Вестник Томского государственного университета. Биология. 2020. № 50. С. 135–156

ЭКОЛОГИЯ

УДК 574:504.064.36(470+571)
doi: 10.17223/19988591/50/7

А.М. Богданова[1], Е.В. Евстафьева[1], Н.В. Барановская[2], Е.Е. Ляпина[3], С.Л. Тымченко[1], Т.С. Большунова[4]

[1] Медицинская академия им. С.И. Георгиевского Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского, г. Симферополь, Россия
[2] Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия
[3] Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск, Россия
[4] АО «ТомскНИПИнефть», г. Томск, Россия

Территориальные особенности распределения ртути в эпифитных лишайниках Крымского полуострова

Работа выполнена при поддержке Программы развития федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского» на 2015–2024 гг. по проекту «Сеть академической мобильности «Академическая мобильность молодых ученых России» в 2017 году»; анализ ртути выполнен при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-29-24212/18_мк, а также в рамках госбюджетной темы № АААА-А17-117013050031-8.

Представлены результаты определения содержания ртути в пробах эпифитных лишайников (n=60) видов Evernia mesomorpha Nyl., *E. prunastri* (L.) Ach., *Xanthoria parietina* (L.) Th. Fr., *Cladonia rangiformis* Hoffm., *Parmelia sulcata* Tayl., *используемых в качестве биоиндикаторов атмосферной эмиссии тяжелых металлов. Образцы собраны в 2015–2018 гг. в природных и городских экосистемах в центральном, юго-западном, южном, юго-восточном и восточном географических регионах Крымского полуострова. Определение содержания ртути в сухой массе лишайников выполнено атомно-абсорбционным методом с использованием анализатора ртути «РА–915М», пиролитической приставки «ПИРО–915+» и пакета программ RA915P. Полученные результаты свидетельствуют об отличиях в содержании ртути в лишайниках из различных регионов, но при этом все величины, за исключением одной пробы в г. Симферополе (1,16 мкг/г), не выходят за пределы нормальных значений относительно кларка для наземных растений и колебались в пределах от 0,037 до 0,306 мкг/г при M=0,079±0,040 мкг/г. В целом аномальное содержание ртути на различных территориях полуострова не выявлено, а полученные значения сопоставимы с данными фонового содержания ртути в эпифитных лишайниках других регионов Российской Федерации. Более высокие значения (p<0,01) на мониторинговых площадках южного побережья по сравнению с центральным, восточным и юго-*

западным регионами могут быть обусловлены атмосферно-геохимическими особенностями этих территорий (количество осадков, морские аэрозоли, подводный вулканизм, ртутные металлогенические зоны).

Ключевые слова: *биосубстрат; биоаккумуляция; лихеноиндикация; тяжелые металлы; Республика Крым.*

Введение

В современных условиях в связи с интенсификацией процессов техногенного загрязнения и антропогенной трансформацией биосферы одним из важных направлений в области экологических исследований является мониторинг состояния окружающей среды (ОС), включающий определение содержания поллютантов в биотических и абиотических компонентах экосистем. Среди антропогенных факторов различной природы ведущее место занимает химическое загрязнение ОС, в том числе тяжелыми металлами. Ртуть признана международным научным сообществом одним из первоочередных металлов, подлежащих оценке и нормированию [1] в связи с тем, что она является глобальным загрязнителем 1-го класса опасности во всех средах (атмосферном воздухе, воде, почвах) и оказывает токсичное воздействие на биоту вне зависимости от дозы [2], поэтому ртутное загрязнение представляет проблему как для развивающихся, так и богатых стран. Обладая такими физико-химическими свойствами, как высокая подвижность, летучесть, растворимость, способность к аккумуляции, низкая температура плавления и кипения, этот элемент и его соединения легко мигрируют между средами и по трофическим цепям, а также переносятся на большие расстояния с воздушными массами [3–5]. В связи с этим при изучении ртутного загрязнения большое внимание уделяют атмосферной эмиссии этого элемента, наиболее чувствительными биоиндикаторами которой признаны такие компоненты растительного покрова, как лишайники [6]. Они обладают особыми аккумуляционными свойствами, большой продолжительностью жизни, не имеют специализированных органов поглощения элементов из почвы, не сбрасывают пораженные поллютантами части таллома, благодаря чему отражают многолетнюю атмосферную эмиссию металлов [7, 8].

На территории Российской Федерации, как и в большинстве стран, существует проблема ртутного загрязнения ОС, при этом на региональном уровне выделяют как антропогенные источники поступления ртути в биосферу (работа угольных теплоэлектростанций, производство первичных металлов, хлор-щелочное и аффинажное производства, сжигание твердых бытовых отходов), так и природные (дегазация земной коры, вулканические и геотермические выбросы, ртутные и полиметаллические месторождения), при этом Россия является участником международной Минаматской конвенции по контролю ртутного загрязнения. В связи с этим в некоторых преимущественно промышленно развитых регионах проводятся исследования, вклю-

чающие в том числе систематический биоэкологический мониторинг ртути в различных компонентах экосистем [9–13].

