

УДК 581.571.151–25

ЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ ЛИШАЙНИКА НА ШИФЕРЕ КАК БИОИНДИКАТОР ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ АГЛОМЕРАЦИИ Г. ГОРНО-АЛТАЙСКА

Робертус Юрий Владимирович¹,
ariocol@mail.gorny.ru

Рихванов Леонид Петрович²,
rikhvanov@tpu.ru

Ситникова Валентина Александровна³,
valya_90_well@mail.ru

Савенко Ксения Сергеевна⁴,
ariocol@mail.gorny.ru

Большунова Татьяна Сергеевна²,
BolshunovaTS@gmail.com

¹ Институт водных и экологических проблем СО РАН,
Россия, 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1.

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

³ Горно-Алтайский государственный университет,
Россия, 649000, Республика Алтай, г. Горно-Алтайск, ул. Ленкина, 1.

⁴ Алтайский региональный институт экологии,
Россия, 649100, Республика Алтай, с. Майма, ул. Заводская, 54.

Актуальность работы обусловлена необходимостью оценки и мониторинга экологического состояния атмосферного воздуха в районе города Горно-Алтайска – наиболее урбанизированной территории Республики Алтай.

Цель работы: изучение химического состава и особенностей распределения элементов в лишайнике *Caloplaca* sp. (накипная) на шифере как биоиндикатора специфики и интенсивности антропогенной деятельности в пределах агломерации г. Горно-Алтайска.

Методы исследования: отбор на шиферной кровле строений репрезентативных проб лишайника *Caloplaca* sp. (накипная) и сопяженных проб шифера-субстрата, определение содержания в них 28 химических элементов методом инструментального нейтронно-активационного анализа, обработка и интерпретация полученных данных методами прикладной статистики.

Результаты. Впервые получены данные об уровнях содержания комплекса химических элементов в лишайнике *Caloplaca* sp. (накипная) на шифере в районе г. Горно-Алтайска. Проведено их сравнение с местным фоном и кларком в биосфере. Установлены тесные связи между элементами ассоциации As, Sb, Cr, Zn, Ba, Br, Co, Fe, U, PЗЭ в лишайнике, а также близкий уровень их концентраций и содержания в углях Кузнецкого бассейна. Приведена аргументация в пользу поступления этих элементов в лишайник *Caloplaca* sp. из атмосферного воздуха. Выявлены области их повышенных концентраций в лишайнике, пространственно совпадающие с очагами высокой пылевой нагрузки на территории агломерации. Сделан вывод о возможности использования элементного состава эпилитного лишайника *Caloplaca* sp. на шифере для целей биоиндикации специфики и интенсивности антропогенной деятельности, а также в качестве дополнительного показателя при мониторинге состояния приземной атмосферы населенных пунктов агломерации г. Горно-Алтайска.

Ключевые слова:

Горно-Алтайск, атмосферный воздух, лишайники на шифере, элементный состав, особенности распределения, загрязнение, биоиндикатор.

Введение

В Республике Алтай к слабо урбанизированным территориям относится хозяйственно-сели-тебная агломерация г. Горно-Алтайска и его при-городов, где в условиях расчлененного рельефа на площади 30 км² проживает 85 тыс. чел. Несмотря на отсутствие крупных и средних промышленных предприятий, компоненты окружающей среды на этой территории подвержены воздействию со сто-роны угольных котельных (в прошлом до 150 ед.) и автотранспортных средств (более 35 тыс. ед.) [1].

Следует отметить, что в районе г. Горно-Алтай-ска начиная с 1990-х гг. эпизодически проводи-лись работы по оценке экологического состояния и мониторингу компонентов окружающей среды, в основном атмосферного воздуха и природных вод.

В последние годы, после перевода основных ко-тельных на природный газ, экологическая обста-новка в пределах агломерации заметно улучши-лась, особенно состояние воздушного бассейна, для которого в зимние периоды были нередки про-цессы смогообразования. Очаги прошлого загряз-

нения атмосферного воздуха, в разной степени проявленные в почвенном покрове агломерации [2], нуждаются в подтверждении по другим природным средам и объектам, в частности, на примере широко распространенных накипных лишайников на шифере. Известно, что лишайники успешно используются в биоиндикационных исследованиях антропогенного и естественного загрязнения воздуха [3–5].

В литературе так называемые нитрофильные лишайники, обитающие на искусственных «каменистопоподобных» субстратах (бетоне, кирпиче, шифере и пр.) выделяются в отдельную группу эпилитной лишенофлоры [6, 7]. Характерными особенностями этих лишайников являются: долголетие, медленный постоянный рост, аэральное питание, безбарьерное накопление поллютантов [8, 9]. Это делает их чувствительным биоиндикатором широкого спектра загрязнителей атмосферного воздуха населенных пунктов и позволяет на их основе картографировать зоны многолетнего загрязнения, особенно на урбанизированных территориях [10–17].

С учетом того обстоятельства, что более 85 % агломерации г. Горно-Алтайска составляет частный сектор с одноэтажной застройкой и широким применением шифера в качестве кровельного материала, авторами была изучена возможность оценки по элементному составу обитающих на нем эпилитных лишайников уровня и специфики прошлого загрязнения приземной атмосферы этой территории.

В качестве тест-объекта в работе используются эпилитные лишайники *Caloplaca* sp., весьма распространенные и исследуемые в биоиндикации [18–20].

Материалы и методы

Объектом изучения служили шиферные крыши одноэтажных домов и надворных построек в г. Горно-Алтайске и в пригородных селах Майма, Кызыл-Озек, Алферово. Путем опроса уточнялась дата сооружения кровли. В основном опробовалась кровля со временем эксплуатации 40–60 лет. Всего на территории агломерации было взято 28 образцов доминирующего лишайника *Caloplaca* sp., представленного мелкими (0,1–0,5 мм) накипны-

ми агрегатами зеленовато-желтого цвета толщиной до 1–2 мм (рис. 1).

Расстояние между пунктами опробования составляло 1–2 км, то есть примерно 1 проба на 1 км². Для оценки влияния химического состава шифера на элементный состав покрытого им лишайника в четырех пунктах были взяты их сопряженные пробы.

Для однородности данных выбирались площади с проективным покрытием кровли около 50 %, которое определяли общепринятым в лишенологии [21, 22 и др.] визуальным способом сеточки-квадрата со стороной 10 см и ортогональными линиями через 1 см.

