

Особенности распространения эпифитных лишайников на коре тополя Максимовича в городе Южно-Сахалинск и его окрестностях

© 2021 В. В. Каганов^{*1,2}, А. В. Кордюков^{*1}, А. К. Ежкин¹

¹Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия

²Сахалинский филиал Ботанического сада-института ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия

*E-mail: vladimirkaganov@mail.ru; a.kordyukov@imgg.ru

Резюме. Приводятся результаты исследования эпифитных лишайников как биоиндикаторов загрязнения атмосферы в городе Южно-Сахалинск, а также в его окрестностях в местах естественного произрастания тополя. В качестве субстрата выбран тополь Максимовича, как наиболее распространенный форофит в озеленении города. Всего на коре тополя Максимовича на 15 площадках в районе исследования зарегистрировано 47 видов эпифитных лишайников. Оценивали видовой состав, встречаемость лишайников, разнообразие, чувствительность к загрязнению, токсифобность. По результатам кластерного анализа выделены 3 кластера, отражающие степень антропогенного воздействия на эпифитные лишайники. В зависимости от приуроченности к этим кластерам выявлены 4 группы лишайников по степени чувствительности к антропогенному воздействию.

Ключевые слова: лишеноиндикация, биомониторинг, городская среда, антропогенное воздействие

Distribution features of epiphytic lichens on *Populus maximowiczii* in Yuzhno-Sakhalinsk city and its suburbs

Vladimir V. Kaganov^{*1,2}, Alexander V. Kordyukov^{*1}, Alexander K. Ezhkin¹

¹Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

²Sakhalin Branch of the Botanical Garden-Institute, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

*E-mail: vladimirkaganov@mail.ru; a.kordyukov@imgg.ru

Abstract. The results of research of epiphytic lichens as bioindicators of the atmosphere pollution in Yuzhno-Sakhalinsk city and its suburbs are reported. *Populus maximowiczii* was chosen as the most common tree species in the plantings of the city as a lichen substrate. Control sites was chosen in natural habitats of *Populus maximowiczii* in surroundings of the city. In total, 47 lichen species were registered on bark of *Populus maximowiczii* on all sites. Three clusters of anthropogenic influence on lichens were defined by the results of the cluster analysis of 15 stations where species composition and occurrence frequency were registered. Four groups of lichen sensitivity to anthropogenic influence were identified according to confinement to these three clusters. The analysis of species distribution by the degree of sensitivity was made for each site.

Keywords: lichenindication, biomonitoring, urban zone, anthropogenic impact

Для цитирования: Каганов В.В., Кордюков А.В., Ежкин А.К. Особенности распространения эпифитных лишайников на коре тополя Максимовича в городе Южно-Сахалинск и его окрестностях. *Геосистемы переходных зон*, 2021, т. 5, № 4, с. 428–438.

<https://doi.org/10.30730/gtr.2021.5.4.428-438>

For citation: Kaganov V.V., Kordyukov A.V., Ezhkin A.K. Distribution features of epiphytic lichens on *Populus maximowiczii* in Yuzhno-Sakhalinsk city and its suburbs. *Geosistemy perekhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2021, vol. 5, no. 4, pp. 428–438. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2021.5.4.428-438>

Введение

Эпифитные лишайники – одни из наиболее известных биологических индикаторов, оценка состояния которых используется при мониторинге окружающей среды и деградации экосистем. Большой опыт применения эпифитных лишайников накоплен в биомониторинге урбанизированных территорий [Бязров, 2002; Ерофеева, Сергеева, 2014].

Одно из наиболее распространенных деревьев в посадках г. Южно-Сахалинск – тополь Максимовича (*Populus maximowiczii* A. Henri). Он массово применялся в озеленении города с середины прошлого века. Дикорастущий тополь Максимовича формирует по долинам рек на Сахалине чистые тополевики, ивово-тополевые, тополево-чозениевые или другие смешанные леса [Сабилов, 2017; Корзников, Ежкин, 2019]. Его распространенность в естественных и искусственных природных ландшафтах дает хорошую возможность для оценки и сравнения видового состава лишайников-эпифитов на участках с разной антропогенной нагрузкой, что служит одним из главных условий для проведения лишайниковых индикаторных исследований [Бязров, 2002]. Возможность использования эпифитных лишайников в качестве индикаторов состояния окружающей среды определила цель настоящей работы – определить видовой состав и встречаемость лишайников, обитающих на коре тополя Максимовича в городе Южно-Сахалинск и его окрестностях, выявить особенности их распространения в зависимости от степени антропогенной нагрузки.

Географическая и климатическая характеристика района исследований

Исследования проходили в черте города Южно-Сахалинск и его окрестностях – в долинах рек Рогатка и Красносельская, а также на удаленном участке – в долине р. Белая, близ с. Сокол Долинского района.

Столица областного центра расположена на юго-востоке о. Сахалин в центральной части Сусунайской долины, вытянутой в меридиональном направлении, между Сусунайским и Мицульским хребтами.

Район относится к Южно-Сахалинской климатической области, которая характеризуется влажным муссонным климатом, значительным (около 860 мм/год) количеством осадков, теплыми южными ветрами летом и холодными северными и северо-западными

ветрами зимой. Среднегодовая температура 2–3 °С со средней минимальной температурой в январе –13.5 °С и средней максимальной температурой в августе +17.2 °С. Значительная облачность и частые туманы формируют прохладный и влажный характер климата [Земцова, 1968].

Климатические условия местности и особенности географического положения (расположение города в зоне пониженного рельефа в окружении горных хребтов, частые атмосферные инверсии) препятствуют рассеиванию и выносу вредных веществ (взвешенные вещества, формальдегид, SO₂ и NO₂, тяжелые металлы и др.), поступающих в атмосферу от различных источников (автомобильного и железнодорожного транспорта, твердотопливных котельных и т.д.) [Доклад... , 2021]. В результате образуется плотный слой смога, который в течение долгого времени находится в нижних слоях атмосферы. В связи с длительным и непрерывным загрязнением города, а также антропогенной трансформацией естественных участков растительности в окрестностях города, для лишайнобиоты города характерен набор видов, устойчивых к атмосферному загрязнению [Ежкин, Галанина, 2016].

