of the wet- test quarter]	7,2	2,1	10,5	6,3	10,7	3,5

Примечание. Обозначения, как и в табл. 1.

[Note. Symbols are the same as in Table 1].

На востоке ареала секции наблюдается расширение распространения видов, которое в современный период охватило и ее северо-восточную часть (Забайкалье и частично центральную часть Сибири). Распространение видов в большей степени приурочено к горным массивам, которые являлись рефугиумами для видов секции *Xerobia*. В период последнего ледникового максимума ареал видов был более целостным, в последующее время образовались дизъюнкции. Полученные результаты согласуются с мнением А.В. Положий [5] о том, что центром происхождения рода *Oxytropis* является Южная Сибирь, а после оледенений наблюдалось расселение видов на территорию Центральной Азии. Это также подтверждается высоким видовым богатством рода в изучаемом регионе, для которого характерно наличие большого числа эндемиков вторичного происхождения [4].

Необходимо отметить, что для прошлых геологических эпох повышается значимость такой переменной, как сезонность потенциальной эвапотранспирации (см. табл. 2). Данный факт косвенно подтверждается анализом различных климатических сценариев в максимум малой ледниковой эпохи, когда на юго-востоке Внутренней Азии в этот период предположительно наблюдалось резкое падение количества осадков [24]. В современный период эта часть ареала секции характеризуется наилучшими условиями увлажнения за счет влияния тихоокеанского муссона, поэтому здесь отмечается некоторое расширение распространения видов *Oxytropis*.

Составлены прогнозные карты ареала секции для различных климатических сценариев. Для условий современного климата значимыми являются следующие переменные: средняя температура самой сухой четверти года, средняя суточная амплитуда температуры за каждый месяц, изотермичность (22,5; 18,7; 15,3, % вклада переменных соответственно).

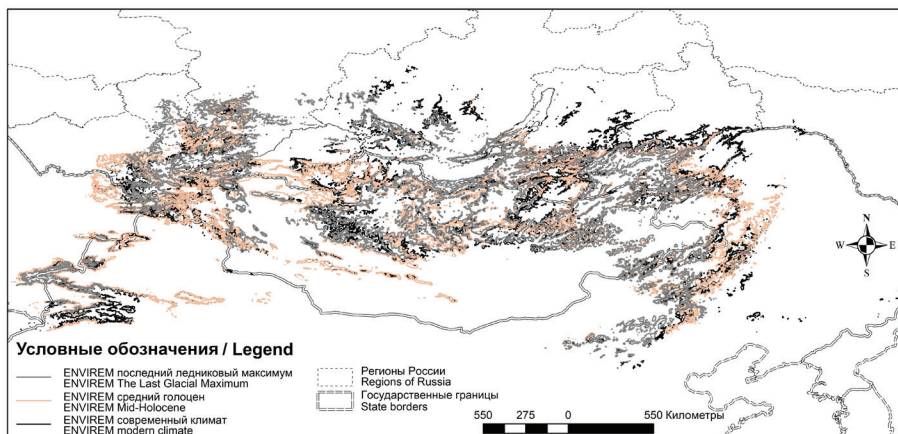


Рис. 4. Потенциальные ареалы видов секции *Xerobia* по результатам моделирования в Maxent на основе переменных ENVIREM. Сравнение ареалов проводится при значениях вероятности 0,54 на логистической шкале Maxent (среднее значение, характерное для условий, сходных с современным распространением видов)

[Fig. 4. Potential distribution of species of the section *Xerobia* under Maxent modeling with ENVIREM variables. Comparison of distribution is done according to 0.54 meaning of logistic scale of Maxent (average meaning for conditions close to modern distribution of species)]

При анализе различных климатических сценариев на 2050 и 2070 гг. набор ключевых переменных остается таким же, к ним лишь добавляется сезонность температуры. Эта переменная оценивает изменения температурных показателей в течение года, т.е. стандартное отклонение температур. Все разработанные сценарии Межправительственной комиссии по изменению климата предполагают в будущем рост температурных показателей в большей или меньшей степени, поэтому вариабельность температурных показателей будет неизбежно расти. Вследствие того, что изучаемый реги-

он характеризуется выраженной континентальностью климата и аридными условиями, ареалы видов секции *Xerobia* по результатам моделирования в будущем могут измениться в незначительной степени даже при наибольшем потеплении климата (сценарий RCP8.5). При потеплении климата появляются новые потенциальные экологические ниши на северо-западе (Синцзян-Уйгурский автономный район) и северо-востоке Китая (провинции Внутренняя Монголия и Хэйлунцзян), а также в центральной и восточной части Забайкальского края и на юго-востоке Иркутской области (рис. 5). Также прогнозируется незначительное сокращение ареала секции *Xerobia* в ее юго-восточной части. В целом характер прогнозируемых изменений к 2070 г. при наиболее неблагоприятном климатическом сценарии является относительно невысоким, и распространение изучаемых видов будет отмечаться в границах ареалов, близких к современным.

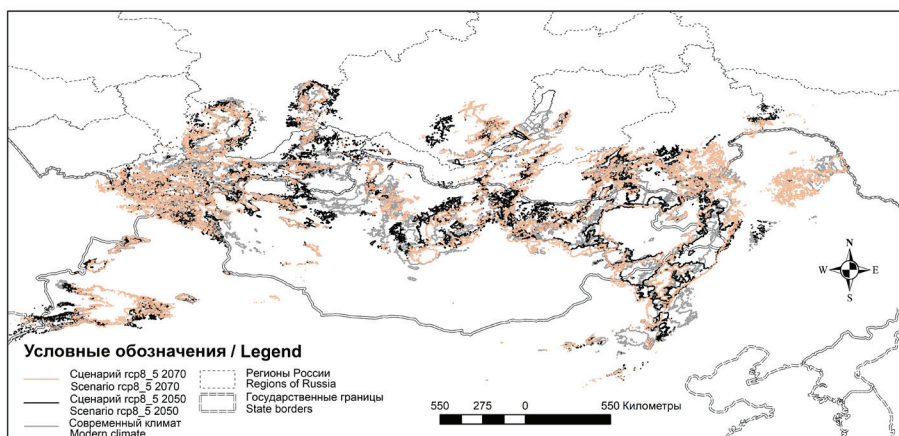


Рис. 5. Прогнозные потенциальные ареалы видов секции *Xerobia* по результатам моделирования в Maxent на основе переменных BIOCLIM. Использованы значения, как и на рис. 4

[Fig. 5. Forecast potential distribution of species of the section *Xerobia* under Maxent modeling with BIOCLIM variables. Figure captures are the same as in Fig. 4]

Результаты моделирования распространения изучаемых видов секции показывают относительно небольшие изменения их ареалов в прошлом, а также при прогнозируемых климатических изменениях в будущем даже при возможности реализации самого негативного климатического сценария.

Заключение

Оценка потенциального распространения видов секции *Xerobia* в программном пакете Maxent показала, что переменные ENVIREM проводят более корректное моделирование в сравнении с переменными BIOCLIM. Основными факторами, определяющими распространение видов централь-

ноазиатской приуроченности, являются показатели температуры (среднегодовая температура и изотермичность) и потенциальной эвапотранспирации в самые сухие и холодные периоды года. Распространение маньчжуро-даурских видов лимитируется коэффициентом вариации осадков, годовой амплитудой температуры, сезонностью потенциальной эвапотранспирации и ее показателями в самый сухой период года. Для распространения видов этих ареалогических групп важное значение также имеют сумма осадков в самой холодной четверти года и потенциальная эвапотранспирация в самый сухой период года

В современный период ключевыми факторами распространения видов секции *Xerobia* по переменным ENVIREM являются потенциальная эвапотранспирация самой сухой четверти года, индекс континентальности и метрика относительной влажности и аридности. Эти переменные также являются детерминирующими факторами для условий среднего голоцена и последнего ледникового максимума. Это может свидетельствовать о том, что экологические условия на изучаемой территории оставались достаточно стабильными и в прошлые геологические эпохи.

Анализ прогнозных карт ареалов для различных климатических сценариев на основе переменных BIOCLIM выявил незначительную степень изменений ареалов видов секции *Xerobia* при различных вероятных климатических сценариях в будущем, в том числе и при максимальном потеплении климата.

Литература

1. Санданов Д.В. Современные подходы к моделированию разнообразия и пространственному распределению видов растений: перспективы их применения в России // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2019. № 46. С. 82–114. doi: [10.17223/19988591/46/5](https://doi.org/10.17223/19988591/46/5)
2. Огуреева Г.Н., Котова Т.В. Картографирование биоразнообразия // География и мониторинг биоразнообразия. М. : Издательство научного и учебно-методического центра, 2002. С. 216–246.
3. Малышев Л.И. Модельное значение рода *Oxytropis* (Fabaceae) для ботанико-географического районирования Северной и Центральной Азии // Ботанический журнал. 2006. Т. 91, № 8. С. 1145–1156.
4. Растения Центральной Азии. По материалам Ботанического института им. В.Л. Комарова РАН. Вып. 86: Род Остролодочник / сост. В.И. Грубов. СПб. : Изд-во СПФХА, 1998. 92 с.
5. Положий А.В. К вопросу о происхождении и эволюции рода *Oxytropis* (Fabaceae) // Ботанический журнал. 2003. Т. 88, № 10. С. 55–59.
6. Малышев Л.И. Разнообразие рода Остролодка (*Oxytropis*) в Азиатской России // Turczaninowia. 2008. Т. 11, вып. 4. С. 5–141.
7. Pyak A.I. *Oxytropis sobolevskajae* sp. nov. (Fabaceae: Papilionoideae, Galegeae) from Tuva Republic (south Siberia, Russia) // Nordic Journal of Botany. 2014. Vol. 32. PP. 139–142. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1756-1051.2013.00196.x>
8. Селютин И.Ю. Анализ состояния ценопопуляций редких видов *Oxytropis* секции *Xerobia* Южной Сибири // Проблемы изучения растительного покрова Сибири :

- материалы VI Междунар. науч. конф. (Томск, 24–26 октября 2017 г.). Томск: Издательский дом ТГУ, 2017. С. 229–231.
9. Селютина И.Ю., Санданов Д.В., Кониченко Е.С. Находка в Республике Бурятия *Oxytropis triphylla* (Fabaceae) – эндемика западного побережья оз. Байкал // Ботанический журнал. 2010. Т. 95, № 8. С. 1164–1170.
 10. Чимитов Д.Г., Иметхенова О.В., Найданов Б.Б., Санданов Д.В., Кривенко Д.А. Новые данные о распространении *Oxytropis triphylla* (Fabaceae) и *Stipa glareosa* (Poaceae) в Республике Бурятия // Растительный мир Азиатской России. 2017. № 1 (25). С. 10–18. doi: [10.21782/RMAR1995-2449-2017-1\(10-18\)](https://doi.org/10.21782/RMAR1995-2449-2017-1(10-18))
 11. Селютина И.Ю., Санданов Д.В. Демографическая структура и численность популяций редких эндемичных видов рода *Oxytropis* степей Приольхонья // Растительный мир Азиатской России. 2018. № 1 (29). С. 14–23. doi: [10.21782/RMAR1995-2449-2018-1\(14-23\)](https://doi.org/10.21782/RMAR1995-2449-2018-1(14-23))
 12. Санданов Д.В. Геоинформационный анализ распространения редких сосудистых растений на территории Бурятии // Ученые записки Забайкальского государственного университета. 2016. Т. 11, № 1. С. 38–45.
 13. Улзийхутаг Н. Бобовые Монголии (таксономия, экология, география, филогения и хозяйственное значение). Улаанбаатар: Бемби сан, 2003. 588 с.
 14. Phillips S.J., Dudik M. Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation // Ecography. 2008. Vol. 31. PP. 161–175. doi: <https://doi.org/10.1111/j.0906-7590.2008.5203.x>
 15. Kimura M.K., Uchiyama K., Nakao K., Moriguchi Y., San Jose-Maldia L., Tsumura Y. Evidence for cryptic northern refugia in the last glacial period in *Cryptomeria japonica* // Annals of Botany. 2014. Vol. 114, № 8. PP. 1687–1700. doi: <https://doi.org/10.1093/aob/mcu197>
 16. Tsuyama I., Nakao K., Higa M., Matsui T., Shichi K., Tanaka N. What controls the distribution of the Japanese endemic hemlock, *Tsuga diversifolia*? Footprint of climate in the glacial period on current habitat occupancy // Journal of Forest Research. 2014. Vol. 19, № 1. PP. 154–165. doi: <https://doi.org/10.1007/s10310-013-0399-9>
 17. McSweeney C.F., Jones R.G., Booth B.B.B. Selecting ensemble members to provide regional climate change information // Journal of Climatology. 2012. Vol. 25. PP. 7100–7121. doi: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00526.1>
 18. Hijmans R.J., Cameron S.E., Parra J.L., Jones P.G., Jarvis A. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas // International Journal of Climatology. 2005. Vol. 25. PP. 1965–1978. doi: <https://doi.org/10.1002/joc.1276>
 19. Tittle P.O., Bemmels J.B. ENVIREM: an expanded set of bioclimatic and topographic variables increases flexibility and improves performance of ecological niche modeling // Ecography. 2018. Vol. 41. PP. 291–307. doi: <https://doi.org/10.1111/ecog.02880>
 20. Попов М.Г. Флора Средней Сибири. М. ; Л. : Изд-во АН СССР, 1957. Т. 1. С. 336–352.
 21. Санданов Д.В., Liu Y., Wang Z., Королук А.Ю. Древесные и травянистые растения Внутренней Азии: видовое богатство и эколого-географические особенности // Сибирский экологический журнал. 2020. № 4. С. 450–462.
 22. Санданов Д.В., Найданов Б.Б. Пространственное моделирование ареалов восточно-азиатских видов растений: современное состояние и динамика под влиянием климатических изменений // Растительный мир Азиатской России. 2015. № 3 (19). С. 30–35.
 23. Ганюшкин Д.А. Гляциогенные комплексы резкоконтинентального района северо-запада Внутренней Азии: дис. ... д-ра геогр. наук. СПб., 2015. 429 с.
 24. Зубаков В.А. Глобальные климатические события плейстоцена. Л. : Гидрометеиздат, 1986. 288 с.
 25. Климанов В.А., Величко А.А., Борзенкова И.И. Климатические характеристики голоцена (интервал 6000–5500 л.н.) // Палеоклиматы и палеоландшафты

внетропического пространства Северного полушария. Поздний плейстоцен – голоцен. М., 2009. С. 20–24.

Поступила в редакцию 02.06.2020 г.; повторно 31.08.2020 г.;
принята 27.10.2020 г.; опубликована 29.12.2020 г.

Авторский коллектив:

Санданов Денис Викторович – канд. биол. наук, с.н.с. лаборатории флористики и геоботаники, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН» (Россия, 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6).

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-8504-3485>

E-mail: sdenis1178@mail.ru

Дугарова Анастасия Сергеевна – магистрант 2-го курса кафедры ботаники, Федеральное государственное бюджетное учреждение образования «Бурятский государственный университет» (Россия, 670000, г. Улан-Удэ, ул. Смолина, 24а).

E-mail: anastasia.dugarova@yandex.ru

Селютин Инесса Юрьевна – канд. биол. наук, с.н.с. лаборатории экологии и геоботаники, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Центральный сибирский ботанический сад СО РАН» (Россия, 630090, г. Новосибирск, ул. Золотолинская, 101).

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-5032-2065>

E-mail: selyutina.inessa@mail.ru

Для цитирования: Санданов Д.В., Дугарова А.С., Селютин И.Ю. Моделирование распространения видов секции *Xerobia* Bunge рода *Oxytropis* DC. на территории Центральной Азии при климатических изменениях в прошлом и будущем // Вестн. Том. гос. ун-та. Биология. 2020. № 52. С. 85–104. doi: 10.17223/19988591/52/5

For citation: Sandanov DV, Dugarova AS, Selyutina IYu. Species distribution modeling for the section *Xerobia* Bunge of the genus *Oxytropis* DC. on the territory of Central Asia under past and future climate change. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya = Tomsk State University Journal of Biology*. 2020;52:85-104. doi: 10.17223/19988591/52/5 In Russian, English Summary

Denis V. Sandanov¹, Anastasia S. Dugarova², Inessa Yu. Selyutina³

¹ Institute of General and Experimental Biology, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude, Russian Federation

² Buryat State University, Ulan-Ude, Russian Federation

³ Central Siberian Botanical Garden, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

Species distribution modeling for the section *Xerobia* Bunge of the genus *Oxytropis* DC. on the territory of Central Asia under past and future climate change

Modern botanical studies revealing patterns of plant species distribution are based on analysis of big datasets. Despite publishing many maps of diversity and species richness on the global scale and for huge biogeographic regions of the world, the territories of Northern and Central Asia remain poorly studied.

We elaborated a special database, including distribution of 19 *Oxytropis* species of the section *Xerobia* with 1353 localities (See Fig. 1). For all species, we analyzed their whole distribution range, including data from Kazakhstan, Mongolia and China. Species distribution was detected according to the main foreign and Russian herbaria, online databases, field data and relevés. Species distribution modeling was performed using Maxent 3.3.3k with MIROC-ESM model in resolution of 2.5 arc-minutes.

19 BIOCLIM and 18 ENVIREM variables were analyzed. Past climate change was evaluated using ENVIREM variables for the Mid-Holocene (ca. 6.000 yr. BP) and the Last Glacial Maximum (ca. 22.000 yr. BP). Future distribution modeling was carried out basing on different climatic scenarios, according to IPCC AR5: RCP8.5, RCP2.6 and RCP6.0.

Species distribution from the section *Xerobia* mostly occupied the territory of Central Asia (See Fig. 1). Few species, such as *Oxytropis grandiflora* (Pall.) DC. and *O. leptophylla* (Pall.) DC., were mostly found in the western part of *Xerobia* section distribution on the territory of Zabaykal'skiy region of Russia, Eastern province of Mongolia and Inner Mongolia province of China. The most part of *Xerobia* species have isolated distribution and often occupy specific habitats. In such case, using SDM with only bioclimatic variables for local endemic species is pointless. So, we chose species *Oxytropis ampullata* (Pall.) Pers. (See Fig. 2) with Central Asian distribution and *O. grandiflora* with Manchuro-Daurian distribution for modeling (See Fig. 3A). The selected species differ in their ecology: *O. ampullata* is a mountainous species, whereas most habitats for *O. grandiflora* are river valleys and mid-mountainous regions. Our analysis showed that ENVIREM variables provide more correct modeling results than BIOCLIM variables (See Fig. 2). Predictive maps on the basis of BIOCLIM variables showed wide potential distribution for *O. ampullata*, which does not correspond well to the species ecology. The main habitats for this species are such mountainous regions as the Khangai mountains, the Russian and the Mongolian Altai mountains, the Dzhungarian mountains, and the Tarbagatai ridge. Additionally, modeling showed potential distribution for the species in the Selenga river valley. Modern distribution of *O. grandiflora* was studied quite well; suitable habitats with new localities for the species can be found in the Khentii mountains (See Fig. 3A).

The determinants for *O. ampullata* are mean annual temperature, isothermality and potential evapotranspiration (PET) of the driest and coldest quarter (See Table 1). PET parameters in the driest and the coldest time of the year have the key meaning because in arid conditions plants receive the main portion of moisture in the colder period when the evaporation is not intense, also it is important to conserve the moisture during the dry season. Distribution of *O. grandiflora* is limited by temperature and precipitation seasonality, temperature annual range, PET seasonality, and PET of the driest quarter (See Table 1). Determinants for the species with Central-Asian distribution *O. ampullata* are connected with temperature variables, whereas for Manchuro-Daurian species *O. grandiflora* precipitation matters (See Table 1 and Fig. 3A).

The key factors for modern distribution of the studied *Xerobia* species are mean monthly potential evapotranspiration of the driest quarter, continentality index and climatic moisture index (See Fig. 3B). All these variables were determinants for the mid-Holocene and the Last Glacial Maximum (See Table 2 and Fig. 4), which might give evidence of relatively stable environmental conditions in the studied region. Central Asia has not been severely affected by glaciation as more northern latitudes and climate conditions on that territory were relatively stable during a long period.

Modeling for the past climate showed a wider distribution for *Xerobia* species in the north-west during the Last Glacial Maximum and future shrinking during the Mid-Holocene till modern time (See Fig. 4). The north-eastern territories, such as Zabaykal'skiy region of Russia and, partially, the central part of Siberia, are characterized by a wider distribution under modern climate conditions. Species habitats of that territory are mostly confined with mountains. It is consistent with previous studies that described Southern Siberia as one of the centers of speciation for the genus *Oxytropis*. This region has now high *Oxytropis* species richness with a great number of endemics.

Predictive maps for different climate scenarios reveal insignificant changes in distribution of the section *Xerobia*, even for the maximum climate warming (RCP8.5 scenario) (See Fig.5). Under predicted climate change, potential habitats in the south-west and in the north-east of *Xerobia* distribution, as well as a slight shrinking in the south-east can be observed in the future.

The paper contains 5 Figures, 2 Tables and 25 References.

Key words: *Oxytropis*; species distribution modeling; environmental variables; Maxent; Central Asia.

Funding: The reported study was funded by the Russian Foundation for Basic Research (Project No 19-54-53014) and partially by the Russian Federal Budget (Project No AAAA-A17-117011810036-3).

The Authors declare no conflict of interest.

References

1. Sandanov DV. Modern approaches to modeling plant diversity and spatial distribution of plant species: Implication prospects in Russia. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya* = *Tomsk State University Journal of Biology*. 2019;46:82-114. doi: [10.17223/19988591/46/5](https://doi.org/10.17223/19988591/46/5) In Russian, English Summary
2. Ogureeva GN, Kotova TV. Kartografirovaniye bioraznoobraziya [Mapping of biodiversity]. In: *Geografiya i monitoring bioraznoobraziya* [Geography and monitoring of biodiversity]. Moscow: Izdatel'stvo nauchnogo i uchebno-metodicheskogo tsentra; 2002. pp. 216-246. In Russian
3. Malyshev LI. Model significance of the genus *Oxytropis* (Fabaceae) for the botanical geographical zoning of the Northern and Central Asia. *Botanicheskiy zhurnal* = *Botanical J.* 2006;91(8):1145-1156. In Russian
4. Rasteniya Tsentral'noy Azii. Po materialam Botanicheskogo Instituta im. V.L. Komarova RAN [Plants of Central Asia. Proceedings of V.L. Komarov Botanical Institute of the Russian Academy of Sciences]. Grubov VI, compiler. Saint-Petersburg: Saint-Petersburg Chemistry and Pharmacy Academy Publ.; 1998. Vol. 8b. 92 p. In Russian
5. Polozhiy AV. On the problem of the origin and evolution of the genus *Oxytropis* (Fabaceae). *Botanicheskiy zhurnal* = *Botanical J.* 2003;88(10):55-59. In Russian
6. Malyshev LI. Diversity of the genus *Oxytropis* in Asian Russia. *Turczaninowia*. 2008;11(4):5-141. In Russian
7. Pyak AI. *Oxytropis sobolevskajae* sp. nov. (Fabaceae: Papilionoideae, Galegeae) from Tuva Republic (south Siberia, Russia). *Nordic J Botany*. 2014;32:139-142. doi: [10.1111/j.1756-1051.2013.00196.x](https://doi.org/10.1111/j.1756-1051.2013.00196.x)
8. Selyutina IYu. Analiz sostoyaniya tsenopopulyatsiy redkikh vidov *Oxytropis* sekcii *Xerobia* Yuzhnoy Sibiri [Analysis of the state of rare *Oxytropis* species cenopopulations of the *Xerobia* section in Southern Siberia]. In: *Problemy izucheniya rastitel'nogo pokrova Sibiri*. Materialy VI mezhd. nauch. konf. [Problems of studying the vegetation cover of Siberia. Proceedings (Tomsk, Russia, 24-26 October, 2017)]. Tomsk: Tomsk State University Publ.; 2017. pp. 229-231. In Russian, English Summary
9. Selyutina IYu, Sandanov DV, Konichenko ES. The finding of endemic species *Oxytropis triphylla* (Pall.) Pers. in the Republic of Buryatia. *Botanicheskiy zhurnal* = *Botanical J.* 2010;95(8):1164-1170. In Russian
10. Chimitov DG, Imetkhenova OV, Naydanov BB, Sandanov DV, Krivenko DA. New data relating to the distribution *Oxytropis triphylla* (Fabaceae) and *Stipa glareosa* (Poaceae) in the Republic of Buryatia. *Rastitel'nyy Mir Aziatskoj Rossii*. 2017;1(25):10-18. doi: [10.21782/RMAR1995-2449-2017-1\(10-18\)](https://doi.org/10.21782/RMAR1995-2449-2017-1(10-18))

11. Selyutina IYu, Sandanov DV. Demographic structure and population size of rare endemic *Oxytropis* species from Priol'khonye steppe. *Rastitel'nyj Mir Aziatskoj Rossii*. 2018;1(29):14-23. doi: [10.21782/RMAR1995-2449-2018-1\(14-23\)](https://doi.org/10.21782/RMAR1995-2449-2018-1(14-23))
12. Sandanov DV. GIS-analysis of rare vascular plants distribution on the territory of Buryatia. *Uchenye zapiski Zabayskogo gosudarstvennogo universiteta = Scholarly Notes of Transbaikalian State University*. 2016;11(1):38-45. In Russian
13. Ulziykhutag N. Bobovyie Mongolii (taksonomiya, ekologiya, geografiya, filogeniya i khozyaystvennoe znachenie) [Legumes of Mongolia (Taxonomy, ecology, geography, phylogeny and practical meaning)]. Ulaanbaatar, 2003. 588 p. In Russian, English Summary
14. Phillips SJ, Dudik M. Modeling of species distributions with Maxent: New extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*. 2008;31:161-175. doi: [10.1111/j.0906-7590.2008.5203.x](https://doi.org/10.1111/j.0906-7590.2008.5203.x)
15. Kimura MK, Uchiyama K, Nakao K, Moriguchi Y, San Jose-Maldia L, Tsumura Y. Evidence for cryptic northern refugia in the last glacial period in *Cryptomeria japonica*. *Annals of Botany*. 2014;114(8):1687-1700. doi: [10.1093/aob/mcu197](https://doi.org/10.1093/aob/mcu197)
16. Tsuyama I, Nakao K, Higa M, Matsui T, Shichi K, Tanaka N. What controls the distribution of the Japanese endemic hemlock, *Tsuga diversifolia*? Footprint of climate in the glacial period on current habitat occupancy. *J Forest Research*. 2014;19(1):154-165. doi: [10.1007/s10310-013-0399-9](https://doi.org/10.1007/s10310-013-0399-9)
17. McSweeney CF, Jones RG, Booth BBB. Selecting ensemble members to provide regional climate change information. *J Climatology*. 2012;25:7100-7121. doi: [10.1175/JCLI-D-11-00526.1](https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00526.1)
18. Hijmans RJ, Cameron SE, Parra JL, Jones PG, Jarvis A. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *Int J Climatology*. 2005;25:1965-1978. doi: [10.1002/joc.1276](https://doi.org/10.1002/joc.1276)
19. Tittle PO, Bemmels JB. ENVIREM: an expanded set of bioclimatic and topographic variables increases flexibility and improves performance of ecological niche modeling. *Ecography*. 2018;41:291-307. doi: [10.1111/ecog.02880](https://doi.org/10.1111/ecog.02880)
20. Popov MG. Flora Sredney Sibiri [Flora of Middle Siberia]. Shishkin BK, editor. Moscow, Leningrad: Soviet Academy of Science Publ.; 1957. Vol. 1. pp. 336-352.
21. Sandanov DV, Liu Y, Wang Z, Korolyuk AYU. Erratum to: Woody and herbaceous plants of Inner Asia: Species richness and ecogeographic patterns. *Contemporary Problems of Ecology*. 2020;4:360-369. doi: [10.1134/S1995425520040101](https://doi.org/10.1134/S1995425520040101)
22. Sandanov DV, Naidanov BB. Spatial modeling of East-Asian plant species distribution: Current condition and future dynamic under climatic change. *Rastitel'nyj Mir Aziatskoj Rossii*. 2015;3(19):30-35. In Russian
23. Ganyushkin DA. *Glyatsiogennye komplekсы rezkokontinental'nogo rayona severo-zapada Vnutrenney Azii* [Glaciogenic complexes of the sharp continental district in the north-west of Inner Asia. DrSci. Dissertation, Geography]. Saint-Petersburg: Saint-Petersburg State University; 2015. 429 p. In Russian
24. Zubakov VA. Global'nye klimaticheskie sobytiya pleystotsena [Global climatic events of the Pleistocene]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ.; 1986. 288 p.
25. Klimanov VA, Velichko AA, Borzenkova II. Klimaticheskie kharakteristiki golotsena (interval 6000-5500 l.n.) [Climate characteristics of the Holocene (6000-5500 years ago)]. In: *Paleoklimaty i paleolandshafty vnetropicheskogo prostranstva Severnogo polushariya. Pozdnyy pleystotsen – golotsen* [Paleoclimates and paleoenvironments of extra-tropical regions of the Northern Hemisphere. Late Pleistocene – Holocene. Atlas-monograph]. Velichko AA, editor-in-chief. Moscow: GEOS Publ.; 2009. pp. 20-24.