Отбор проводился в сухую погоду специальным ножом-скребком. Во избежание его контакта с поверхностью шифера края ножа обматывались изолентой, что обеспечивало срез лишайника на высоте более 0,5 мм. Все пробы просматривались под микроскопом и очищались от попавших частичек шифера. Подготовка проб лишайников к анализу заключалась в истирании материала до состояния пудры.

Элементный состав проб изучен методом ИНАА на исследовательском реакторе ИРТ-Т в лаборатории ядерно-геохимических методов Томского политехнического университета (аналитик А.Ф. Судыко). По результатам анализа были рассчитаны статистические параметры распределения элементов, их корреляционные связи, коэффициенты (K_c) и кларки (K_k) концентрации относительно местного фона и биосферы соответственно. Кроме того, проведен сравнительный анализ элементного состава субстрата – шифера и изученного лишайника *Caloplaca* sp.

Результаты и их обсуждение

Предварительно установлено, что в появлении и развитии лишайников на шифере в пределах агломерации г. Горно-Алтайска можно выделить три основные стадии. В первую из них на гребнях волн шиферных листов появляются темные пятна, во вторую на их месте развивается лишайник *Caloplaca* sp. (накипная), в третью среди его скоплений появляется красновато-оранжевые розетки *Xantoria* sp. (лопастная) (рис. 1).

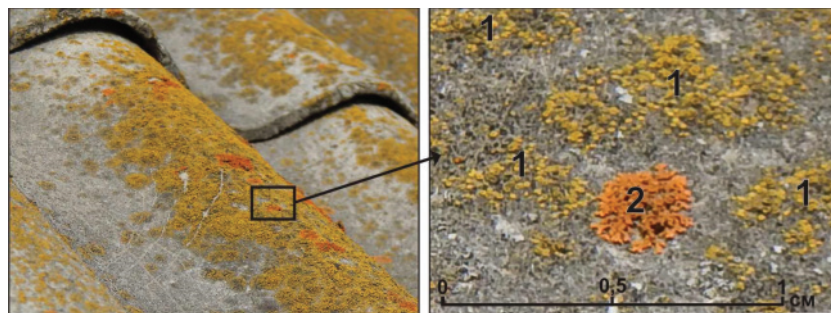


Рис. 1. Лишайники на шифере: 1 – *Caloplaca* sp. (накипная); 2 – *Xantoria* sp. (лопастная)

Fig. 1. Lichens on roofing slate: 1 – *Caloplaca* sp. (scale); 2 – *Xantoria* sp. (blade)

Таблица 1. Содержание МЭ в лишайнике и в шифере в районе г. Горно-Алтайска, мг/кг

Table 1. Contents of microelements in lichen and slate in the area of Gorno-Altaysk, mg/kg

МЭ ME	Лишайник <i>Caloplaca</i> sp. (накипная) Lichen <i>Caloplaca</i> sp. (scale)				Кс*, ед	Кк**, ед.	Шифер (субстрат) Slate (substrate)			$\bar{X}_n/\bar{X}_w$, ед.
	фон/background	max	mean	V, %			max	mean	V, %	
Na	0,1	1,28	0,51	62	5,1	0,3	0,11	0,09	13	5,67
Ca	0,7	2,33	1,28	25	1,8	0,8	19,7	17,0	30	0,08
Cr	30	235,0	78,7	52	2,6	15734	298,6	211,0	31	0,37
Fe	1	2,96	1,83	27	1,8	0,8	2,37	2,28	5	0,80
Co	4	17,2	9,46	28	2,4	4300	16,3	14,5	10	0,65
Zn	80	521,5	169,7	57	2,1	36891	359,1	158,7	85	1,07
As	4	16,4	8,26	33	2,0	27533	42,0	26,5	46	0,31
Br	7	31,0	19,2	32	2,7	7385	2,84	2,50	22	7,68
Rb	10	37,6	23,6	22	2,4	7167	10,6	4,51	87	5,23
Sb	0,2	2,96	1,14	54	5,7	45640	14,5	4,64	143	0,24
Cs	0,5	1,77	1,27	23	2,5	2117	0,81	0,35	92	3,63
Ba	120	492,7	271,7	27	2,3	75472	798,8	538,6	47	0,50
La	5	22,9	12,0	30	2,4	12000	10,9	8,67	17	1,38
Ce	10	71,5	27,0	42	2,7	8993	22,4	18,5	14	1,46
Hf	0,5	6,44	2,24	50	4,5	11200	1,37	1,02	26	2,20
Ta	0,1	0,78	0,41	51	4,1	2050	0,37	0,14	116	2,93
Th	1,5	4,78	3,01	27	2,0	3762	2,50	2,00	30	1,50
U	0,5	2,66	1,38	37	2,8	6900	1,60	1,39	12	1,00

* – содержание относительно местного фона, ** – то же относительно кларка элемента в биосфере [20].

* – content relative to local background, ** – the same with respect to the clark of element in the biosphere [20].

Впервые оцененное среднее содержание микро-элементов (МЭ) в этом лишайнике характеризуется умеренной вариабельностью, небольшим превышением местного фона (в среднем в 2,5 раза) и значительным – на 3–4 порядка – превышением их кларков в биосфере, кроме околосларковых концентраций железа, кальция и натрия (табл. 1).

Среднее содержание основных МЭ (более 10 мг/кг) в лишайнике *Caloplaca* sp. убывает в ряду: Ba, Zn, Cr, Ce, Rb, Br, La, Nd, а в субстрате-шифере в ряду: Ba, Cr, Zn, As, Ce, Ca, Co. При внешнем сходстве этих рядов в них есть и заметные различия, выражающиеся в отношении среднего содержания МЭ в лишайнике и в шифере. Наибольшие, более чем трехкратные, различия между ними проявлены для Ca, Sb, As, Cs, Na, Rb, Br.

Анализ элементного состава лишайника *Caloplaca* sp. в пределах изученных населенных пунктов агломерации показал, что максимальное содержание большинства МЭ проявлено на территории г. Горно-Алтайска и в подчиненном количестве в сопредельном с ним с. Алфёрово (табл. 2). Так, среднее значение коэффициента превышения местного фона по всем изученным МЭ увеличивается в ряду населенных пунктов: Кызыл-Озек (2,1) – Майма (2,5) – Алфёрово (3,0) – Горно-Алтайск (3,4).

