

Научная статья

УДК 577.1:57.042; 581: 58.01/07

DOI: <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2023-13-1-67-76>



Минеральный состав почвенной цианопрокариоты *Nostoc commune* из Байкальского региона

И.Н. Егорова✉, О.В. Шергина, Г.С. Тупикова

Сибирский институт физиологии и биохимии растений СО РАН,
г. Иркутск, Российская Федерация

Аннотация. Почвенная цианопрокариота *Nostoc commune* Vaucher ex Bornet et Flahault – нитчатый организм, формирующий макроскопические колонии на поверхности почвы, способный к оксигенному фотосинтезу и фиксации атмосферного азота. Вид вносит существенный вклад в азотный и углеродный баланс экосистем, участвует в процессах восстановления нарушенных почв. В задачи настоящего исследования входило определение содержания минеральных элементов (Ca, Mg, K, Na, Cu, Fe, Mn, Zn, Cd, Pb) в талломах *N. commune*, функционирующих в травянистых растительных сообществах Байкальского региона на территориях разной степени антропогенной нарушенности, и установление влияния кислотности почвы на накопление ностоком элементов. Элементный состав определяли методами эмиссионной пламенной фотометрии и атомно-абсорбционной спектроскопии. Впервые в региональных образцах *N. commune* определены уровни накопления Ca, Mg, K, Na, Cu, Fe, Mn, Zn, Cd, Pb. Показано, что талломы вида содержали значительное количество кальция, магния, калия, натрия, железа. По способности аккумулировать кальций (до 27440 мг·кг⁻¹ абс. сухого веса), произрастать на нейтральных и щелочных почвах вид может быть отнесен к кальцефилам. По уровню накопления железа (в среднем 2112 мг·кг⁻¹) *N. commune* на порядок превосходит сосудистые растения. Отмечены существенные различия в содержании изученных элементов в ностоке из разных местонахождений. Талломы *N. commune*, функционирующие в непосредственной близости от скоростной автомагистрали, содержали в повышенных количествах свинец, медь, цинк, кадмий, кальций, магний, натрий. Установлено, что при более низкой кислотности почвы вид накапливает больше Ca, Mg, Cd; в условиях повышенной кислотности почв талломы *N. commune* аккумулируют Fe, Mn, K. Выявлена значительная корреляция между содержанием этих элементов в ностоке и кислотностью верхних горизонтов почв.

Ключевые слова: *Nostoc commune*, почвенная цианопрокариота, минеральные элементы, техногенное загрязнение, Байкальский регион

Финансирование. Работа была выполнена в рамках государственного задания РФ, номер проекта FWSS-2022-0002.

Для цитирования: Егорова И.Н., Шергина О.В., Тупикова Г.С. Минеральный состав почвенной цианопрокариоты *Nostoc commune* из Байкальского региона // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2023. Т. 13. N 1. С. 67–76. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2023-13-1-67-76>.

PHYSICOCHEMICAL BIOLOGY

Original article

Mineral composition of the *Nostoc commune* soil cyanoprokaryota in the Baikal region

Irina N. Egorova✉, Olga V. Shergina, Galina S. Tupikova

Siberian Institute of Plant Physiology and Biochemistry SB RAS, Irkutsk, Russian Federation

Abstract. The *Nostoc commune* Vaucher ex Bornet et Flahault soil cyanoprokaryote is a filamentous organism forming macroscopic colonies on the soil surface. This organism is capable of oxygenic photosynthesis and atmospheric nitrogen fixation, thereby contributing to the nitrogen and carbon balance of ecosystems and participating in the processes of disturbed soil recovery. The present study aimed to determine the content of mineral elements (Ca, Mg, K, Na, Cu, Fe, Mn, Zn, Cd, Pb) in *N. commune* thalli growing in herbaceous plant communities of the Baikal region in areas of various anthropogenic disturbance, and to establish the effect of soil acidity on the accumulation of these elements. The elemental composition was determined by emission flame photometry and atomic absorption spectroscopy. To the best of our knowledge, the accumulation of Ca, Mg, K, Na, Cu, Fe, Mn, Zn, Cd, and Pb in regional samples of *N. commune* were determined for the first time. The investigated thalli were found to contain significant amounts of Ca, Mg, K, Na, and Fe. The species can be referred to calciphiles in terms of its ability to accumulate Ca (up to 27,440 mg·kg⁻¹ abs. dry weight) and to grow on neutral and alkaline soils. *N. commune*

© Егорова И.Н., Шергина О.В., Тупикова Г.С., 2023

outperforms vascular plants in terms of Fe accumulation (on average, 2112 mg·kg⁻¹). Significant differences were observed in the content of the studied elements in *N. commune* collected from different sites. *N. commune* thalli growing in the vicinity of a highway contained Pb, Cu, Zn, Cd, Ca, Mg, and Na in increased amounts. Under lower soil acidity, the species was found to accumulate more Ca, Mg, and Cd. Under increased soil acidity, *N. commune* thalli accumulate Fe, Mn, and K. A significant correlation between the content of these elements in *N. commune* and the acidity of the upper soil horizons was revealed.

Keywords: *Nostoc commune*, soil cyanoprokaryota, mineral elements, anthropogenic pollution, Baikal region

Funding. The work was supported by State Job RF no. FWSS-2022-0002.

For citation: Egorova I.N., Shergina O.V., Tupikova G.S. Mineral composition of the *Nostoc commune* soil cyanoprokaryota in the Baikal region. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2023;13(1):67-76. (In Russian). <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2023-13-1-67-76>.

ВВЕДЕНИЕ

Положение Байкальского региона в центре Азии на юге Восточной Сибири предопределило особенности его природных условий, обусловило сложность и разнообразие природных комплексов. В регионе сосредоточены большие промышленные города, хорошо развита транспортная инфраструктура. Транспорт и промышленность создают значительную нагрузку на окружающую среду, в связи с чем антропогенное загрязнение стало одним из ведущих факторов, определяющих состояние почвенного и растительного покрова. В условиях возрастающего антропогенного давления проблема накопления химических элементов во всех частях природных экосистем становится все более актуальной. Важнейшей составляющей наземной биоты являются водоросли, играющие большую роль в создании первичной продукции, минерализации, водоудержания, стабилизации почвы, циклах биогенных элементов. Известно значение почвенных водорослей как индикаторов изменений окружающей среды. Тем не менее вопросам физиологии и биохимии почвенных водорослей, изучения минерального состава и его изменения под влиянием факторов среды, во многом обусловленном их региональным характером, уделяется недостаточное внимание. В ряде исследований, проводившихся в Байкальском регионе, содержатся данные о составе минеральных элементов высших растений, водных макро- и некоторых микроводорослей из различных биоценозов [1–13]. Сведения о минеральном составе наземных водорослей крайне немногочисленны [14, 15].

