

УДК 574.4; 581.5
DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4448
Шифр специальности ВАК: 1.6.4

Оценка особенностей аэрогенного воздействия Норильского промышленного комплекса на природную среду с использованием эпигейных лишайников

А.В. Горбунов¹, Д.Б. Петренко^{1,2}✉, Б.В. Ермолаев¹,
А.А. Дронова^{1,2}, Е.В. Аристархова^{1,2}, О.И. Окина¹

¹ Геологический институт РАН, Россия, г. Москва

² Государственный университет просвещения, Россия, г. Мытищи

✉ dbpetrenko@yandex.by

Аннотация. *Актуальность* исследования обусловлена необходимостью изучения особенностей аэрогенного воздействия Норильского промышленного комплекса на природную среду. *Цель:* изучение особенностей аэрогенного воздействия Норильского промышленного комплекса в южной-юго-западной зоне на удалении 40–60 км с использованием лишайников *Cladonia rungeferina* и *Cetraria sp.* *Объекты:* почва, лишайники *Cladonia rungeferina* и *Cetraria sp.* *Методы.* Проведен отбор образцов почв и лишайников в 40–60 км к югу-юго-западу от Норильского промышленного района. Отбор образцов проводился по схеме двух профилей протяженностью 14 и 20 км. Анализ образцов проводился с помощью комплекса методов, состоящего из рентгено-флуоресцентного («S4 Pioneer» Bruker AXS), атомно-абсорбционного методов (КВАНТ-2А, Юлия-5К) и масс спектрометрии с индукционно-связанной плазмой (ELEMENT-2) в лаборатории ГИН РАН, г. Москва. Определялась концентрация Ti, V, Ni, Cr, Mn, Fe, Co, Cu, Zn, As, Se, Rb, Cd, Sb, Ba, La, Ce, Hg, Pb, Th, U. *Результаты.* Получены данные о концентрации 21-го элемента в почвах и лишайниках. Рассчитано и показано распределение элементов в почве и лишайниках относительно концентрации в верхней части континентальной коры. Рассчитан коэффициент обогащения EF (enrichment factor) для Mn, Ni, Cu, Hg, Pb, оценено распределение этого коэффициента для обоих профилей. Показано, что техногенная составляющая аэрогенного воздействия для Mn, Ni, Cu, Pb к югу-юго-западу от Норильского промышленного комплекса на расстоянии 40–60 км практически отсутствует. Повышенные значения коэффициента обогащения EF (enrichment factor) в лишайниках для Hg объясняются сочетанием двух факторов – постоянного присутствия ртути в значительных концентрациях в экосистемах и тундровых пожаров, прошедших в этой зоне в 2019–2020 гг., что и привело в конечном итоге к повторному осаждению Hg на выгоревших территориях.

Ключевые слова: Норильский производственный комплекс, аэрогенное воздействие, Mn, Ni, Cu, Hg, Pb, почва, лишайник

Для цитирования: Оценка особенностей аэрогенного воздействия норильского промышленного комплекса на природную среду с использованием эпигейных лишайников / А.В. Горбунов, Д.Б. Петренко, Б.В. Ермолаев, А.А. Дронова, Е.В. Аристархова, О.И. Окина // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 9. – С. 31–39. DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4448

UDC 574.4; 581.5
DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4448

Assessment of the aerogenic impact of the Norilsk industrial complex on the natural environment using epigeal lichens

A.V. Gorbunov¹, D.B. Petrenko^{1,2}✉, B.V. Ermolaev¹, A.A. Dronova^{1,2},
E.V. Aristarkhova^{1,2}, O.I. Okina¹

¹ Geological Institute RAS, Moscow, Russian Federation

² State University of Education, Mytishchi, Russian Federation

✉ dbpetrenko@yandex.by

Abstract. Relevance. The need to study the features of aerogenic effects of the Norilsk industrial complex on the natural environment. **Aim.** To study the features of the aerogenic effects of the Norilsk industrial complex in the south-southwest zone at a distance of 40–60 km using lichens *Cladonia rungeferina* and *Cetraria* sp. **Objects.** Soil, lichens *Cladonia rungeferina* and *Cetraria* sp. **Methods.** Soil and lichen samples were taken 40–60 km south-southwest of the Norilsk Industrial district. Sampling was carried out according to the scheme of two profiles with a length of 14 and 20 km. The samples were analyzed using a set of methods consisting of X-ray fluorescence (S4 Pioneer Bruker AXS), atomic absorption methods (KVANT-2A, Julia-5K) and induction-coupled plasma mass spectrometry (ELEMENT-2) in the laboratory of the GIN RAS, Moscow. The concentration of Ti, V, Ni, Cr, Mn, Fe, Co, Cu, Zn, As, Se, Rb, Cd, Sb, Ba, La was determined. **Results.** The authors have obtained the data on the concentration of the 21 elements in soils and lichens. The paper demonstrates the calculation of distribution of elements in soil and lichens relative to the concentration in the upper part of the continental crust. The authors calculated the enrichment factor for Mn, Ni, Cu, Hg, Pb and estimated the distribution of this coefficient for both profiles. It is shown that the technogenic component of the aerogenic effect for Mn, Ni, Cu, Pb to the south-southwest of the Norilsk industrial complex at a distance of 40–60 km is practically absent. The increased values of the enrichment factor in lichens for Hg are explained by a combination of two factors – the constant presence of mercury in significant concentrations in ecosystems and tundra fires that took place in this zone in 2019–2020, which ultimately led to the re-deposition of Hg in the burnt areas.