Подобная ситуация объясняется концентрацией на территории города основных источников антропогенного воздействия на окружающую природную среду (котельных, автотранспорта) и доминирующим в теплые периоды года переносом их выбросов в восточном направлении в сторону с. Алфёрово [23].

Таблица 2. Параметры распределение МЭ в лишайнике *Caloplaca* sp., мг/кг

Table 2. Parameters of distribution of microelements in the lichen *Caloplaca* sp., mg/kg

МЭ ME	с. Майма (n=10) Mayma (n=10)		г. Горно-Ал- тайск (n=13) Gorno-Altaysk (n=13)		с. Алфёрово (n=2) Alpherovo (n=2)		с. Кызыл- Озек (n=3) Kyzyl-Ozek (n=3)	
	max	mean	max	mean	max	mean	max	mean
Na	1,16	0,46	1,28	0,60	0,44	0,43	0,66	0,37
Ca	1,54	1,14	2,33	1,44	1,18	1,09	1,46	1,09
Cr	84,5	55,7	235,0	102,9	64,5	62,8	102,8	62,1
Fe	1,93	1,51	2,96	2,16	2,01	1,94	1,37	1,32
Co	9,56	7,80	17,2	11,4	9,83	9,53	7,07	6,71
Zn	364,5	167,0	521,5	200,1	102,3	101,2	118,1	108,1
As	9,59	6,94	16,4	9,61	7,12	6,35	5,89	5,63
Br	27,3	18,2	31,0	20,0	23,1	21,8	24,0	19,9
Rb	32,6	22,2	37,6	24,8	29,0	27,6	22,2	20,8
Sb	1,47	0,89	2,96	1,57	0,73	0,63	0,84	0,59
Cs	1,61	1,29	1,77	1,22	1,74	1,66	1,57	1,25
Ba	319,1	241,5	492,7	309,8	231,0	209,6	273,4	225,4
Ce	29,2	20,7	71,5	33,3	30,8	30,2	20,9	18,3
Hf	2,51	1,74	6,44	2,74	2,66	2,65	1,55	1,42
Ta	0,52	0,31	0,78	0,50	0,49	0,48	0,47	0,30
Th	3,52	2,51	4,78	3,52	3,48	3,46	2,53	2,26
U	2,03	1,39	2,66	1,41	1,80	1,71	1,24	1,01

Примечание: выделены наибольшие средние концентрации МЭ в ряду населенных пунктов агломерации.

Note: the highest average concentrations of ME in a number of settlements of agglomeration are in bold.

Большинство изученных МЭ в лишайнике *Caloplaca* sp. имеют между собой тесные (на уровне более 95 %) положительные связи, доля которых как правило превышает 50 % от их общего числа. Наиболее устойчивые связи характерны для ассо-

циации типоморфных элементов As, Sb, Cr, Zn, Ba, Br, Co, Fe, U, РЗЭ. Среднее содержание этой группы МЭ в лишайнике в основном заметно ниже, чем в шифере (кроме цинка, урана, брома и РЗЭ). Исключением является пониженное число связей натрия, хрома, брома, цезия и золота (табл. 3). Так, все связи золота с другими МЭ отрицательные и незначимые, что в свете имеющихся данных не находит объяснения.

Анализ корреляционных связей между МЭ в сопряженных пробах лишайника *Caloplaca* sp. и в шифере показал, что большая их часть имеет близкий к значимому уровень и отрицательный знак, проявленный как для связей разных МЭ, так и для связи конкретных микроэлементов в лишайнике и в шифере. Доля отрицательных связей между МЭ в таких сопряженных пробах, как правило, превышает 60 % от их общего количества (рис. 2), кроме натрия (23 %) и кальция (42 %) (табл. 3). Эти данные согласуются с представлениями [24], что для лишайников, развивающихся на бедных МЭ субстратах, характерен более высокий уровень их аккумуляции, чем для тех, которые росли на богатых ими субстратах.

Таблица 3. Характер корреляционных связей МЭ в лишайнике *Caloplaca* sp. и шифере

Table 3. Nature of correlations of microelements in the lichen *Caloplaca* sp. and slate

Ba	Zn	Cr	Rb	Br	Co	As	Sb	Fe	Na	Ca	Cs	Hf	Th	U	РЗЭ
Число положительных корреляционных связей между МЭ ($p \geq 0,05$) в лишайнике, % Number of positive correlations between ME ($p \geq 0,05$) in the lichen, %															
81	35	19	50	12	73	50	58	80	0	54	23	73	81	50	70
Число отрицательных корреляционных связей между МЭ в лишайнике и в шифере ($p \geq 0,05$), % Number of negative correlations between ME in lichen and slate ($p \geq 0,05$), %															
69	81	62	88	62	88	69	69	72	23	42	75	61	62	62	80

Между долей значимых корреляционных связей МЭ в лишайнике *Caloplaca* sp. и их долей в сопряженных пробах лишайника и шифера проявлена зависимость, выражающаяся в том, что доля первых из них в целом увеличивается по мере на-

растания числа отрицательных связей МЭ в лишайнике и в шифере. Примечательно, что наименьший уровень связей МЭ в лишайнике характерен для наиболее «летучих» из них – бром, цезий и др. [25] (рис. 2). Доминирующий «противофазный» характер МЭ в лишайнике относительно содержания в шифере-субстрате наглядно виден при сравнении их средних концентраций (рис. 3).

Иными словами, чем выше «антагонизм» МЭ в лишайнике и субстрате, тем выше уровень прямых связей между МЭ в лишайнике. На наш взгляд, это обстоятельство указывает на: 1) почти полное отсутствие поступления МЭ из шифера в лишайник; 2) преобладающее поступление МЭ в лишайник из атмосферного воздуха; 3) тесную связь МЭ, предположительно поступающих в лишайник от их общего источника.