Представители рода *Nostoc* – широко распространенные в наземных экосистемах нитчатые колониальные организмы, участвующие в восстановлении нарушенных почв, в улучшении почвенного плодородия, аккумуляции тяжелых металлов [16–18]. *Nostoc commune* – цианопрокариота/цианобактерия, формирующая макроскопические таломы, способная к окислительному фотосинтезу и фиксации атмосферного азота, вносящая существенный вклад в азотный и углеродный баланс биогеоценозов. Вид формирует высокую биомассу в ряде наземных экосистем Байкальского региона и сопредельных территорий. Наиболее массово развивается в травянистых биоценозах антропогенно нарушенных территорий вблизи дорог, что косвенно свидетельствует о его значительном участии в их восстановлении [14]. Однако сведе-

ния о физиолого-биохимических особенностях вида, функционирующего в различных природных условиях региона, немногочисленны и фрагментарны. Цель настоящего исследования – впервые установить элементный состав (Ca, Mg, K, Na, Cu, Fe, Mn, Zn, Cd, Pb) *N. commune*, развивающегося в травянистых сообществах Байкальского региона на территориях разной степени антропогенной нарушенности, и определить влияние кислотности почвы на накопление элементов талломами вида.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Природные образцы почвенной цианопрокариоты *N. commune* (рис. 1) были собраны в июле 2018 года в окрестностях поселка Баяндай (Иркутская область, Россия) в непосредственной близости от автомагистрали Р-418. На рис. 2 показан район работ.

Территория относится к окраинному понижению Сибирской платформы. Местность сильно пересеченная, грядовая и холмистая с плоскими междуречьями и пологими склонами. Коренные породы – терригенно-угленосные юрские отложения, богатые известью из-за наличия известняков и мергелевых образований. Развита среднемошная и относительно мощная, преимущественно суглинистая, в верхней части генетического профиля слабокислые и нейтральные



Рис. 1. Таломы *Nostoc commune* различного жизненного состояния, расположенные на территории исследований в Байкальском регионе

Fig. 1. *Nostoc commune* thalli of different living status in the Baikal region research area



Рис. 2. Территория исследований. Район работ обозначен справа (красная точка); масштабная линейка – 50 км. Расположение пробных площадей показано справа. 1, 2, 3 – номера пробных площадей; масштабная линейка – 50 м

Fig. 2. Investigation territory location. The work area is marked on the right (red dot); scale bar – 50 km. The locations of the sampling areas (SA) are shown on the left. 1, 2, 3 are SA numbers; scale bar – 50 m

почвы с растительностью средней и повышенной продуктивности. В районе исследования преобладают степи [19, 20]. Автомагистраль Р-418 соединяет крупные города, расположенные на севере и юге Байкальского региона, с популярными туристическими направлениями на озере Байкал.

Дорога приобрела современный вид в 30-х годах прошлого века. В результате вскрыши грунта при строительстве дороги вдоль обочин размещаются насыпи (отвалы) высотой до нескольких метров (см. рис. 2). На отвалах сформировались растительные сообщества со значительным развитием злаков. В напочвенном покрове этих сообществ и рядом с отвалами широко представлен *N. commune*, на отдель-

ных участках выступающий как доминантный вид. Единичные макроколонии *N. commune* были обнаружены в растительном покрове ненарушенных прилегающих территорий.

Материалом для исследования послужили колонии, собранные на разном расстоянии от автомагистрали. Как отмечалось выше, территория характеризуется сложным рельефом. Образцы вида отбирали на 3-х пробных площадях (ПП) размером 100–150 м в длину и 20–25 м в ширину (см. рис. 2). ПП 1 расположена в непосредственной близости от трассы, захватывает обочину и склон насыпи, обращенный к дороге (табл. 1, см. рис. 2). ПП 2 и 3 находились у подножия отвалов с их противоположных от трассы

Таблица 1. Краткая характеристика мест отбора образцов

Table 1. Characteristics of the sampling areas

Пробные площади	Учетные площадки	Широта (N/°)	Долгота (E/°)	Высота (м)
1	1	53,02771	105,48410	670
1	2	53,02795	105,48454	678
1	3	53,02805	105,48501	677
1	4	53,02782	105,48411	685
1	5	53,02784	105,48422	677
1	6	53,02840	105,48589	682
1	7	53,02816	105,48564	676
2	8	53,02707	105,48431	676
2	9	53,02705	105,48428	674
2	10	53,02710	105,48447	676
2	11	53,02711	105,48453	676
2	12	53,02795	105,48454	673
2	13	53,02716	105,48472	674
2	14	53,02719	105,48528	675
3	15	53,02832	105,48447	673
3	16	53,02830	105,48431	673
3	17	53,02831	105,48424	672
3	18	53,02829	105,48418	674
3	19	53,02819	105,48380	673
3	20	53,02820	105,48393	671
3	21	53,02802	105,48360	667

сторон. Некоторые участки ПП 2 и 3 также были перекопаны во время строительства дороги. ПП 3 характеризуется наименьшей нарушенностью. На каждой ПП закладывали учетные площадки размером 1 м², на которых собирали все макроколонии вида. Площадки выбирали с учетом биомассы *N. commune*, поскольку для исследований необходимо значительное ее количество. Всего было заложено по 7 таких площадок. На учетных площадках ПП 2 и 3 также были взяты пробы поверхностных горизонтов дерново-карбонатной почвы для определения кислотности – О (0–1 см), А1 (1–4 см), А2В1 (5–15 см).