Материалы и методы исследования

Исследование затрагивает особенности распределения лишайников-эпифитов на стволах тополя Максимовича на участках с потенциально различной антропогенной нагрузкой – центр города, скверы, часть городского парка, удаленные территории. Всего было обследовано 15 учетных площадок (рис. 1), на которых фиксировали видовой состав лишайников и их встречаемость на стволах тополя. Отбор площадок проводили по принципу наличия не менее 10 модельных деревьев тополя на участке. Модельные деревья были выбраны одинакового диаметра, без наклона относительно уровня почвы или с наклоном, который не превышал 10°.

В городских скверах было заложено 5 учетных площадок (№ 1–5, номера соответствуют табл. 2), находящихся вблизи дорог общего пользования и расположенных рядом с перекрестками улиц, наиболее загруженных автотранспортом: Сахалинской и проспекта Мира, Ленина и Пограничной, Ленина и проспекта Победы, Комсомольской и Сахалинской. В городском парке культуры и отдыха им. Ю.А. Гагарина заложены 3 площадки (№ 6, 7, 9),

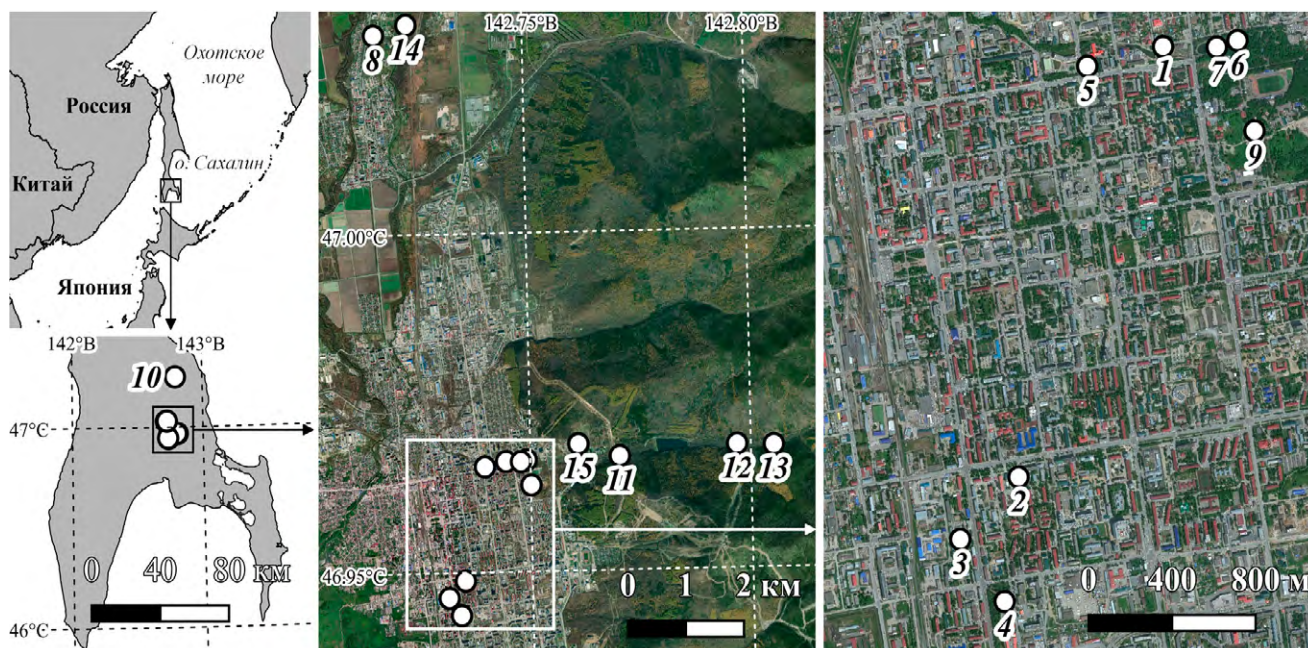


Рис. 1. Карта-схема района исследования. Белыми точками отмечены учетные площадки: на нижней левой части – наиболее удаленная учетная площадка № 10 (в долине р. Белая); в центральной и правой частях – площадки на территории и в ближайших окрестностях г. Южно-Сахалинск (на фоне спутникового снимка DigitalGlobe).

Fig. 1. Sketch-map of the study area. White dots mark the registration sites: the most distant site no.10 (in the Belaya River valley) is on the left bottom part; in the central and right parts there are the sites in the territory of Yuzhno-Sakhalinsk city and its surroundings (against the background of the DigitalGlobe satellite image).

одна – на лыжероллерной трассе спортшколы зимних видов спорта (№ 15). Шесть площадок – на территории Института морской геологии и геофизики ДВО РАН (№ 8) и припойменных участках рек Красносельская, Рогатка и Белая (№ 10–14) – удалены от плотной дорожной сети.

Натурные исследования эпифитных лишайников проводились в летние месяцы 2018 г. Они включали рекогносцировочные работы, в частности закладку учетных площадок и сбор гербарного материала для последующего определения; измерения для оценки встречаемости лишайников.

Для последующего определения встречаемости использовали рамку 10×40 см, разделенную на 4 части – микроплощадки (10×10 см) (рис. 2). Рамка прикладывалась с четырех сторон ствола дерева на высоте от 1.1 до 1.5 м. Всего в районе исследований было заложено 2400 микроплощадок [Kaganov et al., 2019].

Сбор и сушку эпифитных лишайников проводили по общепринятой методике [Определитель лишайников... , 1974; Флора лишайников... , 2014]. В бумажные конверты помещали собранные объекты с полевой этикеткой, на которой указывали место сбора (номер точки), субстрат, дату сбора.

Идентификацию лишайников осуществляли с помощью традиционных лихенологических методик [Определитель лишайников... , 1974; Флора лишайников... , 2014]. При определении использовались микроскопы Биоллам, Микромед-2, МБС-10, реактивы: 10%-й раствор КОН, насыщенный водный раствор CaCl_2O_2 , раствор I_2 в водном растворе йодистого калия и спиртовый раствор парафенилендиамина. Обработка и определение материалов проводились в лаборатории экологии растений и геоэкологии Института морской геологии и геофизики ДВО РАН.

Названия таксонов даны согласно базе данных Index Fungorum, CABI Bioscience Databases (<http://www.indexfungorum.org>). Во время исследований было собрано не менее 400 образцов лишайников. Гербарий хранится в Институте морской геологии и геофизики ДВО РАН (SAK).