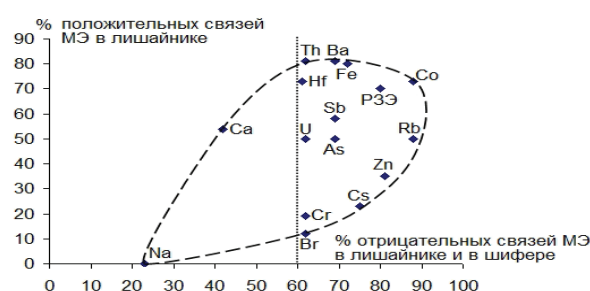


Рис. 2. Зависимость между числом связей МЭ ($p \geq 0,05$) в лишайнике *Caloplaca* sp. и частотой обратных связей МЭ в системе лишайник *Caloplaca* sp. – шифер-субстрат

Fig. 2. Relationship between the number of relationships of microelements ($p \geq 0,05$) in the lichen *Caloplaca* sp. and frequency of feedback of microelements in the lichen *Caloplaca* sp. – slate-substrate system

Сопоставление среднего содержания МЭ в лишайнике *Caloplaca* sp. и в углях Кузнецкого бассейна [26], которые в основном используются в котельных агломерации, показало их близкий характер (рис. 3). В пользу «угольной» природы загрязнения, фиксируемого лишайником, говорит и тот факт, что убывающий ряд концентраций МЭ, а также их отношений в нем (Th/U, Rb/Cs и др.) почти идентичен ряду их содержания в кузнецком угле. Отдельные отличия в рядах предположи-

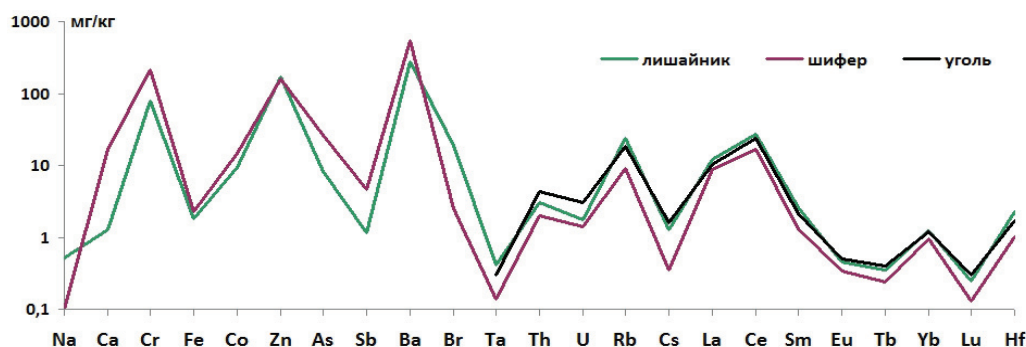


Рис. 3. Средние концентрации МЭ в лишайнике *Caloplaca* sp., в шифере-субстрате и в кузнецком угле

Fig. 3. Average concentrations of microelements in the lichen *Caloplaca* sp., in the slate-substrate and in Kuznetsk coal

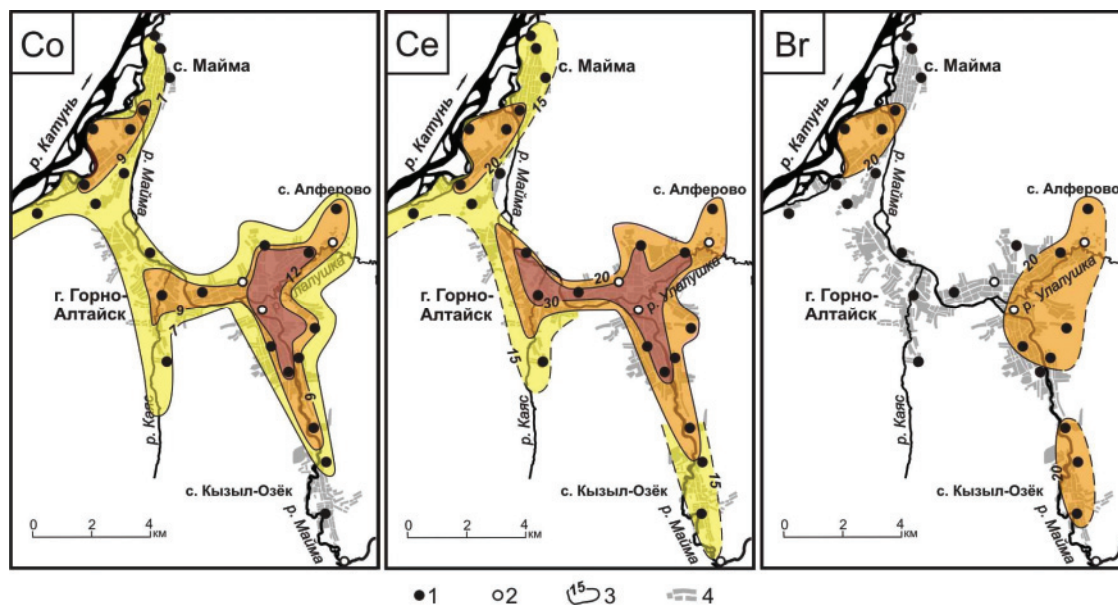


Рис. 4. Характер распределения МЭ в лишайнике *Caloplaca sp.* на территории агломерации г. Горно-Алтайска. Пункты опробования: 1 – лишайника, 2 – лишайника и шифера; 3 – области повышенного содержания микроэлементов (мг/кг) в лишайнике; 4 – промышленно-селитебная зона агломерации г. Горно-Алтайска

Fig. 4. Distribution of microelements in the lichen *Caloplaca sp.* in the agglomeration area of Gorno-Altaysk. The points of sampling: 1 – lichens, 2 – lichen and slate; 3 – region of the high content of microelements (mg/kg) in lichen; 4 – industrial-residential area agglomeration city of Gorno-Altaysk

тельно обусловлены частичным использованием бурых углей Канско-Ачинского бассейна.

На основании изложенного можно предполагать, что основным источником поступления изученных МЭ в лишайник на шифере (главным образом, ассоциации As, Sb, Cr, Zn, Ba, Br, Co, Fe, U, РЗЭ) являлись пылеаэрозольные выбросы, а также сажа и недожог угольных котельных в относительно недалеком прошлом (10–50 лет назад).

Установлено, что распределение на территории агломерации МЭ, аккумулирующихся в лишайнике *Caloplaca sp.*, имеет однотипный характер. Предварительно выявлены две области повышенного содержания МЭ в лишайнике, основная из которых охватывает центральную и восточную части г. Горно-Алтайска, а второстепенная – центр с. Майма (район развязки). Ореолы отдельных «летучих» МЭ (бром, цезий и др.) локализованы в восточной части агломерации (рис. 4).