Талломы *N. commune* с одной учетной площадки объединяли в один смешанный образец, всего их 21. Собранные образцы промывали в дистиллированной воде, высушивали на воздухе при комнатной температуре, измельчали до порошкообразного состояния. Исследование содержания элементов в *Nostoc* проводилось после озоления материала в муфельной печи при 450 °С и его растворения в концентрированной HCl. Содержание кальция (Ca), магния (Mg), калия (K), натрия (Na) устанавливали методом эмиссионной пламенной фотометрии (пламенный фотометр Flapho 4 производства Carl Zeiss, Германия). Марганец (Mn), железо (Fe), цинк (Zn), медь (Cu), свинец (Pb), кадмий (Cd) определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии (атомно-абсорбционные спектрофотометры AAS Vario 6 производства Analytik Jena AG, Германия; Spectrum One FT-IR фирмы PerkinElmer Life and Analytical Sciences, США). Для измерений pH почвы использовали pH-метр Hanna Checker HI 98103 (Hanna Instruments, Китай). Все измерения проведены в 3-кратной аналитической повторности.

Для статистической обработки полученных данных применяли пакет статистических программ R версии 3.5.1 (2018). Для установления корреляции между содержанием минеральных элементов в *Nostoc* и кислотностью почвы использовали непараметрический коэффициент Спирмена. Рассчитывали t-критерий для определения уровня значимости. Карты исследуемой территории построены с помощью программы Google Earth.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные нами данные по содержанию минеральных элементов в талломах вида (табл. 2, рис. 3) в целом согласуются с таковыми в образцах *N. commune* из других регионов [18, 21–24] и водорослей пресноводных экосистем [3, 17, 25].

По усредненному содержанию элементы в ностоке ранжируются в следующем порядке: Ca>Mg>K>Fe>Na>Mn>Zn>Cu>Pb>Cd. Ранее сообщалось о способности *N. commune* накапливать значительное количество кальция и о том, что его можно отнести к кальцефилам [21]. Полученные нами данные согласуются с литературными.

По сравнению с высшими растениями региональные образцы *N. commune* накапливают значительно большие количества железа, тогда как концентрации других измеренных нами элементов находятся в диапазоне, установленном для континентальной растительности. Среднее содержание железа в растительном покрове континентов составляет 200 мг·кг⁻¹. Для примера,

в Забайкалье в травянистых растениях степей железа в среднем содержалось 182 (флуктуации 82–280) мг·кг⁻¹, в луговых растениях – 130 (56–195) мг·кг⁻¹, в смешанных травостоях – 164 (58–330) мг·кг⁻¹, в растениях рапса – 301 (214–435) мг·кг⁻¹ [цит. по 26]. В изученных талломах *Nostoc commune* содержание железа в среднем составило 2112 мг·кг⁻¹ (пределы колебаний 864–6011). Сходные данные по накоплению железа в ностоке были получены для образцов вида из тундровых биогеоценозов Российской Арктики [22]. В.И. Ермолаев [27] также отмечал, что образцы вида из якутской тундры содержат много железа, хотя значения автором не указаны. Повышенные концентрации Fe в талломах *N. commune* могут отражать геохимические особенности ландшафтов. Так, по данным исследований в Китае в ностоке не выявлено высокого содержания железа, значения варьировались в пределах, установленных для высших растений [23]. Другие исследователи отметили, что изученные ими образцы *N. commune* накапливали до 3940 мг·кг⁻¹ Fe [18].

В талломах *N. commune*, собранных на разном расстоянии от автотрассы Р-418, содержание кальция, магния, калия, натрия, марганца, железа, цинка, меди, свинца и кадмия сильно варьировалось (см. рис. 3, см. табл. 2). Отмечены значительные различия в содержании элементов в талломах *N. commune*, собранных на одной ПП (см. рис. 3), что может быть обусловлено местными особенностями почвенно-растительного покрова.

Известно, что в травянистых биогеоценозах горных регионов почвенно-растительный покров отличается комплексностью и неоднородностью [28–30]. В целом колонии вида, функционирующие рядом с автомагистралью на ПП 1, накапливали больше свинца, чем таковые на ПП 2 и 3, хотя максимальные значения этого элемента найдены в ностоке с одной из площадок на ПП 3. Только в талломах вида, функционировавших в непосредственной близости от трассы, обнаружены максимальные содержания кальция, магния, натрия, цинка, меди и кадмия (см. табл. 2, см. рис. 3). Вероятно, поступление этих элементов во многом обусловлено выбросами транспорта. Содержание калия, железа, марганца на ПП 1 не превышало таковое на ПП 2 и 3, расположенных на удалении от автомагистрали. *N. commune* не имеет специализированных тканей для поглощения элементов и воды, сорбция происходит пассивно. Вид занимает нижний ярус биогеоценозов, поэтому большое значение имеют особенности рельефа и характер растительного покрова, влияющие на поступление элементов из атмосферы. На наш взгляд, этим можно объяснить существенные различия в содержании ряда элементов в талломах *N. commune* вблизи магистрали и на удалении от нее, поскольку наличие отвалов вдоль дороги и развитый травянистый покров препятствуют поступлению элементов к колониям, растущим на поверхности почвы.

Уровни накопления химических элементов в живых организмах определяются явлениями синергизма и антагонизма между элементами, которые не постоянны. Они возникают и меняют свой характер в зависимости от стадии развития организма, концентрации элемента в среде и погодных условий. Степень

Таблица 2. Кислотность почвы и содержание элементов в талломах *N. commune* из Байкальского региона
 Table 2. Soil acidity and element content in *N. commune* thalloms from the Baikal region