Для оценки биоразнообразия лишайников использованы индекс разнообразия Шеннона (1) [Shannon, Weaver, 1963] и индекс выравненности экологических сообществ Пилелу (2) [Pielou, 1966, 1975]:

$$H = - \sum \frac{n_i}{N} \log_2 \frac{n_i}{N}, \quad (1)$$



Рис. 2. Рамка 10 × 40 см на стволе тополя.

Fig. 2. A frame of 10 × 40 cm on a poplar trunk.

$$E = H / H_{max}, \quad (2)$$

где H – индекс Шеннона, E – индекс Пиелу, n_i – встречаемость i -го вида на учетной площадке, N – суммарная встречаемость видов на учетной площадке.

Для оценки антропогенного воздействия на особенности распределения лишайников был рассчитан индекс атмосферной чистоты (I.A.P.) по каждой учетной площадке по формуле (3), предложенной [LeBlanc, De Sloover, 1970] для оценки воздействия промышленных объектов на состояние лишайнобиоты и широко используемой в современных лишайноиндикационных исследованиях для определения уровня антропогенной нагрузки [Das et al., 2013; Adjiri et al., 2019; Tanona, Czarnota, 2020; Herzig et al., 2020]:

$$I. A. P. = \frac{1}{10} \sum Q_i \times F_i, \quad (3)$$

где F_i – показатель встречаемости i -го вида, Q_i – коэффициент токсифобности (ассоциированности) i -го вида, определяемый по среднему количеству видов, сопутствующих данному виду на всех участках в исследуемом районе [Foucard, 2001]. Чем больше числовой показатель Q , тем более чувствителен к загрязнению вид.

Для оценки особенностей распределения и встречаемости лишайников была выполнена кластеризация учетных площадок методом Варда [Ward, 1963]. Чувствительность лишайников определяли по значению коэффициента токсифобности (Q) и приуроченности видов к учетным площадкам с разной степенью антропогенной нагрузки, определенной по значениям I.A.P. и особенностям биоразнообразия лишайнобиоты. Выделены следующие группы чувствительности: толерантная (Т), умеренно-толерантная (УТ), средне-чувствительная (СЧ), чувствительная (Ч) (табл. 1).

Результаты и обсуждение

На всех обследованных площадках на коре тополя Максимовича было зарегистрировано 47 видов эпифитных лишайников. Доминантами выступают в основном представители неморальных видов из родов *Physcia* (Schreb.) Michaux, *Physconia* Poelt, *Phaeophyscia* Moberg, *Physciella* Essl. В относительно чистых районах встречаются виды из родов *Lobaria* (Schreb.) Hoffm., *Leptogium* (Ach.) Gray, *Collema* F.H. Wigg., *Heterodermia* Trevis и другие.

Выявленные виды относятся к 8 порядкам, 14 семействам и к 26 родам. Большинство видов принадлежит к порядкам *Teloshistales* D. Hawk. et O.E. Erikss (15 видов, средний показатель встречаемости 76.9 %), *Lecanorales* Nannf. (13 видов, встречаемость 15.9 %), *Peltigerales* Walt. (7 видов, 4.5 %). Остальные порядки с меньшим количеством видов, показатель встречаемости которых не превышает 1 %. К доминирующим семействам по числу видов относятся *Physciaceae* Zahlbr. (15 видов, средний показатель встречаемости 70.7 %), *Parmeliaceae* Zenker (5 видов, 12.5 %) и *Teloshistaceae* Zahlbr. (5 видов, 7.7 %). К числу ведущих родов отнесены: *Lecanora* Ach. (5 видов), *Caloplaca* Th. Fr. (4 вида), *Phaeophyscia* Moberg (3 вида), *Physconia* Poelt (3 вида).

Разброс значений рассчитанного индекса атмосферной чистоты (I.A.P.) составил от 8.46 на учетной площадке, наиболее близкой (на расстоянии 23 м) к автомобильной дороге (№ 5 – сквер им. Г.И. Невельского), до 49.83 на одной из наиболее удаленных (расстояние 3070 м) от дорог площадок (№ 10 – долина р. Белая) (рис. 3).

В целом значение I.A.P. и степень удаленности учетных площадок от автомобильных дорог подчиняется линейной зависимости,

значение коэффициента детерминации (R^2) составляет 0.83 при $p < 0.001$.

На основании данных о встречаемости лишайников на учетных площадках был выполнен кластерный анализ. На рис. 4 приведена дендрограмма, визуализирующая степень сходства характеристик учетных площадок, с указанием их номеров и мест расположения.

На основе анализа групп кластеров принято решение выбрать значение Эвклидова

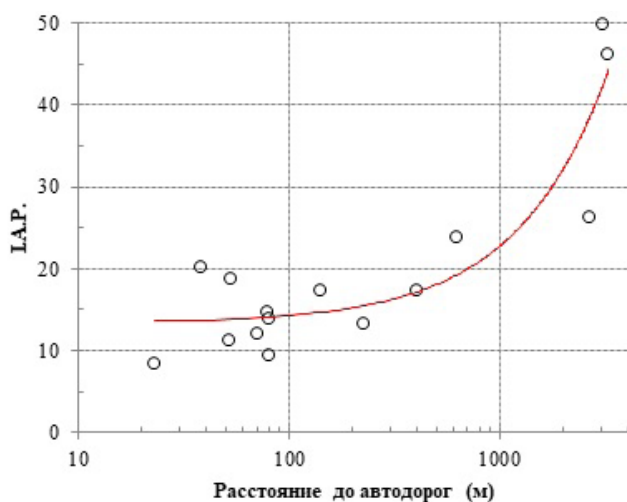


Рис. 3. Диаграмма связи между расстоянием до автодорог и значением индекса атмосферной чистоты.

Fig. 3. Diagram of relation between the distance to public roads and Index of Atmospheric Purity value.

расстояния 130 (единиц) как разделяющее. При этом выделено 3 кластера. Они объединяют учетные площадки по уровню сходства состава и встречаемости эпифитных лишайников.

В кластер I попали площадки, в непосредственной близости от которых расположена густая дорожная сеть. Это городские скверы и дворовые территории (№ 1–5, расстояние до ближайших автодорог 23–80 м). Зарегистрировано 8 видов лишайников. По показателю встречаемости здесь доминируют *Physciella melanchnra* (Hue) Essl. и *Phaeophyscia hirtuosa* (Kremplh.) Essl. Наименьшее значение индекса I.A.P. в этом кластере отмечено на площадке № 5 (сквер им. Г.И. Невельского) – 8.46; наибольшее – 14.64 – на площадке № 1 (Аллея интернационалистов), среднее значение – 11.15. В целом для учетных площадок этого кластера характерны меньшие значения I.A.P. по сравнению с другими двумя кластерами.