Таким образом, полученные данные по элементному составу лишайника *Caloplaca sp.* на шифере позволяют с высокой степенью достоверности зонировать территорию агломерации г. Горно-Алтайска по уровню накопленного (прошлого и текущего) антропогенного воздействия (загрязнения) на приземную атмосферу. В качестве показателя уровня загрязнения атмосферного воздуха авторы использовали величину пылевой нагрузки в прошлый отопительный период 1997 г.

Следует отметить, что в «догазовый период» (до 2008 г.) пылевая нагрузка, создаваемая угольными котельными на территории агломерации, варьировалась в больших пределах – от менее

100 кг/км²сут на окраинах города и в пригородных селах до более 850 кг/км²сут в центральной и юго-восточной частях г. Горно-Алтайска.

Охарактеризованные по величине суммарного показателя загрязнения – СПЗ [27], области повышенного содержания типоморфной ассоциации «угольных» МЭ в лишайнике *Caloplaca sp.* пространственно совпадают с очагами повышенной и высокой пылевой нагрузки (рис. 5), что указывает на котельные как основной источник поступления МЭ в атмосферный воздух, а из него в лишайники на шифере.

Особенностью выделенных областей повышенного содержания МЭ в лишайнике *Caloplaca sp.* является их расплывчатый слабоконтрастный характер и отсутствие экстремальных концентраций элементов, что свидетельствует о способности лишайников «дозировано» поглощать МЭ, содержащиеся в аэрозолях и гидрозолях.

Полученные данные совместно с материалами ранее проведенных снегомерных работ позволили сопоставить пространственное распределение основных микроэлементов (Zn, Cr, As, Se и др.) и их СПЗ в лишайнике *Caloplaca sp.* с уровнем пылевой нагрузки и в конечном итоге со степенью загрязнения снежного и почвенного покрова на территории агломерации г. Горно-Алтайска (табл. 4). С учетом тесной связи этих показателей уровня антропогенного загрязнения компонентов окружающей среды возможно построение номограмм для индикации и предварительной оценки экологического состояния локальных участков в пределах изученной площади.

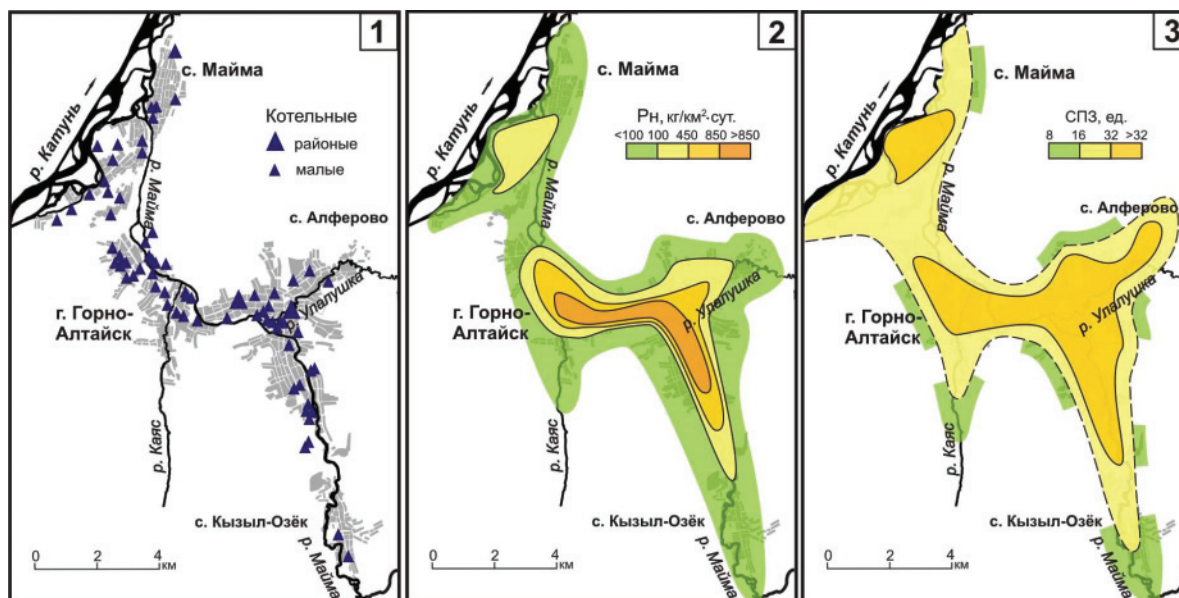


Рис. 5. Схема угольных котельных (1) и пылевая нагрузка (2) на территории агломерации в 1997 г., распределение СПЗ для МЭ в лишайнике *Caloplaca* sp. (3)

Fig. 5. Scheme of coal-fired boilers (1) and dust load (2) in the agglomeration area in 1997, distribution of the total pollution index for microelements in the lichen *Caloplaca* sp. (3)

Таблица 4. Уровни пылевой нагрузки, содержания МЭ и СПЗ лишайника *Caloplaca* sp. на территории агломерации г. Горно-Алтайска

Table 4. Levels of dust loading, content of microelements and total pollution index of the lichen *Caloplaca* sp. in the agglomeration area of Gorno-Altaysk

Степень загрязнения Pollution level	Пылевая нагрузка, кг/км²·сут Dust load, kg/ km² day	СПЗ, ед. TPI, units	Среднее содержание микроэлементов, мг/кг Average content of microelements, mg / kg					
			Fe	Zn	Cr	Co	As	Ce
Низкая/Low	<100	<30	<1,4	<120	<50	<7	<6	<20
Повышенная/Elevated	100–250	30–40	1,4–1,7	120–170	50–70	7–9	6–8	20–25
Средняя/Medium	250–450	40–50	1,7–2,0	170–250	70–90	9–11	8–10	25–30
Высокая/High	>450	>50	>2,0	>250	>90	>11	>10	>30

Закключение

На основании вышеизложенных данных можно сделать следующие выводы:

1. Элементный состав доминирующего на шифере эпилитного лишайника *Caloplaca* sp. (накипная) в пределах агломерации г. Горно-Алтайска представлен в основном ассоциацией типоморфных микроэлементов (As, Sb, Cr, Zn, Ba, Br, Co, Fe, U, РЗЭ), содержащихся в выбросах котельных, работающих на кузнецком угле.
2. Для этой ассоциации «угольных» МЭ в лишайнике *Caloplaca* sp. характерны ясно выраженные обратные связи с их концентрациями в шифере, свидетельствующие о преобладающем поступлении МЭ в лишайник из атмосферного воздуха.