Received 02 June 2020; Revised 31 August 2020;

Accepted 27 October 2020; Published 29 December 2020

Author info:

Sandanov Denis V, Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher, Laboratory of Floristics and Geobotany, Federal State Budgetary Institution of Science Institute of General and Experimental Biology, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 6 Sakhyanovoi Str., Ulan-Ude 670047, Russian Federation.

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-8504-3485>

E-mail: sdenis1178@mail.ru

Dugarova Anastasia S, Master's Student, Department of Botany, Federal State Budgetary Institution of Education Buryat State University, 24a Smolina Str., Ulan-Ude 670000, Russian Federation.

E-mail: anastasia.dugarova@yandex.ru

Selyutina Inessa Yu, Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher, Laboratory of Ecology and Geobotany, Federal State Budgetary Institution of Science Central Siberian Botanical Garden, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 101 Zolotodolinskaya Str., Novosibirsk 600090, Russian Federation.

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-5032-2065>

E-mail: selyutina.inessa@mail.ru

УДК 581.5/574.47(571.55)
doi: 10.17223/19988591/52/6

**В.В. Чепинога^{1,2}, О.А. Аненхонов³, Е.В. Софронова¹,
А.П. Софронов¹, Б.А. Коротяев⁴, И.А. Махов⁵**

¹Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, г. Иркутск, Россия

²Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия

³Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН, г. Улан-Удэ, Россия

⁴Зоологический институт РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

⁵Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

Растительные сообщества с *Ulmus japonica* (Ulmaceae) в Западном Забайкалье: распространение, значение для сохранения биоразнообразия и перспективы охраны

Работа выполнена в рамках государственных заданий Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН (рег. № АААА-А17-117041910172-4), Института общей и экспериментальной биологии СО РАН (рег. № АААА-А17-117011810036-3) и Зоологического института РАН (рег. № АААА-А19-119020690101-6) при поддержке РФФИ (проекты 18-05-00557, 19-54-53014 и 19-04-00565), а также при частичной поддержке РФФИ и правительства Иркутской области (проект 20-45-380009).

Во флоре Западного Забайкалья вяз японский (*Ulmus japonica* (Rehder) Sarg.) – неморальный реликт с восточноазиатским распространением. В регионе вид встречается на небольших участках в низовьях р. Селенга (участок «Югово») и на р. Чикой («Жиндо»), оторванных от основного ареала. В результате исследования уточнены сведения о распространении *U. japonica* в Западном Забайкалье, выявлены ряд новых местонахождений в низовьях р. Селенга и новое местонахождение (участок «Мурочи») на р. Чикой. Сообщение о произрастании вяза близ с. Подлопатки на р. Хилок не подтвердилось. В Баргузинской долине, откуда имеется гербарный образец этого вида, обнаружить *U. japonica* не удалось. Изучен состав сообществ, в которых *U. japonica* выступает доминантом либо содоминантом, и описаны их основные черты и отличительные особенности. Установлено, что сообщества с *U. japonica* на участке «Югово» отличаются от «Жиндо» и «Мурочи» не только большим ценотическим разнообразием, но и составом характерных видов сосудистых растений. По литературным данным и результатам оригинальных исследований в сообществах выявлено 16 видов сосудистых растений, лишенизированных грибов, жесткокрылых и чешуекрылых насекомых, которые включены в региональные или федеральную Красные книги. Обнаружен еще 31 вид редких и реликтовых видов растений, грибов и насекомых. В общей сложности 19 видов организмов приведены впервые для вязовников или региона в целом. Эти виды могут быть рекомендованы к включению в региональную Красную книгу или в «бионадзорный список» видов, требующих особого внимания. В качестве перспективных мер по организации охраны сообществ с *U. japonica* предложено включение их в формате кластеров в уже существующие охраняемые территории (Байкальский заповедник и

Национальный парк «Чикой»), а также в предложенную ранее российско-монгольскую трансграничную особо охраняемую природную территорию кластерного типа «Селенга».

Ключевые слова: *Coleoptera*; *Heteroptera*; *Lepidoptera*; вяз японский; неморальные реликты; нуждающиеся в охране виды; охраняемые природные территории.

Введение

Ильм, или вяз японский (*Ulmus japonica* (Rehder) Sarg.), – широколистное дерево высотой до 30 м (рис. 1). Ареал этого вида в России охватывает юг Республики Бурятия и Забайкальского края, Амурскую область, юг Хабаровского края, Приморский край и о. Сахалин [1]. За рубежом этот вид произрастает в Японии (откуда описан) [2], на Корейском полуострове [3], в восточной Монголии [4], восточных и юго-восточных провинциях Китая [5]. В Китае также встречается менее распространенный близкородственный вид вяз Давида (*Ulmus davidiana* Planch.), разновидностью которого некоторые исследователи считают вяз японский (*Ulmus davidiana* var. *japonica* (Rehder) Nakai). Эта точка зрения, в частности, принята в глобальных базах данных по биоразнообразию, таких как Catalogue of Life (CoL) [6] и Plants of the World Online (POWO) [7]. Поскольку мы не касаемся вопросов таксономии, в данной статье будет использовано название в ранге вида *Ulmus japonica* (вяз японский).

Ареал *U. japonica* в Азии образует северную часть естественного ареала не только этого вида, но (вместе с ареалом вяза приземистого (*U. pumila* L.)) и рода *Ulmus* L. в целом [8]. В Забайкалье, географическом регионе, который охватывает Республику Бурятия и Забайкальский край, более или менее цельная часть ареала *U. japonica* ограничена бассейном р. Амур (водосборный бассейн Тихого океана) и заканчивается на западе низовьями р. Ингода [9, 10]; западнее Яблонового хребта (водосборный бассейн Северного Ледовитого океана) было известно несколько фрагментов ареала *U. japonica*. Два из них расположены в бассейне р. Селенга. Первый, более крупный, находится в низовьях Селенги недалеко от ее впадения в оз. Байкал [9, 11, 12]. Условно обозначим этот участок «Югово» по одному из близлежащих населенных пунктов. Второй небольшой участок (массив «Жиндо») расположен на р. Чикой (правый приток р. Селенга) недалеко от с. Жиндо уже в пределах Забайкальского края у государственной границы с Монгольской Народной Республикой [13]. В окрестностях с. Жиндо известны также удаленные от основного массива отдельные особи *U. japonica* [10]. В архиве Института общей и экспериментальной биологии СО РАН (г. Улан-Удэ, Респ. Бурятия, Россия) имеется рукопись научного отчета за 1969 г. М.А. Решикова [14], где *U. japonica* приводился для окрестностей с. Подлопатки (нижнее течение р. Хилок) на юге Бурятии. Для Баргузинской долины (Северное Прибайкалье, Бурятия) также указывалось изолированное местонахождение в окрестностях с. Душелан [15]; гербарный образец 1911 г. хранится в Ботаническом

института им. В.Л. Комарова РАН – БИН РАН, LE, г. Санкт-Петербург, Россия).



Рис. 1. *Ulmus japonica* в пойменном лесу в долине нижнего течения р. Селенга (фото А. Софронова)

[Fig. 1. *Ulmus japonica* in the floodplain forest in the lower reaches of the Selenga River. Photo by Aleksandr Sofronov]

На биогеографическое значение фрагментов ареала *U. japonica* в Западном Забайкалье впервые обратил внимание А.С. Плешанов [16]. Он отметил реликтовую природу *U. japonica* в регионе, одной из немногих широколиственных пород деревьев во флоре Байкальской Сибири [17, 18]. Развернутые А.С. Плешановым исследования вязовых рощ в низовьях р. Селенга показали, что под их пологом встречается целый комплекс реликтовых видов организмов [19, 20], что позволило обозначить район распространения вязовых сообществ как комплексный рефугиум [21]. Как выяснилось позднее, участок «Югово», расположенный вблизи восточного окончания хр. Хамар-Дабан, входит в рефугиальную зону северного макросклона этого хребта [22]. Анализ группы неморальных реликтовых видов растений хамар-дабанского рефугиума показал своеобразие реликтов восточного участка, что связано с особыми историко-биогеографическими связями сообществ *U. japonica* [22].

Реликтовая природа самого *U. japonica* и присутствие ряда других реликтовых растений и животных, в частности насекомых, обитающих совместно с вязом японским, подвигли нас на более подробное изучение распространения *U. japonica* и его сообществ в Западном Забайкалье.

Цель исследования – уточнение сведений о распространении и экологической приуроченности *U. japonica* в Западном Забайкалье, выявление со-

става сообществ с участием этого вида, оценка значения японсковязовников для сохранения биоразнообразия Байкальского региона и предложение стратегии сохранения образуемых *U. japonica* уникальных экосистем. С учетом трансграничного расположения бассейна р. Селенга и наличия японсковязовых рощ на приграничных территориях как в России, так и в Монголии рассмотрены варианты организации особо охраняемых территорий в граничащих районах обоих государств.

Материалы и методики исследования

Для уточнения данных о распространении *U. japonica* в Западном Забайкалье известные местонахождения были нанесены на топографическую основу. В ходе анализа осенних данных дистанционного зондирования Земли на основании цветовых характеристик достоверно известных местонахождений обширных массивов вязовников были дополнительно намечены участки, где предположено наличие ранее не зарегистрированных сообществ *U. japonica*. В раннелетний (июнь) период 2018 и 2019 гг. проведены поисковые работы по подтверждению известных и верификации предполагаемых местонахождений *U. japonica*. В более поздний период – в июле и августе 2018 и 2019 гг. соответственно – совершены повторные экспедиционные выезды для геоботанического исследования вязовников и лесов с участием *U. japonica*. В результате на всех участках произрастания *U. japonica* сделано 67 полных описаний сообществ. В дополнение к ним использованы 26 геоботанических описаний, выполненных В.В. Чепиной и Е.М. Гладких на участке «Югово» в конце июня 2014 и конце июля 2015 г. Все описания составлены согласно стандартной методике [23]. В течение ряда лет на всех обследованных участках *U. japonica* («Югово», «Жиндо», «Мурочи») проведены также сборы специализированных растительноядных насекомых – жесткокрылых надсемейства Curculionoidea (долгоносики), полужесткокрылых и чешуекрылых – общепринятыми методами [24]. Для уточнения границ и подробного анализа пространственной структуры отдельных массивов вязовников выполнена фотосъемка с квадрокоптера (DJI Mavic 2 Pro). Кроме того, дважды проведены поиски *U. japonica* в Баргузинской долине (Республика Бурятия) для проверки местонахождения, указанного на гербарном листе: «Забайкальск. обл., Баргузинский уезд, около с. Душелана. 1911, М. Короткий и П. Николаев» (LE). Также предприняты поиски *U. japonica* в местонахождении, указанном М.А. Решиковым [14]: «в притеррасной части поймы р. Хилок /левобережье / в окрестностях с. Подлопатки». Район исследования с известными ранее (кроме указания для Баргузинской долины) и обнаруженными нами местонахождениями *U. japonica* показан на рис. 2.

При оценке значения вязовников для сохранения биоразнообразия региона помимо собственных данных и опубликованных сведений других авторов использованы материалы Красных книг Республики Бурятия [25] и Забай-

кальского края [26]. Это позволило учесть редкие и отличающиеся коротким периодом вегетации виды растений, не попавшие в геоботанические описания и гербарные сборы.

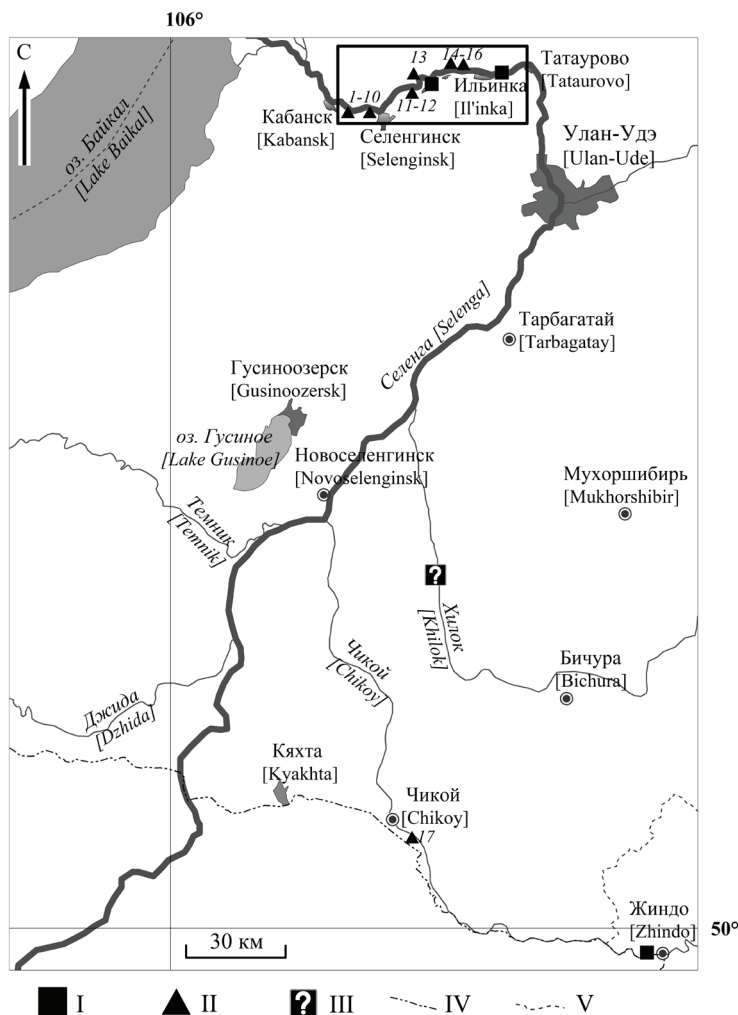


Рис 2. Распространение *Ulmus japonica* на юге Западного Забайкалья. Прямоугольником выделен участок «Югово» (см. рис. 3). Условные обозначения местонахождений вида: I – известные по литературным источникам; II – обнаруженные в 2018 и 2019 гг.; III – данные из фондовых материалов; IV – граница Российской Федерации; V – границы между субъектами Федерации [Fig. 2. Distribution of *Ulmus japonica* in the south of Western Transbaikalia. The rectangle shows Yugovo site (See Fig. 3). Symbols designating species locations: I - According to the literature sources; II - Revealed in 2018 and 2019 (this paper); III - Data from unpublished archives; IV - Border of the Russian Federation; V - Borders between Russian administrative regions]

Собранный гербарий хранится в гербариях Иркутского государственного университета (IRKU) и Института общей и экспериментальной биологии СО РАН (UUN). Часть собранных насекомых (жесткокрылые) помещена в коллекционные фонды Зоологического института РАН (г. Санкт-Петербург).

Названия таксонов сосудистых растений приведены по Конспекту флоры... [27], лишенизированных грибов – по Урбанавичусу [28]. Названия насекомых приведены по специализированным источникам: жесткокрылых – по Alonso-Zarazaga et al. [29], полужесткокрылых – по Винокурову с соавт. [30], чешуекрылых – по Каталогу чешуекрылых России [31]. Названия мохообразных, грибов и перепончатокрылых насекомых приведены по работе А.С. Плешанова и Г.И. Плешановой [17], в которой были опубликованы соответствующие находки.

Результаты исследования и обсуждение

Новые местонахождения *Ulmus japonica*

В результате полевых исследований в пределах Кабанского и Прибайкальского районов Республики Бурятия обнаружено по меньшей мере 16 новых мест произрастания *U. japonica* на участке длиной около 40 км вдоль р. Селенга от окрестностей с. Кабанск до окрестностей с. Татаурово (участок «Югово») (рис. 3).

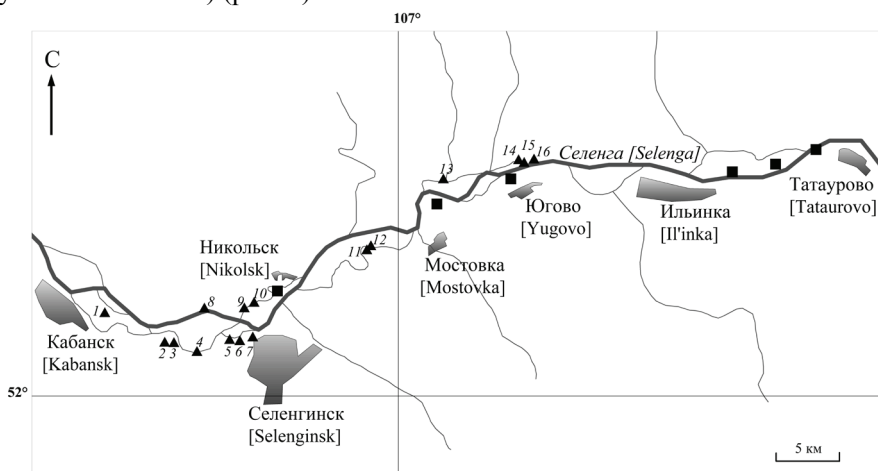


Рис. 3. Распространение *Ulmus japonica* на участке «Югово»; положение участка в Западном Забайкалье и условные обозначения – см. рис. 2

[Fig. 3. Distribution of *Ulmus japonica* at Yugovo site; for location of the site and the legend see Fig. 2]

Новые местонахождения [New localities]: 1 – 52°03'35"N, 106°41'17"E; 2 – 52°01'53"N, 106°45'24"E; 3 – 52°01'38"N, 106°46'21"E; 4 – 52°01'15"N, 106°47'13"E; 5 – 52°01'58"N, 106°49'13"E; 6 – 52°01'56"N, 106°49'53"E; 7 – 52°02'05"N, 106°50'41"E; 8 – 52°03'07"N, 106°47'52"E; 9 – 52°02'55"N, 106°48'29"E; 10 – 52°02'40"N, 106°49'38"E; 11 – 52°05'12"N, 106°57'26"E; 12 – 52°05'23"N, 106°57'40"E; 13 – 52°07'49"N, 107°02'04"E; 14 – 52°08'30"N, 107°06'29"E; 15 – 52°08'25"N, 107°06'50"E; 16 – 52°08'30"N, 107°07'25"E

Ранее на этом участке вяз был известен из примерно шести местонахождений. В пределах участка вяз часто представлен не одиночными деревьями, а небольшими вязовыми с примесью черемухи (*Padus avium* Mill.) либо вязово-черемуховыми массивами площадью до 10–15 га, расположенными в пределах узкой полосы в пойме и на первой террасе долины р. Селенга.

Другой целостный массив площадью около 20 га с доминированием *U. japonica* находится в 4 км к западу от с. Жиндо (см. рис. 2, местонахождение 17) по правому берегу р. Чикой [13]. По нашим данным его местоположение – 49°56'24"N, 107°54'50"E. Скопления *U. japonica* легко обнаружить с помощью бинокля также на противоположном берегу р. Чикой на монгольской территории. Литературных данных о распространении *U. japonica* на левобережье Чикоя (в Монголии) мы не нашли. Подтвердить наличие в настоящее время одиночных деревьев, указанных Н.А. Бутиной [13] для участка реки выше по течению, не удалось.

Новое, ранее не упоминавшееся в литературе (см. рис. 2) местонахождение *U. japonica* выявлено в 75 км на северо-запад-запад от с. Жиндо, в 5 км к юго-востоку от с. Чикой (близ населенного пункта Верхние Мурочи) (50°14'03"N, 106°58'47"E). Этот участок («Мурочи») расположен на о. Нижний Могой (между основным руслом р. Чикой и одним из ее рукавов) и представлен несколькими разрозненными японсковязовыми сообществами. Судя по характеру распределения древостоя по острову (общая площадь 114 га), вяз японский раньше занимал его большую часть, однако в результате регулярных пожаров (по-видимому, весенних палов) древостой изредился и сменился послелесными суходольными лугами с куртинами *Rosa davurica* Pall., разрозненными сообществами *U. pumila*, либо черемуховыми и ивовыми зарослями. В настоящее время сообщества с сомкнутым древостоем *U. japonica* разобщены и не занимают значительных площадей. Обследование окрестностей при помощи квадрокоптера показало наличие отдельных деревьев либо небольших скоплений *U. japonica* на соседних островах и участках поймы реки. Очевидно, что вяз распространен по долине Чикоя заметно шире, чем было известно ранее. Кроме того, поскольку на территории между участками «Мурочи» и «Жиндо» государственная граница между Россией и Монголией проходит непосредственно вдоль русла р. Чикой, можно ожидать, что *U. japonica* встречается здесь чаще, чем известно на данный момент, и сохранность его популяций в режимных условиях приграничной полосы должна быть заметно лучше.

Сведения о произрастании *U. japonica* в долине р. Хилок близ с. Подлопатки (см. рис. 2) не подтвердились. В окрестностях села на участке протяженностью не менее 10 км вдоль реки выше и ниже по течению реки от села отмечены лишь заросли ив (*Salix dasyclados* Wimm., *S. microstachya* Turcz. ex Trautv., *S. schwerinii* E.L. Wolf и др.).

В Баргузинской долине нами обследованы все визуально подходящие для *U. japonica* экотопы в окрестностях с. Душелан вдоль водотоков по па-

дям Кедровая (Джигорда) и Алга, а также по безводным распадкам, однако *U. japonica* не найден.

Основные черты сообществ *Ulmus japonica*

Ulmus japonica зарегистрирован в 93 геоботанических описаниях лесных и кустарниковых сообществ; в 89 из них вяз японский выступал ценозообразователем, т.е. играл роль доминанта или субдоминанта в древесном ярусе. Ценофлора таких сообществ насчитывает 193 вида сосудистых растений. Более чем в 20% описаний (II–V классы постоянства) встречается 41 вид сосудистых растений, а 21 вид характеризуется высоким постоянством (более 40% описаний, или III–V классы постоянства).

Растительные сообщества с участием *U. japonica* занимают дренированные участки высокой поймы, обычно приподнятые на 1–2 м над руслом реки и образованные аллювиальными отложениями. Содоминантом *U. japonica* в древесном ярусе часто выступает *Padus avium*, чье активное участие в сообществах связано с антропогенным (рекреационным) воздействием. В результате образуются черемухово-вязовые и вязово-черемуховые рощи. На участках, где черемуха не создает избыточного затенения, в сообществах хорошо развит кустарниковый ярус, составленный в разных комбинациях из *Malus baccata* (L.) Borkh., *Rhamnus davurica* Pall., *Ribes spicatum* E. Robson, *Rosa acicularis* Lindl., *R. davurica*, *Swida alba* (L.) Opiz и др. Травяной ярус обычно хорошо выражен, с проективным покрытием 35–80% и высотой до 100–140 см. В его составе заметную роль играют растения с преимущественно восточноазиатским или маньчжуро-даурским распространением: *Elymus pendulinus* (Nevski) Tzvelev, *Festuca extremiorientalis* Ohwi, *Filipendula palmata* (Pall.) Maxim., *Lamium album* subsp. *orientale* Kamelin & A.L. Budantzev, *Thalictrum baicalense* Turcz. ex Ledeb.

Сообщества вязовников в низовьях Селенги («Югово») и на Чикое («Жиндо», «Мурочи») несколько различаются. Для селенгинских сообществ характерны такие виды, как *Carex arnellii* Christ ex Scheutz, *Circaea lutetiana* L., *Elymus pendulinus*, *Festuca extremiorientalis*, *Filipendula palmata*, *Hesperis sibirica* L., *Lamium album* subsp. *orientale*, а для сообществ на Чикое – *Anemonidium dichotomum* (L.) Holub, *Carex sordida* Van Heurck & Müll. Arg., *Menispermum dauricum* DC., *Rhamnus davurica*, *Rubia cordifolia* L.

Кроме чистых массивов и ценозов с участием черемухи в низовьях Селенги («Югово»), *U. japonica* изредка образует ксеромезофитные разреженные сообщества с большим или меньшим участием сосны (*Pinus sylvestris* L.) и березы (*Betula platyphylla* Sukaczew) либо формирует подлесок в составе сосновых лесов. Такие сообщества обнаружены нами близ с. Никольск и пос. Брянск на незатапливаемых террасах или крайне редко затапливаемых участках высоких пойм в условиях длительной, но не интенсивной антропогенной нагрузки. Фитоценозы включают мезоксерофильные виды (*Agrostis gigantea* Roth, *Elytrigia repens* (L.) Nevski, *Linaria acutiloba* Fisch. ex Rehb., *Medicago falcata* L., *Poa angustifolia* L., *Ranunculus polyanthemus* L.,

Thalictrum simplex L.), характерные для сосновых лесов и суходольных лугов бассейна Селенги.

Природоохранное значение лесов с *Ulmus japonica*

Природоохранное значение японскоязовников имеет три аспекта: i) сам *U. japonica* – охраняемый вид, занесенный в Красную книгу Республики Бурятия [12] с категорией и статусом «3 (NT) – редкий вид. Реликт третичных широколиственных лесов с дизъюнктивным ареалом, находится на его западной границе», а также в Красную книгу Забайкальского края [10] с категорией и статусом «2. Вид, находящийся вблизи северо-западной границы распространения, численность которого сокращается в результате изменения условий существования и разрушения местообитаний. Реликт третичного периода»; ii) в японскоязовых сообществах обитает 16 видов организмов, занесенных в Красные книги (табл. 1); iii) японскоязовые сообщества составляют часть пойменной растительности, которая выполняет ряд важных гидролого-геоморфологических функций [32].

Выявление новых местонахождений *U. japonica* в Западном Забайкалье не изменяет категории его редкости, поскольку находки либо расположены в пределах района с ранее известными местонахождениями (участок «Югово»), либо представляют собой маленькие разрозненные рощицы и отдельные деревья на небольшом участке («Мурочи»). Соответственно, появление данных о новых находках не может влиять на оценки категорий и статусов этого вида в региональных Красных книгах.

По принятым нормативам охране подлежат не сообщества и занимаемые ими участки, а лишь собственно виды растений, грибов и животных, занесенные в Красные книги и обитающие в тех же биотопах, что и *U. japonica*. Хотя биоценотические связи видов, сосуществующих с *U. japonica*, пока не изучены, можно предполагать, что вяз выступает как минимум в роли консорта либо даже детерминанта [34]. Поэтому *U. japonica* можно рассматривать как «вид-зонтик» [35], сохранение которого будет способствовать также сохранению части или всех сосуществующих с ним видов, в том числе редких и реликтовых (табл. 2).

Как видно из табл. 1 и 2, список редких и реликтовых организмов включает 47 видов, из которых 19 приведены по нашим данным впервые. Включенные в табл. 2 виды организмов обнаружены главным образом на участке «Югово» как наиболее изученном, а также наиболее крупном и экологически разнообразном. Виды различаются как по степени редкости, так и по отношению к статусу реликтовости. Например, такие виды жуков-долгоносиков, как *Phymatopoderus latipennis* и *Teretriorhynchites icosandriae* subsp. *ussuriensis*, вероятно, могут быть отнесены к числу неморальных реликтов в бассейне Селенги. Ареалы обоих таксонов расположены преимущественно на юге Дальнего Востока и захватывают лишь неширокую полосу территории юга Восточной Сибири [38, 39]. Редкие полужесткокрылые насекомые известны из Бурятии по единичным находкам [36, 40, 41].