Keywords: Norilsk industrial complex, aerogenic impact, Mn, Ni, Cu, Hg, Pb, soil, lichen

For citation: Gorbunov A.V., Petrenko D.B., Ermolaev B.V., Dronova A.A., Aristarkhova E.V., Okina O.I. Assessment of the aerogenic impact of the Norilsk industrial complex on the natural environment using epigeal lichens. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 9, pp. 31–39. DOI: 10.18799/24131830/2024/9/4448

Введение

В центральной части Арктического региона воздействие на природную среду формируется в основном за счет Норильского горно-металлургического комплекса. Норильский промышленный район (НПР) представляет собой единый производственный комплекс по добыче и производству цветных и драгоценных металлов. В данном промышленном районе ведётся добыча Cu,

Ni, Co, Pd, Os, Pt, Au, Ag, Ir, Rh, Ru. Попутная продукция: техническая сера, Se, Te, H₂SO₄. Столь широкий ряд продукции обуславливает и разнообразие вредных выбросов с предприятий НПР: на эти предприятия приходится 78 % вредных выбросов Красноярского края и 10 % Российской Федерации [1–4]. Наиболее активными загрязнителями являются диоксид серы и тяжелые металлы: Cu, Ni, Pb.

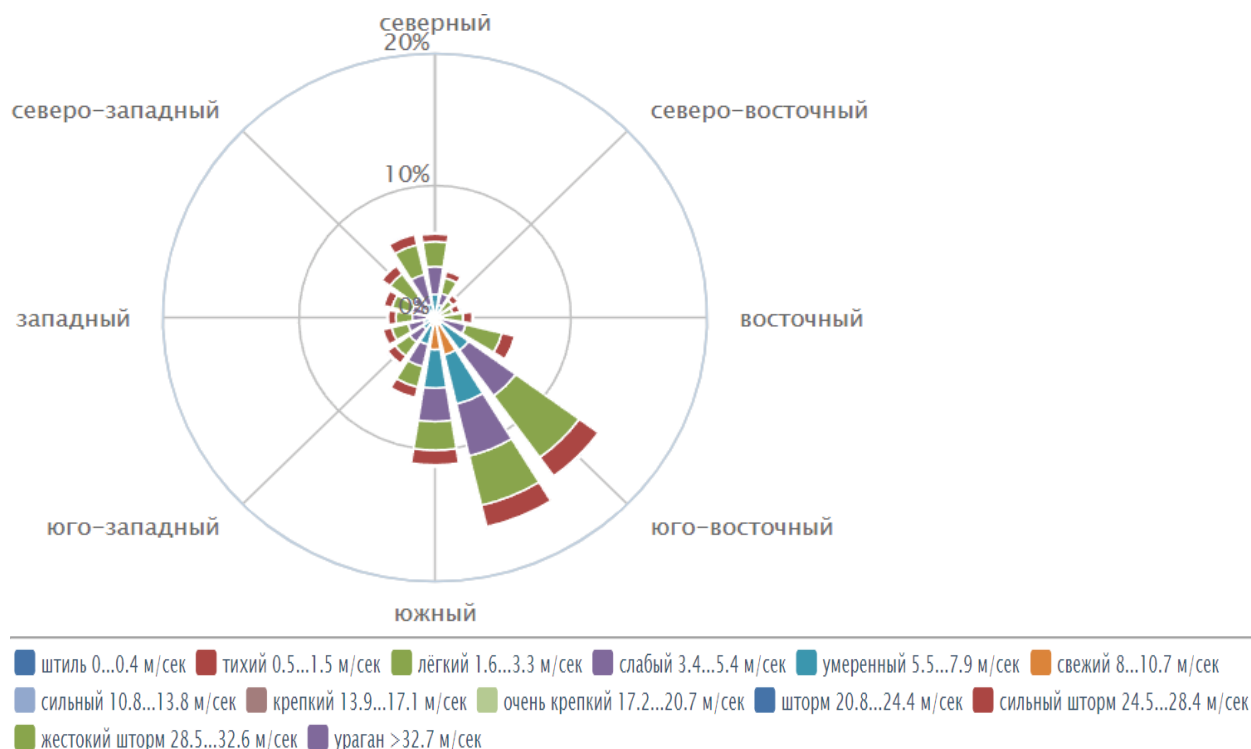


Рис. 1. Роза ветров, Норильский промышленный район, 2021 г.

Fig. 1. Wind rose, Norilsk industrial district, 2021

Согласно розе ветров (рис. 1) в районе Норильского промышленного комплекса в течение 2021 г. преобладали юго-юго-восточные ветра со скоростью 0,5–7,9 м/сек-в общем около 42 % [5]. В зависимости от сезона направление ветров кардинально меняется: например, в январе преобладают северо-северо-западные ветра (около 50 %). Исследования, проведенные в этом регионе в юго-восточном направлении [1, 2] позволили выявить три зоны аэрогенного воздействия Норильского промышленного комплекса на природную среду. Первая зона распространена до 80 км от промышленного центра, вторая зона – 80–140 км, третья зона – на удалении более 140 км. В первой зоне древесная растительность погибла полностью. Содержание серы в растениях превышает фоновый уровень, (в качестве которого был взят участок вблизи р. Черной в 223 км от Норильска) в 1,2–4 раза, никеля – в 1,5–470 раз, меди – в 1,3–156 раз [6]. В зоне 80–140 км появляются черты, свойственные данной биоклиматической зоне, подлесок и мохово-травянистая растительность не угнетены. В этой зоне содержание серы, никеля и меди в растениях близки к фоновым значениям.

Данные о распространении аэрогенного воздействия Норильского промышленного района в направлении юг, юго-запад практически отсутствуют.

При оценке техногенных факторов воздействия на природную среду наиболее важным является контроль за атмосферными выпадениями. Этот контроль может осуществляться несколькими методами: отбор атмосферных аэрозолей с помощью аспираторов, расположение планшетов на исследуемых территориях, отбор образцов снежного по-

крова, оценка с помощью мхов и лишайников. В результате анализа достоинств и недостатков каждого из этих методов мы остановились на использовании последнего метода. В отличие от воды и атмосферного воздуха, которые выступают в роли транспортирующих сред, лишайники являются депонирующей средой и наиболее объективными индикаторами техногенного загрязнения экосистем [7, 8]. При изучении аэрогенного воздействия использовались многие виды лишайников, но наиболее перспективными из них считаются *Cladonia rungeferina* и *Cetraria sp.* [7–9]. С точки зрения распространенности, доступности и легкости пробоотбора эти лишайники представляют собой универсальные объекты для исследования.