3. Области повышенных концентраций этой ассоциации МЭ в лишайнике *Caloplaca* sp. пространственно совпадают с прошлыми очагами высокой пылевой нагрузки на территории агломерации г. Горно-Алтайска. Максимальное содержание МЭ в лишайнике проявлено на территории г. Горно-Алтайска и частично на смежной подветренной части с. Алферово.
4. Элементный состав лишайника *Caloplaca* sp. и, вероятно, других эпилитных лишайников на шифере служит надежным биоиндикатором специфики и интенсивности прошлой и частично текущей антропогенной деятельности [28] и может использоваться в качестве дополнительного метода при мониторинге состояния приземной атмосферы населенных пунктов агломерации г. Горно-Алтайска.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ситникова В.А. Обзор антропогенного загрязнения природных сред на территории агломерации г. Горно-Алтайска // Природные ресурсы Горного Алтая. – 2014. – № 1–2. – С. 73–77.
2. Робертус Ю.В. К вопросу формирования антропогенных отрицательных геохимических аномалий // Биогеохимия техногенеза и современные проблемы геохимической экологии: Матер. IX Межд. биогеохимической школы. – Барнаул: 2015. – Т. I. – С. 197–200.
3. Use of geochemical signatures, including rare earth elements, in mosses and lichens to assess spatial integration and the influence of forest environment / L. Gandois, Y. Agnan, S. Leblond, N. Sejalon-Delmas, G. Le Roux, A. Probst // Atmospheric Environment. – 2014. – V. 95. – P. 96–104.
4. Василевич М.И., Василевич Р.С. Особенности накопления тяжелых металлов эпифитными лишайниками в таежной зоне фоновых территорий европейского северо-востока России // Экология. – 2018. – № 1. – С. 17–23.
5. Bargagli R. Moss and lichen biomonitoring of atmospheric mercury: a review // Science of the Total Environment. – 2016. – V. 572. – P. 216–231.
6. Малышева Н.В. Лишайники городов европейской России: автореф. дис. ... д-ра наук. – СПб., 2005. – 38 с.
7. Nash T.H. Lichen biology. – Cambridge: Cambridge University Press, 1996. – 303 p.
8. Rossbach M., Lambrecht S. Lichens as Biomonitors: Global, Regional and Local Aspects // Croatica Chemica Acta. – 2006. – V. 79 (1). – P. 119–124.
9. Markert B., Wünschmann S., Baltrėnaitė E. Innovative observation of the environment. Bioindicators and biomonitors: definitions, strategies and applications // Journal of Environmental Engineering and Landscape Management. – 2012. – V. 20 (3). – P. 221–239.
10. Conti M.E., Cecchetti G. Biological monitoring: lichens as bioindicators of air pollution assessment – a review // Environmental Pollution. – 2001. – V. 114 (3). – P. 471–492.
11. Кузнецова В.Ф. Эпифитные лишайники как индикаторы загрязнения атмосферного воздуха газообразными поллютантами, тяжелыми металлами и радионуклидами: автореф. дис. ... канд. наук. – Нижний Новгород, 2004. – 24 с.
12. Richardson D.H.S. Understanding the pollution sensitivity of lichens // Botanical Journal of the Linnean Society. – 1988. – V. 96. – P. 31–43.
13. Большунова Т.С., Рихванов Л.П., Барановская Н.В. Элементный состав лишайников как индикатор загрязнения атмосферы // Экология и промышленность России. – 2014. – № 11. – С. 26–31.
14. Сафранкова Е.А. Комплексная лишайноиндикация общего состояния атмосферы урбоэкосистем: дис. ... канд. наук. – Брянск, 2014. – 204 с.
15. Lichen biomonitoring near Karabash Smelter Town, Ural Mountains, Russia, one of the most polluted areas in the world / O.W. Purvis, P.J. Chimonides, G.C. Jones, I.N. Mikhailova, B. Spiro, D.J. Weiss, B.J. Williamson // Proc. R. Soc. Lond. B. – 2004. – V. 27. – P. 221–226. URL: <http://rspb.royalsocietypublishing.org> (дата обращения 25.10.2017).
16. Lichen monitoring as a potential tool in environmental forensics: case study of the Cu smelter and former mining town of Karabash, Russia / O.W. Purvis, B.J. Williamson, B. Spiro, V. Udachin, I.N. Mikhailova, A. Dolgoplova // Environmental and Criminal Geoforesics. – London: Geological Society, London, 2013. – Special Publications. – V. 384. – P. 133–136.
17. Mezhibor A.M., Bolshunova T.S., Rikhvanov L.P. Geochemical features of sphagnum mosses and epiphytic lichens in oil and gas exploitation areas (the case of Western Siberia, Russia). Environmental Earth Sciences: Scientific Journal. – 2016. – V. 17. – Iss. 165. – P. 1260. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12665-016-6062-y> (дата обращения 11.11.2017).
18. Dispersal patterns of meiospores shape population spatial structure of saxicolous lichens / M. Morando, E. Favero-Longo, E. Matteucci, S. Sandrone, L. Appolonia, M. Carrier, J. Nascimbene, R. Piervittori // The Lichenologist. – 2017. – V. 49. – № 4. – P. 397–413.
19. Contribution to the knowledge of genus caloplaca in central European Russia / E. Muchnik, R. Wilk, J. Vondrak, I. Frolov // Polish Botanical Journal. – 2014. – V. 59. – № 2. – P. 263–270.
20. Бязров Л.Г., Пельгунова Л.А. Микрорентгенофлуоресцентная спектроскопия содержания химических элементов на поверхностях вегетативных частей и плодовых органов лишайнизированных грибов семейства Teloschistaceae // Журнал прикладной спектроскопии. – 2015. – Т. 82. – № 6. – С. 923–927.
21. Закутнова В.И. Экобиоморфологический анализ лишайнофлоры дельты Волги: Таксономический состав, география, мониторинг городов и заповедных мест: дис. ... д-ра наук. – Астрахань, 2004. – 358 с.
22. Accumulation of inorganic contaminants / R. Bargagli, I. Mikhailova, P.L. Nimis, C. Scheidegger, P.A. Wolseley // Monitoring with Lichens. – Kluwer: Academic Publishers, 2002. – P. 65–84.
23. Состояние воздушного бассейна в районе г. Горно-Алтайска / Ю.В. Робертус, Р.В. Любимов, А.В. Кивацкая, Г.А. Шевченко // Проблемы и перспективы социально-экономического развития города: Матер. науч.-практ. конф. – Горно-Алтайск, 2013. – С. 112–115.
24. Бязров Л.Г. Лишайники в экологическом мониторинге. – М.: Научный мир, 2002. – 336 с.
25. Иванов В.В. Экологическая геохимия элементов: справочник: в 6 кн. Кн. 1. – М.: Недра, 1994. – 304 с.
26. Редкие элементы в углях Кузнецкого бассейна / С.И. Арбузов, В.В. Ершов, А.А. Поцелуев, Л.П. Рихванов. – Кемерово: Кемеровский полиграфкомбинат, 2000. – 248 с.
27. Сагт Ю.Е., Башаркевич И.Л., Ревич Б.А. Методические рекомендации по геохимической оценке источников загрязнения окружающей среды. – М.: ИМГРЭ, 1982. – 102 с.
28. Bargagli R. Trace Elements in Terrestrial Plants: an Ecophysiological Approach to Biomonitoring and Biorecovery. – Berlin: Springer, 1998. – 324 p.