ПП*	УП**	рН (H ₂ O почвы)/ горизонты			рН (КС) почвы/ горизонты			Содержание минеральных элементов в <i>Nostoc</i> (мг·кг ⁻¹ абс. сухого веса)									
		O	A1	A2B1	O	A1	A2B1	Pb	Cd	Fe	Cu	Zn	Ca	Mg	K	Na	
1	1	-***	-	-	-	-	-	3,92	0,134	3626,00	12,42	39,20	27440,00	8689,34	1731,34	326,66	
1	2	-	-	-	-	-	-	3,11	0,036	2156,00	4,24	16,98	8068,66	1698,66	2450,00	323,40	
1	3	-	-	-	-	-	-	6,20	0,069	1992,66	3,26	13,06	6206,66	1143,34	1992,66	280,94	
1	4	-	-	-	-	-	-	1,55	0,049	1681,33	4,53	14,23	9312,00	1746,00	2037,00	206,93	
1	5	-	-	-	-	-	-	1,48	0,036	1261,00	2,45	8,08	3556,67	646,67	2392,67	1778,33	
1	6	-	-	-	-	-	-	4,60	0,059	1829,34	3,92	20,26	8493,34	1829,34	2384,66	316,86	
1	7	-	-	-	-	-	-	4,60	0,059	2482,66	4,90	18,62	8591,34	2058,00	2482,66	271,14	
2	8	6,2	6,8	7,8	6,0	6,7	7,3	1,23	0,104	1067,00	4,53	17,14	14226,70	4494,33	1746,00	320,10	
2	9	6,8	6,9	8,0	6,6	6,8	7,4	0,84	0,086	864,00	3,84	16,96	14080,03	4640,00	1312,00	380,80	
2	10	6,8	7,1	7,2	6,6	7,0	7,1	1,30	0,108	1502,66	4,24	21,24	17574,60	5716,66	1764,00	336,46	
2	11	6,7	6,9	7,8	6,5	6,8	7,2	2,19	0,052	2352,00	4,90	20,23	11760,00	4050,66	2711,34	610,86	
2	12	6,6	6,6	7,4	6,3	6,5	7,2	1,50	0,059	1078,00	3,60	25,48	19698,00	6860,00	1600,66	454,06	
2	13	6,9	7,1	7,1	6,8	7,0	7,1	2,36	0,065	1422,67	5,50	22,63	17783,33	6143,33	1746,00	378,30	
2	14	5,8	5,8	6,4	5,4	5,6	6,0	4,24	0,046	6010,66	7,18	27,12	5978,00	2646,00	3038,00	316,86	
3	15	6,3	5,8	5,6	5,4	5,3	5,0	2,91	0,052	1143,34	3,26	20,58	7513,34	1666,00	2221,34	258,06	
3	16	-	-	-	-	-	-	6,86	0,059	2613,34	4,24	17,32	7513,34	1731,34	1927,34	248,26	
3	17	6,1	6,4	6,2	5,8	6,0	5,9	1,46	0,075	1907,67	3,88	23,28	8591,34	1992,66	2580,66	1078,00	
3	18	6,2	6,0	6,3	5,8	5,2	6,1	2,13	0,030	2809,34	5,22	20,90	6631,34	1502,66	1992,66	313,60	
3	19	5,9	6,2	6,2	5,8	5,6	5,5	1,11	0,051	1099,33	2,30	13,26	7210,33	1713,67	1843,00	523,80	
3	20	5,9	5,9	6,1	5,8	5,8	5,7	1,65	0,037	2244,00	3,96	24,75	7491,00	1782,00	2738,99	366,30	
3	21	6,5	6,4	6,4	5,8	5,8	5,6	2,38	0,042	3201,34	4,90	26,14	8591,34	2058,00	2352,00	277,66	

Примечание. * – пробные площади; ** – учетные площади; *** – данные отсутствуют.

корреляции между содержаниями элементов варьируется и изменяется от очень слабой до сильной [8, 18]. Нами установлена значительная положительная корреляция между содержанием ряда минеральных элементов в *Nostoc commune*, особенно марганцем

и железом, кальцием и магнием, и отрицательная корреляция между натрием и свинцом (табл. 3).

В литературе имеются противоречивые сведения о влиянии почвы на химический состав *N. commune* [18, 23]. В результате проведенных исследований

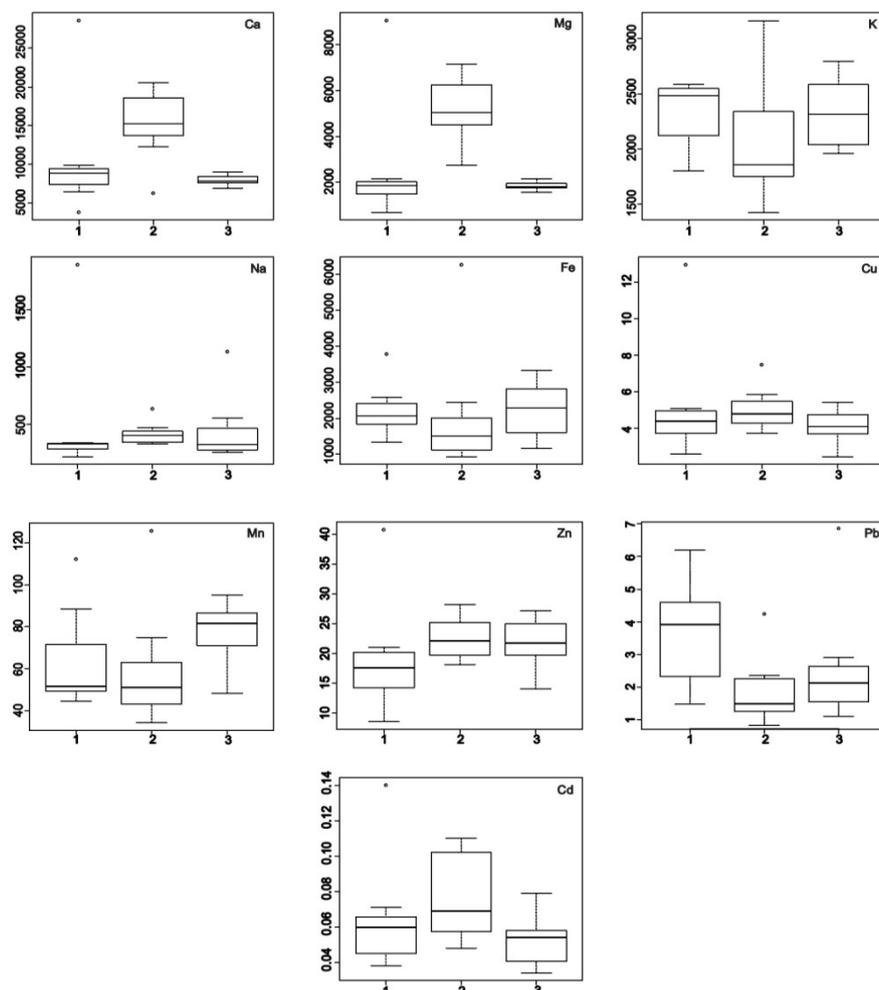


Рис. 3. Содержание минеральных элементов в талломах *Nostoc commune* ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ абсолютно сухой массы), собранных на разном расстоянии от автодороги. 1, 2, 3 – пробные площади ($n = 7$)