Целью настоящей работы было изучение особенностей аэрогенного воздействия на природную среду к югу и юго-западу от Норильского промышленного комплекса с использованием эпигейных (растущих на почве) лишайников *Cladonia rungeferina* и *Cetraria sp.*

Методика эксперимента

Отбор образцов. Отбор образцов проводился в летний сезон 2021 г. в Таймырском Долгано-Ненецком районе в 40–60 км к юго-юго-западу от Норильского промышленного комплекса.

Площадки отбора образцов характеризовались бедным распространением растительности, видимо, вследствие низовых пожаров, произошедших в этой области в 2019–2020 гг. (рис. 2). Растительность представлена многолетними морозоустойчивыми травами: осокой, господствующей в низинах и болотах, лютиком, пушицей, лишайниками.



Рис. 2. Ландшафт места отбора проб (фото Д.Б. Петренко)
Fig. 2. Landscape of the sampling site (photo by D.B. Petrenko)

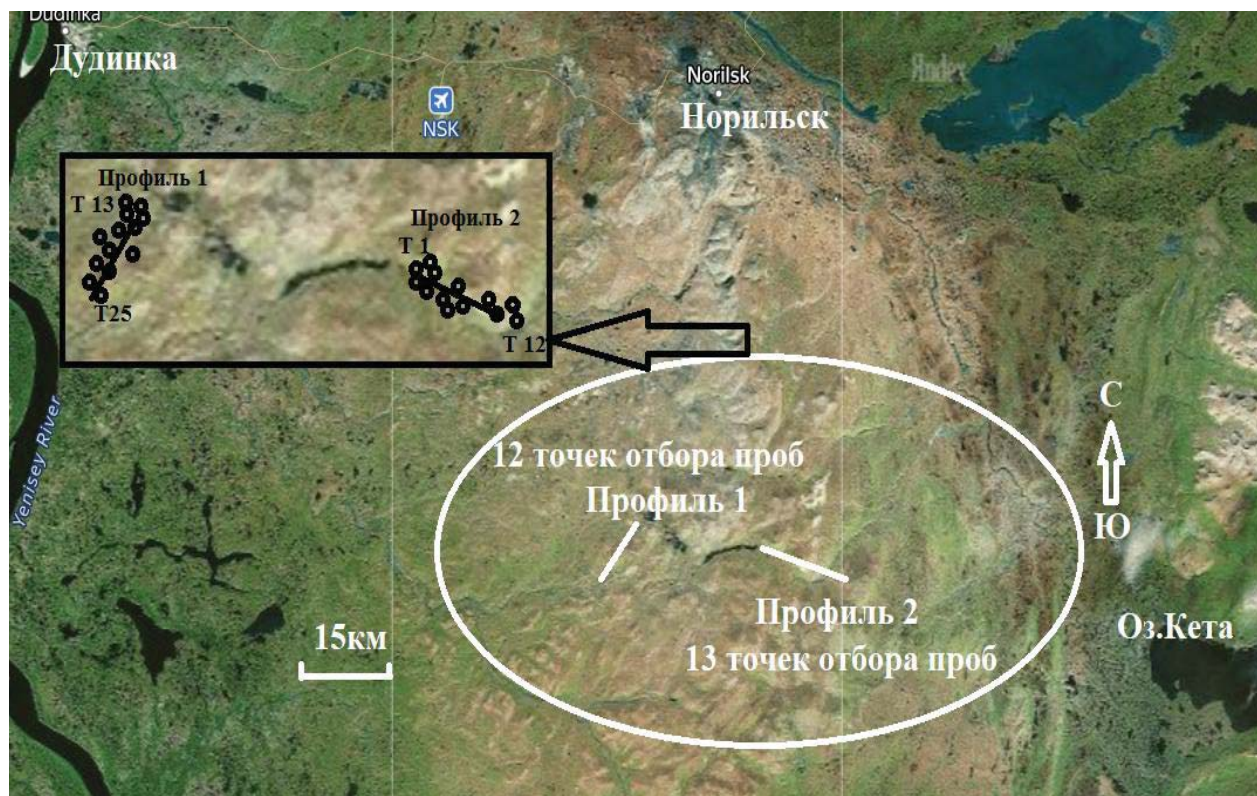


Рис. 3. Схема отбора проб
Fig. 3. Sampling scheme

Лишайники были представлены видами *Cetraria islandica*, *Cladonia rangiferina*, *Cladonia alpestris*. Следует отметить, что лишайники сохранились в основном в низинах и за буграми с подветренной стороны. Среди кустарничков наблюдались голубика, морошка, черника, брусника. Пожары относительно редки в экосистемах субарктической лесотундры, но они могут сильно изменить свойства экосистем – на исследуемой территории полностью выгорела древесная растительность (карликовая береза, полярная ива).

Образцы почвы и лишайников [видов *Cladonia rangiferina* ((L.) Weber ex F.H.Wigg) и *Cetraria sp.*] отбирались с одних и тех же площадок, отбор образцов осуществлялся условно по схеме двух профилей: профиль 1 – СВ-ЮЗ протяженностью 20 км, и профиль 2 – СЗ-ЮВ протяженностью 14 км с шагом около 0,5–2 км (в зависимости от наличия или отсутствия необходимых лишайников шаг изменялся в широких пределах) (рис. 3). В каждой точке отбиралась почва и лишайник, всего было отобрано 25 проб почвы и 25 проб лишайников. Почва глеево-подзолистая, торфяно-глеевая, бурая супесчаная или суглинистая. В верхнем горизонте почвы (1–3 см) наблюдалось преобладание продуктов горения – крупно- и тонкодисперсная зола, обугленные древесные останки, подстилка в значительной степени минерализована. Почва отбиралась в соот-

ветствии с существующими нормативами ГОСТ Р 58595-2019 [10]. Отбор проб лишайников проводился в соответствии с опубликованными в литературных источниках рекомендациями [7–9, 11] в стерильные полиэтиленовые пакеты zip-лок, усредненные пробы лишайников отбирали с площади 10–20 м². Для анализа отбирали верхние части (3–7 см) талломов лишайников.