Кластер II составили площадки, расположенные в городском парке и на территории ИМГиГ ДВО РАН – на расстоянии 38–225 м от дорог (№ 6–9). В этом кластере зарегистрировано 12 видов лишайников. Количество видов увеличилось по сравнению с кластером I на 4: добавились виды родов *Caloplaca*, *Lecanora*, *Parmelia* и *Physconia*. Минимальное значение I.A.P., равное 13.28, отмечено на площадке

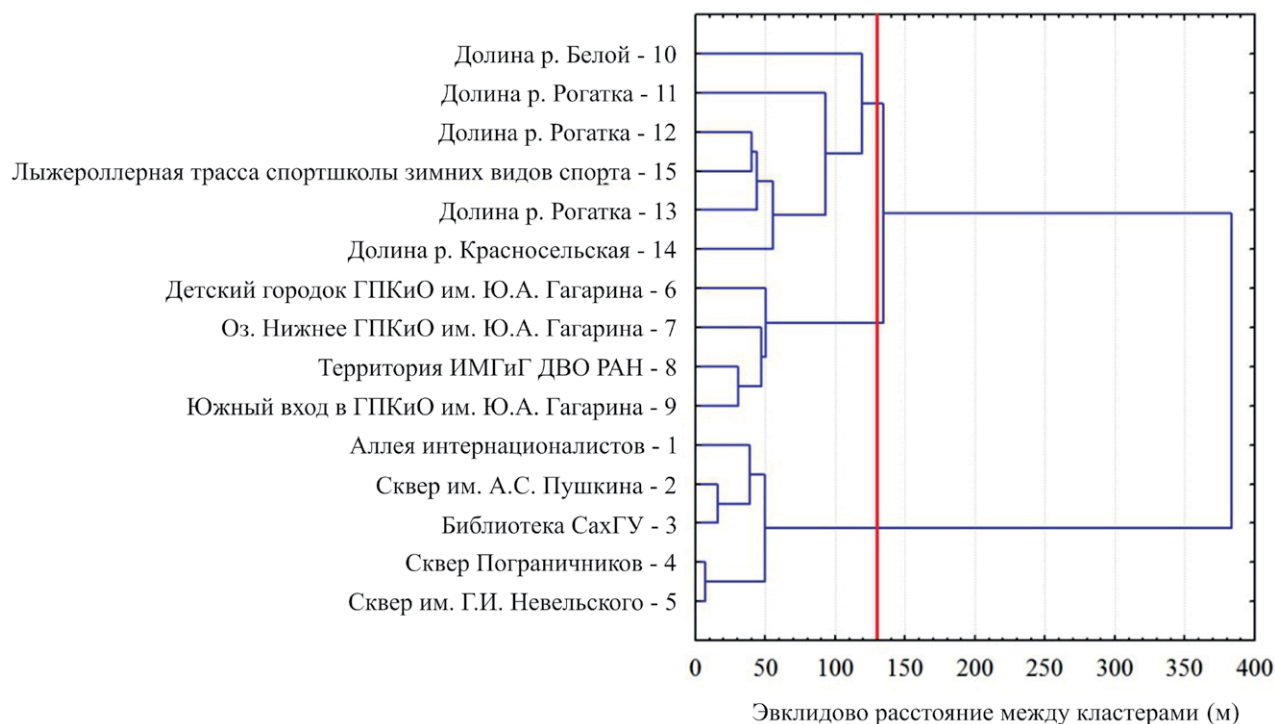


Рис. 4. Дендрограмма сходства 15 исследованных участков. Красной линией обозначено разделяющее значение Эвклидова расстояния. Номера участков соответствуют табл. 2.

Fig. 4. Dendrogram of similarities between 15 studied sites. The red line marks the separating value of the Euclidean distance. Numbers of the sites are in accordance with the table 2.

Таблица 1. Биоиндикаторные показатели лишайников на коре тополя Максимовича в районе исследований
Table 1. Bioindication indexes of lichens on *Populus maximowiczii* bark in the study area