Таблица 1 [Table 1]

**Виды растений, грибов и насекомых, включенные в Красные книги,
из числа отмеченных в сообществах с *Ulmus japonica* в Западном Забайкалье**
[Red Data Book-listed species of plants, fungi and insects recorded
in communities with *Ulmus japonica* in Western Transbaikalia]

№	Название вида [Species]	Участки с <i>U. japonica</i> [Sites with <i>U. japonica</i>]			Категория редкости [Rarity category]		
		Югово [Yugovo] (68)*	Мурочи [Murochi] (7)*	Жиндо [Zhindo] (18)*	КК РФ [RB RF] (2008)	КК РБ [RB RB] (2013)	КК ЗК [RB ZK] (2017)
Сосудистые растения (Trachaeophyta)							
1	<i>Circaea lutetiana</i> L.	26	.	.	.	1	1
2	<i>Festuca extremiorientalis</i> Ohwi	46	2	4	.	3	.
3	<i>Gagea terraccianoana</i> Pascher**	+	.	.	.	1	.
4	<i>Lonicera chrysantha</i> Turcz. ex Ledeb.	1	.	.	.	.	3
5	<i>Menispermum dauricum</i> DC.	.	2	8	.	3	3
6	<i>Mertensia sibirica</i> (L.) G. Don**	+	.	.	.	1	.
7	<i>Neottianthe cucullata</i> (L.) Schlecht.	.	.	1	36	7	3
8	<i>Rhamnus davurica</i> Pall.	2	.	18	.	.	3
9	<i>Ulmus japonica</i> (Rehder) Sarg.	68	7	18	.	3	2
Лихенизированные грибы (Ascomycota)							
10	<i>Inonotus hispidus</i> (Bull.) P. Karst.**	+	.	.	.	2	.
11	<i>Heliocybe sulcata</i> (Berk.) Redhead & Ginns**	+	.	.	.	3	.
12	<i>Pleurotus dryinus</i> (Pers.) P. Kumm. **	+	.	.	.	3	.
13	<i>Trametes conchifer</i> (Schwein.) Pilát**	+	.	.	.	2	.
Жесткокрылые насекомые (Coleoptera)							
14	<i>Carabus smaragdinus</i> Fischer von Waldheim, 1823**	+	.	.	.	4	.
Чешуекрылые насекомые (Lepidoptera)							
15	<i>Apatura metis</i> Freyer, 1829***	+	.	.	.	4	.
16	<i>Callambulyx tatarinovi</i> Bremer et Grey, [1852] 1853***	.	.	+	.	.	3
Итого видов [Species in total]		13	3	6	1	13	7

Примечание. * – число геоботанических описаний, выполненных на участке, для части сосудистых растений указано число описаний, в которых виды отмечены; для прочих растений и насекомых знаком «+» отмечено наличие на участке; ** – данные по Красной книге Республики Бурятия [25]; *** – оригинальные данные. Категории охраны. КК РФ – Красная книга Российской Федерации [31]: 36 – редкий вид, имеющий значительный ареал, в пределах которого встречается спорадически и с небольшой численностью популяций. КК РБ – Красная книга Республики Бурятия [25]: 1 – вид, находящийся под угрозой исчезновения; 2 – уязвимый вид, сокращающийся в численности; 3 – редкий вид; 4 – вид неопределенного статуса, биология которого изучена недостаточно; 7 – вид, находящийся в Республике Бурятия вне опасности, но внесенный в Красную книгу РФ. КК ЗК – Красная книга Забайкальского края [26]: 1 – вид, находящийся под угрозой исчезновения; 2 – вид на границе ареала; 3 – редкий вид.

[Note. * - Number of relevés sampled at the site; for several vascular plants, the number of registrations within the pool of relevés is given; for other plants and insects the occurrence within the site is designated by “+”; ** - data from the Red Data Book of the Republic of Buryatia [25]; *** - original data. Protection categories. RB RF - Red Data Book of the Russian Federation [31]: 36 - rare species embracing wide distribution range and sporadically occurring as small-sized populations. RB RB - Red Data Book of the Republic of Buryatia [25]: 1 - endangered species; 2 - vulnerable species; 3 - rare species; 4 - status is uncertain as the biology of the species is poorly known; 7 - species included in the Red Data Book of the Russian Federation but in Buryatia it is out of concern; RB ZK - Red Data Book of Zabaikalskii Krai [26]: 1 - endangered species; 2 - species at the edge of its distribution area; 3 - rare species].

Таблица 2 [Table 2]

Редкие и реликтовые организмы, отмеченные в сообществах с *Ulmus japonica**
[Relict and rare species of plants, fungi and insects revealed in communities with *Ulmus japonica]**

№	Название вида [Species]	Участки с <i>U. japonica</i> [Sites with <i>U. japonica</i>]			Источ- ники данных [Data sources]
		Югово [Yugovo]	Мурочи [Murochi]	Жиндо [Zhindo]	
Сосудистые растения (Trachaeophyta)					
1	<i>Carex sordida</i> Van Heurck & Müll. Arg.	.	+	+	4
2	<i>Cinna latifolia</i> (Trevir.) Griseb.	+	.	.	4
3	<i>Crataegus maximowiczii</i> C.K. Schneid.	+	.	.	4
4	<i>Elymus caninus</i> (L.) L.	+	.	.	4
5	<i>Elymus pendulinus</i> (Nevski) Tzvelev	+	.	+	4
6	<i>Thalictrum baicalense</i> Turcz. ex Ledeb.	+	+	+	4
Мохообразные (Bryophyta)					
7	<i>Pylaisiella selwynii</i> (Kindb.) H.A. Crum, Steere & L.E. Anderson	+	.	.	1
Грибы (Basidiomycota)					
8	<i>Crepidotus</i> aff. <i>submollis</i> Murrill	+	.	.	1
9	<i>Pleurotus citrinopileatus</i> Singer	+	.	.	1
Лихенизированные грибы (Ascomycota)					
10	<i>Anisomeridium biforme</i> (Borrer) R.C. Harris	+	.	.	3
11	<i>Bacidia circumspecta</i> (Nyl. ex Vain.) Malme	+	.	.	3
12	<i>Caloplaca ahtii</i> Sochting	+	.	.	3
13	<i>Lecania koerberiana</i> J. Lahm	+	.	.	3
14	<i>Oxneria fallax</i> (Hepp ex Arnol) S.Y. Kondr. & Kärnefelt**	+	.	.	1
15	<i>Parmelia</i> cf. <i>pseudolaevior</i> Asahina	+	.	.	3
16	<i>Physcia aipolia</i> (Ehrh. ex Humb.) Fűrnr.**	+	.	.	1
17	<i>Physcia caesia</i> (Hoffm.) Fűrnr.**	+	.	.	1
18	<i>Sclerophora pallida</i> (Pers.) Y.J. Jao & Spooner	+	.	.	3
Перепончатокрылые насекомые (Hymenoptera)					
19	<i>Vespa crabro</i> Linnaeus, 1758	+	.	.	1
Жесткокрылые насекомые (Coleoptera)					
20	<i>Anthonomus maculatus</i> Ter-Minassian, 1972	+	.	.	4
21	<i>Corigetus marmoratus</i> Desbrochers des Loges, 1873	+	.	.	4
22	<i>Orchestes mutabilis</i> Boheman, 1843	+	.	.	4
23	<i>Phymatopoderus latipennis</i> (Jekel, 1860)	+	.	.	4
24	<i>Teretriorhynchites icosandriae</i> subsp. <i>ussuriensis</i> (Voss, 1930)	+	.	.	4
Полужесткокрылые насекомые (Heteroptera)					
25	<i>Drymus parvulus</i> Jakovlev, 1881	+	.	.	4
26	<i>Pilophorus mongolicus</i> Kerzhner, 1984	+	.	.	2
27	<i>Plinthisus lativentris</i> G. Horváth, 1906	+	.	.	4
Чешуекрылые насекомые (Lepidoptera)					
28	<i>Caligula boisduvalii</i> Eversmann, 1864	+	.	.	4
29	<i>Catocala helena</i> Eversmann, 1856	+	.	.	4
30	<i>Eudia pavonia</i> (Linnaeus, 1758)	+	.	.	4
31	<i>Fixsenia pruni</i> (Linnaeus, 1758)	+	.	.	4
Итого видов [Species in total]		30	2	3	

Примечание. Источники данных: 1 – Плешанов, Плешанова [17]; 2 – Винокуров и др. [36]; 3 – Макрый [37]; 4 – оригинальные данные. * – виды, включенные в табл. 1, не приведены. ** – Т.В. Макрый [37] оспорила определение этих видов, однако, по устному сообщению А.В. Лишты, ею была проверена хотя и бо́льшая часть сборов А.С. Плешанова, но не вся коллекция, и часть образцов осталась непроверенной, поэтому мы приводим изначально указанные в работе [17] названия таксонов.

[Note. Data sources: 1 - Pleshanov & Pleshanova [17]; 2 - Vinokurov et al. [36]; 3 - Makryi [37]; 4 - Original data. * - Species included in the Table 1 are not shown. ** - T.V. Makryi [37] questioned the determination of these species, however, according to the personal comment by A.V. Lishtva, a part of the collection was not available to T.V. Makryi and some specimens were not examined. For this reason, we give the names of the taxa originally reported by Pleshanov & Pleshanova [17].

Основная часть ареалов включенных в табл. 1 и 2 видов лежит южнее и / или восточнее района исследования [30]. Уровень редкости и важности для сохранения биоразнообразия Западного Забайкалья, по крайней мере части видов, включенных в табл. 2, заслуживает того, чтобы рассмотреть вопрос о включении их в региональный список как подлежащих охране либо, как минимум, в «бионадзорный список» аналогично таковому в Красной книге Республики Бурятия [25], куда уже входят приведенные в таблице виды чешуекрылых. Для охраны на региональном уровне также могут быть рекомендованы *Cinna latifolia*, *Crataegus maximowiczii*, *Pylaisiella selwynii*, *Corigetus marmoratus*, *Phymatopoderus latipennis*, *Teretriorhynchites icosandriae* subsp. *ussuriensis*, *Pilophorus mongolicus*.

Перспективы организации охраны сообществ с *Ulmus japonica*

Полноценная охрана отдельных видов должна базироваться на сохранении экосистем, в состав которых они входят [40]. Общепринятой в России организационной формой охраны являются особо охраняемые природные территории (ООПТ): национальные парки, заповедники, заказники, памятники природы. Для сохранения *U. japonica* до сих пор ни одна из этих категорий ООПТ не применена: ни одно из местообитаний вида не входит в состав какой-либо охраняемой территории. Однако с учетом приведенных выше данных (см. табл. 1, 2) о подлежащих охране видах организмов мы считаем необходимым предложить организацию ООПТ для сохранения как самого *U. japonica*, так и всего комплекса видов, входящих в состав образуемых им сообществ, для которых он выступает в роли «зонтика». В сложившейся ситуации требуется рассмотреть вопрос о категориях ООПТ, соответствующих задаче сохранения этих уникальных экосистем.

Ранее выдвигалось предложение об охране сообществ с *U. japonica* в низовьях Селенги путем организации ООПТ в ранге памятников природы у сёл Мостовка и Татаурово [12, 43] однако оно не было реализовано. Альтернативным было недавнее предложение о создании государственного природного заказника федерального или регионального значения: для оптимальной охраны предложено создать ООПТ категории «заказник» в виде трёх кластеров с сообществами *U. japonica* по берегам или на островах Селенги с максимальным количеством реликтовых видов в их составе [44]. Действительно, именно кластерная форма ООПТ представляется наиболее подходящей для охраны территориально разрозненных объектов. Реализация предложения об ООПТ из трёх кластеров в низовьях р. Селенга [44], несомненно, будет способствовать сохранению самого *U. japonica* и других подлежащих охране видов, обитающих на участке «Югово». Однако в этом случае останется без решения проблема охраны других участков – «Жиндо»

и «Мурочи», в которых также есть нуждающиеся в охране виды. Вместе с тем при организации охраны этих двух участков неизбежны осложнения. Во-первых, «Мурочи» и «Жиндо» находятся на значительном удалении (первый из них – на расстоянии около 300 км от участка «Югово», а второй – ещё почти на 130 км дальше), и по этой причине включение их в единую кластерную ООПТ вместе с участком «Югово» представляется нерациональным; во-вторых, участок «Жиндо» располагается на территории иного субъекта Федерации (Забайкальский край – ЗК), в отличие от участков «Югово» и «Мурочи» (расположены в Республике Бурятия – РБ), что будет препятствием к организационной целостности, если создавать одну отдельную ООПТ для охраны разных кластеров – массивов *U. japonica* и компонентов его сообществ. Таким образом, несмотря на привлекательность охраны разных участков произрастания *U. japonica* под эгидой единой кластерной ООПТ, приходится признать нерациональность такого подхода.

В связи с этим необходимо рассмотрение иных возможных вариантов. В первую очередь, важно соотнести имеющиеся участки (потенциальные кластеры) с уже существующей сетью ООПТ. На территории РБ ближайшим к участку «Югово» является государственный природный заказник (ГПЗ) «Кабанский» в дельте р. Селенга, находящийся под управлением ФГБУ «Байкальский государственный биосферный заповедник» (далее – Байкальский заповедник). Кроме того, под управлением Байкальского заповедника находится еще один ГПЗ «Алтачейский» (в Мухоршибирском районе РБ). По нашему мнению, для охраны располагающихся в низовьях р. Селенга биоценозов из *U. japonica* и других связанных с ним видов организмов, подлежащих охране, можно предложить создание кластерного ГПЗ «Юговский». Функции управления новым ГПЗ возможно возложить на Байкальский заповедник, у которого уже имеется аналогичный положительный опыт с другими заказниками.

Рассмотрим перспективы организации охраны участков «Жиндо» и «Мурочи». В Красной книге ЗК предложено организовать памятник природы в окрестностях с. Жиндо для охраны реликтового сообщества [10]. На наш взгляд, другим возможным решением для организации охраны участка «Жиндо» может быть создание ГПЗ, управление которым возложить на созданный в 2014 г. в Красночикоискм районе ЗК Национальный парк «Чикой» (администрация находится в с. Красный Чикой – примерно в 90 км от участка «Жиндо»). Наше предложение хорошо согласуется с выдвинутым обоснованием создания двусторонней трансграничной ООПТ «Хэнтэй-Чикойское нагорье», в которую с российской стороны предлагается включить Национальный парк «Чикой» [45]. Реализация такого решения создаст возможность сохранения японскоязызовых сообществ, расположенных не только в окрестностях с. Жиндо, но и на левобережье р. Чикой – на территории Монголии. Хотя *U. japonica* не включен в список видов растений, подлежащих охране на территории Монголии [46], он всё же достаточно редок, уязвим и может быть рекомендован к охране и в этой стране.

В случае включения участка «Жиндо» в состав Национального парка «Чикой» участок «Мурочи», очевидно, может быть предложен к охране в виде самостоятельной ООПТ. Однако этим решением возможности организации охраны японскоязызовников участка «Мурочи» не ограничиваются. Около 40 лет назад М.А. Шаргаев высказал мнение о необходимости создания международного заповедника в бассейне р. Чикой [47], а Г.А. Пешкова [48] внесла предложение о создании степного заповедника на юге Бурятии на Селенгинско-Чикойском участке, «расположенном между селениями Усть-Кяхта и Усть-Киран (Бурятская АССР)». Сразу три варианта для создания степного заповедника были выдвинуты А.Б. Иметхеновым [49]: Боргойская степь, в междуречье Хилка и Чикоя и в Тугнуйской долине. Вслед за указанными авторами о необходимости сохранения целостности компонентов степного комплекса путем создания степного заповедника, нескольких заказников и памятников природы писал Т.Г. Бойков [50, 51], упомянув среди прочих территорию «в бассейне р. Чикой на границе Бурятии, Читинской области и Монголии», где им было рекомендовано «создание международного российско-монгольского биосферного заповедника» [51]. Впоследствии были приведены аргументы в пользу создания степного заповедника на базе ГПЗ «Алтачейский» с его значительным расширением вплоть до включения юго-западной части ГПЗ «Тугнуйский» [52]. Кроме того, К.Ш. Шагжиевым с соавт. было предложено обоснование создания государственного степного заповедника «Селенгинская Даурия» на базе ГПЗ «Боргойский», в котором подчеркнуто, что такой заповедник может быть частью трансграничной международной ООПТ, где со стороны Монголии будет примыкать заповедник (национальный парк) «Селенгинский» [53]. Предложение и краткое обоснование двусторонней трансграничной ООПТ «Селенга» представлены Т.П. Калихман (Савенковой) [45, 54], предлагающей создать с российской стороны кластерный заповедник «Джидинский» (или национальный парк «Селенга»), в состав которого может войти целый ряд кластеров. При реализации такого плана мы предлагаем в качестве дополнительного кластера также участок «Мурочи» для охраны *U. japonica* и других видов.

Выдвинутые предложения по охране *U. japonica* и образуемых им сообществ выходят на международный уровень, поскольку касаются межгосударственных отношений России и Монголии. Необходимость сохранения сообществ *U. japonica* служит дополнительным аргументом в пользу создания кластерных трансграничных ООПТ в сопредельных районах России и Монголии, инициированного еще в 1994 г. путем организации трехсторонней (Россия, Монголия, Китай) кластерной трансграничной заповедной территории «Даурия» (представленной с Российской стороны Государственным природным биосферным заповедником «Даурский»). Важность создания трансграничных ООПТ для развития сотрудничества в сфере охраны природы не вызывает сомнений [45, 55]. Реализация выдвинутых нами пред-

ложений, несомненно, отвечает решению глобальной проблемы сохранения биоразнообразия вне зависимости от государственных границ.

Выводы

1. К настоящему времени к достоверно известным местонахождениям сообществ *U. japonica* на территории Западного Забайкалья относятся: i) ряд пунктов (участок «Югово») в нижнем течении р. Селенга в Кабанском и Прибайкальском районах Республики Бурятия; ii) участок «Мурочи» в нижнем течении р. Чикой в Кяхтинском районе Бурятии; iii) участок «Жиндо» в нижнем течении р. Чикой в Красночико́йском районе Забайкальского края.

2. *Ulmus japonica* включен в региональные Красные книги, и уже на этом основании его сообщества подлежат охране, важность которой возрастает в связи с наличием в их составе ряда других редких и реликтовых видов организмов, занесенных в Красные книги субъектов Федерации и в Красную книгу РФ.

3. Для охраны сообществ *U. japonica* предлагаются: i) создание заказника под управлением Байкальского заповедника в районе участка «Югово»; ii) создание заказника под управлением Национального парка «Чикой» на территории участка «Жиндо»; iii) создание двусторонней трансграничной ООПТ «Селенга» кластерного типа, в составе которой мы рекомендуем предусмотреть также организацию кластера для охраны сообществ *U. japonica* на участке «Мурочи».

Авторы благодарны студентке Иркутского государственного университета Е.М. Гладких за участие в полевых исследованиях и выполнение 6 геоботанических описаний в низовьях р. Селенга в 2015 г., канд. биол. наук Д.Г. Чимитову (ИОЭБ СО РАН, г. Улан-Удэ, Респ. Бурятия, Россия), предоставившему фотографии гербарного образца *Ulmus japonica* из гербария БИН РАН (LE) и сообщившему сведения об этом виде в материалах М.А. Рецикова.

Литература

1. Грудзинская И.А. Вязовые, или Ильмовые – Ulmaceae Mirb. // Сосудистые растения советского Дальнего Востока. Т. 5 / под ред. С.С. Харкевич. СПб. : Наука, 1991. С. 95–100.
2. Ohwi J. *Flora of Japan*. Washington, D.C. : Smithsonian Institute. 1965. 1067 p.
3. Chang C.S., Kim H. *The Woody Plants of Korea*. Beta Version. 2015. URL: <http://florakorea.myspecies.info> (accessed: 22.08.2020).
4. Uргамал М., Оюунтсетег Б., Нямбаяр Д., Дуламсурен Ч. *Conspectus of the vascular plants of Mongolia*. Ulaanbaatar, Mongolia : “Admon Printing” Press, 2014. 334 p.
5. Fu L., Xin Y., Whittemore A. Ulmaceae // *Flora of China*. Wu Zh., Raven P.H. & Hong D., editors. Beijing; St. Louis : Science Press, Missouri Botanical Garden. 2003. Vol. 5. PP. 1–19.
6. Species 2000 & ITIS Catalogue of Life, 2019 Annual Checklist. Roskov Y., Ower G., Orrell T., Nicolson D., Bailly N., Kirk P.M., Bourgoin T., DeWalt R.E., Decock W.,

- Nieukerken E. van, Zarucchi J., Penev L., editors. 2019. URL: <http://www.catalogueoflife.org> (дата обращения: 22.08.2020).
7. Plants of the World Online. Facilitated by the Royal Botanic Gardens, Kew. 2019. URL: <http://powo.science.kew.org> (дата обращения: 22.08.2020).
 8. Грудзинская И.А. Ulmaceae и обоснование выделения Celtidoideae в самостоятельное сем. Celtidaceae // Ботанический журнал. 1967. Т. 52, № 12. С. 1723–1749.
 9. Бусик В.В. Семейство Ulmaceae – Ильмовые // Флора Центральной Сибири. Т. 1 / под ред. Л.И. Малышева и Г.А. Пешковой. Новосибирск : Наука, 1979. С. 270–271.
 10. Бутина Н.А. Ильм японский, *Ulmus japonica* (Rehd.) Sarg. // Красная книга Забайкальского края / ред. О.А. Поляков. Новосибирск : Новосибирский издательский дом, 2017. С. 87–88.
 11. Экулич И.Р. Ильм японский – *Ulmus japonica* (Rehd.) Sarg. // Красная книга Республики Бурятия: Редкие и исчезающие виды растений и грибов. 2-е изд., перераб. и доп. / отв. ред. Т.Г. Бойков. Новосибирск : Наука, 2002. С. 68.
 12. Экулич И.Р. Ильм японский, *Ulmus japonica* (Rehd.) Sarg. // Красная книга Республики Бурятия. Редкие и находящиеся под угрозой исчезновения виды животных, растений и грибов. 3-е изд., перераб. и доп. / отв. ред. Н.М. Пронин. Улан-Удэ : Изд-во БНЦ СО РАН, 2013. С. 629–630.
 13. Бутина Н.А. Сообщества с *Ulmus japonica* (Rehd.) Sarg. (Ulmaceae) // Природоохранное сотрудничество Читинской области (Российская Федерация) и автономного района Внутренняя Монголия (КНР) в трансграничных экологических регионах : материалы научной конференции. Чита : Забайкальский гос. гум.-пед. ун-т, 2007. С. 21–24.
 14. Решиков М.А. Редкие растения бассейна Байкала в Бурятии и их охрана: научный отчет / Бурятские отделения обществ: «Охрана природы» и «Ботаническое общество СССР». Улан-Удэ : кафедра ботаники Бурятского пединститута. 1969. (Рукопись).
 15. Красноборов И.М. Семейство Ильмовые – Ulmaceae // Флора Сибири. Т. 5: Salicaceae – Amaranthaceae / под ред. И.М. Красноборова и Л.И. Малышева. Новосибирск : Наука, 1992. С. 72–74.
 16. Плешанов А.С., Пензина Т.А. Рефугии геотермальных источников Прибайкалья // Флора и растительность Сибири и Дальнего Востока : тезисы конференции. Красноярск : Изд-во Краснояр. гос. пед. ун-та, 1996. С. 134–136.
 17. Плешанов А.С., Плешанова Г.И. Вяз японский в Бурятии // Исследования флоры и растительности Забайкалья : материалы региональной научной конференции. Улан-Удэ : Изд-во Бурят. гос. ун-та, 1997. С. 16–18.
 18. Плешанов А.С., Плешанова Г.И. Структура лесов из вяза японского в Прибайкалье // Проблемы сохранения биологического разнообразия Южной Сибири : материалы I межрегиональной научно-практической конференции (Кемерово, 19–22 мая 1997 г.). Кемерово : Кузбассвузиздат, 1997. С. 136–137.
 19. Плешанов А.С., Плешанова Г.И., Казановский С.Г. Парцеллярные особенности травяного покрова в селенгинских лесах из вяза японского // Флора, растительность и растительные ресурсы Забайкалья. Чита : Изд-во БНЦ СО РАН, 1997. С. 114–115.
 20. Пензина Т.А., Яковлев А.Ю., Боровский Г.Б. Термофильные дереворазрушающие грибы вязовников (*Ulmus japonica*) нижнего течения Селенги // Сохранение биологического разнообразия геотермальных рефугиев Байкальской Сибири : Материалы научной конференции (Иркутск, 21–22 дек. 1999 г.). Иркутск. 2000. С. 31–34.
 21. Плешанов А.С., Плешанова Г.И., Шаманова С.И. Ландшафтно-климатические закономерности пространственного размещения рефугиев в Байкальском регионе // Сибирский экологический журнал. 2002. № 5. С. 603–610.
 22. Chepinoga V.V., Protopopova M.V., Pavlichenko V.V. Detection of the most probable Pleistocene microrefugia on the northern macroslope of the Khamar-Daban Ridge (Southern

- Prebaikalia) // Contemporary Problems of Ecology. 2017. Vol. 13, № 4. PP. 38–42. doi: [10.1134/S1995425517010036](https://doi.org/10.1134/S1995425517010036)
23. Полевая геоботаника / под ред. Е.М. Лавренко и А.А. Корчагина. М. ; Л. : Изд-во АН СССР, 1964. Т. 3. 531 с.
 24. Голуб В.Б., Цуриков М.Н., Прокин А.А. Коллекции насекомых: сбор, обработка и хранение материала. М. : Товарищество научных изданий КМК, 2012. 339 с.
 25. Красная книга Республики Бурятия. Редкие и находящиеся под угрозой исчезновения виды животных, растений и грибов. 3-е изд., перераб. и доп. / отв. ред. Н.М. Пронин. Улан-Удэ : Изд-во БНЦ СО РАН, 2013. 688 с.
 26. Красная книга Забайкальского края / ред. О.А. Поляков. Новосибирск : Новосибирский издательский дом, 2017. 384 с.
 27. Конспект флоры Азиатской России: сосудистые растения / под ред. К.С. Байкова. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. 640 с.
 28. Урбанавичюс Г.П. Список лишенофлоры России. СПб. : Наука, 2010. 194 с.
 29. Alonso-Zarazaga M.A., Barrios H., Borovec R., Bouchard P., Caldara R., Colonnelli E., Gültekin L., Hlaváč P., Korotyaev B., Lyal C.H.C., Machado A., Meregalli M., Pierotti H., Ren L., Sánchez-Ruiz M., Sforzi A., Silfverberg H., Skuhrovec J., Trýzna M., Velázquez de Castro A.J., Yunakov N.N. Cooperative Catalogue of Palaearctic Coleoptera Curculionoidea. Monografías electrónicas SEA, 2017. Vol. 8. 729 p.
 30. Винокуров Н.Н., Голуб В.Б., Канюкова Е.В. Каталог полужесткокрылых насекомых (Heteroptera) азиатской части России. Новосибирск : Наука, 2010. 319 с.
 31. Каталог чешуекрылых России. 2-е изд. / под ред. С.Ю. Синёва. СПб. : Зоологический институт РАН, 2019. 448 с.
 32. Gurnell A. Plants as river system engineers // Earth Surface Processes and Landforms. 2014. Vol. 39, № 1. PP. 4–25. doi: [10.1002/esp.3397](https://doi.org/10.1002/esp.3397)
 33. Красная книга Российской Федерации (растения и грибы) / под ред. Ю.П. Трутнева. М. : Товарищество научных изданий КМК, 2008. 855 с.
 34. Онипченко В.Г. Функциональная фитоценология: Синэкология растений : учеб. пособие. 2-е изд. М. : КРАСАНД, 2014. 576 с.
 35. Roberge J.-M., Angelstam P. Usefulness of the umbrella species concept as a conservation tool // Conservation Biology. 2004. Vol. 18, № 1. PP. 76–85. doi: [10.1111/j.1523-1739.2004.00450.x](https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2004.00450.x)
 36. Винокуров Н.Н., Плешанов А.С., Агафонова Т.А. Редкие и малоизвестные полужесткокрылые (Heteroptera) Байкальского региона // Энтомологические исследования в Северной Азии. Новосибирск : Талер-Пресс, 2006. С. 43–45.
 37. Макрый Т.В. Лишайники ильмовников из *Ulmus japonica* Западного и Восточного Забайкалья // Сибирский экологический журнал. 2007. Т. 14, № 6. С. 951–960.
 38. Тер-Минасян М.Е. Долгоносики-трубковерты (Attelabidae). Фауна СССР. Новая серия № 39. Насекомые жесткокрылые. Т. 27, вып. 2. М. ; Л. : Изд-во АН СССР, 1950. 232 с.
 39. Legalov A.A. Annotated checklist of species of superfamily Curculionoidea (Coleoptera) from Asian part of the Russia // Amurian Zoological Journal. 2010. Vol. 2, № 2. PP. 93–132.
 40. Дидоренко С.В., Дидоренко С.И. Материалы по фауне наземных полужесткокрылых (Heteroptera) северо-западного макросклона хребта Хамар-Дабан // Наземные членистоногие Сибири и Дальнего Востока. Иркутск : Изд-во Иркутского гос. ун-та, 1985. С. 80–89.
 41. Софронова Е.В. Новые виды полужесткокрылых насекомых (Heteroptera) Республики Бурятия // Известия Иркутского гос. ун-та. 2012. Т. 5, № 1. С. 132–134.
 42. Keith D.A., Rodríguez J.P., Rodríguez-Clark K.M., Nicholson E., Aapala K., Alonso A., Asmussen M., Bachman S., Basset A., Barrow E.G., Benson J.S., Bishop M.J., Bonifacio R., Brooks Th.M., Burgman M.A., Comer P., Comin F.A., Essl F., Faber-Langendoen D., Fairweather P.G., Holdaway R.J., Jennings M., Kingsford R.T., Lester R.E., Mac Nally