Анализ образцов. Отобранные образцы лишайников высушивали при комнатной температуре, а затем в сушильном шкафу при температуре 30 °С доводили до постоянного веса. Образцы, подготовленные таким образом, измельчали в гомогенизаторе до размеров <1 мм. Для анализа от каждого образца отбирали три параллельные навески по 150–500 мг. Пробы почвы высушивали при температуре 30 °С до воздушно-сухого состояния, просеивали через сито с диаметром отверстий 1 мм и истирали до крупности зерна 60–80 мкм (сито 200 меш). Анализ образцов почвы проводился при помощи рентгенофлуоресцентного (РФА) метода с использованием последовательного волнового XRF спектрометра «S4 Pioneer» (Bruker AXS, Германия). Обработка полученных результатов осуществлялась программой «S4 Spectra Plus». Образцы лишайника анализировали с помощью масс спектрометра с индуктивно-связанной плазмой высокого разрешения «ELEMENT-2» (Thermo Fisher Scien-

tific, США). Совместное использование этих методов обеспечивает определение в отобранных образцах большинства интересующих нас элементов в широком диапазоне концентраций, за исключением определения Hg в почвах и лишайниках, а также Fe и Zn в лишайниках. Концентрация Hg в отобранных образцах определялась с помощью анализатора ртути «Юлия-5К» (НПО «Метрология», Россия), концентрация Fe и Zn в лишайниках определялась с помощью пламенной атомно-абсорбционной спектроскопии на анализаторе «КВАНТ-2А» (КОРТЭК, Россия). В отобранных образцах была оценена концентрация Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Cu, Zn, As, Se, Rb, Cd, Sb, Ba, La, Ce, Hg, Pb, Th, U. Все аналитические работы проводились в соответствии с аттестованными методиками, утвержденными в качестве руководящих документов, с использованием стандартных образцов состава производства МАГАТЭ, Китай, Россия. Анализ состава отобранных образцов осуществлялся в Лаборатории химико-аналитических исследований Геологического института РАН.

Результаты

В табл. 1 приведены данные о концентрации тяжелых и токсичных элементов в образцах почвы и лишайников. Следует отметить, что концентрация токсичных элементов в почве находится в пределах значений ПДК и ОДК, величина стандартного отклонения практически для всех приведенных в таблице элементов находится в пределах 30–35 %, что говорит о достаточно равномерной выборке данных, $r_{H_{KCl}}=4,35-5,11$ [12]. Значения концентрации элементов, приведенные для лишайников, на порядок меньше, чем в почвах.

Исключение составляет концентрация Hg, которая сопоставима по величине с концентрацией в почве. Данные, приведенные в таблице для почвы и лишайников, обладают чрезвычайно высокой вариабельностью, что говорит о значительной неравномерности в выборке. Для того чтобы оценить особенности распределения элементов в лишайниках относительно почвы, было рассчитано отношение концентрации элементов в почве и лишайнике на концентрацию элементов в верхней части континентальной коры [9, 13–15] по формуле:

$$K_{отн} = C_i(\text{почва, лишайник}) / C_{i \text{ з.к.}}$$

где C_i – концентрация i -го элемента в почве или лишайнике; $C_{i \text{ з.к.}}$ – концентрация i -го элемента в верхней части земной коры.

Распределение полученного коэффициента $K_{отн}$ в почве и лишайнике приведено на рис. 3, графики расположены по мере убывания $K_{отн}$ в почве. В наибольшей степени в почве накапливаются такие элементы, как Cu, Cr, Ni, Co, ($K_{отн}=1,6-2,4$).

В лишайниках следует отметить накопление Cu, Ni, Hg, Mn, Cd и Pb, которые можно отнести к аэрогенному воздействию.

Таблица 1. Элементный состав почвы и лишайников, воздушно-сухой вес, мг/кг

Table 1. Elemental composition of soil and lichens, air-dry weight, mg/kg

Элемент Element	Почва/Soil		Лишайник/Lichen	
	$C_{ср} \backslash C_{мед}$ $C_{mean} \backslash C_{median}$	$C_{мин} - C_{макс}$ $C_{min} - C_{max}$	$C_{ср} \backslash C_{мед}$ $C_{mean} \backslash C_{median}$	$C_{мин} - C_{макс}$ $C_{min} - C_{max}$
Ti	5260\5675	2213–8745	49,8\34,3	16,5–331
V	173\184	94–270	1,9\0,93	0,63–11,9
Cr	194\185	105–471	3,55\2,68	0,96–16,2
Mn	968\957	383–1987	51\30,8	5,15–162
Fe	42810\43115	12268–87568	407\515	218–933
Co	27,2\25,2	10,3–52,1	1,31\1,09	0,62–3,57
Ni	93,5\82,5	49,4–287	24,2\19,2	9,47–19,2
Cu	93,6\82,8	34,6–228	18,5\13,9	6,02–74,2
Zn	95,4\96,1	54,5–155	16,1\16,6	5,83–27,5
As	6,6\6,52	5,51–819	0,18\0,16	0,11–0,82
Se	4,7\4,51	2,25–8,36	0,95\0,76	0,26–3,28
Sr	119\118	62,6–219	6,28\3,04	1,04–29,6
Cd	0,73\0,67	0,43–1,18	0,14\0,12	0,05–0,59
Sn	0,61\0,66	0,31–1,03	0,16\0,12	0,05–0,55
Sb	0,04\0,06	0,02–0,07	0,02\0,02	0,01–0,11
Ba	488\494	154–956	6,76\5,02	1,47–18,3
La	11,9\12,5	7,91–15,8	0,51\0,43	0,22–0,86
Ce	26,9\27,3	18,8–35,3	1,11\0,92	0,56–1,75
Hg	0,095\0,91	0,052–0,133	0,032\0,021	0,009–0,089
Pb	14,8\14,1	11,6–20,7	2,39\1,91	0,25–6,72
Th	2,97\3,32	2,21–6,72	0,053\0,065	0,028–0,099
U	1,03\1,22	2,23–1,56	0,014\0,013	0,01–0,022