Fig. 3. *Nostoc commune* mineral compositions ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ of absolutely dry matter) collected from different location near the road P-418 in Baikal region. 1 – sample area (SA) 1; 2 – SA 2; 3 – SA 3 ($n=7$)

Таблица 3. Корреляция между элементами в *Nostoc commune*

Table 3. Correlation between elements in the *Nostoc commune*

	Cd	Pb	Mn	Fe	Cu	Zn	Ca	Mg	K	Na
Cd	–	-0,075	-0,340	-0,260	0,043	0,091	0,639	0,603	-0,539	0,063
Pb	-0,075	–	0,472	0,665	0,327	0,160	-0,245	-0,189	0,325	-0,606
Mn	-0,340	0,472	–	0,804	0,468	0,459	-0,281	-0,156	0,456	-0,242
Fe	-0,260	0,665	0,804	–	0,656	0,460	-0,244	-0,062	0,495	-0,369
Cu	0,043	0,327	0,468	0,656	–	0,536	0,333	0,468	0,099	-0,282
Zn	0,091	0,160	0,459	0,460	0,536	–	0,339	0,573	0,082	0,040
Ca	0,639	-0,245	-0,281	-0,244	0,333	0,339	–	0,854	-0,548	0,161
Mg	0,603	-0,189	-0,156	-0,062	0,468	0,573	0,854	–	-0,398	0,267
K	-0,539	0,325	0,456	0,495	0,099	0,082	-0,548	-0,398	–	-0,076
Na	0,063	-0,606	-0,242	-0,369	-0,282	0,040	0,161	0,267	-0,076	–

Таблица 4. Корреляция между элементами в *Nostoc* и кислотностью почвы

Table 4. Correlation between *Nostoc* elements and soil pH

Элементы	Коэффициент корреляции Спирмена					
	рН (KCl) почвы / горизонт			рН (H ₂ O) почвы / горизонт		
	0	A1	A2B1	0	A1	A2B1
Cd	0,580*	0,795**	0,586*	0,482	0,721**	0,606*
Pb	-0,053	-0,407	-0,440	-0,077	-0,451	-0,335
Mn	-0,637*	-0,573*	-0,609*	-0,186	-0,581*	-0,515
Fe	-0,577*	-0,511	-0,500	-0,363	-0,528	-0,412
Cu	0,010	0,073	0,191	0,084	0,075	0,232
Zn	-0,261	-0,159	-0,215	-0,165	-0,291	-0,242
Ca	0,824**	0,850**	0,644*	0,765**	0,855**	0,614*
Mg	0,777**	0,838**	0,761**	0,632*	0,764**	0,798**
K	-0,601*	-0,543	-0,576*	-0,592*	-0,634*	-0,518
Na	0,425	0,440	0,310	0,088	0,368	0,275

Примечание. Уровень статистической значимости: * – p=0,05; ** – p=0,01.

нами показано, что кислотность верхних горизонтов изученных почв варьируется от слабокислой до слабощелочной (см. табл. 2). Ранее было установлено, что кислотность органической подстилки и верхних гумусовых горизонтов снижается при переходе от ненарушенных к антропогенно нарушенным почвам [31]. Результаты ранговой корреляции Спирмена между содержанием элементов в *Nostoc* и кислотностью почвы показали, что концентрации Ca, Mg и Cd значительно и позитивно коррелируют с рН почвы (табл. 4). Выявлена отрицательная корреляция между Fe, Mn, K и кислотностью верхних горизонтов. Полученные данные свидетельствуют о том, что процессы, протекающие в почве, имеют значение для накопления ностоком элементов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые установлено содержание ряда элементов (Ca, Mg, K, Na, Cu, Fe, Mn, Zn, Cd, Pb) в талломах почвенной цианобактерии *Nostoc commune*, популяции которой функционируют в травянистых растительных сообществах Байкальского региона разной степени антропогенной нарушенности. Показано, что вид аккумулирует значительные количества кальция и может быть отнесен к кальцефилам. В сравнении с высшими растениями носток способен в высоких концентрациях аккумулировать железо, тогда как содержание других умеренных элементов находится в диапазоне значений,

установленных для континентальной растительности.

Установлено, что в условиях сложного рельефа местности, хорошо развитого растительного покрова воздействие техногенного загрязнения на наземные водоросли во многом зависит от близости их расположения к источнику загрязнения. В наших исследованиях максимальные концентрации Pb, Cd, Zn, Cu, Ca, Mg, Na были отмечены в образцах, собранных в непосредственной близости от автомагистрали.

Одним из определяющих факторов, влияющих на накопление химических элементов живыми организмами, является содержание элементов и их доступность в среде обитания. Атмосфера – это не единственный источник минерального питания и состава наземных водорослей. Такими источниками могут служить мертвые остатки высших растений, разрушающиеся коренные породы или почва [21]. Наши исследования показали, что процессы, происходящие в почве, влияют на накопление *Nostoc commune* химических элементов, т.к. установлена значительная корреляция между содержанием ряда элементов в ностоке и кислотностью почвы. Отмечена статистически значимая положительная корреляция между содержанием Ca, Mg, Cd в ностоке и рН почвы, отрицательная – между Fe, Mn, K и рН. Представляют большой интерес дальнейшие исследования в этой области.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Санина Н.Б., Чупарина Е.В., Нестерова А.А. Химический состав растительности Байкальского биосферного заповедника (в связи с проблемой деградации пихтовых лесов северного склона хр. Хамар-Дабан) // Сибирский экологический журнал. 2004. Т. 11. N 1. С. 57–65.
2. Белоголова Г.А., Коваль П.В., Матяшенко Г.В., Гуничева Т.Н., Чупарина Е.В. Распределение макроэлементов в растениях Южного Прибайкалья // Сибирский экологический журнал. 2006. Т. 13. N 3. С. 359–396.
3. Куликова Н.Н., Парадина Л.Ф., Сутурин А.Н., Таничева И.В., Ижболдина Л.А., Ханаев И.В. [и др.]. Микроэлементный состав круглогодично вегетиру-

ющих макроводорослей каменистой литорали оз. Байкал (Россия) // Альгология. 2008. Т. 18. N 3. С. 244–255.

4. Гребенщикова В.И., Китаев Н.А., Лустенберг Э.Е., Медведев В.И., Ломоносов И.С., Карчевский А.Н. Распределение радиоактивных элементов в окружающей среде Прибайкалья (Сообщение 1. Уран) // Сибирский экологический журнал. 2009. Т. 16. N 1. С. 17–28.