Поступила 15.11.2017 г.

Информация об авторах

Робертус Ю.В., кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Горно-Алтайского филиала Института водных и экологических проблем СО РАН.

Рихванов Л.П., доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры геоэкологии и геохимии Института природных ресурсов Томского политехнического университета.

Ситникова В.А., аспирант Горно-Алтайского госуниверситета.

Савенко К.С., кандидат географических наук, старший научный сотрудник Алтайского регионального института экологии.

Большунова Т.С., кандидат геолого-минералогических наук, инженер-исследователь кафедры геоэкологии и геохимии Института природных ресурсов Томского политехнического университета.

UDC 581.571.151–25

ELEMENTAL COMPOSITION OF LICHEN ON ROOFING SLATE AS BIOINDICATOR OF AIR POLLUTION IN GORNO-ALTAYSK

Yury V. Robertus¹,
ariocol@mail.gorny.ru

Leonid P. Rikhvanov²,
rikhvanov@tpu.ru

Valentina A. Sitnikova³,
valya_90_well@mail.ru

Kseniya S. Savenko⁴,
ariocol@mail.gorny.ru

Tatiana S. Bolshunova²,
BolshunovaTS@gmail.com

¹ Institute of water and environmental problems SB RAS,
1, Molodezhnaya street, Barnaul, 656038, Russia.

² National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

³ Gorno-Altaysk State University,
1, Lenkina street, Gorno-Altaysk, 649000, Russia.

⁴ Altai Regional Institute of Ecology,
54, Zavodskaya street, Mayma, 649100, Russia.

Relevance of the work is caused by the need to assess and monitor the ecological condition of atmospheric air in Gorno-Altaysk as the most urbanized area of the Altai Republic.

The main aim of the study is the research of chemical composition and characteristics of distribution of elements in the lichen *Caloplaca* sp. (scale) on the slate as a bioindicator of the specificity and intensity of anthropogenic activities in Gorno-Altaysk.

The methods: lichen *Caloplaca* sp. (scale) and conjugate slate sampling from the roof of buildings, determination of content of 28 chemical elements using instrumental neutron activation analysis, processing and interpretation of the data obtained by the methods of applied statistics.

The results. The authors have obtained the data on the levels of contents of chemical elements in the lichen *Caloplaca* sp. (scale) on the slate near Gorno-Altaysk and compared them with local background and Clarke in the biosphere. Close relationship between the elements of As, Sb, Cr, Zn, Ba, Br, Co, Fe, U association, rare earth elements in lichen, as well as their level of concentration and content in coals of the Kuznetsk basin was determined. The paper introduces the argument in favor of admission of these elements in the lichen *Caloplaca* sp. from atmospheric air. The authors revealed the scope of their elevated concentrations in lichen, spatially coincident with areas of high dust load within the Metropolitan area. The conclusion is made about the possibility of using the elemental composition of the epilithic lichen *Caloplaca* sp. on the slate for bioindication of specificity and intensity of anthropogenic activities, as well as an additional indicator for monitoring the condition of surface atmosphere of the settlements within Gorno-Altaysk area.

Key words:

Gorno-Altaysk, air, lichen on slate, elemental composition, peculiarities of distribution, pollution, bioindicator.

REFERENCES

1. Sitnikova V.A. An overview of anthropogenic contamination of the natural environments within the Metropolitan area the city of Gorno-Altaysk. *Natural resources of Gorny Altai*, 2014, no. 1–2, pp. 73–77. In Rus.
2. Robertus Yu.V. K voprosu formirovaniya antropogennykh otritsatelnykh geokhimicheskikh anomalii [About formation of negative anthropogenic geochemical anomalies]. *Biogeokhimiya tekhnogeneza i sovremennye problemy geokhimicheskoy ekologii. Materialy IX Mezhdunarodnoy biogeokhimicheskoy shkoly* [Biogeochemistry of technogenic and contemporary problems of geochemical ecology: Materials IX Int. Biogeochemical School]. Barnaul, 2015. Vol. I, pp. 197–200.
3. Gandois L., Agnan Y., Leblond S., Sejalon-Delmas N., Le Roux G., Probst A. Use of geochemical signatures, including rare earth elements, in mosses and lichens to assess spatial integration and the influence of forest environment. *Atmospheric Environment*, 2014, vol. 95, pp. 96–104.
4. Vasilevich M.I., Vasilevich R.S. The features of accumulation of heavy metals in epiphytic lichens in a taiga zone of background territories of the European northeast of Russia. *Ehkologiya*, 2018, no. 1, pp. 17–23. In Rus.
5. Bargagli R. Moss and lichen biomonitoring of atmospheric mercury: a review. *Science of the Total Environment*, 2016, vol. 572, pp. 216–231.
6. Malysheva N.V. *Lishayniki gorodov evropeyskoy Rossii*. Avtoreferat Kand. Diss. [Lichens of the cities of European Russia. Cand. Diss. Abstract]. St-Petersburg, 2005. 38 p.