Обсуждение

Учитывая специфику производства, основными маркерами воздействия Норильского промышленного комплекса на природную среду являются Ni, Cu и Pb. Графики, представленные на рис. 3, позволяют отнести к основным поллютантам также Mn и Hg. Для того чтобы оценить соотношение техногенных и терригенных источников поступления Mn, Ni, Cu, Pb и Hg в талломы лишайников, нами были рассчитаны значения коэффициента обогащения EF (enrichment factor) для этих элементов по точкам отбора на профилях 1 и 2. Коэффициент EF широко используется в анализе атмосферных аэрозолей и лихенометрических исследованиях [11, 16–18]. Величина этого коэффициента показывает соотношение элементов-загрязнителей и основных литогенных элементов (Fe, Si, Al) в атмосферных выпадениях, вычлняя техногенную составляющую. В качестве эталонной величины нами использовалось содержание Fe в верхней части земной коры [9, 13, 14].

Расчёт коэффициента проводился по формуле:

$$EF = \frac{C_i / C_{Fei}(\text{лишайник})}{C_{i \text{ з.к.}} / C_{Fe \text{ з.к.}}(\text{земная кора})}$$

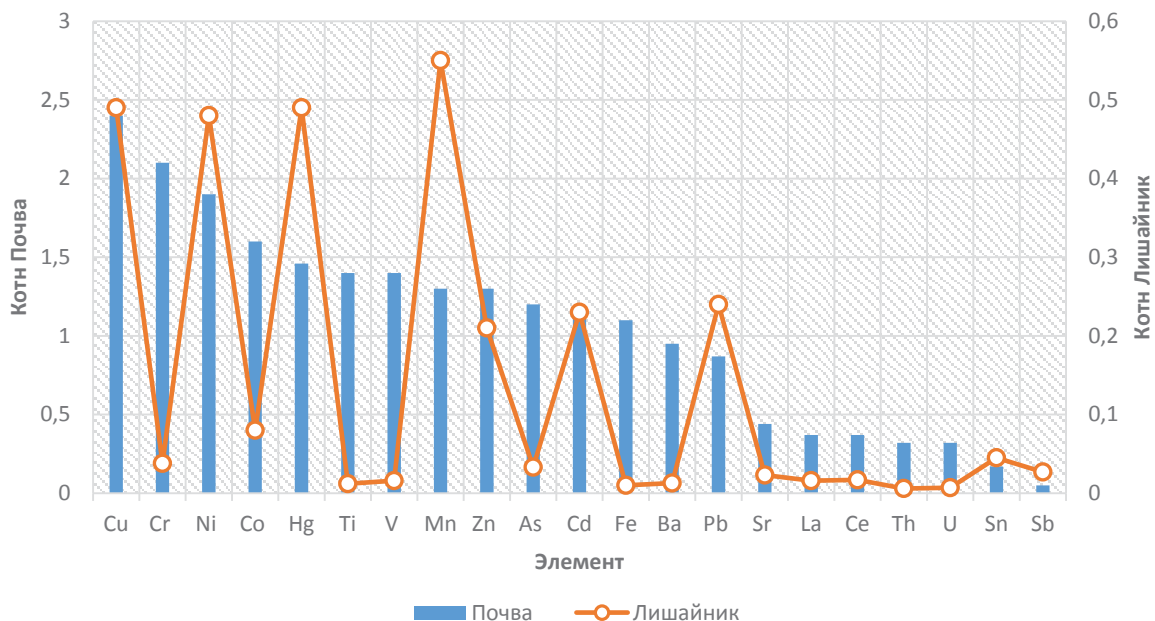


Рис. 4. Распределение элементов в почве и лишайниках относительно концентрации в верхней части континентальной коры

Fig. 4. Distribution of elements in soil and lichens relative to concentrations in the upper part of the continental crust

где C_i – концентрация изучаемого элемента в лишайнике; C_{Fei} – концентрация Fe в лишайнике; $C_{Fe_{з.к}}$ – концентрация Fe в земной коре; $C_{i_{з.к}}$ – концентрация изучаемого элемента в земной коре.

Источники поступления элементов классифицируются на три группы в зависимости от рассчитанной величины EF. Низкие значения коэффициента обогащения ($E_F < 10$) указывают на отсутствие антропогенных источников. В этом случае основным источником изучаемого элемента является местная минеральная и органическая пыль. Элементы с коэффициентами обогащения в интервале от 10 до 100 считаются умеренно обогащенными (до 50 %) и имеют смешанное происхождение. Значение коэффициента $E_F > 100$ характеризует существенный вклад антропогенного источника (выше 50 %) [11, 16–18]. В табл. 2 представлены среднеарифметические значения коэффициента EF, рассчитанного по точкам отбора образцов профилей 1 и 2.