5. Гребенщикова В.И., Китаев Н.А., Лустенберг Э.Е., Медведев В.И., Ломоносов И.С., Карчевский А.Н. Распределение радиоактивных элементов в окружающей среде Прибайкалья (Сообщение 2.

- Торий и цезий-137) // Сибирский экологический журнал. 2010. Т. 17. N 3. С. 493–503.
6. Нечаева Е.Г., Белозерцева И.А., Напрасникова Е.В., Воробьева И.Б., Давыдова Н.Д., Дубынина С.С. [и др.]. Мониторинг и прогнозирование вещественно-динамического состояния геосистем Сибирских регионов: монография. Новосибирск: Наука, 2010. 315 с.
7. Павлова Л.А., Ткаченко А.В., Горегляд А.В., Кузьмин М.И. Особенности изучения элементного состава (неорганических компонентов) створок диатомовых водорослей методом РСМА // Методы и объекты химического анализа. 2014. Т. 9. N 2. С. 65–72.
8. Сосорова С.Б., Меркушева М.Г., Убугунов Л.Л. Содержание микроэлементов в лекарственных растениях разных экосистем озера Котокельского (Западное Забайкалье) // Химия растительного сырья. 2016. N 2. С. 53–59. <https://doi.org/10.14258/jscrpm.201602697>.
9. Шветцов С.Г., Воронин В.И. Распределение урана и тория в почве и растениях Восточной Сибири (Иркутская область) // Журнал Сибирского федерального университета. Биология. 2019. Т. 12. N 1. С. 86–100. <https://doi.org/10.17516/1997-1389-0035>.
10. Шергина О.В., Михайлова Т.А., Калугина О.В. Изменение биогеохимических показателей в сосновых лесах при техногенном загрязнении // Сибирский лесной журнал. 2018. N 4. С. 29–38. <https://doi.org/10.15372/SJFS20180404>.
11. Bogush A.A., Bobrov V.A., Klimin M.A., Vychinskii V.A., Leonova G.A., Krivonogov S.K., et al. Sedimentation and accumulation of elements in the Vydrino Peat Bog (Southern Baikal Region) // Russian Geology and Geophysics. 2019. Vol. 60, no. 2. P. 163–175. <https://doi.org/10.15372/RGG2019012>.
12. Shiretorova V.G., Zhigzhitzhapova S.V., Dylenova E.P., Radnaeva L.D. Accumulation of heavy metals in aquatic vegetation of the Barguzin River // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 169. P. 01018. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016901018>.
13. Кашин В.К. Содержание микроэлементов в пырее в Западном Забайкалье // Агрехимия. 2020. N 3. С. 55–61. <https://doi.org/10.31857/S0002188120030072>.
14. Егорова И.Н., Шамбуева Г.С., Шергина О.В., Шинен Н. К экологии *Nostoc commune* (Cyanoprokaryota) из Южной Сибири и Монголии // Сибирский лесной журнал. 2019. N 1. С. 16–29. <https://doi.org/10.15372/SJFS20190102>.
15. Егорова И.Н., Коновалов М.С., Шергина О.В., Дударева Н.В., Тупилова Г.С. Ассоциации водорослей и мохообразных рода *Hedwigia* P. Beauv. в горной тайге Хэнтэя (Забайкальский край, Россия) // Сибирский лесной журнал. 2020. N 6. С. 64–80. <https://doi.org/10.15372/SJFS20200606>.
16. Obana S., Miyamoto K., Motita S., Ohmori M., Inubushi K. Effect of *Nostoc* sp. on soil characteristics plant growth and nutrient uptake // Journal of Applied Phycology. 2007. Vol. 19, no. 6. P. 641–646. <https://doi.org/10.1007/s10811-007-9193-4>.
17. Revilla S.R., Pérez J.M., Salas J.V. Evaluación de la capacidad acumuladora de Cd(II), Pb(II) y Cr(VI) por colonias de *Nostoc commune* “Murmunta” // Revista de la Sociedad Química del Perú. 2018. Vol. 84, no. 2. P. 239–246.
18. Wang W., Li H., Guénon R., Yang Yu., Shu X., Cheng X., et al. Geographical variability of mineral elements and stability of restrictive mineral elements in terrestrial cyanobacteria across gradients of climate, soil and atmospheric wet deposition mineral concentration // Frontiers in Microbiology. 2021. Vol. 11. P. e582655. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.582655>.
19. Флоренсов Н.А., Олюнин В.Н. Рельеф и геологическое строение // Предбайкалье и Забайкалье. М.: Наука, 1965. С. 23–90.
20. Угланов М.Н., Бояркин В.М., Иванов И.Н., Филлипова С.А. Природно-мелиоративные условия в лесостепных районах Восточной Сибири. Иркутск: ИГУ, 1990. 160 с.
21. Большев Н.Н. Водоросли и их роль в образовании почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1968. 84 с.
22. Patova E.N., Sivkov M.D. Accumulation of heavy metals by *Nostoc commune* Vauch. ex Bornet et Flahault (Cyanoprokaryota) in terrestrial tundra ecosystems of the Russian Arctic // Algological Studies. 2003. Vol. 109, no. 1. P. 469–473. <https://doi.org/10.1127/1864-1318/2003/0109-0469>.
23. Diao Y., Han H., Zhang D., Zhou Ji., Yang Z. Determination of nine microelements in *Nostoc commune* Vauch by ICP-AES // Advanced Materials Research. 2012. Vol. 518-523. P. 5020–5023. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.518-523.5020>.
24. Горностаева Е.А., Фокина Ф.И., Кондакова Л.В., Огородникова С.Ю., Домрачева Л.И., Лаптев Д.С. [и др.]. Потенциал природных биопленок *Nostoc commune* как сорбентов тяжелых металлов в водной среде // Вода: химия и экология. 2013. N 1. С. 93–101.
25. Hoktha P., Kaewmekha A. Determination of heavy metal (Pb, Cd and Zn) in blue-green algae (*Nostoc commune*) by atomic absorption spectrophotometry // International Journal of Advances in Science Engineering and Technology. 2016. Vol. 3. P. 1–2.
26. Кашин В.К. Особенности накопления микроэлементов степной растительностью Западного Забайкалья // Агрехимия. 2014. N 6. С. 69–76.
27. Ермолаев В.И. Экологические особенности и значение *Nostoc commune* F. ulvaceum Elenk. // Экология. 1979. N 4. С. 90–92.
28. Козлова А.А., Кузьмин В.А., Напрасникова Е.В. Функционирование почв в бугристо-западных экосистемах Верхнего Приангарья // Сибирский экологический журнал. 2010. N 3. С. 407–417.
29. Убугунов Л.Л., Гынинова А.Б., Белозерцева И.А., Доржготов Д., Убугунова В.И., Сороковой А.А. [и др.]. Географические закономерности распределения почв на водосборной территории оз. Байкал (к карте «почвы бассейна оз. Байкал») // Природа Внутренней Азии. 2018. N 2. С. 8–26.
30. Намзалов Б.Б. Экстрараональные степные явления в горах Южной Сибири: особенности производственной организации, очаги новейшего видообразования и ценогенеза // Сибирский экологический журнал. 2020. N 5. С. 600–611. <https://doi.org/10.15372/SEJ20200504>.