7. Nash T.H. *Lichen biology*. Cambridge, Cambridge University Press, 1996. 303 p.
8. Rossbach M., Lambrecht S. Lichens as Biomonitors: Global, Regional and Local Aspects. *Croatica Chemica Acta.*, 2006, vol. 79 (1), pp. 119–124.
9. Markert B., Wünschmann S., Baltrėnaitė E. Innovative observation of the environment. Bioindicators and biomonitors: definitions, strategies and applications. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 2012, vol. 20 (3), pp. 221–239.
10. Conti M.E., Cecchetti G. Biological monitoring: lichens as bioindicators of air pollution assessment – a review. *Environmental Pollution*, 2001, vol. 114 (3), pp. 471–492.
11. Kuznetsova V.F. *Epifitnye lishayniki kak indikator zagryazneniya atmosferynogo vozdukh gazoobraznyimi pollyutantami, tyazhelyimi metallami i radionuklidami*. Avtoreferat Kand. Diss. [Epiphytic lichens as indicators of air pollution with gaseous pollutants, heavy metals and radionuclides. Cand. Diss. Abstract]. Nizhny Novgorod, 2004. 24 p.
12. Richardson D.H.S. Understanding the pollution sensitivity of lichens. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 1988, vol. 96, pp. 31–43.
13. Bolshunova T.S., Rikhvanov L.P., Baranovskaya N.V. Elemental composition of lichens as indicator of atmospheric pollution. *Ecology and industry of Russia*, 2014, no. 11, pp. 26–31. In Rus.
14. Safrankova E.A. *Kompleksnaya likhenindikatsiya obshchego sostoyaniya atmosfery urboekosistem*. Diss. Kand. nauk [Complex lichen-indications of the general condition of the atmosphere of urban ecosystems. Cand. Diss.]. Bryansk, 2014. 204 p.
15. Purvis O.W., Chimonides P.J., Jones G.C., Mikhailova I.N., Spiro B., Weiss D.J., Williamson B.J. Lichen biomonitoring near Karabash Smelter Town, Ural Mountains, Russia, one of the most polluted areas in the world. *Proc. R. Soc. Lond. B.*, 2004, vol. 27, pp. 221–226. Available at: <http://rspb.royalsocietypublishing.org> (accessed 25 October 2017).
16. Purvis O.W., Williamson B.J., Spiro B., Udachin V., Mikhailova I.N., Dolgoplova A. Lichen monitoring as a potential tool in environmental forensics: case study of the Cu smelter and former mining town of Karabash, Russia. *Environmental and Criminal Geoforensics*. London, Geological Society, London, Special Publications, 2013. Vol. 384, pp. 133–136.
17. Mezhibor A.M., Bolshunova T.S., Rikhvanov L.P. Geochemical features of sphagnum mosses and epiphytic lichens in oil and gas exploitation areas (the case of Western Siberia, Russia). *Environmental Earth Sciences: Scientific Journal*, 2016, vol. 17, Iss. 165, pp. 1260. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12665-016-6062-y> (accessed 11 November 2017).
18. Morando M., Favero-Longo E., Matteucci E., Sandrone S., Appolonia L., Carrier M., Nascimbene J., Piervittori R. Dispersal patterns of meiospores shape population spatial structure of saxicolous lichens. *The Lichenologist*, 2017, vol. 49, no. 4, pp. 397–413.
19. Muchnik E., Wilk R., Vondrak J., Frolov I. Contribution to the knowledge of genus *Caloplaca* in central European Russia. *Polish Botanical Journal*, 2014, vol. 59, no. 2, pp. 263–270.
20. Biazrov L.G., Pelgunova L.A. Micro-x-ray fluorescence spectrometry of the chemical elements composition on surfaces of vegetative parts and fruit bodies of lichenized fungi family Teloschistaceae. *Journal of Applied Spectroscopy*, 2015, vol. 82, no. 6, pp. 923–927. In Rus.
21. Zakutnova V.I. *Ekobiomorfologichesky analiz likhenoflory delty Volgi: Taksonomichesky sostav, geografiya, monitoring gorodov i zapovednykh mest*. Diss. Kand. nauk [Ecobiomorphological analysis of the lichen flora of the Volga Delta: taxonomic composition, geography, the monitoring of cities and protected areas. Cand. Diss.]. Astrakhan, 2004. 358 p.
22. Bargagli R., Mikhailova I., Nimis P.L., Scheidegger C., Wolseley P.A. Accumulation of inorganic contaminants. *Monitoring with Lichens*. Kluwer, Academic Publishers, 2002. pp. 65–84.
23. Robertus Yu.V., Lyubimov R.V., Kivatskaya A.V., Shevchenko G.A. Sostoyanie vozdukhnoy basseyna v rayone g. Gorno-Altayskaya [The state of air basin in the city of Gorno-Altaysk]. *Problemy i perspektivy sotsialno-ekonomicheskogo razvitiya goroda: materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Problems and prospects of socio-economic development of the city. Proc. of scientific-practical conference]. Gorno-Altaysk, 2013. pp. 112–115.
24. Biazrov L.G. *Lishayniki v ekologicheskoy monitoringe* [Lichens in environmental monitoring]. Moscow, Nauchny mir Publ., 2002. 336 p.
25. Ivanov V.V. *Ekologicheskaya geokhimiya elementov: spravochnik* [Environmental Geochemistry of elements: handbook]. Moscow, Nedra Publ., 1994. 304 p.
26. Arbuzov S.I., Ershov V.V., Potseluev A.A., Rikhvanov L.P. *Redkie elementy v uglyakh Kuznetskogo basseyna* [Rare elements in coals of the Kuznetsk basin]. Kemerovo, Kemerovskiy poligraf-kombinat, 2000. 248 p.
27. Saet Yu.E., Basharkevich I.L., Revich B.A. *Metodicheskie rekomendatsii po geokhimicheskoy otsenke istochnikov zagryazneniya okruzhayushchey sredy* [Methodic recommendations for geochemical assessment of pollution sources of the environment]. Moscow, IMGRE Publ., 1982. 102 p.
28. Bargagli R. *Trace Elements in Terrestrial Plants: an Ecophysiological Approach to Biomonitoring and Biorecovery*. Berlin, Springer, 1998. 324 p.

Received: 15 November 2017.

Information about the authors

Yuriy V. Robertus, Cand. Sc., leading researcher, Gorno-Altai branch of the Institute for Water and Environmental Problems SB RAS.

Leonid P. Richvanov, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Valentina A. Sitnikova, postgraduate student, Gorno-Altai State University.

Ksenia S. Savenko, Cand. Sc., senior researcher, Altai Regional Institute of Ecology.

Tatiana S. Bolshunova, Cand. Sc., researcher, National Research Tomsk Polytechnic University.