Таблица 2. Среднее значение коэффициента EF по профилям 1 и 2

Table 2. Average value of EF coefficient for profiles 1 and 2

Элемент Element	Профиль 1 Selection profile 1		Профиль 2 Selection profile 2	
	EF	мин/макс min/max	EF	мин/макс min/max
Mn	1,6	0,65/3,6	1,7	0,71/5,3
Ni	2,22	0,24/4,56	1,78	0,22/6,93
Cu	2,31	0,15/7,07	1,65	0,17/6,15
Hg	18	2,7/62,6	23,1	2,54/74
Pb	1,6	0,65/3,6	4,52	1,23/14,5

Согласно данным табл. 2, величина коэффициента EF для Mn, Ni и Cu находится в диапазоне 0,15–6,9, что указывает на отсутствие техногенного воздействия на лишайники на протяжении обоих профилей. Диапазон значений величины коэффициента EF для Pb находится в пределах 0,6–4,5, для точек 6 и 7 профиля 2 он увеличивается до 14–15. Практически это также указывает на отсутствие какого-либо техногенного воздействия Pb. Для профилей 1 и 2 коэффициент EF Hg составляет в среднем 18 и 23,1, соответственно, максимальные величины достигают значений 63 и 74. Это указывает на значительное возрастание техногенного воздействия Hg на воздушную среду. Появление Hg в качестве приоритетного техногенного загрязнителя природной среды в данном регионе было несколько неожиданным: руды НПР в основном представлены пирротинном, халькопиритом, пентландитом, пиритом и кубанитом [19, 20]. В этих минералах Hg представлена примесями с концентрациями 0,7–6,2 г/т, что не предполагает значительного присутствия Hg в производственных выбросах НПР. По мнению авторов наиболее вероятной причиной этого являются два обстоятельства:

1. Примерно половина выбросов Hg в окружающую среду имеет природное происхождение и является следствием дегазации земной коры. По этой причине Hg постоянно присутствует в любой экосистеме в значительных количествах [21].
2. Второй причиной послужили тундровые пожары 2019–2020 гг. Пожары имели характер

так называемого «низового» пожара, температура составляла около 400–450 °С. По литературным данным в верхнем горизонте почвы и золе растений после пожара концентрация Hg уменьшается примерно на порядок. При этом Hg переходит в атомарное состояние и распространяется в виде газовой компоненты атмосферы [22–24], концентрация Hg в атмосфере резко (в 7–10 раз) увеличивается. В дальнейшем происходит сорбция Hg атмосферными аэрозолями с последующим осаждением на поверхности выгоревших площадей, в том числе и на сохранившиеся лишайники. Это ведет к увеличению общей концентрации Hg в лишайнике и, соответственно, к увеличению *EF*. Следует подчеркнуть, что это увеличение происходит именно за счет совпадения есте-

ственных природных факторов и не является следствием техногенного воздействия.

Заключение

Аэрогенное воздействие Норильского промышленного комплекса в исследуемом районе не обнаружено. Выявлена атмохимическая аномалия Hg умеренной интенсивности (*EF*=10–100). Эта аномалия, по мнению авторов, не имеет отношения к Норильскому промышленному району, и возникла она при сочетании двух факторов – постоянного присутствия ртути в значительных концентрациях в экосистемах за счет природных факторов и тундровых пожаров 2019–2020 гг., которые привели в конечном итоге к вторичному осаждению Hg на выгоревших территориях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Техногенное воздействие на окружающую среду в Российской Арктике на примере Норильского промышленного района / Н.В. Юркевич, И.Н. Ельцов, В.Н. Гуреев, Н.А. Мазов, Н.В. Юркевич, А.В. Еделев // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 12. – С. 230–249.
2. Соколов Ю.И. Арктика: к проблеме накопленного экологического ущерба // Арктика: Экология и экономика. 2013. – № 2. – С. 18–27.
3. Assessment of the state of soil microbial cenoses in the forest-tundra zone under conditions of airborne industrial pollution / A.V. Bogorodskaya, T.V. Ponomareva, O.A. Shapchenkova, A.S. Shishikin. // Eurasian Soil Science. – 2012. – Vol. 45. – № 5. – P. 521–531. DOI: 10.1134/S106422931205002X.
4. Резникова Е. Беллона «Норникель»: экологические амбиции. – 2019. – 31 с. URL: <https://bellona.ru/publication/nornikel-ekologicheskie-ambitsii/> (дата обращения 01.10.23).
5. Gismeteo: Погода в России. URL: <https://www.gismeteo.ru> (дата обращения 01.10.2023).
6. Зубарева О.Н. Оценка дальности распространения выбросов в зоне влияния группы предприятий «Норильский никель» на основе анализа растений // Эволюция биосферы и техногенез: Материалы Всерос. конф. – Чита, 22–28 августа 2016. – Чита: Бурятский научный центр СО РАН, 2016 – С. 202–204.
7. Большунова В.С., Рихванов Л.П., Барановская Н.В. Элементный состав лишайников как индикатор загрязнения атмосферы // Экология и промышленность России. – 2014. – № 11. – С. 26–31.
8. Towards understanding the effect of heavy metals on mycobion physiological condition in a widespread metal-tolerant lichen *Cladonia rei*. ELSEVIER / K. Rola, E. Latkowska, W. Ogar, P. Osyczka // Chemosphere. – 2022. – Vol. 308. – P. 1–9. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.136365.
9. Nash T. H., Gries C. The use of lichens in atmospheric deposition studies with an emphasis on the arctic // Science of the total environment. – 1995. – Vol. 160–161. – P. 729–736. DOI: 10.1016/0048-9697(95)04406-Q.
10. ГОСТ Р 58595-2019. Почвы. Отбор проб. – М.: Стандартинформ, 2019. – 5 с.
11. Nash T.H. Nutrients, elemental accumulation, and mineral cycling // Lichen Biology. – 2008. – P. 234–251. DOI: 10.1017/CBO9780511790478.013.
12. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. – М.: ГАРАНТ, 2021. – 972 с.
13. Григорьев Н.А. Распределение химических элементов в верхней части континентальной коры. – Екатеринбург: Уральское отделение РАН, 2009. – 383 с.
14. Касимов Н.С., Власов Д.В. Кларки химических элементов как эталоны сравнения в экогеохимии // Вест. Московского Университета сер. 5, география. – 2015. – № 2. – С. 7–18.
15. Rudnick R.L., Gao S. Composition of the continental crust // Treatise on Geochemistry. Elsevier. – 2014. – Vol. 3. – P. 1–51. DOI: 10.1016/B978-0-08-095975-7. 00301-6.
16. Bačkor M., Loppi S. Interactions of lichens with heavy metals // Biologia Plantarum. – 2009. – Vol. 53. – № 2. – P. 214–222. DOI: 10.1007/s10535-009-0042-y.
17. Первые данные о распределении изотопов, макро-и микроэлементов из атмосферных выпадений в лишайниках арктических территорий Западной Сибири / М.Ю. Кропачева, К.А. Мезина, Д.К. Белянин, М.С. Мельгунов, И.В. Макарова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, – 2022. – Т. 333. – № 9. – С. 46–56.
18. Assessment of major ions and trace elements in snow: a case study across northeastern China, 2017–2018 / H. Xue, W. Chen, M. Li, B. Liu, G. Li, X. Han // Chemosphere. – 2020. – Vol. 251. – P. 126328. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.126328.
19. Trace elements composition of surface snow in the polar zone of northwestern Siberia: the impact of urban and industrial emissions / R. Pozhitkov, D. Moskovchenko, A. Soromotin, A. Kudryavtsev, E. Tomilova // Environmental Monitoring and Assessment. – 2020. – Vol. 192. – № 4. – P. 215. DOI: 10.1007/s10661-020-8179-4.