Вид лишайника	Q	Группа чувствительности	Встречаемость по кластерам (в %)		
			I	II	III
<i>Anaptychia isidiza</i> Kurok.	21.25	СЧ	–	–	2.3
<i>Arthonia</i> sp.	30	Н/о	–	–	0.7
<i>Bacidia sachalinensis</i> J. Gerasimova, A. Ezhkin & A. Beck	25.5	Ч	–	–	2.5
<i>Buellia disciformis</i> (Fr.) Mudd.	23.5	СЧ	–	–	1.5
<i>B. erubescens</i> Arnold.	17	СЧ	–	–	0.4
<i>Buellia</i> sp.	19	СЧ	–	–	4.4
<i>Caloplaca cerina</i> (Ehrh. ex Hedwig) Th. Fr.	17	СЧ	–	–	0.1
<i>C. tarani</i> S.Y. Kondr., S.I. Tchabanenko, I. Galanina & L. Yakovczenko	21.33	Ч	–	–	1.7
<i>Candelaria concolor</i> (Dicks.) Stein.	8.46	УТ	11.82	25.31	5.7
<i>Cetrelia</i> cf. <i>olivetorum</i> (Nyl.) W.L. Culb. & C.F. Culb.	21	Ч	–	–	0.3
<i>Collema furfuraceum</i> Du Rietz	19	Ч	–	–	19.3
<i>C. subflaccidum</i> Degel.	10	Ч	–	–	0.4
<i>Eopyrenula intermedia</i> Coppins	30	Н/о	–	–	4.1
<i>Graphis rikuzensis</i> (Vain.) M. Nakan.	30	Ч	–	–	0.7
<i>Gyalolechia flavorubescens</i> (Huds.) Søchting	19	СЧ	–	–	12.3
<i>Heterodermia speciosa</i> (Wulfen) Trevis.	21.25	СЧ	–	–	2.1
<i>Lecanora allophana</i> Nyl.	17	СЧ	–	–	0.5
<i>L. pachyheila</i> Hue	15	СЧ	–	0.59	5.8
<i>Lecanora</i> sp.	18.33	Н/о	–	–	5.5
<i>Lecanora</i> sp. 1	21	Н/о	–	–	2.2
<i>Lecanora</i> sp. 2	21	Н/о	–	–	1.0
<i>Lepraria incana</i> (L.) Ach.	17	СЧ	–	–	0.4
<i>Leptogium burnetiae</i> Dodge.	21.33	Ч	–	–	1.9
<i>L. cyanescens</i> (Rabenh.) Körb	21.25	Ч	–	–	4.3
<i>Lobaria kazawaensis</i> Asahina	30	Ч	–	–	0.1
<i>L. pulmonaria</i> (L.) Hoffm.	30	Ч	–	–	0.2
<i>Mikhtomia gordejvii</i> (Tomin) S.Y. Kondr.	15.4	УТ	–	2.15	4.9
<i>Opegrapha atra</i> Pers.	21	Н/о	–	–	0.4
<i>Oxneria huculica</i> S.Y. Kondr.	8	УТ	6.25	11.30	0.9
<i>Parmelia fertilis</i> Müll. Arg.	16.5	УТ	–	0.98	2.2
<i>P. saxatilis</i> (L.) Ach.	13.14	УТ	1.61	2.73	8.4
<i>P. sulcata</i> Taylor	21	СЧ	–	–	2.1
<i>Peltigera</i> sp.	30	Н/о	–	–	0.2
<i>Pertusaria amara</i> (Ach.) Nyl.	30	Ч	–	–	0.1
<i>P. pertusa</i> (Weigel) Tuck.	30	Ч	–	–	0.1
<i>Pertusaria</i> sp.	21	Н/о	–	–	1.2
<i>Phaeophyscia hirtuosa</i> (Kremplh.) Essl.	10.47	УТ	41.64	41.21	51.3
<i>Ph. hispidula</i> (Ach.) Essl.	19	СЧ	–	0.39	0.7
<i>Ph. rubropulchra</i> (Degelius) Essl.	30	СЧ	–	–	0.2
<i>Physcia alnophila</i> (Vain.) Loht. et al.	30	СЧ	–	–	0.7
<i>Physciella chloantha</i> (Ach.) Essl.	5	Т	0.83	–	–
<i>Ph. melanchra</i> (Hue) Essl.	5.86	Т	78.45	3.91	–
<i>Physconia detersa</i> (Nyl.) Poelt	11.46	УТ	3.72	56.98	18.7
<i>Ph. grumosa</i> Kashiw. & Poelt	17	СЧ	–	4.49	13.5
<i>Ph. kurokawae</i> Kashiw.	11	УТ	0.21	5.92	8.0
<i>Ramalina roesleri</i> (Hochst. ex Schaer.) Hue	15.5	СЧ	–	–	1.2
<i>Rinodina efflorescens</i> Malme	30	Н/о	–	–	0.2

Примечание. Q – токсифобность. Группы чувствительности: Т – толерантная, УТ – умеренно-толерантная, СЧ – средне-чувствительная, Ч – чувствительная, Н/о – чувствительность не определена. Прочерк – вид отсутствует.

Note. Q – toxophobicity. Sensitivity groups: Т – tolerant, УТ – moderately tolerant, СЧ – medium sensitivity, Ч – sensitive, Н/о – sensitivity is not defined. Dash – the species is absent.

№ 9 (южный вход в ГПКиО им. Ю.А. Гагарина), максимальное – 20.14 – на площадке № 6 («детский городок» в ГПКиО им. Ю.А. Гагарина). Среднее значение I.A.P. на площадках кластера составляет 16.55.

Кластер III объединяет наиболее удаленные от дорожной сети площадки с богатым видовым разнообразием (№ 10–15, расстояние до ближайших автодорог 140–3270 м) и более естественными условиями произрастания объектов мониторинга. На площадках этого кластера отмечено 45 видов, что почти в 4 раза превосходит количество видов, отмеченное на площадках кластера II, т.е. 95.7 % от всех видов эпифитных лишайников, произрастающих на учетных площадках. Значение I.A.P. варьирует от 17.34 (площадка № 15 – лыжероллерная трасса спортшколы зимних видов спорта) до 49.83 (площадка № 10 – долина р. Белая); среднее значение – 30.12.

Особенности видового состава и значения индекса атмосферной чистоты (I.A.P.) на учетных площадках по выделенным кластерам позволяют судить о разной степени антропогенной нагрузки на исследуемой территории. Площадки в зоне сильной, средней и слабой нагрузки объединились в кластеры I, II, III соответственно.

На основе показателей встречаемости был посчитан коэффициент Q относительной токсифобности (ассоциированности). По значению коэффициента вкупе с данными приуроченности видов к зонам с разной антропогенной нагрузкой лишайники были отнесены к той или иной группе чувствительности.

В табл. 1 представлен список видов лишайников в алфавитном порядке, включающий показатель встречаемости и распределение лишайников по группам чувствительности. Виды лишайников, отмеченные только один раз, не были отнесены ни к одной из групп.

Виды толерантной группы – *Physciella chloantha* и *P. melanchra* – приурочены к площадкам кластера I (с сильной антропогенной нагрузкой) (рис. 5 а). Коэффициент токсифобности не превышает 6. Лишайники толерантной группы чувствительности устойчивы к особенностям атмосферного воздуха, характерным для городской среды, в том числе повышенному содержанию загрязнителей. Показатель встречаемости в пределах 58 %. В зоне слабой антропогенной нагрузки лишайники толерантной группы не были зарегистрированы.

Умеренно-толерантная группа включает 8 видов, которые отмечены во всех кластерах с незначительными вариациями встречаемости



Рис. 5. Внешний вид слоевища *Physciella melanchra* (а), *Phaeophyscia hirtuosa* (б), *Lecanora pachyheila* (в), *Leptogium cyanescens* (г).

Fig. 5. Thallus appearance *Physciella melanchra* (а), *Phaeophyscia hirtuosa* (б), *Lecanora pachyheila* (в), *Leptogium cyanescens* (г).

в градиенте антропогенного воздействия либо с увеличением встречаемости в зоне слабой антропогенной нагрузки. Наиболее распространенные из них – *Candelaria concolor*, *Phaeophyscia hirtuosa* (рис. 5 б), *Physconia detersa*. Коэффициент токсифобности от 8 до 16.5. В среднем суммарный показатель встречаемости 45.4 %.