- R., McCarthy M.A., Moat J., Oliveira-Miranda M.A., Pisanu P., Poulin B., Regan T.J., Riecken U., Spalding M.D., Zambrano-Martínez S. Scientific foundations for an IUCN Red List of ecosystems // PLoS ONE. 2013. Vol. 8, № 5, Art. E62111. PP. 1–25. doi: [10.1371/journal.pone.0062111](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0062111)
43. Сэкулич И.Р., Аненхонов О.А., Пыхалова Т.Д., Сэкулич Н.В. Необходимость создания памятника природы «Реликтовая роща ильма японского (Прибайкальский район, Бурятия)» // Районы Бурятии в фокусе экологических проблем Байкальского региона : материалы научно-практической конференции (Улан-Удэ, апрель 1999 г.). Улан-Удэ : Изд-во Бурятского гос. ун-та, 1999. С. 28–29.
 44. Софронова Е.В. Предложения об охране сообществ, образованных ильмом японским (*Ulmus japonica*) в низовьях р. Селенга (Республика Бурятия) // Географические основы и экологические принципы региональной политики природопользования : материалы международной научно-практической конференции, посвящённой памяти чл.-корр. РАН А.Н. Антипова (г. Иркутск, 23–27 сентября 2019 г.). / отв. ред. И.Н. Владимиров. Иркутск : Изд-во ИГ СО РАН, 2019. С. 639–641.
 45. Калихман Т.П. Природоохранные трансграничные территории Сибири и Дальнего Востока // География и природные ресурсы. 2019. № 4. С. 22–32. doi: [10.21782/GIPR0206-1619-2019-4\(22-32\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2019-4(22-32))
 46. Нямбаяр Д., Оюунцэцэг Б., Тунгалаг Р. Монголын ургамлын Улаан данс ба хамгааллын төлөвлөгөөний эмхэтгэл (1-р хэсэг). Улаанбаатар хот, 2012. 189 с.
 47. Шаргаев М.А., Бикс К.А. Особо охраняемые территории Забайкалья // Уникальные объекты живой природы бассейна Байкала / под ред. Л.В. Попова. Новосибирск: Наука, 1990. С. 188–194.
 48. Пешкова Г.А. Селенгинский степной заповедник // Охрана растительного мира Сибири. Приложения. I: Предложения по организации в Сибири новых государственных заповедников. Новосибирск : Наука, 1981. С. 213–214.
 49. Иметхенов А.Б. Памятники природы Бурятии. Улан-Удэ : Бурят. кн. изд-во, 1990. 157 с.
 50. Бойков Т.Г. Редкие и исчезающие виды растений Западного Забайкалья // Биологические ресурсы Забайкалья и их охрана. Улан-Удэ : БФ СО АН СССР, 1982. С. 19–46.
 51. Бойков Т.Г. Редкие растения и фитоценозы Забайкалья. Новосибирск : Наука, 1999. 262 с.
 52. Иметхенов А.Б., Иметхенов О.А. Об организации степного заповедника в Забайкалье // География и природные ресурсы. 2001. № 4. С. 141–144.
 53. Шагжиев К.Ш., Намзалов Б.Б., Елаев Э.Н., Иванова О.А. О концепции организации государственного степного заповедника «Селенгинская Даурия» в Республике Бурятия // Вестник Бурятского государственного университета. Биология, География. 2014. № 4. С. 37–45.
 54. Савенкова Т.П. Охраняемые природные территории бассейна озера Байкал. Иркутск : Изд-во Института географии СО РАН, 2001. 186 с.
 55. Природоохранное сотрудничество в трансграничных экологических регионах: Россия – Китай – Монголия / под ред. О.В. Корсуна. Вып. 3 : в 2 ч. Чита : Поиск, 2012.

Поступила в редакцию 11.06.2020 г.; повторно 30.08.2020 г.;
принята 27.10.2020 г.; опубликована 29.12.2020 г.

Авторский коллектив:

Чепинога Виктор Владимирович – д-р биол. наук, в.н.с. лаборатории физической географии и биогеографии, Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН (Россия, 664033, г. Иркутск, ул. Улан-Баторская, 1); профессор кафедры ботаники биолого-почвенного факультета, Иркутский государственный университет (Россия, 664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1).

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-3809-7453>

E-mail: victor.chepinoga@gmail.com

Аненхонов Олег Арнольдович – д-р биол. наук, заведующий лабораторией флористики и геоботаники, Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН (Россия, 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6).

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-8633-7154>

E-mail: anen@yandex.ru

Софронова Елена Валерьевна – канд. биол. наук, с.н.с. лаборатории физической географии и биогеографии, Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН (Россия, 664033, г. Иркутск, ул. Улан-Баторская, 1).

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-4701-1108>

E-mail: aronia@yandex.ru

Софронов Александр Петрович – канд. геогр. наук, с.н.с. лаборатории физической географии и биогеографии, Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН (Россия, 664033, г. Иркутск, ул. Улан-Баторская, 1).

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-7247-0269>

E-mail: alesofronov@yandex.ru

Коротяев Борис Александрович – д-р биол. наук, г.н.с. лаборатории систематики насекомых, Зоологический институт РАН (Россия, 199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., 1).

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-3492-2746>

E-mail: korotyay@rambler.ru

Махов Илья Андреевич – инженер-исследователь биологического факультета, Санкт-Петербургский государственный университет (Россия, 199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., 7-9).

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-3563-0139>

E-mail: maakhov@mail.ru

Для цитирования: Чепинога В.В., Аненхонов О.А., Софронова Е.В., Софронов А.П., Коротяев Б.А., Махов И.А. Растительные сообщества с *Ulmus japonica* (Ulmaceae) в Западном Забайкалье: распространение, значение для сохранения биоразнообразия и перспективы охраны // Вестн. Том. гос. ун-та. Биология. 2020. № 52. С. 105–129. doi: 10.17223/19988591/52/6

For citation: Chepinoga VV, Anenkhonov OA, Sofronova EV, Sofronov AP, Korotyaev BA, Makhov IA. *Ulmus japonica* (Ulmaceae) communities in Western Transbaikalia: Distribution, value for biodiversity conservation and perspectives of protection. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya* = *Tomsk State University Journal of Biology*. 2020;52:105-129. doi: 10.17223/19988591/52/6 In Russian, English Summary

**Victor V. Chepinoga^{1,2}, Oleg A. Anenkhonov³, Elena V. Sofronova¹,
Aleksandr P. Sofronov¹, Boris A. Korotyaev⁴, Ilya A. Makhov⁵**

¹V.B. Sochava Institute of Geography, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russian Federation

²Irkutsk State University, Irkutsk, Russian Federation

³Institute of General and Experimental Biology, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude, Russian Federation

⁴Zoological Institute, Russian Academy of Sciences, Saint-Petersburg, Russian Federation

⁵Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russian Federation

***Ulmus japonica* (Ulmaceae) communities in Western Transbaikalia: Distribution, value for biodiversity conservation and perspectives of protection**

The East Asian tree *Ulmus japonica* (Rehder) Sarg. is a nemoral relict species for Western Transbaikalia (See Fig. 1). A few localities of this tree are known in the region, those in the lower reaches of the Selenga River (Yugovo site; Republic of Buryatia) and the Chikoy River (Zhindo site; Zabaikalskii Krai), remote from the main distribution area (See Fig. 2). The study aimed to verify the distribution of *U. japonica* and to

estimate the value of *U. japonica* communities for biodiversity conservation in the region. Based on the data collected, we discussed some opportunities and suggested approaches for the protection of these unique ecosystems.

During the fieldwork in 2018 and 2019, we studied all known localities of *U. japonica* in Western Transbaikalia and revealed a pleiad of new locations within the site Yugovo as well as a new location (the site Murochi) in the Chikoy River valley within the Republic of Buryatia (See Fig. 2 and 3). Information on the occurrence of *U. japonica* in the vicinity of Podlopatki village (in the Khilok River valley) was not confirmed. Also, our attempts to find this species at the site within the Barguzin River valley according to the label of the existing herbarium specimen failed. Based on 93 relevés, we examined species composition in woodlands where *U. japonica* is a codominant species and revealed the main features and peculiarities of the communities in the region.

At all sites, monodominant coppices of *U. japonica* and coenoses where it is mixed with *Padus avium* Mill. occurred. Nevertheless, *Ulmus japonica* communities from the site Yugovo differ from those of Zhindo and Murochi in a greater phytocoenotic diversity and the composition of characteristic plant species. Additionally, at Yugovo rather xeromesophytic sparse communities where *U. japonica* is mixed with *Pinus sylvestris* L. and *Betula platyphylla* Sukaczew were found. Characteristic species of shrub and herbal layers at Yugovo site are *Carex arnellii* Christ ex Scheutz, *Circaea lutetiana* L., *Elymus pendulinus* (Nevski) Tzvelev, *Festuca extremiorientalis* Ohwi, *Filipendula palmata* (Pall.) Maxim., *Hesperis sibirica* L., *Lamium album* subsp. *orientale* Kamelin & A.L. Budantzev, whereas at Zhindo and Murochi they are *Anemonidium dichotomum* (L.) Holub, *Carex sordida* Van Heurck & Müll. Arg., *Menispermum dauricum* DC., *Rhamnus davurica* Pall., and *Rubia cordifolia* L. According to our studies supplemented with data from the literature sources, there are 16 species of vascular plants, lichens, beetles, and lepidopterans registered in *Ulmus japonica*-forests that are included in the Federal and/or in regional Red Data Books (See Table 1). We have revealed 31 additional rare and relict species of plants, fungi and insects (See Table 2). In total, 19 species were found in Western Transbaikalia or within this plant community type for the first time. The newly revealed rare and relict species could be recommended for listing in the regional Red Data Book or inclusion in the list of species of special surveillance. As a perspective of the protection of communities with *U. japonica*, we propose to maintain them as distinct clusters under the management of the existing protected areas. Namely, the site Yugovo can be protected as a separate cluster of the Baikal Natural Reserve, likewise, the protection of the site Zhindo can be managed by the Chikoy National Park. The newly discovered site Murochi might be included in the preliminarily proposed Russian-Mongolian trans-boundary Selenga protected area.

The paper contains 3 Figures, 2 Tables, and 55 References.

Key words: Coleoptera; Heteroptera; Lepidoptera; japanese elm; nemoral relicts; protected species; protected areas; nature reserves; clustered protected areas; Lake Baikal watershed.

Funding: The research was carried out in the framework of Projects № AAAA-A17-117041910172-4, № AAAA-A17-117011810036-3, and № AAAA-A19-119020690101-6 supported by the Russian Federal Budget. Partially, the research was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (Grants No 18-05-00557, 19-54-53014, 19-04-00565, and 20-45-380009).

Acknowledgments: We are grateful to EM Gladkikh for participating in the fieldwork and making six relevés in the lower reaches of the Selenga River in 2015; our thanks go to Dr. Daba G Chimitov, who provided us with photographs of the *Ulmus japonica* sample from the Herbarium of the Botanical Institute (RAS) and shed light on information about this species in MA Reshchikov's manuscript.

The Authors declare no conflict of interest.

References

1. Grudzinskaya IA. Ulmaceae Mirb. In: *Sosudistyye rasteniya sovetskogo Dal'nego Vostoka* [Vascular plants of the Soviet Far East]. Vol. 5. Kharkevich SS, editor. St. Petersburg: Nauka Publ.; 1991. pp. 95-100. In Russian
2. Ohwi J. *Flora of Japan*. Washington D.C.: Smithsonian Institute Publ.; 1965. 1067 p.
3. Chang CS, Kim H. The woody plants of Korea. Beta Version. 2015. [Electronic resource]. Available at: <http://florakorea.myspecies.info> (accessed 16.08.2020).
4. Urgamal M, Oyuntsetseg B, Nyambayar D, Dulamsuren Ch. Conspectus of the vascular plants of Mongolia. Ulaanbaatar, Mongolia: "Admon Printing" Press; 2014. 334 p.
5. Fu L, Xin Y, Whittemore A. Ulmaceae. In: *Flora of China*. Wu Zh, Raven PH and Hong D, editors. Beijing; St. Louis: Science press, Missouri Botanical Garden; 2003. Vol. 5. pp. 1-19.
6. *Species 2000 & ITIS Catalogue of Life, 2019 Annual Checklist*. Roskov Y, Ower G, Orrell T, Nicolson D, Baillly N, Kirk PM, Bourgoin T, DeWalt RE, Decock W, Nieukerken E. van, Zarucchi J and Penev L, editors. 2019. [Electronic resource]. Available at: <http://www.catalogueoflife.org> (accessed 22.08.2020).
7. *Plants of the World Online*. Facilitated by the Royal Botanic Gardens, Kew. 2019. [Electronic resource]. Available at: <http://powo.science.kew.org> (accessed 22.08.2020).
8. Grudzinskaya IA. Ulmaceae and reasons for distinguishing Celtidoideae as a separate family Celtidaceae Link. *Botanicheskiy zhurnal = Botanical J.* 1967;52(12):1723-1749. In Russian
9. Bussik VV. Ulmaceae. In: *Flora Tsentral'noy Sibiri* [Flora of Central Siberia]. Vol. 1. Malyshev LI and Peshkova GA, editors. Novosibirsk: Nauka, Siberian Branch Publ.; 1979. pp. 270-271. In Russian
10. Butina NA. *Ulmus japonica* (Rehd.) Sarg. In: *Krasnaya kniga Zabaykal'skogo kraya* [The Red Data Book of Zabaikal'skii Krai]. Polyakov OA, editor. Novosibirsk: Novosibirsk Press House; 2017. pp. 87-88. In Russian
11. Sekulich IR. *Ulmus japonica* (Rehd.) Sarg. In: *Krasnaya kniga Respubliki Buryatiya: Redkiye i ischezayushchiye vidy rasteniy i gribov* [The Red Data Book of the Republic of Buryatia: Rare and endangered species of plants and fungi]. 2nd ed. Boikov TG, editor. Novosibirsk: Nauka, Siberian Branch Publ.; 2002. p. 68. In Russian
12. Sekulich IR. *Ulmus japonica* (Rehd.) Sarg. In: *Krasnaya kniga Respubliki Buryatiya. Redkiye i nakhodyashchiyesya pod ugrozoy ischeznoveniya vidy zhivotnykh, rasteniy i gribov* [The Red Data Book of the Republic of Buryatia. Rare and endangered species of animals, plants and fungi]. 3rd ed. Pronin NM, editor. Ulan-Ude: Buryat Sci. Center SB RAS Press; 2013. pp. 629-630. In Russian
13. Butina NA. Plant communities with *Ulmus japonica* (Rehd.) Sarg. (Ulmaceae). In: *Prirodookhrannoye sotrudnichestvo Chitinskoy oblasti (Rossiyskaya Federatsiya) i avtonomnogo rayona Vnutrennyaya Mongoliya (KNR) v transgranichnykh ekologicheskikh regionakh. Materialy nauchnoy konferentsii* [Cooperation of Chita Oblast (Russian Federation) and the Inner Mongolia Autonomous Region (PRC) in nature protection of transboundary ecological regions. Proceedings]. Chita: Zabaik. University Press; 2007. pp. 21-24. In Russian
14. Reshchikov MA. Redkiye rasteniya basseyna Baykala v Buryatii i ikh okhrana: Nauchnyy otchet / Buryatskiye otdeleniya obshchestv: «Okhrana prirody» i «Botanicheskoye obshchestvo SSSR» [Rare plants of the catchment basin of Lake Baikal and their conservation in the Republic of Buryatia: Scientific Report of the Buryat section of the societies "Protection of Nature" and "Botanical Society of the USSR"]. Ulan-Ude: Department of Botany of the Buryat Pedagogical Institute; 1969. (Archive manuscript). In Russian

15. Krasnoborov IM. Ulmaceae. In: *Flora Sibiri* [Flora of Siberia]. Vol. 5. Salicaceae - Amaranthaceae. Krasnoborov IM and Malyshev LI, editors. Novosibirsk: Nauka, Siberian Branch Publ.; 1992. pp. 72-74. In Russian
16. Pleshanov AS, Penzina TA. Refugii geotermal'nykh istochnikov Pribaykal'ya [Refugia of geothermal sources in the Baikal region]. In: *Flora i rastitel'nost' Sibiri i Dal'nego Vostoka* [Flora and vegetation of Siberia and the Far East. Proceedings]. Krasnoyarsk: Krasnoyarsk St. Pedagogical Univ. Press; 1996. pp. 134-136. In Russian
17. Pleshanov AS, Pleshanova GI. Vyaz yaponskiy v Buryatii [The Japanese elm in Buryatia]. In: *Issledovaniya flory i rastitel'nosti Zabaykal'ya* [Investigation of the flora and vegetation in Transbaikalia. Proceedings]. Ulan-Ude: Buryat Univ. Press; 1997. pp. 16-18. In Russian
18. Pleshanov AS, Pleshanova GI. Struktura lesov iz vyaza yaponskogo v Pribaykal'ye [Community structure of the Japanese elm forest in the Cisbaikal Region]. In: *Problemy sokhraneniya biologicheskogo raznoobraziya Yuzhnoy Sibiri* [Problems of conservation of biodiversity in Southern Siberia. Proceedings of the 1st Interreg. Conf. (Kemerovo, Russia, May 19-22, 1997)]. Kemerovo: Kuzbassvuzizdat; 1997. pp. 136-137. In Russian
19. Pleshanov AS, Pleshanova GI, Kazanovsky SG. Partsel'yarnyye osobennosti travyanogo pokrova v selenginskikh lesakh iz vyaza yaponskogo [Particular features of the herb layer in the Japanese elm forests in the Selenga region]. In: *Flora, rastitel'nost' i rastitel'nyye resursy Zabaykal'ya* [Flora, vegetation and plant resources of Transbaikalia. Proceedings]. Chita: Buryat Sci. Center Press; 1997. pp. 114-115. In Russian
20. Penzina TA, Yakovlev AY, Borovsky GB. Termofil'nyye derevorazrushayushchiye griby vyazovnikov (*Ulmus japonica*) nizhnego techeniya Selengi [Thermophilic wood-destroying mushrooms in the elm (*Ulmus japonica*) forests of the lower Selenga River region]. In: *Sokhraneniye biologicheskogo raznoobraziya geotermal'nykh refugiyev Baykal'skoy Sibiri* [Biodiversity conservation of geothermal refugia in Baikal Siberia. Proceedings (Irkutsk, Russia, December 21-22, 1999)]. Irkutsk; 2000. pp. 31-34. In Russian
21. Pleshanov AS, Pleshanova GI, Shamanova SI. Landscape-climatic patterns of spatial distribution of refugia in the Baikal region. *Sibirskii Ekologicheskii Zhurnal = Contemporary Problems of Ecology*. 2002;5:603-610. In Russian
22. Chepinoga VV, Protopenova MV, Pavlichenko VV. Detection of the most probable Pleistocene microrefugia on the northern macroslope of the Khamar-Daban Ridge (Southern Prebaikalia). *Contemporary Problems of Ecology*. 2017;10(1):38-42. doi: [10.1134/S1995425517010036](https://doi.org/10.1134/S1995425517010036)
23. *Polevaya geobotanika* [Field Geobotany]. Vol. 3. Lavrenko EM and Korchagina AA, editors. Moscow, Leningrad: AS USSR Publ.; 1964. 531 p. In Russian
24. Golub VB, Tsurikov MN, Prokin AA. Insect collections: Collecting, preparation and storage of the material. Moscow: KMK Scientific Press Ltd., 2012. 339 p. In Russian
25. *Krasnaya kniga Respubliki Buryatiya. Redkiye i nakhodyashchiyesya pod ugrozoy ischeznoventiya vidy zhivotnykh, rasteniy i gribov* [The Red Data Book of the Republic of Buryatia. Rare and endangered species of animals, plants and fungi]. 3rd ed. Pronin NM, editor. Ulan-Ude: Buryat Sci. Center SB RAS Press; 2013. 688 p. In Russian
26. *Krasnaya kniga Zabaykal'skogo kraya* [The Red Data Book of Zabaikal'skii Krai]. Polyakov OA, editor. Novosibirsk: Novosibirsk Press House; 2017. 384 p. In Russian
27. *Konspekt flory Aziatskoy Rossii: sosudistyye rasteniya* [Check-list of the Flora of Asian Russia: Vascular Plants]. Baikov KS, editor. Novosibirsk: Nauka, Siberian Branch Publ.; 2012. 640 p. In Russian
28. Urbanavichus GP. Spisok likenoflory Rossii [A checklist of the lichen flora of Russia]. St. Petersburg: Nauka Publ.; 2010. 194 p. In Russian
29. Alonso-Zarazaga MA, Barrios H, Borovec R, Bouchard P, Caldara R, Colonnelli E, Gültekin L, Hlaváč P, Korotyaev B, Lyal CHC, Machado A, Meregalli M, Pierotti H, Ren L, Sánchez-Ruiz M, Sforzi A, Silfverberg H, Skuhrovec J, Trýzna M, Velázquez de

- Castro AJ, Yunakov NN. Cooperative Catalogue of Palaearctic Coleoptera Curculionoidea. *Monografías electrónicas SEA*. 2017;8:1-729.
30. Vinokurov NN, Golub VB, Kanyukova EV. Catalogue of the Heteroptera of the Asian part of Russia. Novosibirsk: Nauka, Siberian Branch Publ.; 2010. 319 p. In Russian
 31. *Catalogue of the Lepidoptera of Russia*. 2nd ed. Sinev SYu, editor. St. Petersburg: Zoological Institute RAS; 2019. 448 p. In Russian
 32. Gurnell A. Plants as river system engineers. *Earth Surface Processes and Landforms*. 2014;39(1):4-25. doi: [10.1002/esp.3397](https://doi.org/10.1002/esp.3397)
 33. *Krasnaya kniga Rossiyskoy Federatsii (rasteniya i griby)* [The Red Data Book of the Russian Federation (Plants and fungi)]. Trutnev YuP, editor. Moscow: KMK Scientific Press Ltd.; 2008. 855 p. In Russian
 34. Onipchenko VG. Funktsional'naya fitotsenologiya: Sin-ekologiya rasteniy. Uchebnoye posobiye [Functional phytocoenology: Sinecology of plants. Tutorial]. 2nd ed. Moscow: KRASAND Publ.; 2014. 576 p. In Russian
 35. Roberge J-M, Angelstam P. Usefulness of the umbrella species concept as a conservation tool. *Conservation Biology*. 2004;18(1):76-85. doi: [10.1111/j.1523-1739.2004.00450.x](https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2004.00450.x)
 36. Vinokurov NN, Pleshanov AS, Agafonova TA. Redkiye i maloizvestnyye poluzhestkokrylyye (Heteroptera) Baykal'skogo regiona [Rare and little known Heteroptera of the Baikal region]. In: *Entomologicheskkiye issledovaniya v Severnoy Azii* [Entomological studies in North Asia]. Novosibirsk: Taler-Press; 2006. pp. 43-45. In Russian
 37. Makryi TM. Lichens of *Ulmus japonica* forests in Western and Eastern Trans-Baikal Region. *Sibirskii Ekologicheskii Zhurnal = Contemporary Problems of Ecology*. 2007;14(6):951-960. In Russian
 38. Ter-Minassian ME. Dolgonosiki-trubkovery (Attelabidae) [Leaf-rolling weevils (Attelabidae)]. In: *Fauna SSSR. Novaya seriya № 39. Nasekomye zhestkokrylyye* [Fauna of the USSR. New Series No. 39. Coleoptera]. Vol. 27, Iss. 2. Moscow, Leningrad: Academy of the USSR Press; 1950. 232 p. In Russian
 39. Legalov AA. Annotated checklist of species of superfamily Curculionoidea (Coleoptera) from Asian part of the Russia. *Amurian Zoological Journal*. 2010;2(2):93-132.
 40. Didorenko SV, Didorenko SI. Materialy po faune nazemnykh poluzhestkokrylykh (Heteroptera) severo-zapadnogo makrosklona khrebtu Khamar-Daban [Contribution to the Heteroptera fauna of the northwestern macroslope of the Khamar-Daban Ridge]. In: *Nazemnyye chlenistonogiye Sibiri i Dal'nego Vostoka* [Terrestrial arthropods of Siberia and the Far East]. Irkutsk: Irkutsk St. Univ. Publ.; 1985. pp. 80-89. In Russian
 41. Sofronova EV. New records of Heteroptera from the Republic of Buryatia. *Izvestiya Irkutskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya Biologiya. Ekologiya = The Bulletin of Irkutsk State University. Series Biology. Ecology*. 2012;5(1):132-134. In Russian
 42. Keith DA, Rodríguez JP, Rodríguez-Clark KM, Nicholson E, Aapala K, Alonso A, Asmussen M, Bachman S, Basset A, Barrow EG, Benson JS, Bishop MJ, Bonifacio R, Brooks ThM, Burgman MA, Comer P, Com'n FA, Essl F, Faber-Langendoen D, Fairweather PG, Holdaway RJ, Jennings M, Kingsford RT, Lester RE, Mac Nally R, McCarthy MA, Moat J, Oliveira-Miranda MA, Pisanu P, Poulin B, Regan TJ, Riecken U, Spalding MD, Zambrano-Martínez S. Scientific Foundations for an IUCN Red List of Ecosystems. *PLoS ONE*. 2013;8(5):e62111:1-25. doi: [10.1371/journal.pone.0062111](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0062111)
 43. Sekulich IR, Anenkhonov OA, Pykhalova TD, Sekulich NV. Neobkhodimost' sozdaniya pamyatnika prirody "Reliktovaya roshcha il'ma yaponskogo (Pribaykal'skiy rayon, Buryatiya)" [The need of creating the natural monument Relict grove of *Ulmus japonica* (Pribaikalskii District, Buryatia)]. In: *Rayony Buryatii v fokuse ekologicheskikh problem Baykal'skogo regiona* [Proceedings of the Sci. and Pract. Conf. The districts of Buryatia in the focus of environmental problems of the Baikal region (Ulan-Ude, Russia, April, 1999)]. Ulan-Ude: Buryat University Press; 1999. pp. 28-29. In Russian

44. Sofronova EV. Proposals for the protection of communities formed by the Japanese elm in the lower reaches of the Selenga River (Republic of Buryatia). In: *Geograficheskiye osnovy i ekologicheskiye printsipy regional'noy politiki prirodoopol'zovaniya* [Proceedings of the Int. Sci. and Pract. Conf. Geographical foundations and environmental principles of the regional policy of nature management (Irkutsk, Russia, 23-27, September, 2019)]. Vladimirov IN, editor. Irkutsk: Institute of Geography SB RAS Publ.; 2019. pp. 639-641. In Russian
45. Kalikhman TP. Environmental transboundary territories of Siberia and Far East. *Geography and Natural Resources*. 2019;4:22-32. doi: [10.21782/GIPR0206-1619-2019-4\(22-32\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2019-4(22-32)) In Russian, English Summary
46. Nyambayar D, Oyuntsetseg B, Tungalag R. Mongolyn urgamlyn Ulaan dans ba khamgaalyn төлөвлөгөөний эмхетгел (1-р хэсэг). Ulaanbaatar khot; 2012. 189 p. In Mongolian
47. Shargaev MA, Biks KA. Osobo okhranyaemye territorii Zabaykal'ya [Specially Protected Areas of Transbaikalia]. In: *Unikal'nye ob"ekty zhivoy prirody basseyna* [Unique objects of wildlife in the catchment area of Lake Baikal]. Popov LV, editor. Novosibirsk: Nauka, Siberian Branch Publ.; 1990. pp. 188-194. In Russian
48. Peshkova AA. Selenginskiy stepnoy zapovednik [Selenginskii Steppe Reserve]. In: *Okhrana rastitel'nogo mira Sibiri*. Prilozheniya. I. Predlozheniya po organizatsii v Sibiri novykh gosudarstvennykh zapovednikov [Vegetation conservation in Siberia. Supplement 1. Application for organization of new nature reserves in Siberia]. Novosibirsk: Nauka, Siberian Branch Publ.; 1981. pp. 213-214. In Russian
49. Imetkhenov AB. Pamyatniki prirody Buryatii [Natural monuments of Buryatia]. Ulan-Ude: Buryat. Book Press; 1990. 157 p. In Russian
50. Boikov TG. Redkiye i ischezayushchiye vidy rasteniy Zapadnogo Zabaykal'ya [Rare and endangered plant species in Western Transbaikalia]. In: *Biologicheskkiye resursy Zabaykal'ya i ikh okhrana* [Biological resources of Transbaikalia and their protection]. Ulan-Ude: BF SB AN USSR; 1982. pp. 19-26. In Russian
51. Boikov TG. Redkiye rasteniya i fitotsenozy Zabaykal'ya [Rare plants and phytocoenoses of Transbaikalia]. Novosibirsk: Nauka, Siberian Branch Publ.; 1999. 262 p. In Russian
52. Imetkhenov AB, Imetkhenov OA. On the organization of a steppe reserve in Transbaikalia. *Geography and Nature Resources*. 2001;4:141-144. In Russian
53. Shagzhiev KSh, Namsalov BB, Elayev EN, Ivanova OA. O kontseptsii organizatsii Gosudarstvennogo Stepnogo Zapovednika "Selenginskaya dauriya" v Respublike Buryatiya [On the conception of establishment a State Steppe Reservation "Selenginskaya Dauria" in the Republic of Buryatia. *Vestnik Buryatskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya, Geografiya* = *BSU Bulletin. Biology, Geography*. 2014;4(1):37-45. In Russian
54. Savenkova TP. Okhranyayemyye prirodnyye territorii basseyna ozera Baykal [Protected areas of the Baikal Lake catchment area]. Irkutsk: Institute of Geography SB RAS Publ.; 2001. 186 p. In Russian
55. *Prirodookhrannoye sotrudnichestvo v transgranichnykh ekologicheskikh regionakh: Rossiya - Kitay - Mongoliya* [Environmental cooperation in transboundary environmental regions: Russia - China - Mongolia]. Iss. 3. In 2 vol. Korsun OV, editor. Chita: Poisk Publ.; 2012. In Russian

Received 11 June 2020; Revised 30 August 2020;

Accepted 27 October 2020; Published 29 December 2020

Author info:

Chepinoga Victor V, Dr. Sci. (Biol.), Leading Researcher, Laboratory of Physical Geography and Biogeography, V.B. Sochava Institute of Geography, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1 Ulan-Batorskaya Str., Irkutsk 664033, Russian Federation; Professor, Department of Botany, Irkutsk State University, 1 K. Marks Str., Irkutsk 664003, Russian Federation.