20. Додин Д.А., Чернышов Н.М., Череднакова О.И. Металлогения платиноидов крупных регионов России. – М.: Геоинформмарк, 2001. – 302 с.
21. Пурмаль А.П. Антропогенная токсикация планеты // Соросовский образовательный журнал. – 1998. – № 9. – С. 39–51.
22. Ртуть в почвах и растительности на заповедных территориях Приморского края / Н.В. Барановская, В.В. Иванов, Н.А., Осипова А.М. Паничев, И.Ю. Чекрызов, В.Д. Доронина, А.А. Хвощевская // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 11. – С. 90–100.
23. Журкова И.С. Миграция ртути в пирогенных условиях // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 7. – С. 63–70.
24. Mercury emissions from biomass burning in China / X. Huang, M. Li, H.R. Friedli, Y. Song, D. Chang, L. Zhu // Environmental Science and Technology. – 2011. – Vol. 45 (21). – P. 9442–9448. DOI: 10.1021/es202224e.

Информация об авторах

Анатолий Викторович Горбунов, старший научный сотрудник Геологического института РАН, Россия, 119017, г. Москва, Пыжевский пер., 7с1. anatolygor@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7794-100X>

Дмитрий Борисович Петренко, кандидат химических наук, научный сотрудник Геологического института РАН, Россия, 119017, г. Москва, Пыжевский пер., 7с1; заведующий лабораторией экологической биохимии, доцент кафедры теоретической и прикладной химии Государственного университета просвещения, Россия, 141014, г. Мытищи, ул. Веры Волошиной, 24. dbpetrenko@yandex.by; <https://orcid.org/0000-0003-0640-5159>

Борис Владимирович Ермолаев, научный сотрудник Геологического института РАН, Россия, 119017, г. Москва, Пыжевский пер., 7с1. ermolaev-bv@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9072-312X>

Анна Александровна Дронова, младший научный сотрудник Геологического института РАН, Россия, 119017, г. Москва, Пыжевский пер., 7с1; аспирант кафедры теоретической и прикладной химии Государственного университета просвещения, Россия, 141014, г. Мытищи, ул. Веры Волошиной, 24. ann.drnv@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1232-9765>

Елизавета Владимировна Аристархова, младший научный сотрудник Геологического института РАН, Россия, 119017, г. Москва, Пыжевский пер., 7с1; аспирант кафедры теоретической и прикладной химии Государственного университета просвещения, Россия, 141014, г. Мытищи, ул. Веры Волошиной, 24. aristarkhova_lisa@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0002-3826-9446>

Ольга Ильинична Окина, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Геологического института РАН, Россия, 119017, г. Москва, Пыжевский пер., 7с1. okina@bk.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1947-4551>

Поступила в редакцию: 25.10.2023

Поступила после рецензирования: 16.04.2024

Принята к публикации: 09.07.2024

REFERENCES

1. Yurkevich N.V., Eltsov I.N., Gureev V.N., Mazov N.A., Yurkevich N.V., Edelev A.V. Technogenic impact on the environment in the Russian Arctic on the example of the Norilsk Industrial district. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332. pp. 230–249. (In Russ.)
2. Sokolov Yu.I. The Arctic: to the problem of accumulated environmental damage. *Arktika: Ekologiya i ekonomika*, 2013, no. 2, pp. 18–27. (In Russ.)
3. Bogorodskaya A.V., Ponomareva T.V., Shapchenkova O.A., Shishikin A.S. Assessment of the state of soil microbial cenoses in the forest-tundra zone under conditions of airborne industrial pollution. *Eurasian Soil Science*, 2012, vol. 45, no 5, pp. 521–531. DOI: 10.1134/S106422931205002X.
4. Reznikova E. *Bellona «Nornikel»: ecological ambitious*, 2019. 31 p. (In Russ.) Available at <https://bellona.ru/publication/nornikel-ekologicheskie-ambitsii/> (accessed 01 October 2023).
5. Gismeteo: Weather in Russia. URL: <https://www.gismeteo.ru> (accessed 01 October 2023)
6. Zubareva O.N. Assessment of the distribution range of emissions in the zone of influence of the Norilsk Nickel group of enterprises based on plant analysis. *Evolution of the biosphere and technogenesis. Materials of the All-Russian conference*. Chita, August 22–28, 2016. Chita, Buryat Scientific Center SB RAS Publ., 2016. pp. 202–204. (In Russ.)
7. Bolshunova V.S., Rikhvanov L.P., Baranovskaya N.V. Elemental composition of lichens as an indicator of atmospheric pollution. *Ekologiya i promyshlennost Rossii*, 2014, vol. 11, pp. 26–31. (In Russ.)
8. Rola K., Latkowska E., Ogar W., Osyczka P. Towards understanding the effect of heavy metals on mycobion physiological condition in a widespread metal-tolerant lichen *Cladonia rei*. *ELSEVIER. Chemosphere*, 2022, vol. 308, pp. 1–9. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.136365.
9. Nash T. H., Gries C. The use of lichens in atmospheric deposition studies with an emphasis on the arctic. *Science of the total environment*, 1995, vol. 160–161, pp. 729–736. DOI: 10.1016/0048-9697(95)04406-Q.
10. SS R 58595-2019. *Soils. Sampling*. Moscow, Standartinform Publ., 2019. 5 p. (In Russ.)
11. Nash T.H. Nutrients, elemental accumulation, and mineral cycling. *Lichen Biology*, 2008, pp. 234–251. DOI: 10.1017/CBO9780511790478.013.