Виды средне-чувствительной группы (СЧ) приурочены к кластерам II и III, объединяющим учетные площадки, испытывающие среднее и слабое антропогенное воздействие. Группа насчитывает 16 видов с коэффициентом токсифобности в диапазоне 15–30. В основном это широко распространенные лишайники: *Gyalolechia flavorubescens*, *Lecanora pachyheila* (рис. 5 в), *Physconia grumosa* и др. Средний показатель встречаемости вида на исследуемой территории – 6.23 %.

Чувствительная группа включает 12 видов; лишайники данной группы встречаются толь-

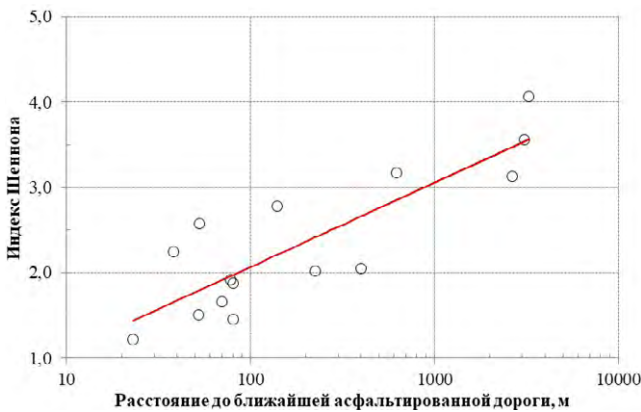


Рис. 6. Диаграмма связи между расстоянием до автодорог и значением индекса разнообразия Шеннона.

Fig. 6. Diagram of relation between the distance to public roads and Shannon diversity index value.

ко в зоне слабого антропогенного воздействия. Наиболее распространенные лишайники этой группы – *Collema furfuraceum* и *Leptogium cyanescens* (рис. 5 г). Хорошо развитые слоевища с апотециями были встречены только в отдаленных от города районах – в долинах рек Белая и Рогатка.

Для оценки разнообразия эпифитных лишайников на учетных площадках был посчитан индекс Шеннона, а также его нормированный вариант – индекс Пиелу. Сводная информация о значении указанных индексов, а также индекса атмосферной чистоты (I.A.P.), количестве видов и расстоянии площадок до ближайшей асфальтированной автодороги представлена в табл. 2.

Результаты анализа значений индекса разнообразия Шеннона свидетельствуют об их прямой корреляции с расстоянием до ближайших асфальтированных автомобильных дорог, $R^2 = 0.71$ (рис. 6).

Отмеченная зависимость явно обусловлена негативным влиянием антропогенной нагрузки на возможность произрастания лишайников чувствительной и среднечувствительной групп. Вследствие этого на учетных площадках I и отчасти II кластера существенно снижено разнообразие эпифитных лишайников. Так, значение индексов Шеннона и Пиелу на учетных площадках в непосредственной близости от автодорог (кластер I, сильное антропогенное воздействие) составляет, соответственно, 1.21–1.91 и 0.29–0.47, на площадках кластера II – 1.87–2.57 и 0.46–0.63, кластера III – 2.05–4.06 и 0.5–1. Минимальное значение 1.21 отмечено на учетной площадке № 5 на расстоянии 23 м до автодороги;

Таблица 2. Показатели встречаемости и биоразнообразия эпифитных лишайников в районе исследования

Table 2. Indicators of occurrence and biodiversity of epiphytic lichens in the study area

Параметр	Кластер I					Кластер II				Кластер III					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
<i>n</i>	5	5	4	5	3	6	11	7	8	21	30	17	17	8	10
I.A.P.	14.64	12.05	11.21	9.40	8.46	20.14	18.81	13.96	13.28	49.83	46.20	26.27	23.71	17.36	17.34
<i>H</i>	1.92	1.66	1.50	1.45	1.21	2.24	2.58	1.88	2.02	3.6	4.06	3.13	3.17	2.05	2.78
<i>E</i>	0.47	0.41	0.37	0.36	0.30	0.55	0.63	0.46	0.50	0.88	1.00	0.77	0.78	0.50	0.68
<i>L</i> , м	78	70	52	80	23	38	53	80	225	3070	3270	2644	620	400	140

Примечание. Параметры: *n* – количество видов, I.A.P – индекс атмосферной чистоты, *H* – индекс Шеннона, *E* – индекс Пиелу, *L* – расстояние до пересечения с ближайшей асфальтированной дорогой. Участки: 1 – Аллея интернационалистов, 2 – сквер им. А.С. Пушкина, 3 – библиотека СахГУ, 4 – сквер Пограничников, 5 – сквер им. Г.И. Невельского, 6 – «Детский городок» ГПКиО им. Ю.А. Гагарина, 7 – оз. Нижнее ГПКиО им. Ю.А. Гагарина, 8 – территория ИМГиГ ДВО РАН, 9 – южный вход в ГПКиО им. Ю.А. Гагарина, 10 – долина р. Белая, 11, 12, 13 – долина р. Рогатка, 14 – долина р. Красносельская, 15 – лыжероллерная трасса спортшколы зимних видов спорта.

наименьшее количество видов и I.A.P. отмечено здесь же. Максимальное значение индекса Шеннона 4.06 зафиксировано на площадке № 11, которая удалена от асфальтированного дорожного полотна на расстояние 3270 м и характеризуется наибольшим разнообразием лишайников.

Площадки № 14 и 15, относящиеся к кластеру III, отличаются невысоким разнообразием лишайников (8 и 10 видов соответственно) и средним значением I.A.P. (17.3). Однако в их лишенобиоте отмечены 3 вида из среднечувствительной и чувствительной групп – *Buellia* sp., *Lecanora pachyheila* и *Lecanora* sp. для площадки 14 и *Collema furfuraceum*, *Gyalolechia flavorubescens*, *Ramalina roesleri* для площадки 15.

Выводы

В г. Южно-Сахалинск и его окрестностях на стволах тополя Максимовича было зарегистрировано 47 видов лишайников. Выявленные виды относятся к 8 порядкам, 14 семействам и 26 родам. Ведущие семейства по числу видов – *Physciaceae*, *Parmeliaceae* и *Teloshistaceae*.

Рассчитанный для оценки антропогенного воздействия на особенности распределения лишайников индекс атмосферной чистоты (I.A.P.) показал прямую линейную корреляцию с расстоянием учетных площадок до автодорог ($R^2 = 0.83$).