31. Егорова И.Н., Тупилова Г.С., Шергина О.В., Казановский С.Г. Дополнительные сведения о водорослях почв степных фитоценозов Предбайкалья // Разнообразие почв и биоты Северной и Центральной

Азии: материалы IV Всероссийской научной конференции с международным участием (г. Улан-Удэ, 15–18 июня 2021 г.). Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2021. С. 153–156.

REFERENCES

1. Sanina N.B., Chuparina E.V., Nesterova A.A. Chemical composition of plants in the Baikal biospheric reserve (in connection with the problem of degradation of fir forest at the northern side of the Khamar-Daban mountain ridge). *Sibirskij ekologicheskij zhurnal = Contemporary Problems of Ecology*. 2004;11(1):57-65. (In Russian).
2. Belogolova G.A., Koval P.V., Matyashenko G.V., Gunicheva T.N., Chuparina E.V. Distribution of macroelements in plants of the South Baikal region. *Sibirskii ekologicheskii zhurnal = Contemporary Problems of Ecology*. 2006;13(3):359-396. (In Russian).
3. Kulikova X.X., Paradina I.F., Sitiurin A.N., Tanicheva I.V., Izhboldma I.A., Khunaev I.V., et al. Trace element composition of all-the-year-round vegetating macroalgae on the stony littoral of lake Baikal (Russia). *Al'gologiya = Algologia*. 2008;18(3):244-255. (In Russian).
4. Grebenshchikova V.I., Kitaev N.A., Lustenberg E.E., Lomonosov I.S., Medvedev V.I., Karchevskii A.N. Radioactive elements distribution in the environment of Pribaikal'e. Communication 1. Uranium. *Sibirskii ekologicheskii zhurnal = Contemporary Problems of Ecology*. 2009;16(1):17-28. (In Russian).
5. Grebenshchikova V.I., Kitaev N.A., Lustenberg E.E., Lomonosov I.S., Medvedev V.I., Karchevskii A.N. Radioactive elements distribution in the environment of Pribaikal'e. Communication 2. Thorium and cesium-137. *Sibirskii ekologicheskii zhurnal = Contemporary Problems of Ecology*. 2010;17(3):493-503. (In Russian).
6. Nechaeva E.G., Belozertseva I.A., Naprasnikova E.V., Vorobyeva I.B., Davydova N.D., Dubynina S.S. *Monitoring and forecasting of the substance-dinamical state of geosystems in the Siberian regions: monograph*. Novosibirsk: Nauka; 2010. 315 p. (In Russian).
7. Pavlova L.A., Tkachenko L.L., Goreglyad A.V., Kuzmin M.I. Peculiarities of the diatom valve chemical composition (inorganic components) study by electron probe X-ray microanalysis. *Metody i ob'ekty khimicheskogo analiza = Methods and Objects of Chemical Analysis*. 2014;9(2):65-72. (In Russian).
8. Sosorova S.B., Merkusheva M.G., Ubugunov L.L. The content of trace elements in medicinal plants of different ecosystems of Lake Kotokelskoe (Western Transbaikalia). *Khimija rastitel'nogo syr'ya*. 2016;(2):53-59. <https://doi.org/10.14258/jcpm.201602697>. (In Russian).
9. Shvettsov S.G., Voronin V.I. Distribution of uranium and thorium in soil and woody plants of Eastern Siberia (Irkutsk Region). *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Biologiya = Journal of Siberian Federal University. Biology*. 2019;12(1):86-100. (In Russian). <https://doi.org/10.17516/1997-1389-0035>.
10. Shergina O.V., Mikhailova T.A., Kalugina O.V. Change of biogeochemical indexes in pine forests under technogenic pollution. *Sibirskii lesnoi zhurnal*. 2018;(4):29-38. <https://doi.org/10.15372/SJFS20180404>.
11. Bogush A.A., Bobrov V.A., Klimin M.A., Bychinskii V.A., Leonova G.A., Krivonogov S.K., et al. Sedimentation and accumulation of elements in the Vydrino Peat Bog (Southern Baikal Region). *Russian Geology and Geophysics*. 2019;60(2):163-175. <https://doi.org/10.15372/RGG2019012>.
12. Shiretorova V.G., Zhigzhitzhapova S.V., Dylenova E.P., Radnaeva L.D. Accumulation of heavy metals in aquatic vegetation of the Barguzin River. *E3S Web of Conferences*. 2020;169:01018. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016901018>.
13. Kashin V.K. Microelements content of *Elytrigia repens* (L.) in the Western Transbaikalia. *Agrokhimiya = Agrohimia*. 2020;(3):55-61. (In Russian). <https://doi.org/10.31857/S0002188120030072>.
14. Egorova I.N., Shambueva G.S., Shergina O.V., Shinen N. On the ecology of *Nostoc commune* (Cyanoprokaryota) in Southern Siberia and Mongolia. *Sibirskii lesnoi zhurnal*. 2019;(1):16-29. (In Russian). <https://doi.org/10.15372/SJFS20190102>.
15. Egorova I.N., Kononov M.S., Shergina O.V., Dudareva N.V., Tupikova G.S. Algae and epilithic mosses associations of the *Hedwigia* P. Beauv. genus in mountain taiga of the Khentey uplands (Zabaykalskiy krai, Russia). *Sibirskii lesnoi zhurnal*. 2020;(6):64-80. (In Russian). <https://doi.org/10.15372/SJFS20200606>.
16. Obana S., Miyamoto K., Motita S., Ohmori M., Inubushi K. Effect of *Nostoc* sp. on soil characteristics plant growth and nutrient uptake. *Journal of Applied Phycology*. 2007;19(6):641-646. <https://doi.org/10.1007/s10811-007-9193-4>.
17. Revilla S.R., Pérez J.M., Salas J.V. Evaluación de la capacidad acumuladora de Cd(II), Pb(II) y Cr(VI) por colonias de *Nostoc commune* "Murmunta". *Revista de la Sociedad Química del Perú*. 2018;84(2):239-246.
18. Wang W., Li H., Guénon R., Yang Yu., Shu X., Cheng X., et al. Geographical variability of mineral elements and stability of restrictive mineral elements in terrestrial cyanobacteria across gradients of climate, soil and atmospheric wet deposition mineral concentration. *Frontiers in Microbiology*. 2021;11:e582655. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.582655>.
19. Florensov N.A., Olyunin V.N. Relief and geological structure. In: *Cisbaikalia and Transbaikalia*. Moscow: Nauka; 1965, p. 23–90. (In Russian).
20. Uglanov M.N., Boyarkin V.M., Ivanov I.N., Filipova S.A. *Natural and ameliorative conditions in the forest-steppe regions of Eastern Siberia*. Irkutsk: IGU; 1990. 160 p. (In Russian).
21. Bolyshchev N.N. *Algae and their role in soil formation*. Moscow: Izd-vo Mosk. un-ta; 1968. 84 p. (In Russian).
22. Patova E.N., Sivkov M.D. Accumulation of heavy metals by *Nostoc commune* Vauch. ex Bornet et Flahault (Cyanoprokaryota) in terrestrial tundra ecosystems of the Russian Arctic. *Algological Studies*. 2003;109(1):469-473. <https://doi.org/10.1127/1864-1318/2003/0109-0469>.
23. Diao Y., Han H., Zhang D., Zhou Ji., Yang Z. Determination of nine microelements in *Nostoc commune*