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-3809-7453>

E-mail: victor.chepinoga@gmail.com

Anenkhonov Oleg A, Dr. Sci. (Biol.), Head of the Laboratory of Botany and Geobotany, Institute of General and Experimental Biology, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 6 Sakhyanovoi Str., Ulan-Ude 670047, Russian Federation.

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-8633-7154>

E-mail: anen@yandex.ru

Sofronova Elena V, Cand. Sci (Biol.), Senior Researcher, Laboratory of Physical Geography and Biogeography, V.B. Sochava Institute of Geography, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1 Ulan-Batorskaya Str., Irkutsk 664033, Russian Federation.

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-4701-1108>

E-mail: aronia@yandex.ru

Sofronov Aleksandr P, Cand. Sci (Geogr.), Senior Researcher, Laboratory of Physical Geography and Biogeography, V.B. Sochava Institute of Geography, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1 Ulan-Batorskaya Str., Irkutsk 664033, Russian Federation.

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-7247-0269>

E-mail: alesofronov@yandex.ru

Korotyaev Boris A, Dr. Sci. (Biol.), Chief Researcher, Laboratory of Insect Systematics, Zoological Institute, Russian Academy of Sciences, 1 Universitetskaya nab., Str. Petersburg 199034, Russian Federation.

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-3492-2746>

E-mail: korotyay@rambler.ru

Makhov Ilya A, Researcher, Faculty of Biology, Saint-Petersburg State University, 7-9 Universitetskaya nab., St. Petersburg 199034, Russian Federation.

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-3563-0139>

E-mail: maakhov@mail.ru

ЭКОЛОГИЯ

UDK 574.2

doi: 10.17223/19988591/52/7

**Yulia A. Frank^{1,2}, Egor D. Vorobiev¹, Irina B. Babkina¹,
Dmitry V. Antsiferov², Danil S. Vorobiev¹**

¹*Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation*

²*Darwin LLC, Tomsk, Russian Federation*

Microplastics in fish gut, first records from the Tom River in West Siberia, Russia

This study was supported by Tomsk State University under competitiveness improvement program (Research Grant No 8.2.08.2020).

*This preliminary study investigated the abundance of microplastic particles in gastrointestinal tracts of the dace (*Leuciscus leuciscus* L.) from the Tom River, a large tributary of the Ob River in West Siberia. A total of 13 dace specimens of 2+ to 4+ years of age were studied. Microplastic particles extracted from fish guts were counted and classified by shapes and sizes. In average 204 ± 28.7 items of microplastics were detected for one dace specimen. Microplastic particles were categorized as fragments of irregular shape (70%), spheres (16%), films (7%) and fibers (7%), with size ranging from <0.15 to 2.00 mm. The vast majority of detected microplastic particles (almost 80%) were less than 0.15 mm by their largest dimension. These data provide the first evidence of microplastics in fish from the Ob River system.*

Key words: microplastics; aquatic pollution; rivers; hydrobionts; fish; food chains.

Introduction

In recent decades, plastic debris have been found in aquatic ecosystems around the world as a direct consequence of industrial, consumer waste and wastewater emissions [1]. Pollution of the marine environment with microplastics (particles < 5 mm) is especially intensively studied. The number of studies analyzing the abundance of microplastics in the marine environment began to grow rapidly after 2004, when the seminal paper by Thompson et al. [2] had been published. Microplastics are currently defined as polymer particles smaller than 5 mm [3], or 1 mm [4] in the largest axis. Some authors also use the terms “large” and “small” for microplastics (2-5 mm and 0.5-2 mm, respectively) [5].

The adverse effects of plastics when swallowed by hydrobionts, suffocating or entangling them, have been documented for a variety of marine species, so these

materials were found hazardous to marine fauna [6]. Since plastic breaks down into smaller pieces in an aquatic environment to form microplastics, it is believed that it can enter food chains [6-7]. Both field and laboratory studies suggest that fish absorb micro-sized plastic particles, e.g. originating from synthetic clothing and cleaning products containing plastic granules [7-8]. Ingestion of microplastics by hydrobionts and their accumulation in food chains provides a potential pathway for the transfer of other pollutants and potentially toxic additives to living organisms up to humans with uncertain consequences for their health [9-12].

Most studies on microplastics abundance have focused on marine organisms. Microscopic plastic particles have been detected in marine benthic organisms, especially in bivalves [7, 13-15]. Several reports describe microplastics in the gut of marine fish. Microplastics were detected in semipelagic fish bogue (*Boops boops* L.) around the Balearic Islands [16]. Microplastic ingestion is documented in commercially relevant fish species from the Spanish Atlantic coast and Mediterranean Sea - *Scyliorhinus canicula* L., *Merluccius merluccius* L. and the *Mullus barbatus* L. [17-18]. Ingestion of anthropogenic microfibrils and microfragments by the European anchovy (*Engraulis encrasicolus* L.) of the Mediterranean Sea has been recently studied [19].

Much less attention is paid to riverine fish. First evidence of microplastics ingestion by fish from the Amazon River was received not so long ago [20]. McNeish et al. [21] measured microplastic abundance in fish from three major tributaries of Lake Michigan, the Muskegon River, the Milwaukee River, and the St. Joseph River. The results obtained from these two and several other [22] studies suggested microplastic pollution is common in river food webs.

The aim of this research is to assess the ingestion of microplastics by fish from the Tom River, a large tributary of the Ob River in West Siberia. It should be noted that the abundance of microplastics in fish of the Ob River system has not been studied to date, as well as in fish in other rivers of Russia.

Materials and Methods

The object of the study was common dace, (*Leuciscus leuciscus* L.) from the Tom River in Western Siberia, Russia. *L. leuciscus* is a widespread freshwater fish of Cyprinidae family [23]. Thirteen specimens of common dace were caught using a fishing rod on the right bank of the Tom River within the city of Tomsk (56°27'33"N, 84°56'056"E) on April 01, 2020. Fish were frozen, transported to the laboratory and stored at -20 °C before the laboratory analysis. Subsequently, each fish was defrosted and examined.

The total length of the body (L) and the standard length (from the tip of the snout to the posterior end of the midlateral portion of the hypural plate, l) were measured using a caliper to the nearest 1 mm. Total weight (Q) and body weight without viscera (q) (wet weight, ± 1 g) were determined using an electronic balance. Scales were taken in the region of the dorsal fin (10-15 pcs. in each

specimen). The fish age was determined by the number of annual rings on the fish scales using a dissecting microscope. The sex of the fish was determined visually by gonads as described by Pravdin [24].

The fish was dissected, the gastrointestinal tract (oesophagus, stomach, and intestine) was removed for further processing and stored at -20 °C until analysis according to the method published by Bellas et al. [17]. To extract microplastics from the gut, we used modified protocol developed by Claessens et al. [25] based on acid digestion of the soft tissues. The digestion procedure consisted of 12 h destruction of the fish guts in 25 mL of HNO₃ (22.5 M) at room temperature, followed by 2 h of boiling in a water bath. Then the mixture was diluted to 100 mL with 26% NaCl solution for total salt concentration of 20% and left for additional 12 h for the density separation. After separation, the upper fraction was vacuum filtered using 0.45 µm mixed cellulose ester membrane filter (MF-Millipore). Filters were rinsed with 2% KOH solution for saponification of fats and inspected by light microscopy (stereomicroscope Micromed MC2) using digital camera and ToupView 3.7.6273 software.

The abundance of microplastics of different shape and sizes was evaluated as the number of particles per fish specimen. The microplastics particles extracted from fish guts were classified into four groups by their shape [26]: spheres, films, fibers/lines, and fragments of irregular shape (including foams). The particles of microplastics were also classified by their major dimension into seven groups: <0.15 mm, 0.15-0.30 mm, 0.30-1.00 mm, 1.00-2.00 mm, 2.00-3.00 mm, 3.00-4.00 mm and 4.00-5.00 mm.

The Mann-Whitney U test [27] was used to compare differences in biological parameters and microplastics abundance. Statistically significant differences were considered at $p \leq 0.05$

Results and Discussion

This research analyzed the anthropogenic microparticles in the guts of the dace (*Leuciscus leuciscus* L.) from the Tom River, the right tributary of the Ob River. The daces caught in the Tom River on April 01, 2020 were represented by three age groups: 2+ years (4 specimens), 3+ years (7 specimens), and 4+ years (2 specimens). The sex ratio in the group was: females - 3 specimens (23%), males - 10 specimens (77%). The dimensional features of the fish specimens are presented in Table 1. Statistical comparison of microplastics abundance in the gastrointestinal tract of fish using the nonparametric Mann-Whitney test did not reveal significant differences between groups of males and females, as well as between groups of different ages (2+ and 3+).

According to the analysis results, 204 ± 28.7 items of microplastics were detected in each dace specimen (Table 2). The found value for total microplastic particles per fish (items fish⁻¹) is quite high. The average of microparticle content in the gut of the Mediterranean Sea fish were < 1.00 items per fish for anchovies [19]

and 1.56 ± 0.50 items per fish for the red mullet [17]. The number of microplastics found in the gastrointestinal tract of *Dicentrarchus labrax* L., *Trachurus trachurus* L. and *Scomber colias* Gmelin from North East Atlantic Ocean was 1.3 ± 2.5 items per individual [28]. Microplastics abundance in riverine fish in tributaries of Lake Michigan, USA ranged from 10.0 ± 2.30 to 13.0 ± 1.60 items fish⁻¹ and was not significantly different among the three rivers, the Muskegon River, the Milwaukee River, and the St. Joseph River [20].

Table 1
Dimensional features of the dace, the Tom River, Tomsk, April 01, 2020

Parameters	L, cm	l, cm	Q, g	q, g
M $\pm m_M$	162 ± 2.10	133 ± 1.68	36.2 ± 1.40	31.7 ± 1.46
Min-Max	148-175	123-145	27.7-43.9	23.7-40.3
Sample variance	57.1	36.9	25.7	27.6
Standard deviation	7.55	6.07	5.06	5.25
Coefficient of variation	4.67	4.57	14.0	16.6

Note: L - Total length, l - Standard length, Q - Total weight, q - Body weight without viscera.

Table 2
The content of microplastic particles of different shapes and sizes in the fish gut (items fish⁻¹)

Parameters	Spheres	Films	Fibers	Fragments	<0.15	0.15-0.30	0.30-1.00	1.00-2.00	Total items fish ⁻¹
M $\pm m_M$	31.5 ± 24.4	14.9 ± 2.10	13.9 ± 2.90	144 ± 10.2	162 ± 27.9	24.2 ± 2.50	16.2 ± 4.00	1.20 ± 0.60	204 ± 28.7
Min-Max	0.00-323	5.00-26.0	2.00-35.0	96.0-225	74.0-468	11.0-39.0	1.00-37.0	0.00-7.00	114-512
Standard deviation	88.0	7.60	10.4	36.8	101	9.00	14.5	2.00	104
Coefficient of variation	279	50.9	74.8	25.7	62.0	37.1	89.1	173	50.7

Thus, river fish are in some cases characterized by a relatively higher content of microplastics in the gastrointestinal tract as compared to sea fish. Riverine fish are more susceptible to ingesting microplastics because watercourses flow through many settlements which are anthropogenic sources of primary microplastics and secondary microplastics derived from plastic waste. Accumulation of microplastics in water systems in proximity to cities with a relatively high plastic use was documented in several studies reviewed by Wong et al. [22]. According to the review, microplastics were more common in areas with a high population density or proximity to urban centers. A study on microplastics in the Laurentian Great Lakes attributed the large spatial variability of pollution to population density by Eriksen et al. [29]. The urban sources of microplastics were also reported by Sanchez et al. [30] who detected the presence of microplastics in the

guts of gudgeon (*Gobio gobio* L.) sampled from French urban rivers whereas none were found in gudgeons from sparsely populated areas.

In our study, 100% of the fish contained microplastics in their gut. As previously shown, 28% of 76 sea fish in Indonesia contained microparticles in the gut [31]; 67% of fish caught off the coast of Portugal contained at least one plastic particle [32]; in recent study microplastics were found in 42-62% of fish specimens from Portuguese coastal waters, depending on the species and their feeding type [26]. The frequency of occurrence of plastic debris per species from the Amazon River estuary varied between 18.7% (*Cynoscion microlepidotus* Cuvier) and 100% (*Bagre marinus* Mitchell, *Caranx hippos* L.), a positive correlation was found between fish standard length and number of microplastic particles in the gut [20]. 85% of fish individuals from Lake Michigan tributaries contained microplastic in their digestive tracts, plastic debris content in fish digestive tracts was different among species and feeding groups [21].

Microplastics found in dace from the Tom River were diverse in shape (Fig. 1) and included fragments, spheres, fibers and films ranging from <0.15 to 2.00 mm. Microfragments were the most abundant. In average 144 ± 10.2 fragments fish⁻¹ were detected, that comprised 70% of the total particles (Table 2 and Fig. 1). The remaining 30% of microplastic particles were spheres (16%), films (7%) and fibers (7%) as shown in Fig. 2. The content of fragments of microplastics in the fish gut was significantly higher ($p \leq 0.01$) than other types of particles (Fig. 2).

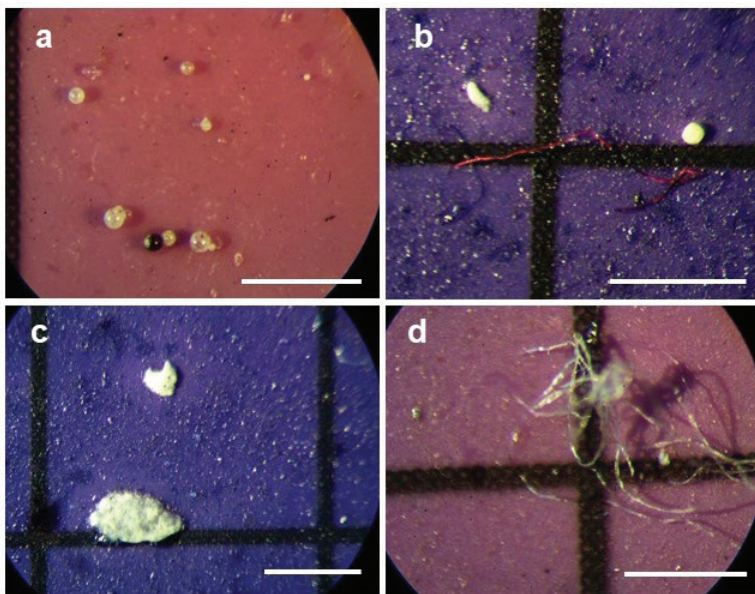


Fig. 1. Diversity of microplastics from the guts of the Tom River dace: spheres (a), sphere, fibers and fragment (b), fragments (c), fibers (d). Scale bar is 1 mm. Microphotographs by Dmitry V. Antsiferov

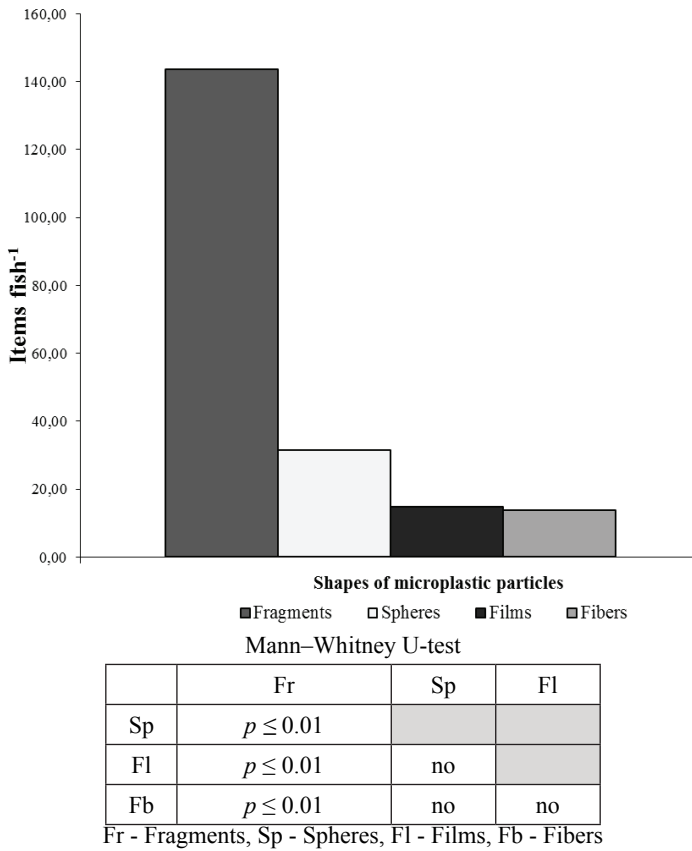
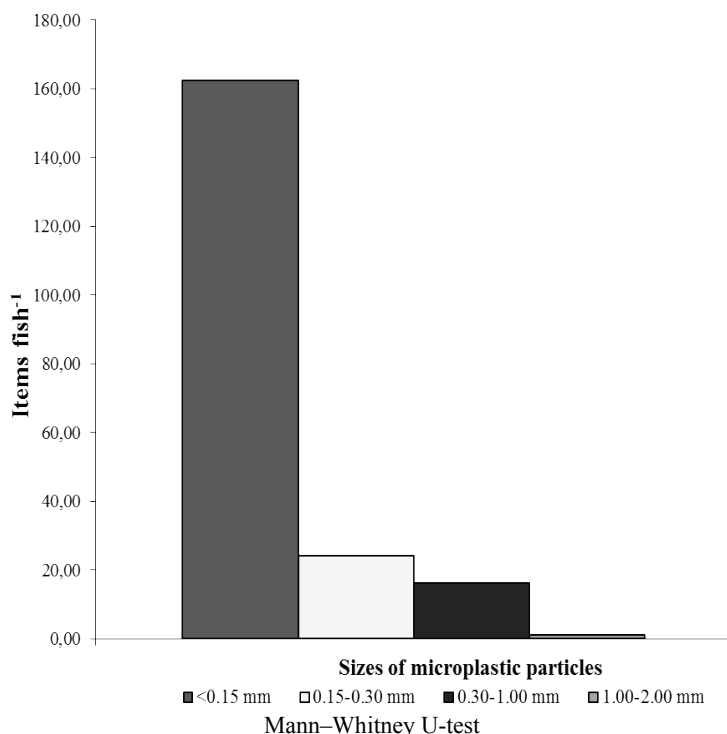


Fig. 2. Abundance of microplastic shapes in the guts of the Tom River dace (a), differences in microplastic shapes abundance (b)

The prevalence of one type of particle or another may differ from site to site. In contrast to our data, fragments were rare in fish from Lake Michigan tributaries and accounted for approximately 2.5-3% while fibers comprised over 90% of the total microplastics [21]. Microspheres, namely pellets, were the most abundant (97.4%) among plastic particles ingested by fish from the Amazon River estuary [20].

The majority of detected microplastic particles (162 ± 27.9 items fish⁻¹ or almost 80%) were less than 0.15 mm by their largest dimension (Table 2 and Figure 3). The content of the smallest (<0.15 mm) microplastics in the fish gut was significantly higher ($p \leq 0.01$) than other sizes of particles (Fig. 3). 20% of the particles detected in the fish gut were in the 0.15-2.00 mm size range. The largest fraction of the plastic particles between 0.15 and 2.00 mm were in the 0.15-0.30 mm size range followed by 0.30-1.00 mm sized particles (Table 2 and Fig. 3). Only one fragment of 3.00-4.00 mm size range was found in the studied dace digestive tracts. No particles of 2.00-3.00 or 4.00-5.00 mm were detected.



	<0.15	0.15-0.30	0.30-1.00
0.15-0.30	$p \leq 0.01$		
0.30-1.00	$p \leq 0.01$	no	
1.00-2.00	$p \leq 0.01$	$p \leq 0.01$	$p \leq 0.01$

Fig. 3. Abundance of microplastic sizes in the guts of the Tom River dace (a), differences in microplastic sizes abundance (b)

The size of microparticles of plastic ingested by aquatic organisms can affect their behavior in the body. It is accepted that microplastics of size less than 0.150 mm are absorbed by the intestine [10]. Micro- and nanoplastics can translocate from the intestine to the circulatory system or surrounding tissue and persist in the animal's body [11], promoting uptake of plastic debris in food chains.

Conclusions

Preliminary assessment conducted in this study suggests that the abundance of microplastics in fish of the Tom River is very high. 100% of thirteen dace (*Leuciscus leuciscus* L.) individuals from the Tom River caught in April, 2020 contained plastic debris in their gastrointestinal tract. In average 204 ± 28.7 items of microplastics were detected for one dace specimen. Fragments were the most

abundant comprising 70% of the total particles, the remaining 30% of microplastic particles were spheres (16%), films (7%) and fibers (7%). The vast majority of the detected particles (almost 80%) were less than 0.15 mm by their largest dimension. 20% of the particles detected in the fish gut were in the 0.15-2.00 mm size range.

There were no significant differences in the abundance of microplastics in the gastrointestinal tract of fish between groups of males and females, as well as between groups of different ages. To identify such relationships, a long-term and large-scale study should be carried out.