По результатам кластерного анализа распределения лишайников на учетных площадках выделено три кластера, позволяющие судить о разном уровне антропогенной нагрузки. Кластер I с наименьшими значениями I.A.P. (8.46–14.64) объединяет площадки, испытывающие сильную антропогенную нагрузку, они находятся в непосредственной близости от густой дорожной сети. В кластер II (I.A.P. 13.28–20.14) вошли площадки, расположенные в зеленой зоне города. Кластер III (I.A.P.

17.34–49.83) объединяет наиболее удаленные от дорожной сети площадки с богатым видовым разнообразием и более естественными условиями жизнедеятельности объектов мониторинга. На площадках этого кластера отмечено 95.7 % всех видов эпифитных лишайников, произрастающих на учетных площадках.

На основании приуроченности лишайников к площадкам с разным уровнем антропогенной нагрузки и коэффициента относительной токсифобности лишайники отнесены к четырем группам чувствительности. Виды толерантной группы типичны для городской среды и не зарегистрированы на площадках со слабой антропогенной нагрузкой, виды умеренно-толерантной группы отмечены во всех кластерах, виды средне-чувствительной группы – в кластерах с площадками, испытывающими среднее и слабое антропогенное воздействие. Чувствительная группа включает виды, встречающиеся только в зоне слабого воздействия.

Индексы разнообразия Шеннона и Пиелу показывают прямую корреляцию с расстоянием до асфальтированных автодорог ($R^2 = 0.71$), что обусловлено негативным влиянием антропогенной нагрузки на условия произрастания чувствительных и среднечувствительных лишайников и, как следствие, снижением разнообразия лишенобиоты на площадках с сильным и средним антропогенным воздействием. Индексы достигают максимального значения на одной из площадок, наиболее удаленных от автодорог (долина р. Белая; 4.06 и 1 соответственно), минимального – на площадке, приближенной к автодороге (сквер им. Г.И. Невельского; 1.21 и 0.29 соответственно).

С высокой долей вероятности полученные данные свидетельствуют о том, что причиной уменьшения биоразнообразия и встречаемости эпифитных лишайников на коре тополя Максимовича является атмосферное загрязнение, вызванное длительным воздействием автотранспорта.

Список литературы

1. Бязров Л.Г. 2002. *Лишайники в экологическом мониторинге*. М.: Науч. мир, 336 с.
2. Доклад о состоянии и об охране окружающей среды Сахалинской области в 2020 году. Мин-во экологии Сахалинской области. Южно-Сахалинск: Эйкон, 2021. 179 с.
3. Ежкин А.К., Галанина И.А. 2016. Эпифитные лишайники лиственных деревьев города Южно-Сахалинск и особенности их распределения по степени чувствительности к антропогенному воздействию. *Вестник Северо-Восточного научного центра ДВО РАН*, 4: 95–107.
4. Ерофеева И.А., Сергеева И.В. 2014. Использование эпифитных лишайников в биоиндикации состояния окружающей среды. *Аграрный научный журнал*. № 10, 2014. С. 18-20.
5. Земцова А.И. 1968. *Климат Сахалина*. Л.: Гидрометеиздат, 197 с.

6. Корзников К.А., Ежкин А.К. **2019**. Ильмовые и ясеневые леса в долине р. Тымь на о-ве Сахалин. *Бюл. Ботанического сада-института ДВО РАН*, 22: 1–14. doi:10.17581/bbgi2201
7. *Определитель лишайников СССР. Вып. 2. Морфология, систематика и географическое распространение* (ред. А.Н. Окснер). 1974. Л.: Наука, 284 с.
8. Сабиров Р.Н. **2017**. О тополевых насаждениях г. Южно-Сахалинск. *Вестник Сахалинского музея*, Южно-Сахалинск, 24: 314–323
9. *Флора лишайников России: Биология, экология, разнообразие, распространение и методы изучения лишайников*. **2014**. (Авт.: М.П. Андреев, Т. Ахти, А.А. Войцехович, Л.В. Гагарина, Ю.В. Герасимова, Д.Е. Гимельбрант, Е.А. Давыдов, Л.А. Конорева, Е.С. Кузнецова, Т.В. Макрый и др.). М.; СПб.: Тов-во науч. изд. КМК, 392 с.
10. Adjiri F., Ramdani M., Lograda T. **2019**. Relationship between lichen diversity and air quality in urban region in Bourdj Bou Arriridj, Algeria. *Biodiversitas J. of Biological Diversity*, 20(8): 2329–2339. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d200831>
11. Das P., Joshi S., Rout J., Upreti D.K. **2013**. Lichen diversity for environmental stress study: Application of index of atmospheric purity (IAP) and mapping around a paper mill in Barak Valley, Assam, northeast India. *Tropical Ecology*, 54(3): 355–364.
12. Foucard T. **2001**. *Svenska skorplavar och svampar som växer på dem*. Stockholm: Stenströms bokförlag Interpubl., 392 p.
13. Herzig R., Schindler C., Urech M., Rihm B., Lötscher H., Thomann G. **2020**. Recalibration and validation of the Swiss lichen bioindication methods for air quality assessment. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(23): 28811–28812. doi:10.1007/s11356-020-09732-x
14. Kaganov V.V., Kordukov A.V., Ezhkin A.K. **2019**. Monitoring of recreational areas of Yuzhno-Sakhalinsk and its surroundings. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 324(2019): 012034. doi:10.1088/1755-1315/324/1/012034
15. LeBlanc F., De Sloover J. **1970**. Relation between industrialization and the distribution and growth of epiphytic lichens and mosses in Montreal. *Canadian J. of Botany*, 48: 1485–1496. <https://doi.org/10.1139/b70-224>
16. Pielou E.C. **1966**. Shannon's formula as a measure of species diversity: its use and misuse. *The American Naturalist*, 100: 463–465. <https://doi.org/10.1086/282439>
17. Pielou E.C. **1975**. *Ecological diversity*. New York: John Wiley & Sons, 165 p.
18. Shannon C.E., Weaver W.W. **1963**. *The mathematical theory of communications*. Urbana: University of Illinois Press, 117 p.
19. Tanona M., Czarnota P. **2020**. Index of Atmospheric Purity reflects the ecological conditions better than the environmental pollution in the Carpathian forests. *J. of Mountain Science*, 17(11). <https://doi.org/10.1007/s11629-020-6266-1>
20. Ward J.H. **1963**. Hierarchical grouping to optimize an objective function. *J. of the American Statistical Association*, 58: 236–244. <https://doi.org/10.2307/2282967>