12. SanPiN 1.2.3685-21. *Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans*. Moscow, GARANT Publ., 2021. 972 p. (In Russ.)
13. Grigorev N.A. *Distribution of chemical elements in the upper part of the continental crust*. Ekaterinburg, Ural branch of RAN Publ., 2009. 383 p. (In Russ.)
14. Kasimov N.S., Vlasov D.V. Clarks of chemical elements as reference standards in ecogeochemistry. *Vestnik Moskovskogo Universiteta ser. 5, geografiya*, 2015. no 2, pp. 7–18. (In Russ.)
15. Rudnick R.L., Gao S. Composition of the continental crust. *Treatise on Geochemistry*, 2014, vol. 3, pp. 1–51. DOI: 10.1016/B978-0-08-095975-7.00301-6.
16. Bačkor M., Loppi S. Interactions of lichens with heavy metals. *Biologia Plantarum*, 2009, vol. 53, no. 2, pp. 214–222. DOI: 10.1007/s10535-009-0042-y.
17. Kropacheva M.Yu., Mezina K.A., Belyanin D.K., Melgunov T.M.S., Makarova I.V. The first data on the distribution of isotopes, macro- and microelements from atmospheric precipitation in the lichens of the Arctic territories of Western Siberia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, pp. 46–56. (In Russ.)
18. Xue H., Chen W., Li M., Liu B., Li G., Han X. Assessment of major ions and trace elements in snow: a case study across northeastern China, 2017–2018. *Chemosphere*, 2020, vol. 251, pp. 126328. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.126328.
19. Pozhitkov R., Moskovchenko D., Soromotin A., Kudryavtsev A., Tomilova E. Trace elements composition of surface snow in the polar zone of northwestern Siberia: the impact of urban and industrial emissions. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2020, vol. 192, no. 4, pp. 215. DOI: 10.1007/s10661-020-8179-4.
20. Dodin D.A., Chernyshov N.M., Cherednakova O.I. *Metallogeny of platinoids of large regions of Russia*. Moscow, Geoinformmark Publ., 2001. 302 p. (In Russ.)
21. Purnal A.P. Anthropogenic toxification of the planet. *Sorosovskiy obrazovatelny zhurnal*, 1998, no. 9, pp. 39–51. (In Russ.)
22. Baranovskaya N.V., Ivanov V.V., Osipova N.A., Panichev A.M., Chekryzhov I.Yu., Doronina V.D., Khvashchevskaya A.A. Mercury in soils and vegetation in protected areas of Primorsky Krai. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, pp. 90–100. (In Russ.)
23. Zhurkova I.S. Migration of mercury in pyrogenic conditions. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, pp. 63–70. (In Russ.)
24. Huang X., Li M., Friedli H.R., Song Y., Chang D., Zhu L. Mercury emissions from biomass burning in China. *Environmental Science and Technology*, 2011, vol. 45 (21), pp. 9442–9448. DOI: 10.1021/es202224e.

Information about the authors

Anatoly V. Gorbunov, Senior Researcher, Geological Institute RAS, 7s1, Pyzhevsky lane, Moscow, 119017, Russian Federation. anatolygor@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7794-100X>

Dmitry B. Petrenko, Cand. Sc., Researcher, Geological Institute RAS, 7s1, Pyzhevsky lane, Moscow, 119017, Russian Federation; Head of the Environmental Biochemistry Laboratory, Associate Professor, State University of Education, 24, Vera Voloshina street, Mytishchi, 141014, Russian Federation. dbpetrenko@yandex.by; <https://orcid.org/0000-0003-0640-5159>

Boris V. Ermolaev, Researcher, Geological Institute RAS, 7s1, Pyzhevsky lane, Moscow, 119017, Russian Federation. ermolaev-bv@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9072-312X>

Anna A. Dronova, Junior Researcher, Geological Institute RAS, 7s1, Pyzhevsky lane, Moscow, 119017, Russian Federation; Postgraduate Student, State University of Education, 24, Vera Voloshina street, Mytishchi, 141014, Russian Federation. ann.drnv@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1232-9765>

Elizaveta V. Aristarkhova, Junior Researcher, Geological Institute RAS, 7s1, Pyzhevsky lane, Moscow, 119017, Russian Federation; Postgraduate Student, State University of Education, 24, Vera Voloshina street, Mytishchi, 141014, Russian Federation. aristarkhova_lisa@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0002-3826-9446>

Olga I. Okina, Cand. Sc., Leading Researcher, Geological Institute RAS, 7s1, Pyzhevsky lane, Moscow, 119017, Russian Federation. okina@bk.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1947-4551>

Received: 25.10.2023

Revised: 16.04.2024

Accepted: 09.07.2024