References

1. Rochman CM and Hoellein T. The global odyssey of plastic pollution. Thinking big about small particles reveals new features of the microplastic cycle. *Science*. 2020;368:1184-1185. doi: [10.1126/science.abc4428](https://doi.org/10.1126/science.abc4428)
2. Thompson RC, Olsen Y, Mitchell PP, Davis A, Rowland SJ, John AW, McGonigle D, Russell AE. Lost at sea: Where is all the plastic? *Science*. 2004;304:838. doi: [10.1126/science.1094559](https://doi.org/10.1126/science.1094559)
3. Bergmann M, Gutow L, Klages M. Marine anthropogenic litter. Berlin, Germany: Springer Publ.; 2015. 447 p.
4. Hartmann NB, Hüffer T, Thompson RC, Hassellöv M, Verschoor A, Daugaard AE, Rist S, Karlsson T, Brennholt N, Cole M, Herrling MP, Hess MC, Ivleva NP, Lusher AL, Wagner M. Are we speaking the same language? Recommendations for a definition and categorization framework for plastic debris. *Environmental Science and Technology*. 2019;53(3):1039-1047. doi: [10.1021/acs.est.8b05297](https://doi.org/10.1021/acs.est.8b05297)
5. Chubarenko I, Esiukova E, Khatmullina L, Lobchuk O, Grave A, Kileso A, Haseler M. From macro to micro, from patchy to uniform: Analyzing plastic contamination along and across a sandy tide-less coast. *Marine Pollution Bulletin*. 2020;156:111198. doi: [10.1016/j.marpolbul.2020.111198](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111198)
6. Rochman CM, Browne MA, Halpern BS, Hentschel BT, Hoh E, Karapanagioti HK, Rios-Mendoza LM, Takada H, Teh S, Thompson RC. Policy: Classify plastic waste as hazardous. *Nature*. 2013;494:69-171. doi: [10.1038/494169a](https://doi.org/10.1038/494169a)
7. Browne MA, Dissanayake A, Galloway TS, Lowe DM, Thompson RC. Ingested microscopic plastic translocates to the circulatory system of the mussel, *Mytilus edulis* (L.). *Environmental Science and Technology*. 2008;42:5026-5031. doi: [10.1021/es800249a](https://doi.org/10.1021/es800249a)
8. Wang W, Ge J, Yu X. Bioavailability and toxicity of microplastics to fish species: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2000;189:109913. doi: [10.1016/j.ecoenv.2019.109913](https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109913)
9. Farrell P, Farrell P, and Nelson K. Trophic level transfer of microplastic: *Mytilus edulis* (L.) to *Carcinus maenas* (L.). *Environmental Pollution*. 2013;177:1-3. doi: [10.1016/j.envpol.2013.01.046](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.01.046)
10. Lusher AL, Hollman PCH, Mendoza-Hill JJ. Microplastics in fisheries and aquaculture: status of knowledge on their occurrence and implications for aquatic organisms and food safety. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper, No. 615. Rome, Italy: FAO; 2017. 126 p.
11. Smith M, Love DC, Rochman CM, Neff RA. Microplastics in Seafood and the Implications for Human Health. *Current Environmental Health Reports*. 2018;5:375-386. doi: [10.1007/s40572-018-0206-z](https://doi.org/10.1007/s40572-018-0206-z)
12. Campanale C, Massarelli C, Savino I, Locaputo V, Uricchio VF. A detailed review study on potential effects of microplastics and additives of concern on human health. *Int J Environmental Research and Public Health*. 2020;17:1212. doi: [10.3390/ijerph17041212](https://doi.org/10.3390/ijerph17041212)

13. Li J, Qu X, Su L, Zhang W, Yang D, Kolandhasamy P, Li D, Shi H. Microplastics in mussels along the coastal waters of China. *Environmental Pollution*. 2016;214:177-184. doi: [10.1016/j.envpol.2016.04.012](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.04.012)
14. Vandermeersch G, Van Cauwenberghe L, Janssen CR, Marques A, Granby K, Fait G, Kotterman MJ, Diogene J, Bekaert K, Robbens J, Devriese L. A critical view on microplastic quantification in aquatic organisms. *Environmental Research*. 2015;143:46-55. doi: [10.1016/j.envres.2015.07.016](https://doi.org/10.1016/j.envres.2015.07.016)
15. Jahan S, Strezov V, Weldekidan H, Kumar R, Kan T, Sarkodie SA, He J, Dastjerdi B, Wilson SP. Interrelationship of microplastic pollution in sediments and oysters in a seaport environment of the eastern coast of Australia. *Science of the Total Environment*. 2019;695:133924. doi: [10.1016/j.scitotenv.2019.133924](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133924)
16. Nadal MA, Alomar C, Deudero S. High levels of microplastic ingestion by the semipelagic fish bogue *Boops boops* (L.) around the Balearic Islands. *Environmental Pollution*. 2016;214:517-523. doi: [10.1016/j.envpol.2016.04.054](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.04.054)
17. Bellas J, Martínez-Armental J, Martínez-Cámara A, Besada V, Martínez-Gómez C. Ingestion of microplastics by demersal fish from the Spanish Atlantic and Mediterranean coasts. *Marine Pollution Bulletin*. 2016;109:55-60. doi: [10.1016/j.marpolbul.2016.06.026](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.06.026)
18. Giani D, Baini M, Galli M, Casini S. Microplastics occurrence in edible fish species (*Mullus barbatus* and *Merluccius merluccius*) collected in three different geographical sub-areas of the Mediterranean Sea. *Marine Pollution Bulletin*. 2019;140:129-137. doi: [10.1016/j.marpolbul.2019.01.005](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.01.005)
19. Capone A, Petrillo M, Misic C. Ingestion and elimination of anthropogenic fibres and microplastic fragments by the European anchovy (*Engraulis encrasicolus*) of the NW Mediterranean Sea. *Marine Biology*. 2020;167:166. doi: [10.1007/s00227-020-03779-7](https://doi.org/10.1007/s00227-020-03779-7)
20. Pegado TSES, Schmid K, Winemiller KO, Chelazzi D, Cincinelli A, Dei L, Giarrizzo T. First evidence of microplastic ingestion by fishes from the Amazon River estuary. *Marine Pollution Bulletin*. 2018;133:814-821. doi: [10.1016/j.marpolbul.2018.06.035](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.06.035)
21. McNeish RE, Kim LH, Barrett HA, Mason SA, Kelly JJ, Hoellein TJ. Microplastic in riverine fish is connected to species traits. *Scientific Reports*. 2018;8:11639. doi: [10.1038/s41598-018-29980-9](https://doi.org/10.1038/s41598-018-29980-9)
22. Wong JKH, Lee KK, Tang KHD, Yap P-S. Microplastics in the freshwater and terrestrial environments: Prevalence, fates, impacts and sustainable solutions. *Science of the Total Environment*. 2020;719:137512. doi: [10.1016/j.scitotenv.2020.137512](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137512)
23. Kottelat M. and Freyhof J. Handbook of European Freshwater Fish. Berlin, Germany: Kottelat, Cornol & Freyhof Publ.; 2007. 646 p.
24. Pravdin IF. Rukovodstvo po izucheniyu ryb [Guide to fish study]. Moscow, Russia: Pishchevaya promyshlennost' Publ.; 1966. 376 p. In Russian
25. Claessens M, Van Cauwenberghe L, Vandegehuchte MB, Janssen CR. New techniques for the detection of microplastics in sediments and field collected organisms. *Marine Pollution Bulletin*. 2013;70:227-233. doi: [10.1016/j.marpolbul.2013.03.009](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.03.009)
26. Cowger W, Gray AB, Eriksen M, Moore C, Thiel M. Evaluating wastewater effluent as a source of microplastics in environmental samples. In: *Microplastics in Water and Wastewater*. Karapanagioti HK and Kalavrouziotis IK, editors. London, UK: IWA Publishing; 2019. pp. 109-131. doi: [10.2166/9781789060034_0109](https://doi.org/10.2166/9781789060034_0109)
27. Mann HB, Whitney DR. On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other. *Annals of Mathematical Statistics*. 1947;18:50-60.
28. Barboza LGA, Lopes C, Oliveira P, Bessa F, Otero V, Henriques B, Raimundo J, Caetano M, Vale C, Guilhermino L. Microplastics in wild fish from North East Atlantic Ocean and its potential for causing neurotoxic effects, lipid oxidative damage, and human health risks associated with ingestion exposure. *Science of the Total Environment*. 2020;717:134625. doi: [10.1016/j.scitotenv.2019.134625](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134625)

29. Eriksen M, Mason S, Wilson S, Box C, Zellers A, Edwards W, Farley H, Amato S. Microplastic pollution in the surface waters of the Laurentian Great Lakes. *Marine Pollution Bulletin*. 2013;77:177-182. doi: [10.1016/j.marpolbul.2013.10.007](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.10.007)
30. Sanchez W, Bender C, Porcher JM. Wild gudgeons (*Gobio gobio*) from French rivers are contaminated by microplastics: preliminary study and first evidence. *Environmental Research*. 2014;128:98-100. doi: [10.1016/j.envres.2013.11.004](https://doi.org/10.1016/j.envres.2013.11.004)
31. Rochman C, Tahir A, Williams S, Baxa DV, Lam R, Miller JT, Teh F-C, Werorilangi S, and Teh SJ. Anthropogenic debris in seafood: Plastic debris and fibers from textiles in fish and bivalves sold for human consumption. *Scientific Reports*. 2015;5:14340. doi: [10.1038/srep14340](https://doi.org/10.1038/srep14340)
32. Neves D, Sobral P, Ferreira JL, Pereira T. Ingestion of microplastics by commercial fish off the Portuguese coast. *Marine Pollution Bulletin*. 2015;101:119-126. doi: [10.1016/j.marpolbul.2015.11.008](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.11.008)

Received 18 October 2020; Revised 01 December 2020;
Accepted 03 December 2020; Published 29 December 2020

Author info:

Frank Yulia A, Cand. Sci. (Biol.), Head of the Laboratory of Industrial Microbiology, Institute of Biology, Tomsk State University, 36 Lenin Ave., Tomsk 634050, Russian Federation; Scientific Vice-Director, Darwin LLC, 28/3 Vysotskogo Str., Tomsk 634040, Russian Federation.

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-6347-4009>

E-mail: yulia.a.frank@gmail.com

Vorobiev Egor D, Student, Institute of Biology, Tomsk State University, 36 Lenin Ave., Tomsk 634050, Russian Federation.

E-mail: vorobieveg@gmail.com

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-5764-6134>

Babkina Irina B, Cand. Sci. (Biol.), Assoc. Prof., Department of Ichthyology and Hydrobiology, Institute of Biology, Tomsk State University, 36 Lenin Ave., Tomsk 634050, Russian Federation.

E-mail: bibsphera@gmail.com

Antsiferov Dmitry V, Cand. Sci. (Biol.), Head of the Department of Biopreparations Production, Darwin LLC, 28/3 Vysotskogo Str., Tomsk 634040, Russian Federation.

E-mail: dmitry.antsiferov@gmail.com

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-1865-1675>

Vorobiev Danil S, Dr. Sci. (Biol.), Director of the Institute of Biology, Tomsk State University, 36 Lenin Ave., Tomsk 634050, Russian Federation.

E-mail: danilvorobiev@yandex.ru

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-4397-4406>

For citation: Frank YuA, Vorobiev ED, Babkina IB, Antsiferov DV, Vorobiev DS. Microplastics in fish gut, first records from the Tom River in West Siberia, Russia. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya = Tomsk State University Journal of Biology*. 2020;52:130-139. doi: [10.17223/19988591/52/7](https://doi.org/10.17223/19988591/52/7)

Для цитирования: Frank Yu.A, Vorobiev E.D., Babkina I.B., Antsiferov D.V., Vorobiev D.S. Microplastics in fish gut, first records from the Tom River in West Siberia, Russia // Вестн. Том. гос. ун-та. Биология. 2020. № 52. С. 130–139. doi: [10.17223/19988591/52/7](https://doi.org/10.17223/19988591/52/7)

УДК 579.68(262.5)

doi: 10.17223/19988591/52/8

Н.И. Копытина

*Федеральный исследовательский центр «Институт биологии южных морей
имени А.О. Ковалевского РАН», г. Севастополь, Россия*

Микобиота пелагиали Одесского региона северо-западной части Чёрного моря

Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ ИнБЮМ по теме «Исследование механизмов управления продукционными процессами в биотехнологических комплексах с целью разработки научных основ получения биологически активных веществ и технических продуктов морского генезиса» (№ гос. регистрации АААА-А18-118021350003-6).

Представлены результаты микологического исследования воды Одесского морского региона северо-западной части Чёрного моря ($30^{\circ}70'00''$ – $31^{\circ}00'00''$ N и $46^{\circ}23'00''$ – $46^{\circ}60'00''$ E). Район подвержен влиянию рек Днепра (93,4%) и Южного Буга (5,7%), постоянных антропогенных стоков городов Одесса, Черноморск (Ильичёвск), Южный, их портов, дноуглубительных работ и открытого моря. Изучен видовой состав и выявлено число колониеобразующих единиц культивируемых микроскопических грибов в 258 образцах воды, взятых летом и осенью 2008–2012 гг. На примере 140 проб рассмотрено влияние факторов окружающей среды: температуры воды, солёности, растворённого кислорода, биохимического потребления кислорода за 5 суток, нефтепродуктов, растворённых форм металлов Cu, Zn, Ni, Cd и взвешенного вещества. Идентифицировано 50 видов микромицетов из 19 родов, 14 семейств, 9 порядков, 4 классов, отдела Ascomycota, из которых наиболее представлены роды *Aspergillus* (17), *Penicillium* (8) и *Alternaria* (7). Известно, что регион характеризуется как переходная зона от мезотрофной к эвтрофной при среднем многолетнем значении $TRIX=5,3$. Установлено относительно равномерное распределение средней численности колоний грибов по горизонтам воды и акватории в течение всего периода исследования. Не выявлено статистически значимой связи числа колониеобразующих единиц микромицетов по горизонтам воды, сезонам, датам отбора проб, местоположения станций, мезотрофной и эвтрофной зонам с рассматриваемыми абиотическими параметрами. Зафиксировано 44% грибов-индикаторов различных видов загрязнения. В местах поступления ливневых стоков и выбросов очистных сооружений наибольшие значения индекса индикаторной валентности ($IndVal$) отмечены для видов *Cladosporium cladosporioides* (28,3%), *Alternaria alternata* (17,5%), *Aspergillus niger* (12,3%), в эвтрофной зоне – для *Aspergillus clavatus* (21,2%), *Penicillium expansum* (17,7%), *Penicillium citrinum* (16,1%), *Al. tenuissima* (12,5%), а в местах локального нефтяного загрязнения – для *A. fumigatus* (60%), *Al. alternata* (40%) и *A. niger* (35,7%). Установлено, что во всей акватории Одесского региона формируются

комплексы грибов, которые обладают высоким сходством видовой и численной структуры, поэтому их можно рассматривать как единое сообщество.

Ключевые слова: *Alternaria*; *Aspergillus*; *Penicillium*; таксономическое разнообразие морских грибов; грибы-индикаторы.

Введение

Происхождение многих «морских» грибов неизвестно, организмы попадают в море вместе с растительными и животными субстратами, терригенными стоками различного происхождения и заносятся ветром. E.B.G. Jones et al. [1] считают, что разделение грибов, выделенных из морских мест обитания, на облигатно и факультативно морские виды, формально и зависит от мнения специалиста. Ранее почти все микромицеты (микроскопические грибы), изолированные из морских грунтов, относили к наземным, однако их многократная изоляция из разных биотопов и в разных лабораториях мира заставила морских микологов рассматривать их как «морские». Подобная ситуация сложилась и в отношении к сапротрофным таксонам, которые выделяют из литоральных субстратов (морские травы, мангровые растения и т. д.) [2].

В монографии «Classification of marine Ascomycota, Basidiomycota, Blastocladiomycota and Chytridiomycota» [2] представлен список морских грибов, включающий 1112 видов из 472 родов. Перечень микроскопических грибов содержит наземные виды, выделенные из морской среды, в том числе из родов *Aspergillus* (47) и *Penicillium* (39). В работе особо отмечены наземные грибы, выделенные из морских экосистем, геном которых подтвержден молекулярными исследованиями, 38 представителей родов *Aspergillus* и *Penicillium* имеют такое подтверждение. Современное определение термина «морской гриб» – это любой гриб, который многократно был выделен из морских сред обитания. Гриб считается морским в связи с тем, что: 1) он способен расти и / или продуцировать споры на субстратах в морской среде; 2) формирует симбиотические отношения с другими морскими организмами или 3) доказано, что он может адаптироваться и развиваться в морской среде [3].

Изучение морской микобиоты в районах влияния терригенных стоков различного происхождения в сочетании с высокой антропогенной нагрузкой представляет несомненный научный интерес.

Цель данного исследования – изучить видовой состав, количество и динамику пространственно-временного распределения культивируемых микроскопических грибов в пелагиали Одесского региона северо-западной части Чёрного моря в зависимости от абиотических факторов и трофического уровня морской воды.

Материалы и методики исследования

Одесский регион (ОР) северо-западной части Чёрного моря (координаты 30°70'00"–31°00'00"N и 46°23'00"–46°60'00"E) находится под влиянием

стока рек Днепр (93,4%), Южный Буг (5,7%) и открытой части моря, поэтому в акватории присутствуют слои воды с разной соленостью от 3 до 18,5‰. Акватория региона испытывает постоянное береговое антропогенное воздействие: хозяйственная деятельность городов Одессы, Черноморска (Ильичевск) и Южного, их портов, судоходства, дноуглубления, неочищенных ливневых и дренажных стоков. Максимальные концентрации биогенных и органических веществ отмечаются в районах расположения станций биологической очистки (СБО) «Северная» и «Южная». В сумме они поставляют в морскую среду 38% нитратов, 79% нитритов, 86% аммонийного азота, 87% фосфатов и 69% органических соединений от общего их количества, которое поступает с берега [4].

Изучение микромицетов в водной толще ОР проведено летом и осенью 2008–2012 гг. (август, октябрь 2008 г., июль, октябрь 2009 г., июнь 2010 г., июль 2011 г., сентябрь 2012 г.). Образцы воды взяты в комплексных экспедиционных рейсах Одесского филиала Института биологии южных морей НАН Украины (ОФ ИнБЮМ НАНУ, в настоящее время Институт морской биологии НАНУ) на НИС «Спрут». Станции отбора проб находились на расстоянии 0,6–14,0 км от берега. Пробы воды брали с поверхностного (1 м) и придонного горизонтов (7–24 м) пластмассовым батометром Молчанова объемом 4 л. Проанализированы результаты обработки 258 проб с 22 станций, на которых произведен отбор проб не менее 3 раз (рис. 1).

Грибы выделяли на среду Чапека, приготовленную на морской воде. В чашку Петри вносили 1 мл воды и заливали средой, охлажденной примерно до 36–40 °С. Для подавления роста бактерий в среду добавляли 0,03% левомицетина (от объема среды) [5]. Посев материала делали в 3 повторностях и культивировали в термостате при температуре 18–20 °С в течение 2–8 недель.

Грибы идентифицировали по «морфолого-культуральным признакам», используя определители грибов В.И. Билай, Э.З. Коваль и G.S. De Hoog et al. 2000 [6, 7]. Валидные названия и таксономическая принадлежность видов грибов соответствуют электронной международной базе данных Index Fungorum [8].

Экологический анализ микокомплексов (совокупность таксонов грибов, занимающих одно дискретное местообитание) проведен по следующим структурным показателям: видовому составу, количеству видов в комплексах, частоте встречаемости вида, числу колониеобразующих единиц (КОЕ/л). Значения КОЕ представлены в виде средней арифметической $\pm$ стандартное отклонение ($M \pm SD$), медианы (Me), минимума (Min) и максимума (Max).

Обработка данных выполнена с применением программы MS Excel, пакета статистических программ StatSoft STATISTICA 10.0 и PRIMER® 5.2.8 [9, 10].

Систематическая характеристика комплексов грибов дана с использованием 2 индексов таксономического разнообразия – индекса средней таксономической отличительности (или таксономического своеобразия) Δ^+ (Average

Taxonomic Distinctness index, AvTD) и индекса вариабельности Λ^+ (Variation in Taxonomic Distinctness index, VarTD), преимущества которых перед другими индексами показаны в работах по зоо- и фитобентосу [9–12].

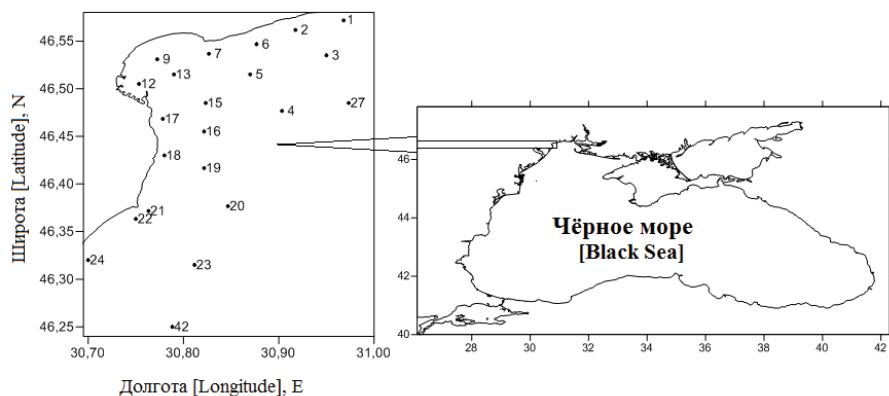


Рис. 1. Карта-схема расположения станций отбора проб на полигоне

Одесского региона северо-западной части Чёрного моря:

станция 2 – район очистных сооружений Одесского припортового завода (ОПЗ); станция 9 – СБО «Северная»; станция 12 – вокзал Одесского морского порта, ЗАО «Одесская сахарная компания», портовый комплекс по транспортировке и перевалке на танкера нефти, нефтепродуктов и сжиженных газов, Одесская теплоэлектростанция; станции 17, 18, 21 – городские ливневые выпуски; станция 22 – СБО «Южная»; станция 24 – очистные сооружения Морского торгового порта «Черноморск»

[Fig. 1. Chart map of the sampling stations at the Odessa region test site in the northwestern Black Sea
Note: Station 2 is the wastewater treatment area of Odessa Port Factory (OPF); Station 9 is the biological water treatment plant *Northern*; Station 12 is Odessa Commercial Sea Port Station; Odessa Sugar Company (private joint stock company); oil terminal of Sintez Oil (private joint stock company with foreign investments); Odessa State Heat and Power Central Plant (public joint stock company); Stations 17, 18 and 21 are urban stormwater discharge outlets; Station 22 is the biological water treatment plant *Southern*; Station 24 is the wastewater treatment facilities of Chernomorsk Commercial Sea Port]

Индексы рассчитаны по факту наличия или отсутствия таксона, учитывают систематическую связь видов в каждой пробе (вид, род, семейство и т.д.) и обеспечивают статистически устойчивое заключение о близости таксономической структуры в пределах сообщества. Если два вида принадлежат к одному роду, то нужно пройти один шаг для того, чтобы достичь общего узла в иерархическом древе. Когда виды относятся к разным родам, но одному семейству, то потребуется два шага (шаг вид–род и шаг род–семейство) и т.д. Длина шагов стандартизирована так, что различие двух видов, связанных на самом верхнем таксономическом уровне, равно 100, и значение индекса Δ^+ изменяется в пределах от 0 до 100. Индекс Δ^+ – средняя длина связей между видами в таксономическом древе отражает вертикальные связи, рассчитан по формуле

$$\Delta^+ = [\sum_{i < j} \omega_{ij}] / [S(S-1)/2], \quad (1)$$

где S – количество видов в выборке; ω_{ij} – мера таксономического различия, заданная длиной пути, который связывает виды i и j в иерархической классификации Линнея.

Индекс Δ^+ – это дисперсия парных длин связи, он также отражает горизонтальную пропорцию сообщества (с учетом числа таксонов на каждом уровне иерархического дерева). Формула для расчёта Δ^+ :

$$\Delta^+ = [\{\sum_{ij} \omega_{ij}^2\} / \{S(S-1)/2\}] - [\Delta^+]^2. \quad (2)$$

Обозначения, такие же, как в формуле (1).

Индексы рассчитаны по матрице видов микромицетов исследуемого района, которая сопоставлена со списком грибов (219 видов), известных в пелагиали всего Чёрного моря [13]. В таксономический анализ включены семь уровней: вид, род, семейство, порядок, класс, отдел, царство. Максимальные значения обоих индексов указывают на высокую выравненность структуры по рангам. Чем больше в сообществе представителей из поливидовых ветвей, тем ниже показатели иерархической выравненности таксономической структуры и меньше значения индекса Δ^+ и Δ^+ . Значение $\Delta^+ = 0$ означает, что в пробе обнаружен 1 вид. Значение $\Delta^+ = 0$ встречается в нескольких вариантах: а) обнаружен 1 вид; б) все виды относятся к одному роду; в) виды замыкаются на уровне семейства; г) все виды принадлежат к разным ветвям дерева и пересекаются на уровне порядка. Построены графики, на которых отображены значения таксономических индексов, соответствующих рассматриваемым сообществам, что позволяет наглядно оценить различие в их структуре [9, 10].

Сходство комплексов грибов оценено по коэффициенту Брэя–Кёртиса в двух вариантах: а) по видовому составу (присутствие / отсутствие вида); б) по численной структуре на основе матрицы КОЕ микромицетов и количества видов, которая трансформирована в степени 0,25. Оценка статистической значимости различий между микокомплексами рассчитана с использованием R-статистики [10].

Комплексы индикаторных видов грибов в интересующих группах определяли по значению индекса индикаторной валентности «Indicator value» (*IndVal*), который рассчитывали по формуле [14]

$$IndVal = N_{ij} / Nt \times P_{ij} / P_j \times 100\%,$$

где N_{ij} – среднее число КОЕ вида в группе; Nt – сумма значений средней численности вида в каждой из групп; P_{ij} – количество проб в пределах групп, в которых отмечен вид; P_j – общее количество проб в данной группе. Индикаторными видами группы с большим числом проб считали те, у которых значение индекса *IndVal* превышало 10,0%.

В 2008–2011 гг. взяты 140 проб воды (летом 108 проб и осенью 32), для параллельного исследования грибов и гидрохимического анализа. Учтены параметры окружающей среды: температура воды (T , °C), солёность (S , ‰), растворенный кислород (O_2), биохимическое потребление кислорода за 5 су-

ток (БПК₅), нефтепродукты (НП), растворённые формы металлов Cu, Zn, Ni, Cd и взвешенное вещество. По итогам объединения биотической (показатели численности и количества видов) и абиотической (физико-химические параметры окружающей среды) матриц сходства выполнен расчет наиболее высоких значений коэффициентов ранговой непараметрической корреляции Спирмана и Кендалла ($\rho_{\max}$) [10]. Данные по абиотическим параметрам воды любезно предоставлены коллегами из Института морской биологии НАНУ (Одесса, Украина) (табл. 1).

Таблица 1 [Table 1]

Значения физико-химических параметров в воде Одесского региона
[Physicochemical parameters of water in Odessa region]

Параметр [Parameter]	$M \pm SD$	Me	Min-Max
Температура [Temperature], T, °C	18,57±5,39	19,20	8,60–25,80
Солёность [Salinity], S, ‰	15,21±1,55	15,19	8,99–17,87
O ₂ , mg/L	7,64±1,14	7,81	4,23–10,45
Нефтепродукты НП, мг/л [Petroleum hydrocarbons, mg/L]	0,05±0,14	0,03	0,01–1,57
Взвешенное вещество, мг/л [Suspended particulate matter, mg/L]	7,12±10,57	5,50	1,50–116,90
Биохимическое потребление кислорода за 5 суток БПК ₅ , мг/л [BOD ₅ : five-day biochemical oxygen demand, mg O ₂ /L]	1,49±0,81	1,28	0,00–3,98
*Cu, µg/L	2,60±2,99	1,40	0,20–15,82
*Zn, µg/L	2,90±7,36	0,28	0,00–49,31
*Ni, µg/L	1,34±1,38	0,84	0,00–7,40
*Cd, µg/L	0,12±0,12	0,11	0,00–1,00

Примечание. * O₂, Cu, Zn, Ni, Cd, растворенные в воде.

[Note. * O₂, Cu, Zn, Ni, Cd: - dissolved in water].

Карта-схема полигона выполнена с применением программы Surfer 12.

Результаты исследования и обсуждение

Традиционной оценкой биологического разнообразия микроскопических грибов остается синэкологический анализ культивируемых видов микромицетов на основе «метода посева», когда видовая идентификация осуществляется при выделении микромицетов на питательные среды [15]. В ОР идентифицировано 50 видов микромицетов из 19 родов, 14 семейств, 9 порядков, 4 классов, отдела Ascomycota. Систематическая структура микобиоты ОР характеризуется большой сгруппированностью видов по родам и семействам: семейство Aspergillaceae включает роды *Aspergillus* (17 видов), *Penicillium* (8) и *Talaromyces* (2), в состав семейства Pleosporaceae входят роды *Alternaria* (7) и *Stemphylium* (1), также выявлены 3 вида в роде

Cladosporium, которые относятся к семейству Cladosporiaceae. Итого 76,0% видов, выявленных в ОР, принадлежат к 3 семействам (табл. 2). По одному виду отмечено в 14 родах и 9 семействах. Во всех экспедициях обнаружено 11 общих видов микромицетов. За весь исследуемый период у 17 видов зарегистрирована встречаемость более 10%, наибольшая отмечена у *Aspergillus fumigatus* (33,0%), *A. clavatus* (23,6%), *Alternaria alternata* (26,4%), *Penicillium expansum* (20,9%) (год описания и автор(ы) видов грибов указаны в табл. 2).

Таблица 2 [Table 2]

Таксономический состав, численность (N_{cp} , КОЕ/л) и частота встречаемости (ЧВ, %) микромицетов в Одесском морском регионе по датам экспедиций
[Taxonomic composition, number (N_m , CFU/L) and percentage of micromycete occurrence (PO, %) in Odessa sea region sorted by expedition dates]

Дата [Date]	08.2008	10.2008	07.2009	10.2009	06.2010	07.2011	09.2012
Вид [Species]	Среднее число колониеобразующих единиц (N_{cp} , КОЕ/л) / частота встречаемости (ЧВ, %) [Average number of colony forming units (N_m , CFU/L) / percentage of occurrence (PO, %)]						
Sordariomycetes – Hypocreales – Bionectriaceae							
<i>Lasionectriopsis spinosa</i> (Negroni) Lechat & P.-A. Moreau 2019	68/2,3	535/6,5	333/6,5	1220/4,5	706/6,3	0/0	3294/26,5
Sordariomycetes – Hypocreales – Incertae sedis							
<i>Sarocladium kiliense</i> (Grütz) Summerb. 2011	0/0	0/0	350/6,5	645/11,4	102/3,1	13951/45,2	3132/23,5
Sordariomycetes – Hypocreales – Stachybotryaceae							
<i>Stachybotrys chartarum</i> (Ehrenb.) S. Hughes 1958	113/2,3	0/0	8113/12,9	8113/9,1	1907/9,4	2890/16,7	780/14,7
Sordariomycetes – Hypocreales – Nectriaceae							
<i>Fusarium</i> sp.	477/11,4	2767/14,3	0/0	0/0	22621/12,5	0/0	1058/14,7
Sordariomycetes – Cephalothecales – Cephalothecaceae							
<i>Phialemonium atrogriseum</i> (Panas.) Dania García, Perdomo, Gené, Cano and Guarro 2013	0/0	0/0	766/12,9	85/4,5	31/3,1	16529/45,2	294/5,9
Sordariomycetes – Sordariales – Chaetomiaceae							
<i>Chaetomium</i> sp.	0/0	0/0	0/0	0/0	63/3,3	0/0	1897/14,7
Sordariomycetes – Microascales – Halosphaeriaceae							
<i>≈Halosphaeriopsis mediosetigera</i> (Cribb and J.W. Cribb) T.W. Johnson 1958	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	382/8,8

Продолжение табл. 2 [Table 2 (cont.)]