References

1. Byazrov L.G. **2002**. *Lishayniki v ekologicheskom monitoringe [Lichens in ecological monitoring]*. Moscow: Nauch. mir, 336 p.
2. *Doklad o sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchey sredy Sakhalinskoj oblasti v 2020 godu [Report on the state and protection of the environment in the Sakhalin Region in 2020]*. Min-vo ekologii Sakhalinskoj oblasti. [The Ministry of ecology of the Sakhalin Region]. Yuzhno-Sakhalinsk: Eykon, 2021. 179 p.
3. Ezhkin A.K., Galanina I.A. **2016**. Epiphytic lichens of deciduous trees in the city of Yuzhno-Sakhalinsk and specifics of their distribution by sensitivity to the anthropogenic impact. *Vestnik Severo-Vostochnogo nauchnogo tsentra DVO RAN = Bull. of the North-East Scientific Center FEB RAS*, 4: 95–107.
4. Erofeeva I.A., Sergeeva I.V. **2014**. The use of epiphytic lichens in bio-indication of the environment. *Agrarnyj nauchnyj zhurnal = [Agrarian Scientific Journal]*, 10: 18–20.
5. Zemtsova A.I. **1968**. *[The climate of Sakhalin]*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 197 p.
6. Корзников К.А., Ежкин А.К. **2019**. Ash and elm forests of the Tym' river valley, Sakhalin Island. *Byul. Botанического сада-института ДВО РАН = [Bull. of the Botanical Garden-Institute FEB RAS]*, 22: 1–14. <https://doi.org/10.17581/bbgi2201>
7. *[Identification guide to the lichens of USSR]*. Iss. 2. *[Morphology, taxonomy and geographical distribution]* (ed. A.N. Oksner). **1974**. Leningrad: Nauka, 284 p.
8. Sabirov R.N. **2017**. [On the populus planting in Yuzhno-Sakhalinsk]. *Vestnik Sakhalinskogo muzeya [Bulletin of the Sakhalin museum]*. Yuzhno-Sakhalinsk, 24: 314–323.

9. *Flora of lichens in Russia: Biology, ecology, diversity, distribution and the study methods*. 2014. (Authors: M.P. Andreev, T. Akhti, A.A. Voytsekhovich et al.). Moscow; Saint Petersburg: Tov-vo nauch. izd. KMK, 392 p.
10. Adjiri F., Ramdani M., Lograda T. 2019. Relationship between lichen diversity and air quality in urban region in Bourdj Bou Arriridj, Algeria. *Biodiversitas J. of Biological Diversity*, 20(8): 2329–2339. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d200831>
11. Das P., Joshi S., Rout J., Upreti D.K. 2013. Lichen diversity for environmental stress study: Application of index of atmospheric purity (IAP) and mapping around a paper mill in Barak Valley, Assam, northeast India. *Tropical Ecology*, 54(3): 355–364.
12. Foucard T. 2001. *Svenska skorplavar och svampar som växer på dem*. Stockholm: Stenströms bokförlag Interpubl., 392 p.
13. Herzig R., Schindler C., Urech M., Rihm B., Lötscher H., Thomann G. 2020. Recalibration and validation of the Swiss lichen bioindication methods for air quality assessment. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(23): 28811–28812. doi:10.1007/s11356-020-09732-x
14. Kaganov V.V., Kordukov A.V., Ezhkin A.K. 2019. Monitoring of recreational areas of Yuzhno-Sakhalinsk and its surroundings. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 324(2019): 012034. doi:10.1088/1755-1315/324/1/012034
15. LeBlanc F., De Sloover J. 1970. Relation between industrialization and the distribution and growth of epiphytic lichens and mosses in Montreal. *Canadian J. of Botany*, 48: 1485–1496. <https://doi.org/10.1139/b70-224>
16. Pielou E.C. 1966. Shannon's formula as a measure of species diversity: its use and misuse. *The American Naturalist*, 100: 463–465. <https://doi.org/10.1086/282439>
17. Pielou E.C. 1975. *Ecological diversity*. New York: John Wiley & Sons, 165 p.
18. Shannon C.E., Weaver W.W. 1963. *The mathematical theory of communications*. Urbana: University of Illinois Press, 117 p.
19. Tanona M., Czarnota P. 2020. Index of Atmospheric Purity reflects the ecological conditions better than the environmental pollution in the Carpathian forests. *J. of Mountain Science*, 17(11). <https://doi.org/10.1007/s11629-020-6266-1>
20. Ward J.H. 1963. Hierarchical grouping to optimize an objective function. *J. of the American Statistical Association*, 58: 236–244. <https://doi.org/10.2307/2282967>

Об авторах

КАГАНОВ Владимир Владимирович (<https://orcid.org/0000-0003-1444-9813>), аспирант, старший инженер лаборатории экологии растений и геоэкологии, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, младший научный сотрудник Сахалинского филиала ботанического сада-института ДВО РАН, Южно-Сахалинск, vladimirkaganov@mail.ru

КОРДЮКОВ Александр Владимирович (<https://orcid.org/0000-0002-1430-1627>), кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории береговых геосистем, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, a.kordyukov@imgg.ru

ЕЖКИН Александр Константинович (<https://orcid.org/0000-0002-2242-2250>), кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории экологии растений и геоэкологии, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, ezhkin@yandex.ru

About the Authors

KAGANOV Vladimir V. (<https://orcid.org/0000-0003-1444-9813>), Postgraduate, Senior Engineer, the Laboratory of plant ecology and geocology, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of the RAS, Yuzhno-Sakhalinsk; Junior Researcher, Sakhalin Branch of the Botanical Garden-Institute of the Far Eastern Branch of the RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, vladimirkaganov@mail.ru

KORDYUKOV Alexander V. (<https://orcid.org/0000-0002-1430-1627>), Cand. Sci. (Biology), Researcher, the Laboratory of coastal geosystems, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of the RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, a.kordyukov@imgg.ru

EZHKIN Alexander K. (<https://orcid.org/0000-0002-2242-2250>), Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher, the Laboratory of plant ecology and geocology, Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of the RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, ezhkin@yandex.ru