Vauch by ICP-AES. *Advanced Materials Research*. 2012;518-523:5020-5023. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.518-523.5020>.

24. Gornostaeva E.A., Fokina A.I., Kondakova L.V., Ogorodnikova S.Yu., Domracheva L.I., Laptev D.S., et al. Application perspectives of *Nostoc commune* biofilms as heavy metal sorbent in water. *Voda: khimiya i ekologiya*. 2013;(1):93-101. (In Russian).

25. Hoktha P., Kaewmekha A. Determination of heavy metal (Pb, Cd and Zn) in blue-green algae (*Nostoc commune*) by atomic absorption spectrophotometry. *International Journal of Advances in Science Engineering and Technology*. 2016;(3):1-2.

26. Kashin V.K. Accumulation features of microelements in steppe plants of Western Transbaikalia. *Al'gologiya = Algologia*. 2014;(6):69-76. (In Russian).

27. Ermolaev V.I. Ecological features and importance of *Nostoc commune* F. *ulvaceum* Elenk. *Ekologiya = Ecology*. 1979;(4):90-92. (In Russian).

28. Kozlova A.A., Kuz'min V.A., Naprasnikova E.V. Functioning of soils in the hummock-hollow ecosystems of the upper Angara Region. *Sibirskij Ekologicheskij*

Zhurnal. 2010;(3):407-417. (In Russian).

29. Ubugunov L.L., Gyninova A.B., Belozertseva I.A., Dorjgotov D., Ubugunova V.I., Sorokovoy A.A., et al. Geographical patterns of soil distribution within the watersheds of Baikal (as applied to the map "the soils of Baikal basin"). *Priroda Vnutrennei Azii = Nature of Inner Asia*. 2018;(2):8-26. (In Russian).

30. Namzalov B.B. Extrazonal phenomena in the mountains of Southern Siberia: peculiarities of morbidity, focus and progressive speciation and cenogenesis. *Sibirskij Ekologicheskij Zhurnal*. 2020;(5):600-611. (In Russian). <https://doi.org/10.15372/SEJ20200504>.

31. Egorova I.N., Tupikova G.S., Shergina O.V., Kazanovskii S.G. Additional information about algae in soils of steppe phytocenoses of Cisbaikalia. In: *Raznoobrazie pochv i bioty Severnoi i Tsentral'noi Azii: materialy IV Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem = Diversity of Soils and Biota of North and Central Asia: Proceedings of the All-Russian Scientific Conference with International Participation*. 15-18 June 2021, Ulan-Ude. Ulan-Ude: Izd-vo BNTs SO RAN; 2021, p. 153-156. (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Егорова Ирина Николаевна,

к.б.н., старший научный сотрудник,
Сибирский институт физиологии и биохимии растений,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 132,
Российская Федерация,
✉egorova@sifibr.irk.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2774-1653>

Шергина Ольга Владимировна,

к.б.н., старший научный сотрудник,
Сибирский институт физиологии и биохимии растений,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 132,
Российская Федерация,
sherolga80@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6333-8821>

Тупикова Галина Сергеевна,

ведущий технолог, аспирант,
Сибирский институт физиологии и биохимии растений,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 132,
Российская Федерация,
galina93shambueva@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-1751-1969>

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Поступила в редакцию 21.03.2022.
Одобрена после рецензирования 25.04.2022.
Принята к публикации 28.02.2023.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Irina N. Egorova,

Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher,
Siberian Institute of Plant Physiology
and Biochemistry,
132, Lermontov St., Irkutsk, 664033,
Russian Federation,
✉egorova@sifibr.irk.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2774-1653>

Olga V. Shergina,

Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher,
Siberian Institute of Plant Physiology
and Biochemistry,
132, Lermontov St., Irkutsk, 664033,
Russian Federation,
sherolga80@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6333-8821>

Galina S. Tupikova,

Leading Technologist, Postgraduate Student,
Siberian Institute of Plant Physiology
and Biochemistry,
132, Lermontov St., Irkutsk, 664033,
Russian Federation,
galina93shambueva@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-1751-1969>

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 21.03.2022.
Approved after reviewing 25.04.2022.
Accepted for publication 28.02.2023.