Дата [Date]	08.2008	10.2008	07.2009	10.2009	06.2010	07.2011	09.2012
Вид [Species]	Среднее число колониеобразующих единиц (N_{cp} , КОЕ/л) / частота встречаемости (ЧВ, %) [Average number of colony forming units (N_m , CFU/L) / percentage of occurrence (PO, %)]						
Sordariomycetes – Microascales – Microascaceae							
<i>Microascus</i> sp.	23/2,3	0/0	33/3,2	20/2,3	20/3,1	0/0	1617/8,6
<i>Pseudallescheria boydii</i> Shear) McGinnis, A.A. Padhye and Ajello 1982	306/4,5	0/0	0/0	1250/2,3	468/3,1	0/0	0/0
Dothideomycetes – Pleosporales – Pleosporaceae							
* <i>Alternaria alternata</i> (Fr.) Keissl. 1912	3056/25,0	3964/25,8	7583/29,0	1571/18,2	3289/25,0	8536/28,6	4029/35,3
<i>Al. chlamydospora</i> Mouch. 1973	23/2,3	0/0	666/3,2	105/4,5	156/9,4	0/0	970/11,8
<i>Al. cichorii</i> Nattress 1937	0/0	0/0	673/3,2	135/4,5	580/3,1	6573/23,8	3117/31,4
<i>Al. dianthicola</i> Neerg. 1945	352/4,5	0/0	983/9,7	126/9,1	403/3,1	256/4,8	4573/28,6
<i>Al. longipes</i> (Ellis and Everh.) E.W. Mason 1928	0/0	107/3,6	67/6,5	145/6,8	440/6,3	0/0	2352/20,0
<i>Al. porri</i> (Ellis) Cif. 1930	45/2,3	0/0	2016/6,5	63/2,3	0/0	2622/16,7	2382/14,3
<i>Al. tenuis-sima</i> (Kunze) Wiltshire 1933	363/2,3	13518/35,5	0/0	4200/11,4	1415/9,4	7012/31,0	4308/22,9
<i>Stemphylium</i> sp.	23/2,3	0/0	0/0	63/6,8	0/0	25/2,4	3147/25,7
Dothideomycetes – Capnodiales – Cladosporiaceae							
* <i>Cladosporium cladosporioides</i> (Fresen.) G.A. de Vries 1952	113/2,3	0/0	2733/9,7	4106/13,6	2783/12,5	641/28,6	2132/17,1
<i>C. herbarum</i> (Pers.) Link 1816	0/0	0/0	0/0	146/4,5	0/0	0/0	2647/28,6
<i>C. macrocarpum</i> Preuss 1848	0/0	0/0	34/3,2	240/11,4	67/3,1	621/14,3	4544/60,0
Dothideomycetes – Dothideales – Saccoteciaceae							
<i>Aureobasidium pullulans</i> (de Bary and Löwenthal) G. Arnaud 1918	670/13,6	232/3,2	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
Eurotiomycetes – Eurotiales – Aspergillaceae							
<i>Aspergillus alliaceus</i> Thom and Church 1945	761/15,9	107/3,2	0/0	0/0	0/0	1975/9,5	0/0
<i>A. caesiellus</i> Saito 1904	0/0	0/0	6500/6,5	0/0	313/3,1	0/0	0/0

Продолжение табл. 2 [Table 2 (cont.)]

Дата [Date]	08.2008	10.2008	07.2009	10.2009	06.2010	07.2011	09.2012
Вид [Species]	Среднее число колониеобразующих единиц (N_{cp} , КОЕ/л) / частота встречаемости (ЧВ, %) [Average number of colony forming units (N_m , CFU/L) / percentage of occurrence (PO, %)]						
* <i>A. candidus</i> Link 1809	261/4,5	0/0	0/0	5866/ 20,5	1906/ 9,4	0/0	0/0
* <i>A. carneus</i> Blochwitz 1933	625/ 9,1	0/0	3500/ 3,2	116/ 4,5	2768/ 3,1	3951/ 16,7	2632/ 17,6
<i>A. clavatonanicus</i> Bat., H. Maia and Alecrim 1955	886/ 6,8	5285/ 16,1	2100/ 6,5	258/ 6,8	6299/ 9,4	3769/ 16,7	5544/ 20,6
<i>A. clavatus</i> Desm. 1834	1181/ 13,6	14464/ 54,8	18667/ 41,9	1375/ 13,6	7720/ 21,9	4256/ 24,2	2176/ 11,8
<i>A. conicus</i> Blochwitz 1914	954/ 4,5	0/0	1166/ 3,2	458/ 4,5	935/ 6,3	1914/ 14,3	1132/ 8,8
<i>A. deflectus</i> Fennell and Raper 1955	23/ 2,3	71/ 3,2	0/0	3670/ 11,4	5131/ 6,3	1817/ 14,3	3323/ 17,6
<i>A. flavipes</i> (Bainier and R. Sartory) Thom and Church 1926	1363/ 6,8	1392/ 12,9	66/ 6,5	0/0	6496/ 21,9	2500/ 14,3	3161/ 23,5
* <i>A. flavus</i> Link 1809	318/ 6,8	1446/ 19,4	1216/ 9,7	2445/ 13,6	934/ 12,5	1207/ 12,1	4823/ 23,5
* <i>A. fumigatus</i> Fresen. 1863	1818/ 29,5	8857/ 22,6	18067/ 41,9	11560/ 50,0	7519/ 34,4	10244/ 26,2	6147/ 23,5
<i>A. granulosus</i> Raper and Thom 1944	2920/ 18,2	8178/ 22,6	0/0	0/0	660/ 3,1	390/ 11,9	0/0
* <i>A. niger</i> Tiegh. 1867	1034/ 4,5	35/ 3,2	2506/ 22,6	1583/ 13,6	2763/ 18,8	1452/ 4,8	5632/ 44,1
* <i>A. ochraceus</i> G. Wilh. 1877	454/ 6,8	1696/ 9,7	2506/ 22,6	1606/ 4,5	1433/ 18,8	353/ 4,8	7352/ 42,9
* <i>A. versicolor</i> (Vuill.) Tirab. 1908	181/ 6,8	3571/ 6,5	383/ 3,2	85/ 4,5	450/ 9,4	0/0	0/0
* <i>A. unguis</i> (Émile-Weill and L. Gaudin) Thom and Raper 1934	0/0	105/ 3,2	266/ 3,2	0/0	0/0	0/0	0/0
* <i>A. ustus</i> (Bainier) Thom and Church 1926	1363/ 20,5	0/0	0/0	0/0	4788/ 25,0	1487/ 11,9	0/0
<i>Penicillium</i> <i>aurantiogriseum</i> Dierckx 1901	68/ 6,8	0/0	1216/ 9,7	200/ 6,8	31/ 3,1	390/ 7,1	3657/ 26,5
* <i>P. brevicompac-</i> <i>tum</i> Dierckx 1901	45/ 2,3	71/ 3,2	100/ 3,2	165/ 9,1	134/ 3,1	195/ 4,8	676/ 11,4
* <i>P. citrinum</i> Thom 1910	181/ 6,8	4958/ 42,9	1166/ 19,4	85/ 2,3	835/ 12,5	3195/ 16,7	779/ 14,6
* <i>P. commune</i> Thom 1910	1022/ 13,6	4053/ 19,4	167/ 19,4	2370/ 15,9	1020/ 21,9	5085/ 23,8	2441/ 26,5
* <i>P. decumbens</i> Thom 1910	181/ 6,8	178/ 3,6	300/ 6,5	1216/ 18,2	125/ 6,3	2207/ 16,7	1029/ 2,9

Окончание табл. 2 [Table 2 (end)]

Дата [Date]	08.2008	10.2008	07.2009	10.2009	06.2010	07.2011	09.2012
Вид [Species]	Среднее число колониеобразующих единиц (N_{cp} , КОЕ/л) / частота встречаемости (ЧВ, %) [Average number of colony forming units (N_m , CFU/L) / percentage of occurrence (PO, %)]						
<i>P. expansum</i> Link 1809	1058/1,4	10960/42,9	6900/16,1	3352/25,0	4734/15,6	2634/11,9	2014/26,5
* <i>P. simplicissimum</i> (Oudem.) Thom 1930	1522/20,5	1584/9,7	133/3,2	1152/11,4	1020/9,4	1280/21,4	926/17,6
<i>Penicillium</i> sp.	1113/6,8	1250/6,5	300/3,2	105/6,8	0/0	158/4,8	117/5,9
<i>Talaromyces verruculosus</i> (Peyronel) Samson, N. Yilmaz, Frisvad and Seifert 2011	80/4,5	0/0	0/0	42/2,3	468/3,1	0/0	0/0
Eurotiomycetes – Onygenales – Onygenaceae							
<i>Chrysosporium inops</i> J.W. Carmich. 1962	23/2,3	767/9,7	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
Eurotiomycetes – Onygenales – Ajellomycetaceae							
<i>Emergomyces pasteurianus</i> (Drouhet, E. Guého & Gori) Dukik, Sigler and de Hoog 2017	0/0	1928/3,2	1833/9,7	770/9,1	1552/18,8	768/9,5	2126/38,2
Saccharomycetes – Saccharomycetales – Incertae sedis							
<i>Candida dubliniensis</i> D.J. Sullivan, Western., K.A. Haynes, Dés.E. Benn. and D.C. Coleman 1995	909/11,4	0/0	1500/3,2	21/2,3	6478/28,1	0/0	0/0

Примечание. * – наземные виды микромицетов с доказанной способностью функционировать в морской среде (по Jones et al., 2015); $\approx$ *Halosphaeriopsis mediosetigera*, облигатно морской микромицет.

[Note. * Terrestrial micromycete species with the proven ability to function in the marine environment (Jones et al. 2015); $\approx$ *Halosphaeriopsis mediosetigera*, obligate marine micromycete].

Частота встречаемости по горизонтам воды различалась у следующих видов: *Aspergillus ochraceus* (поверхностный слой – 10,1%, придонный – 19,4%) и *P. expansum* (16,3 и 25,6%) ($p < 0,05$). Только летом обнаружены *Aspergillus caesiellus* (2,0%) и *A. ustus* (15,0%), преобладали: *Penicillium atrogriseum* (15,7%, осень – 3,6%), *Candida dubliniensis* (10,2 и 1,0%), *Aspergillus alliaceus* (7,8 и 0,9%). Только осенью отмечен вид *Cladosporium herbarum* (10,8%), доминировали: *P. expansum* (31,5%, лето – 12,9%), *Cladosporium macrocarpum* (24,3 и 13,6%), *Aspergillus flavus* (18,9 и 9,5%), *Al. dianthicola* (12,6 и 5,4%), *Lasionectriopsis spinosa* (11,7 и 3,4%), *Chaetomium* sp. (4,5 и 0,7%), *Stemphium* sp. (10,8 и 1,3%) ($p \leq 0,05$).

На графиках таксономических индексов символы, соответствующие микокомплексам, размещены относительно границ 95% вероятностной воронки, пунктирная линия в её центре – средние значения индексов, рассчитанных для списка видов грибов пелагиали всего Чёрного моря. Для микобиоты ОР среднее ожидаемое значение индекса $\Delta^+ = 55,5$ (рис. 2, *A*), что значительно меньше, чем для моря в целом, поэтому символ расположен под нижней границей воронки. Низкое значение индекса обусловлено отсутствием представителей отделов Zygomycota, Basidiomycota, Oomycota, Bigyra в видовом составе грибов ОР [13], а также большой долей поливидовых ветвей в иерархическом древе, что понижает вертикальную выравненность структуры сообщества. Для микобиоты ОР символ индекса $\Lambda^+ = 524,8$ (рис. 2, *B*) находится над верхней границей доверительной воронки. Доминирование поливидовых ветвей в составе сообщества способствует росту общей вариабельности таксономической структуры (зеркальное отображение значения индекса Λ^+).

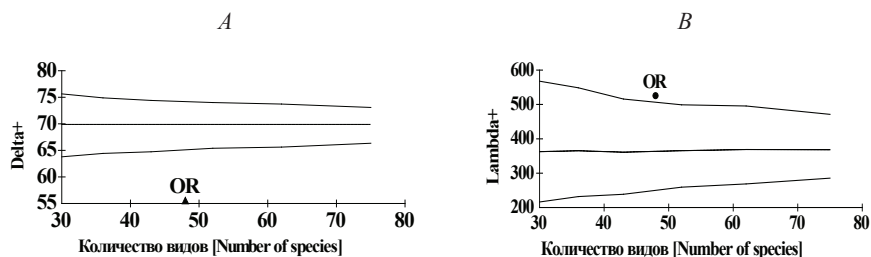


Рис. 2. Значения индексов таксономической отличительности Δ^+ (A) и его вариабельности Λ^+ (B) для микобиоты Одесского региона в целом
[Fig. 2. Average taxonomical distinctness Δ^+ (A) and its variability Λ^+ (B) for the mycobiota of Odessa region as a whole]

Для всех микокомплексов станций ОР значения индекса Δ^+ также намного ниже среднего ожидаемого (рис. 3, *A*), поэтому на графике символы значений индексов расположены под нижней границей вероятностной воронки. Наименьшие значения индексов отмечены для микокомплексов на станциях 23, 27, 15 (43,7–47,5), в видовых композициях которых преобладали представители семейства Aspergillaceae (от 66,7 до 72,2%), а несколько других более высоких таксономических рангов представлены одним или немногими видами.

Для всех микокомплексов станций ОР значения индекса Λ^+ превышают среднее, и их символы находятся над пунктирной линией, а некоторые из них и над верхней границей воронки (рис. 3, *B*). Наибольшие значения индекса Λ^+ отмечены для комплексов на станциях 23, 27 и 15 (616,9–660,5).

Минимальное количество видов обнаружено на ст. 1 и 42 (по 15), но и в этом случае 80,0% видового состава грибов принадлежали к поливидовым ро-

дам. Следовательно, в микокомплексах всех станций сохранялось доминирование представителей поливидовых родов независимо от количества видов.

Анализ таксономического разнообразия показывает, что структура микобиоты пелагиали ОР значительно проще, чем моря, это выражено в небольшом количестве видов и доминировании политаксонных ветвей в составе комплексов. Как правило, такая структура сообществ формируется в условиях постоянного воздействия неблагоприятных факторов среды, включая загрязнение [10].

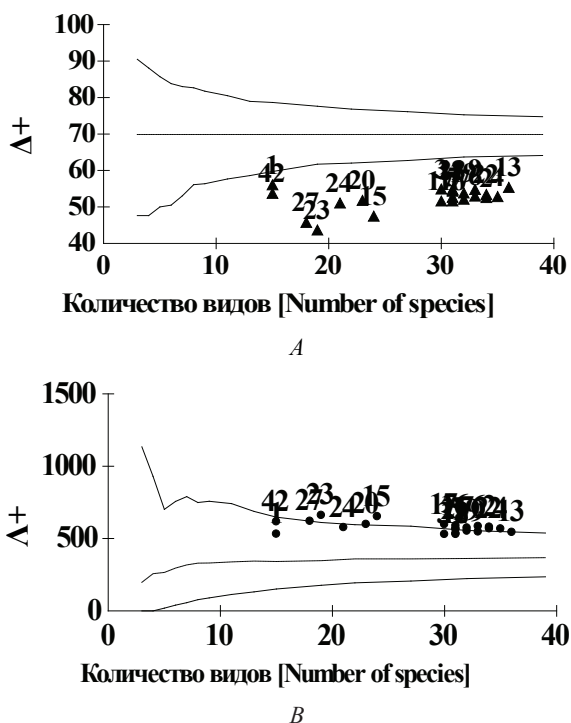


Рис. 3. Значения индексов $\Delta+$ (A) и $\Delta+$ (B) для микокомплексов на каждой из исследованных станций Одесского региона
[Fig. 3. Average taxonomical distinctness $\Delta+$ (A) and its variability $\Delta+$ (B) for the fungal complexes from each station of the marine area of Odessa region]

Сходство видовой структуры комплексов соответствовало: между горизонтами воды – 98,0%; между сезонами – 95,8%; по датам отбора проб – от 63,6 (10.2008 г. ↔ 10.2009 г.) до 88,0% (10.2009 г. ↔ 06.2012 г.). Сходство численной структуры микокомплексов составляло: между горизонтами 82,9%; между сезонами – 75,8%; по датам отбора проб – от 43,5 (08.2008 г. ↔ 09.2012 г.) до 65,7% (07.2009 г. ↔ 06.2010 г.).

Единственный случай различия структуры, близкий к статистически значимому, выявлен между комплексами 10.2008 г. и 09.2012 г. ($R = 0,487$,

уровень значимости 0,1%). Осенью 2008 г.: число видов – 27, среднее число колоний – 90761 ± 55368 , медиана – 92500 КОЕ/л. Осенью 2012 г.: число видов – 38, среднее число колоний – 102357 ± 78251 , медиана – 94000 КОЕ/л. В составе комплексов выявлено 17 общих видов, число КОЕ некоторых из них различалась в 6 раз. Сходство видового состава комплексов – 59,0%, численной структуры – 37,9%. Также в этот период (10.2008 г. и 09.2012 г.) отмечены статистически значимые различия структуры микокомплексов придонного горизонта воды ($R = 0,523$). В 2008 г.: число видов – 19, среднее число КОЕ – 95918 ± 53671 , медиана – 93025 КОЕ/л. В 2012 г.: число видов – 38, среднее число КОЕ – 97370 ± 37019 , медиана – 94500 КОЕ/л. В видовом составе присутствовали 17 общих видов, число колоний некоторых из них отличалось в 28 раз. Сходство видового состава микокомплексов – 56,0%, численной структуры – 37,7%.

В Одесском регионе снижение концентраций загрязняющих веществ наблюдают с 2004 г. В 2005–2010 гг. средние значения ионов металлов были в пределах ПДК для морских водоемов, согласно нормативам качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения [16, 17]. Превышение ПДК по нефтепродуктам отмечали только на станциях, расположенных вблизи источников загрязнения [18].

В течение периода исследования статистически значимо изменялись параметры таких абиотических факторов, как Т, S‰, O₂, БПК₅ и концентрация нефтепродуктов ($p \leq 0,005$). По данным биотической и абиотической матриц сходства вычислены коэффициенты ранговой корреляции Спирмана и Кендалла. Выявлено отсутствие статистической значимой связи между рассматриваемыми абиотическими параметрами и числом КОЕ микромицетов в различных вариантах: горизонтом воды, сезоном, датой отбора проб, местоположением станции. Ранее установлено, что на развитие микромицетов оказывают воздействие концентрации общего азота, нитратного азота (угнетает рост численности), а также общего фосфора (способствует росту численности) [15]. Мы не располагаем исходными данными по содержанию биогенных веществ в воде ОР, поэтому анализ структуры микокомплексов сделан по величине индекса трофического статуса (TRIX) на основании работ коллег, по той же схеме станций [16, 19]. Индекс TRIX вычислен по значениям хлорофилла, отклонению от 100% насыщения воды кислородом, общему фосфору и сумме минеральных форм азота. За период исследования 1992–2010 гг. статистически значимых межгодовых и межсезонных изменений трофического статуса Одесского региона не зафиксировано. Регион характеризуется как переходная зона от мезотрофной (МЗ) к эвтрофной (ЭЗ) при среднем многолетнем значении TRIX=5,3 (значения индекса 4–5 – средний трофический уровень; 5–6 – высокий уровень, низкое качество воды) [16, 19]. По критерию кризисности экосистемы водоемов такой уровень трофности означает переход от пороговых изменений к необратимым [20].

Микологические данные сгруппировали согласно трофическому статусу слоя воды и номерам станций, выполненных по той же схеме. Исследовано 155 проб, взятых на станциях мезотрофной зоны, и 103 пробы эвтрофной. В поверхностном горизонте воды ст. 13 и 17 расположены в эвтрофной зоне, остальная акватория соответствует мезотрофному статусу. В придонном горизонте в ЭЗ расположены станции 3, 4, 5, 9, 12, 13, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 22, 23, 27. Летом в МЗ исследовано 89 проб, осенью – 64. В ЭЗ летом – 57 проб, осенью – 48. В структуре микокомплексов воды отличной трофности не выявлены статистически значимые различия по однофакторному анализу (горизонт, сезон, дата отбора проб, местоположение станции) и по двухфакторному анализу при разных сочетаниях показателей, перечисленных выше. В МЗ и ЭЗ также не выявлены виды грибов, частота встречаемости которых статистически значимо различалась ($p>0,1$). Сходство видовой структуры комплексов между зонами трофности – 99,0%; численной структуры – 86,0%.

В течение всего периода исследования численная и видовая структура микокомплексов оставалась относительно стабильной по районам с различными трофическими статусами, датам экспедиций, сезонам, горизонтам воды (табл. 3).

Таблица 3 [Table 3]

Характеристика структуры микокомплексов в пелагиали Одесского региона
[Characteristics of the structure of mycocomplexes in the water area of Odessa region]

Факторы [Factors]	Микоком- плексы [Mycocom- plexes]	Число проб воды [Number of water samples]	Коли- чество видов грибов [Number of fungal species]	$M \pm SD$ (Min – Max), CFU/L	Me числен- ности, КОЕ/л [Me number, CFU/L]
Мезотрофная зона [Mesotrophic]	Общий [General]	155	49	68613±67915 (2500–498000)	45510
	Поверхност- ный [Surface]	116	48	77149±74212 (2500–498000)	53860
	Придонный [Bottom]	39	46	46301±46068 (6000–197000)	27440
Эвтрофная зона [Eutrophic]	Общий [General]	103	50	93309±70203 (5500–345000)	78600
	Поверхност- ный [Surface]	13	31	130592±83064 (33000–284000)	108500
	Придонный [Bottom]	90	50	86590±64666 (5500–345000)	76750
08.2008	Общий [General]	44	39	25988±18405 (2500–77000)	21250
	Поверхност- ный [Surface]	22	29	25295±17508 (2500–77000)	22250
	Придонный [Bottom]	22	29	26681±19648 (5500–62500)	17750

Продолжение табл. 3 [Table 3 (cont.)]

Факторы [Factors]	Микоком- плексы [Mycocom- plexes]	Число проб воды [Number of water samples]	Коли- чество видов грибов [Number of fungal species]	$M \pm SD$ (Min – Max), CFU/L	Ме числен- ности, КОЕ/л [Me number, CFU/L]
10.2008	Общий [General]	31	27	90761±55368 (9000–197500)	92500
	Поверхност- ный [Surface]	16	26	85948±58353 (9000–174500)	65500
	Придонный [Bottom]	15	19	95917±53671 (19500–197500)	93025
07.2009	Общий [General]	31	35	89546±64654 (8000–284000)	79750
	Поверхност- ный [Surface]	15	28	91026±73844 (19300–284000)	57500
	Придонный [Bottom]	16	26	88066±56579 (8000–209000)	80500
10.2009	Общий [General]	44	39	60740±57792 (2710–281000)	55300
	Поверхност- ный [Surface]	22	31	71967±69670 (2710–281000)	61130
	Придонный [Bottom]	22	32	50411±43120 (6570–151100)	31000
06.2010	Общий [General]	32	41	81406±62162 (11730–250600)	69095
	Поверхност- ный [Surface]	16	32	103282±67135 (22280–250600)	84580
	Придонный [Bottom]	16	32	59530±49575 (11730–215800)	47795
07.2011	Общий [General]	42	33	116664±90346 (16000–345000)	100000
	Поверхност- ный [Surface]	22	31	109678±88506 (17500–260000)	66000
	Придонный [Bottom]	22	30	124000±93956 (16000–345000)	108000
09.2012	Общий [General]	34	38	102357±78251 (27000–498000)	94250
	Поверхност- ный [Surface]	17	33	107344±25674 (27000–498000)	94000
	Придонный [Bottom]	17	38	97370±37019 (37500–184500)	94500
Лето [Summer]	Общий [General]	147	49	76313±72449 (2500–345000)	47000
	Поверхност- ный [Surface]	74	45	79427±8625 (2500–284000)	45355
	Придонный [Bottom]	73	47	73157±8310 (5500–345000)	49500
Осень [Autumn]	Общий [General]	111	47	81331±66253 (2710–498000)	72000
	Поверхност- ный [Surface]	55	45	86715±80046 (2710–498000)	70830

Окончание табл. 3 [Table 3 (end)]

Факторы [Factors]	Микоком- плексы [Mycocom- plexes]	Число проб воды [Number of water samples]	Коли- чество видов грибов [Number of fungal species]	$M \pm SD$ (Min – Max), CFU/L	Me числен- ности, КОЕ/л [Me number, CFU/L]
	Придонный [Bottom]	56	44	76043±49301 (6570–197500)	73715
Поверхностный [Surface]	Общий [General]	129	48	82534±76523 (4000–498000)	57220
Придонный [Bottom]	Общий [General]	129	50	74410±62311 (5500–345000)	61500

Для понимания закономерности распределения видов грибов в зависимости от трофического статуса среды для 9 видов с наибольшей частотой встречаемости вычислили индексы индикаторной валентности (*IndVal*). В мезотрофной зоне наибольшие значения индекса получены для *A. fumigatus* (15,7%) и *Al. alternata* (12,8%), в эвтрофной зоне – для *A. clavatus* (21,2%), *P. expansum* (17,7%), *A. fumigatus* (16,5%), *P. citrinum* (16,1%), *Al. alternata* (14,0%), *Al. tenuissima* (12,5%). Частота встречаемости и число колоний *Al. alternata* и *A. fumigatus* одинаково высоки в МЗ и ЭЗ. К видам-индикаторам эвтрофного статуса морской воды можно отнести *A. clavatus*, *P. expansum*, *P. citrinum*, *Al. tenuissima*.

В условиях техногенной нагрузки доминируют комплексы грибов, устойчивые сразу к нескольким антропогенным факторам. Темноокрашенные гифомицеты (меланинсодержащие) характеризуются широким ареалом распространения, высоким уровнем спорообразования и резистентностью к ряду экстремальных воздействий: повышенной температуре, увеличенной концентрации тяжёлых металлов, городским местам обитания, коммунально-промышленным стокам. Пигменты меланины за счет способности к детоксикации ядовитых соединений способствуют повышению выживаемости организмов в экстремальных условиях [15, 21]. В Одесском регионе выявлено 13 (26,0%) меланинсодержащих индикаторов, 7 из них – представители рода *Alternaria*.

Наибольшее количество меланиновых грибов обнаружено на ст. 3, 4, 5, 6, 9, 12, 13, 16, 18, 19, 21, 22 (10–12 видов), которые расположены в районах ливневых стоков, очистных сооружений или непосредственной близости к ним. Наибольшие значения индекса валентности получены для *C. cladosporioides* (28,3%), *Al. alternata* (17,5%), *A. niger* (12,3%).

В поверхностном слое воды увеличение числа КОЕ меланинсодержащих грибов отмечено в октябре 2009 г. – 33,8% и в сентябре 2012 г. – 43,1%, от общего по акватории. Осенью 2009 г. на 6 станциях обнаружены *Al. alternata*, *Al. tenuissima*, *C. cladosporioides*, *S. chartarum*, доля КОЕ изменялась от 1,6 до 100%. Наибольшая заспоренность выявлена на ст. 2 (очистные сооруже-

ния Одесского припортового завода) и 18 (ливневый выпуск), соответственно 86,3–100,0%. Одновременно на этих станциях отмечены наибольшие за все время исследования концентрации растворённого Zn – 49,3 и 40,1 мкг/л.

В 2012 г. также выявлены виды *Al. chlamidospora*, *Al. cichorii*, *Al. dianthicola*, *Al. longipes*, *Al. porri*, *A. niger*, *C. herbarum*, *Stemphilium* sp. Меланинсодержащие грибы зарегистрированы на всех станциях в пределах 9,4–91,9%. На ст. 21 и 18 (ливневые выпуски) доля КОЕ тёмноокрашенных микромицетов менялась от 81,3 до 91,9%. На перечисленных станциях в составе комплексов присутствовали 2–4 индикатора, общий – *Al. tenuissima*. В придонном горизонте воды наибольшую концентрацию меланинсодержащих грибов наблюдали в октябре 2009 г. и в сентябре 2012 г. – по 36,0%. Осенью 2009 г. на 11 станциях выявили индикаторные виды, доля КОЕ которых составляла от 2,5 до 100,0%. Высокой заспоренностью (85,1–100,0%) отличались ст. 9, 22 (станции СБО) и 17 (ливневый выпуск). На этих точках обнаружено по одному виду: на ст. 9 – *S. chartarum*, на ст. 17 – *A. niger*, на ст. 22 – *C. cladosporioides*. В 2009 г. концентрация загрязняющих веществ не превышала ПДК. Осенью 2012 г. темноокрашенные микромицеты обнаружены на всех станциях ОР, наибольшая доля КОЕ зафиксирована на ст. 20 (53,3%) и 22 (71,2%, СБО «Южная»). Высокие значения индекса индикаторной валентности вычислены для *C. cladosporioides* (33,1%), *A. niger* (27,4%) и *Al. alternata* (25,3%). Выявлено, что значения индексов, полученных по станциям и датам экспедиций, имеют предельные значения для одних и тех же видов.

Согласно литературным данным, индикаторами нефтяного загрязнения являются: *Al. alternata*, *A. flavus*, *A. fumigatus*, *A. niger*, *A. versicolor*, *P. aurantiogriseum*, *P. citrinum*, *P. decumbens*, *P. simplicissimum* (18,0% видового состава ОР) [22–25]. На ст. 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 13, 16, 17, 18, 19, 22 выявили от 7 до 9 видов-индикаторов нефтяного загрязнения. На этих станциях наибольшие значения индексов *IndVal* получены для *Al. alternata* (14,95%) и *A. fumigatus* (23,2%).

Максимальная суммарная доля КОЕ грибов-индикаторов (70,0%), ука-зывающая на нефтяное загрязнение акватории, зарегистрирована в июле 2009 г. В этот период средняя концентрация нефтепродуктов по акватории составляла 0,14 мг/л (поверхностный горизонт – 0,15 мг/л, придонный – 0,12 мг/л). Однако в поверхностном слое воды на ст. 9 (СБО «Северная»), содержание нефтепродуктов отвечало 245 предельно допустимым концентрациям (ПДК, 12,25 мг/л), а на ст. 12 (Одесский порт) – 31 (1,57 мг/л) [18]. Доля КОЕ грибов-индикаторов на ст. 12 и 9, соответствовала 75,0 и 100,0%, по частоте встречаемости доминировал *A. niger*. В придонном слое на ст. 6, 12, 18, 17 зафиксирована 87,4–100,0% КОЕ индикаторов, доминировал *A. fumigatus*. В местах нефтяного загрязнения высокими значениями индексов индикаторной валентности отличались виды *A. fumigatus* (60,0%), *Al. alternata* (40,0%), *A. niger* (35,7%).

В целом по региону выявлено 44% грибов-индикаторов различных видов загрязнения.

Известно, что в антропогенно измененных условиях среды повышается число КОЕ и количество видов микроскопических грибов, обладающих способностью к токсинообразованию, так как микотоксины способствуют выживанию отдельных видов грибов при неблагоприятных условиях в конкуренции с другими видами микроорганизмов [26]. Например, увеличивается число видов рода *Aspergillus* [22, 26]. Данная закономерность характерна и для ОР. Так, род *Aspergillus* представлен 17 видами, а *A. flavus* и *A. fumigatus* относятся к III группе патогенных микроорганизмов (возбудители аспергиллеза). Токсины также вырабатывают представители родов *Alternaria*, *Cladosporium*, *Penicillium*, *Stachybotrys*.

Во время исследования в большей степени изменялись параметры воды: Т, S‰, O₂, БПК₅ и концентрация нефтепродуктов. Концентрации растворимых форм металлов не превышали ПДК. Тем не менее неизменно высокие значения индекса TRIХ свидетельствуют о загрязнении акватории соединениями фосфора и минеральными формами азота, постоянными источниками которых являются речные, ливневые и дренажные стоки, а также выпуски станций биологической очистки вод.

Установлено, что во всей акватории Одесского региона формируются комплексы грибов, которые обладают высоким сходством видовой и численной структуры, поэтому их можно рассматривать как единое сообщество.

Выводы

1. В ходе проведенных исследований идентифицировано 50 видов микромикетов из 19 родов, 12 семейств, 9 порядков, 4 классов, отдела Ascomycota. Преобладали роды *Aspergillus* (17), *Penicillium* (8) и *Alternaria* (7). Структура микобиоты пелагиали ОР значительно проще, чем моря, что выражается в небольшом видовом разнообразии и доминировании поливидовых ветвей в составе комплексов. Видовая и численная структура микокомплексов ОР оставалась относительно стабильной на протяжении всего периода исследования.

2. В изучаемый период не выявлено статистически значимой связи между рассматриваемыми абиотическими параметрами и числом КОЕ микромикетов по горизонтам воды, сезонам, датам отбора проб, местоположению станций и в водах эвтрофного и мезотрофного статуса.

3. Постоянные высокие значения индекса TRIХ свидетельствуют о загрязнении акватории соединениями фосфора и минеральными формами азота, источниками которых являются речные, ливневые и дренажные стоки, а также выпуски станций биологической очистки вод. Особенности структуры микобиоты пелагиали ОР (небольшое количество видов, большая сгруппированность видов по родам) подтверждают наличие неблагоприятных условий среды.

4. В регионе зафиксировано 44% грибов-индикаторов различных видов загрязнения. В районах поступления антропогенных стоков индекс индикаторной валентности (*IndVal*) имел наибольшие значения для меланин-содержащих грибов *Cladosporium cladosporioides*, *Al. alternata*, *A. niger*, устойчивых к нескольким неблагоприятным факторам. В эвтрофной зоне большие значения индексов получены для *A. clavatus*, *P. expansum*, *P. citrinum*, *Al. tenuissima*, а в местах локального нефтяного загрязнения – для *A. fumigatus*, *Al. alternata* и *A. niger*.

5. В условиях постоянного поступления природных и антропогенных береговых стоков в акваторию ОР, происходит формирование комплексов грибов, которые обладают высоким сходством видовой и численной структуры, поэтому их можно рассматривать как единое сообщество.

Автор выражает искреннюю признательность сотрудникам Института морской биологии Национальной академии наук Украины, г. Одесса: д-ру биол. наук, профессору, академику НАНУ [Ю. П. Зайцеву], д-ру биол. наук, профессору, член-корреспонденту НАНУ [Б. Г. Александрову], д-ру биол. наук, профессору Л. В. Воробьёвой и канд. биол. наук, заведующему отделом качества водной среды, С.Е. Дятлову, за неоценимую помощь в работе.

Литература

1. Jones E.B.G., Sakayaroj J., Suetrong S., Somrithipol S., Pang K.L. Classification of marine Ascomycota, anamorphic taxa and Basidiomycota // Fungal Diversity. 2009. Vol. 35. PP. 1–187.
2. Jones E.B.G., Suetrong S., Sakayaroj J., Bahkali A.H., Abdel-Wahab M.A., Boekhout T., Pang K.-L. Classification of marine Ascomycota, Basidiomycota, Blastocladiomycota and Chytridiomycota // Fungal Diversity. 2015. Vol. 73. PP. 1–72. doi: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13225-015-0339-4>
3. Pang K.-L., Overy D.P., Jones E.B.G., Calado M. Da.L., Burgaud G., Walker A.K., Johnson J.A., Kerr R.G., Cha H.-J., Bills G.F. 'Marine fungi' and 'marine-derived fungi' in natural product chemistry research: Toward a new consensual definition // Fungal Biology Reviews. 2016. Vol. 30, Issue 4. PP. 163–175. doi: [10.1016/j.fbr.2016.08.001](https://doi.org/10.1016/j.fbr.2016.08.001)
4. Одесский регион Черного моря: гидробиология пелагиали и бентали / Л.В. Воробьева, И.И. Кулакова, И.А. Синегуб, Л.Н. Полищук, Д.А. Нестерова, А.С. Бондаренко, А.А. Снигирева, А.А. Рыбалко, С.А. Кудренко, В.В. Портянко, Р.В. Мигас, Е.Е. Узун, И.В. Олефир; Под общ. ред. Б.Г. Александрова. Одесса : Астропринт, 2017. 324 с.
5. Методы экспериментальной микологии. Справочник / ред. В.И. Билай. Киев : Наукова думка, 1982. 550 с.
6. Билай В.И., Коваль Э.З. Аспергиллы. Определитель. Киев : Наукова думка, 1988. 202 с.
7. De Hoog G.S., Guarro J., Gene J., Figueras M.J. Atlas of clinical fungi. Utrecht: CBS; Spain.: Reus, 2000. 1126 p.
8. Index Fungorum [Electronic resource]. Available at: <http://www.indexfungorum.org/names/Names.asp> (accessed 15.02.–10.05.2020).
9. Clarke K.R., Warwick R.M. A further biodiversity index applicable to species lists: variation in taxonomic distinctness // Marine Ecology Progress Series. 2001. Ser. 216. PP. 265–278.
10. Clarke K.R., Gorley R.N., Somerfield P.J., Warwick R.M. Change In Marine Communities: An Approach to Statistical Analysis and Interpretation, 3rd edition PRIMER-E: Plymouth. 2014. 262 p.

11. Неврова Е.Л. Структурные основы региональных отличий таксономического разнообразия донных диатомовых (Bacillariophyta) Чёрного моря // Морской биологический журнал. 2016. Т. 1, № 1. С. 43–63.
12. Mouillot D., Gaillard S., Aliaume C., Verlaque M., Belsher T., Troussellier M., Do Chi T. Ability of taxonomic diversity indices to discriminate coastal lagoon environments based on macrophyte communities // Ecological Indicators. 2005. № 5 (1). PP. 1–17. doi: [10.1016/j.ecolind.2004.04.004](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2004.04.004)
13. Копытина Н.И. Водные микроскопические грибы Понто-Каспийского бассейна (чек-лист, синонимика) / ред. Л.И. Рябушко. Воронеж : Ковчег, 2018. 292 с. doi: [10.21072/978-5-6042082-0-5](https://doi.org/10.21072/978-5-6042082-0-5)
14. Прокопенко Е.В. Пауки (AraneI) урочища Грабовое (Пятихатский район Днепропетровской области) // Проблемы экологии и охраны природы техногенного региона. 2018. № 1–2. С. 63–70.
15. Терехова В.А. Микромицеты в экологической оценке водных и наземных экосистем. М. : Наука, 2007. 215 с.
16. Дятлов С.Е., Кошелев А.В., Петросян А.Г., Павлова Е.А., Секундяк Л.Ю. Интегральная оценка качества воды и донных отложений полигона «Одесский регион северо-западной части Чёрного моря» // Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Серія: Біологія. 2013. № 2 (55). С. 50–56.
17. Дятлов С.Е., Чепіжко О.В., Урдя В.О. Міжрічна мінливість вмісту важких металів у воді та донних відкладах полігону «Одеський регіон ПЗЧМ» // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2012. Вып. 26, т. 1. С. 257–269.
18. Доценко С.А., Подплетная Н.Ф., Савин П.Т. Динамика нефтяного загрязнения вод и донных осадков у берегов Одессы // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2011. Т. 1, вып. 25. С. 220–228.
19. Дятлов С.Е., Гончаров А.Ю., Богатова Ю.И. Трофический статус северо-западной части Черного моря // Вода: гигиена и экология. 2013. № 1 (1). С. 51–60.
20. Шабанов В.В., Маркин В.Н. Методика эколого-водохозяйственной оценки водных объектов. М. : ФГБОУ ВПО РГАУ МСХА им. К.А. Тимирязева, 2014. 162 с.
21. Микроорганизмы как агенты биомониторинга и биоремедиации загрязненных почв / Т.Я. Ашихмина, Л.И. Домрачева, Л.В. Кондакова, И.Г. Широких, А.А. Широких, А.И. Фокина, С.Г. Скугорева, Е.А. Горностаева, Е.С. Соловьёва, Е.В. Товстик, С.Ю. Огородникова, Ю.Н. Зыкова; Под общ. ред. Т.Я. Ашихминой, Л.И. Домрачевой. Киров : Науч. изд. ВятГУ, 2018. 254 с.
22. Донерьян Л.Г., Водянова М.А., Тарасова Ж.Е. Микроскопические почвенные грибы – организмы-биоиндикаторы нефтезагрязненных почв // Гигиена и санитария. 2016. № 95 (9). С. 891–894. doi: [10.18821/0016-9900-2016-95-9-891-894](https://doi.org/10.18821/0016-9900-2016-95-9-891-894)
23. Григориади А.С., Якупова А.Б., Амирова А.Р., Ерохина Н.И. Микологическая оценка почвы, загрязненной отходами производства нефтеперерабатывающей промышленности // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2011. Т. 13, № 5(2). С. 155–157.
24. Al-Dossary M.A., Abood S.A., Hamid T.AL-Saad. Biodegradation of Crude Oil Using *Aspergillus* species // Journal of Biology Agriculture and Healthcare. 2019. Vol. 9, № 4. PP. 60–64. doi: [10.7176/JBAH/9-4-09](https://doi.org/10.7176/JBAH/9-4-09)
25. Al-Nasrawi H. Biodegradation of Crude Oil by Fungi Isolated from Gulf of Mexico // Journal of Bioremediation & Biodegradation. 2012. Vol. 3, is. 4. 147. doi: [10.4172/2155-6199.1000147](https://doi.org/10.4172/2155-6199.1000147)

26. Марфенина О.Е. Антропогенная экология почвенных грибов. М. : «Медицина для всех». Национальная Академия Микологии, 2005. 196 с.

Поступила в редакцию 18.05.2020 г.; повторно 04.09.2020 г.;
принята 27.10.2020 г.; опубликована 29.12.2020 г.

Копытина Надежда Ивановна – канд. биол. наук, с.н.с. отдела аквакультуры и морской фармакологии, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Федеральный исследовательский центр “Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН”» (Россия, 299011, г. Севастополь, пр. Адмирала П.С. Нахимова, 2).

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-3201-9334>

E-mail: kopytina_n@mail.ru

Для цитирования: Копытина Н.И. Микобиота пелагиали Одесского региона северо-западной части Чёрного моря // Вестн. Том. гос. ун-та. Биология. 2020. № 52. С. 140–163. doi: [10.17223/19988591/52/8](https://doi.org/10.17223/19988591/52/8)

For citation: Kopytina NI. Mycobiota of the pelagic zone of Odessa region in the northwestern Black Sea. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya* = *Tomsk State University Journal of Biology*. 2020;52:140-163. doi: [10.17223/19988591/52/8](https://doi.org/10.17223/19988591/52/8) In Russian, English Summary

Nadezda I. Kopytina

A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russian Federation

Mycobiota of the pelagic zone of Odessa region in the northwestern Black Sea

Mycobiota of the marine area of Odessa region was studied (30°70'00"-31°00'00"N, 46°23'00"-46°60'00"E) (See Fig. 1). Hydrological and hydrochemical regimes of the marine area of Odessa region in the northwestern Black Sea are affected by the discharge of the Dnieper (93.4%) and the Southern Bug (5.7%) rivers, the permanent anthropogenic discharges of the cities of Odessa, Chernomorsk (Ilyichyovsk), Yuzhnyi and their ports, shipping, dredging, and the open sea. The aim of this work was to study the species composition, the number of colony forming units (CFU) and the dynamics of the spatiotemporal distribution of reared microfungi as a function of abiotic factors and the trophic level of seawater in this area. Water samples were taken in summer and autumn 2008-2012 in the surface (1 m depth) and bottom (7-24 m depth) layers. The samples were taken, at least, in three replicates. The results of processing 258 samples from 22 stations were analyzed. The effects of environmental factors (water temperature, salinity, dissolved oxygen, five-day biochemical oxygen demand, petroleum hydrocarbons, dissolved metals Cu, Zn, Ni, Cd and suspended particulate matter) were studied in 140 samples (See Table 1). Micromycetes were isolated on Czapek's medium prepared in sea water. 1 ml of sample water was added to a Petri dish and filled with medium cooled to approximately 36-40 °C. To suppress the growth of bacteria, 0.03% chloramphenicol was added to the medium (by volume of the medium). Cultivation was carried out at a temperature of 18-20 °C for 2-8 weeks. Micromycetes were identified by morphological and cultural characteristics according to Vera Bilay and Eleonora Koval' (1988) and GS De Hoogh et al. (2000). Nomenclature, and taxonomy of fungi correspond to The Index Fungorum database. The ecological analysis of mycocomplexes was carried out according to: species composition, the number of species in complexes, frequency of occurrence of a species and the number of colony-forming units (CFU / L).

In this research, 50 fungal species of 19 genera, 14 families, 9 orders, 4 classes of the division Ascomycota were revealed. Fungal taxa from Odessa region were grouped

into families. The family Aspergillaceae included the genera *Aspergillus*, *Penicillium* and *Talaromyces* (27 species); the family Pleosporaceae included the genera *Alternaria* and *Stemphylium* (8); and there were 3 species of the genus *Cladosporium* from the family Cladosporiaceae. In total, 76.0% of species found were from the three families (See Table 2). Using Average Taxonomic Distinctness index, AvTD (Δ^+), and Variation in Taxonomic Distinctness index, VarTD (Δ^+), features of the taxonomic diversity of mycocomplexes were revealed. These indices were calculated from a matrix of micromycete species from the region under study combined with the fungi list (master list, 219 species) of the Black Sea pelagic zone. In the analysis, the taxonomy levels from Species to Kingdom were included. For the indices Δ^+ and Δ^+ , 95% probability funnel graphs were plotted, and their mean expected values were calculated for mycobiota of the region under study and for mycocomplexes from each station. It was found out that the mean expected values of the index Δ^+ for mycobiota of the marine area of Odessa region and the stations are considerably lower, and index Δ^+ values are higher than those for the sea as a whole (See Fig. 2 and 3).

According to literature sources, no significant seasonal and inter-annual changes in the trophic status of the region occurred in 1992-2010. It was transitional between mesotrophic and eutrophic. The long-term mean TRIX value was 5.3 (4-5: medium trophic level; 5-6: high trophic level and poor water quality). In the species composition and numerical structure of mycocomplexes of the mesotrophic and eutrophic zones, no significant differences were detected. Over the entire period of this research, a relatively uniform distribution of the mean abundance of fungi over the area and depth was noted (See Table 3). No significant correlation was found between abiotic parameters under study and micromycete abundance over the horizons, seasons, sampling dates, location of stations, as well as mesotrophic and eutrophic zones.

In the region, 44% of fungi-indicators of different kinds of pollution were registered. In the areas of stormwater runoff and wastewater treatment plant discharges, the indicator value (*IndVal*) was the largest for melanin-containing fungi *Cladosporium cladosporioides* (28.3%), *Alternaria alternata* (17.5%), and *Aspergillus niger* (12.3%), which are resistant to several adverse environmental factors. In the eutrophic zone, large values of the indices were found in *Aspergillus clavatus* (21.2%), *Penicillium expansum* (17.7%), *Penicillium citrinum* (16.1%), *Al. tenuissima* (12.5%), and in *A. fumigatus* (60%), *Al. alternata* (40%) and *A. niger* (35.7%) in places of local oil pollution. It is established that in the entire marine area of Odessa region, the formed mycocomplexes have a high similarity in species and numerical structure, and therefore, they can be considered as a single community.

The paper contains 3 Figures, 3 Tables and 26 References.

Key words: *Alternaria*; *Aspergillus*; *Penicillium*; taxonomic diversity of marine fungi; fungi-indicators.

Funding: The work was performed as a part of the state assignment of A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas, Russian Academy of Sciences (Project No AAAA-A18-118021350003-6).

Acknowledgments: The author expresses her sincere gratitude to the staff of the Institute of Marine Biology of the National Academy of Sciences of Ukraine (Odessa): Professor Yuvhenaly P Zaitsev Academician of NASU; Professor Boris G Aleksandrov, Dr. Sci. (Biol.), Corresponding Member of NASU; Professor Lyudmila V Vorobyova, Dr. Sci. (Biol.); Sergey E Dyatlov, Cand. Sci. (Biol.), Head of the Department of Aquatic Environment Quality, for their valuable help in the research.

References

1. Jones EBG, Sakayaroj J, Suetrong S, Somrithipol S, Pang KL. Classification of marine Ascomycota, anamorphic taxa and Basidiomycota. *Fungal Diversity*. 2009;35:1-187.
2. Jones EBG, Suetrong S, Sakayaroj J, Bahkali AH, Abdel-Wahab MA, Boekhout T, Pang K-L. Classification of marine Ascomycota, Basidiomycota, Blastocladiomycota and Chytridiomycota. *Fungal Diversity*. 2015;73:1-72. doi: [10.1007/s13225-015-0339-4](https://doi.org/10.1007/s13225-015-0339-4)
3. Pang K-L, Overy DP, Jones EBG, Calado MDaL, Burgaud G, Walker AK, Johnson JA, Kerr RG, Cha H-J, Bills GF. 'Marine fungi' and 'marine-derived fungi' in natural product chemistry research: Toward a new consensual definition. *Fungal Biology Reviews*. 2016;30(4):163-175. doi: [10.1016/j.fbr.2016.08.001](https://doi.org/10.1016/j.fbr.2016.08.001)
4. *Odessa region of the Black Sea: Hydrobiology of pelagic and benthic areas*. LV Vorob'eva, II Kulakova, IA Sinegub, LN Polishchuk, DA Nesterova, AS Bondarenko, AA Snigireva, AA Rybalko, SA Kudrenko, VV Portyanko, RV Migas, EE Uzun, IV Olefir and BG Aleksandrov, editors. Odessa: Astroprint Publ.; 2017. 324 p. In Russian
5. *Metody eksperimental'noy mikologii. Spravochnik* [Methods of experimental mycology. Handbook]. VI Bilay, editor. Kiev: Naukova dumka Publ.; 1982. 550 p. In Russian
6. Bilay VI, Koval' EZ. *Aspergilly. Opredelitel'* [Identification guide of the genus *Aspergillus*]. Kiev: Naukova dumka Publ.; 1988. 202 p. In Russian
7. De Hoog GS, Guarro J, Gene J, Figueras MJ. Atlas of clinical fungi. 2nd ed. Utrecht, Spain: Reus Publ.; 2000. 1126 p.
8. *Index Fungorum* [Electronic resource]. Available at: <http://www.indexfungorum.org/names/Names.asp> (accessed 15.02.-10.05.2020).
9. Clarke KR, Warwick RM. A further biodiversity index applicable to species lists: Variation in taxonomic distinctness. *Marine Ecology Progress Series*. 2001;216:265-278.
10. Clarke KR, Gorley RN, Somerfield PJ, Warwickb RM. Change in marine communities: An approach to statistical analysis and interpretation. 3rd ed. Plymouth: PRIMER-E; 2014. 262 p.
11. Nevrova EL. The structural basis of regional differences in taxonomic diversity of benthic diatoms (Bacillariophyta) of the Black Sea. *Morskoy biologicheskiy zhurnal = Marine Biological J*. 2016;1(1):43-63. In Russian, English Summary
12. Mouillot D, Gaillard S, Aliaume C, Verlaque M, Belshe T, Troussellier M, Do Chi T. Ability of taxonomic diversity indices to discriminate coastal lagoon environments based on macrophyte communities. *Ecological Indicators*. 2005;5(1):1-17. doi: [10.1016/j.ecolind.2004.04.004](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2004.04.004)
13. Kopytina NI. Vodnye mikroskopicheskie griby Ponto-Kaspiyskogo basseyna (chek-list, sinonimika) [Microfungi of the Ponto-Caspian basin (check-list and synonymy)]. Ryabushko LI, editor. Voronezh: OOO Kovcheg Publ.; 2018. 292 p. doi: [10.21072/978-5-6042082-0-5](https://doi.org/10.21072/978-5-6042082-0-5) In Russian, English Summary
14. Prokopenko EV. Spiders (Aranei) in Grabove ravine (Piatikhatkinskiy district, Dnepropetrovsk region). *Problemy ekologii i okhrany prirody tekhnogenno regiona = Problems of Ecology and Nature Protection of Technogenic Region*. 2018;1-2:63-70. In Russian, English Summary
15. Terekhova VA. Micromycetes in ecological evaluation of aquatic and terrestrial ecosystems. Moscow: Nauka Publ.; 2007. 215 p. In Russian, English Summary
16. Dyatlov SE, Koshelev AV, Petrosyan AG, Pavlova EA, Sekundyak LYu. Water quality and bottom sediments integrated assessment of the polygon "Odessa region of the northwestern part of the Black sea". *Naukovi zapiski Ternopil's'kogo natsional'nogo pedagogichnogo universitetu imeni Volodimira Gnatyuka. Seriya: Biologiya* = *Scientific Issues Ternopil Volodymyr Hnatiuk National Pedagogical University Series: Biology*. 2013;2 (55):50-56. In Russian

17. Dyatlov SE, Chepizhko OV, Urdya VO. Mizhrichna minlivist' vmistu vazhkikh metaliv u vodi ta donnikh vidkladakh poligonu "Odes'kiy region PZChM" [Interrannual variability of the viscous metals content in water and bottom deposits of the landfill]. *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoy i shel'fovoy zon i kompleksnoe ispol'zovanie resursov shel'fa* [Ecological safety of coastal and shelf zones and comprehensive use of shelf resources]. 2012;26(1):257-269. In Ukrainian
18. Dotsenko SA, Podpletnaya NF, Savin PT. Dinamika neftyanogo zagryazneniya vod i donnykh osadkov u beregov Odessy [Dynamics of oil pollution of waters and bottom sediments off the coast of Odessa]. *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoy i shel'fovoy zon i kompleksnoe ispol'zovanie resursov shel'fa* [Ecological safety of coastal and shelf zones and complex use of resources]. 2011;1(25):220-228. In Russian, English Summary
19. Dyatlov SE, Goncharov AYu, Bogatova YuI. Troficheskiy status severo-zapadnoy chasti Chernogo morya [The trophic status of the northwest part of Black sea]. *Voda: gigiena i ekologiya = Water: Hygiene and Ecology*. 2013;1(1):51-60. In Russian
20. Shabanov VV, Markin VN. Metodika ekologo-vodokhozyaystvennoy otsenki vodnykh ob'ektov [Methodology for environmental and water management assessment of water bodies]. Moscow: FGBOU VPO RGAU MSKhA im. KA Timiryazeva Publ.; 2014. 162 p. In Russian
21. *Mikroorganizmy kak agenty biomonitoringa i bioremediatsii zagryaznennykh pochv* [Microorganisms as agents of biomonitoring and bioremediation of polluted soils]. Ashikhmina TYa, Domracheva LI, Kondakova LV, Shirokikh IG, Shirokikh AA, Fokina AI, Skugoreva SG, Gornostaeva EA, Solov'eva ES, Tovstik EV, Ogorodnikova SYu and Zykova YuN, editors; Ashikhmina TYa and Domracheva LI, editors in-chiefs. Kirov: Nauch. izd. VyatGU Publ.; 2018. 254 p. In Russian
22. Doner'yan LG, Vodyanova MA, Tarasova ZhE. Microscopic soil fungi - bioindicators organisms contaminated soil. *Gigiena i sanitariya = Hygiene & Sanitation*. 2016;95(9):891-894. doi: [10.18821/0016-9900-2016-95-9-891-894](https://doi.org/10.18821/0016-9900-2016-95-9-891-894) In Russian, English Summary
23. Grigoriadi AS, Yakupova AB, Amirova AR, Erokhina NI. Mikologicheskaya otsenka pochvy, zagryaznennoy otkhodami proizvodstva neftepererabatyvayushchey promyshlennosti [Mycological assessment of soil, polluted by waste products of petroleum industry]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*. 2011;13(5-2):155-157. In Russian
24. Al-Dossary MA, Abood SA, AL-Saad Hamid T. Biodegradation of Crude Oil Using *Aspergillus* species. *J Biology, Agriculture and Healthcare*. 2019;9(4):60-64. doi: [10.7176/JBAH/9-4-09](https://doi.org/10.7176/JBAH/9-4-09)
25. Al-Nasrawi H. Biodegradation of crude oil by fungi isolated from Gulf of Mexico. *J Bioremediation & Biodegradation*. 2012;3(4):147. doi: [10.4172/2155-6199.1000147](https://doi.org/10.4172/2155-6199.1000147)
26. Marfenina OE. The anthropogenic ecology of soil fungi. Moscow: «Meditcina dlya vseh» Natsional'naya Akademiya Mikologii. Publ.; 2005. 196 p. In Russian, English Summary

Received 18 May 2020; Revised 04 September 2020;
Accepted 27 October 2020; Published 29 December 2020

Author info:

Kopytina Nadezhda I, Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher, Department of Aquaculture and Marine Pharmacology, Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas, Russian Academy of Sciences (IBSS) 2, Nakhimov Ave., Sevastopol 299011, Russian Federation.

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3201-9334>

E-mail: kopytina_n@mail.ru