Однако, как показал анализ литературных источников, для южных территорий, включая Республику Крым, существуют лишь фрагментарные данные о территориальном распределении ртути в компонентах ОС [14–16], что подтверждает необходимость проведения исследований в этом направлении. Ранее нами проведен анализ содержания ртути в лишайниках, отобранных преимущественно на прибрежных территориях полуострова [17], который показал отсутствие аномальных превышений и территориальную неоднородность для этого элемента. Для получения более полной информации по другим территориям нами предпринято дальнейшее определение ртути в эпифитных лишайниках, произрастающих в центральном, юго-западном, южном, юго-восточном и восточном географических регионах Крымского полуострова в зонах с различной степенью антропогенной нагрузки. Результаты исследования и анализа объединенных данных (2015–2018 гг.) представлены в настоящей работе.

Материалы и методики исследования

Характеристика района исследования. Крымский полуостров расположен на территории Восточно-Европейской равнины (45°24'N; 34°00'E) в северной части Черного моря и омывается Азовским морем с северо-востока. Площадь составляет 26 860 км^2. Климат региона отличается в пределах физико-географических районов (Степной Крым и Крымские горы – умеренно континентальный климат, Южный берег Крыма – субтропический климат). Среднегодовые метеорологические характеристики составили: температура воздуха – 12,5°С, сумма осадков – 476 мм в 2015 г.; температура воздуха – 11,8ºС, сумма осадков – 750 мм, что в 1,3 раза выше нормы, в 2016 г.; температура воздуха – 12,3°С, осадков – 369 мм в 2017 г.; температура воздуха –12,7°С, осадков – 455,9 мм в 2018 г. [18]. По характеру рельефа выделяют Северо-Крымскую равнину с Тарханкутской возвышенностью (около 70% территории), грядово-холмистые равнины Керченского полуострова, 3 гряды Горного Крыма, разделенные продольными равнинами [19]. На территории полуострова выделяют свыше 440 видов и разновидностей почв, при этом в Горном Крыму вследствие разнообразия геологического строения и географических особенностей отмечена значительная дифференциация почвенного покрова с преобладанием горных лесных, горно-степных и горно-луговых черноземовидных, дерново-карбонатных почв, в то время как в равнинной части она менее выражена (преимущественно южные черноземы и темно-каштановые почвы) [20]. Для территории Южного берега и части Горного Крыма более характерны коричневые почвы. Наряду с рекреационной и сельскохозяйственной векторностью экономики, промышленный профиль региона определяют химическая и винодельческая

отрасли, производство стройматериалов, электротехнического и электронного оборудования, машино- и судостроение, пищевая и перерабатывающая промышленность [21], которые сосредоточены в таких крупных городах, как Симферополь, Красноперекопск, Армянск, Керчь, Севастополь.

Учитывая, что основными региональными источниками поступления ртути в Крымском регионе являются ртутные рудопроявления в Предгорной и Южнобережной металлогенических зонах и проявления рассеянной ртути в продуктах грязевого вулканизма на Керченском полуострове [22], а также принимая во внимание расположение большинства карьеров по добыче полезных ископаемых и горнодобывающих предприятий [23], для исследования выбрали территории с разной степенью антропогенной нагрузки, расположенные в пределах центрального, юго-западного, южного, юго-восточного и восточного регионов (рис. 1).

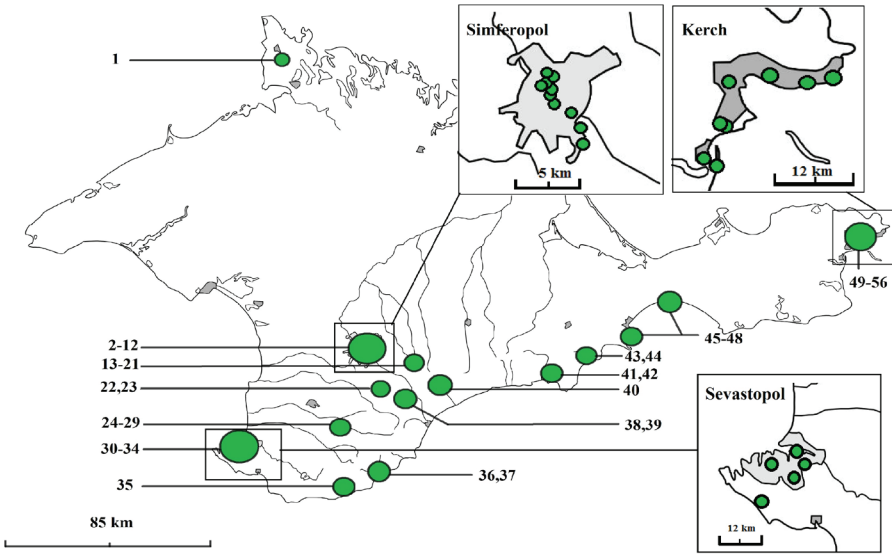


Рис. 1. Расположение площадок отбора лишайников видов *Evernia mesomorpha* Nyl., *E. prunastri* (L.) Ach., *Xanthoria parietina* (L.) Th. Fr., *Cladonia rangiformis* Hoffm., *Parmelia sulcata* Tayl. на территории Крымского полуострова: *1* – г. Армянск; *2–12* – г. Симферополь; *13–21* – Красные пещеры; *22*, *23* – с. Краснолесье; *24–29* – с. Высокое; *30–34* – г. Севастополь; *35* – г. Ай-Петри; *36*, *37* – г. Ялта; *38*, *39* – г. Чатыр-Даг; *40* – г. Демерджи; *41*, *42* – г. Судак; *43*, *44* – пгт. Курортное; *45–48* – г. Феодосия; *49–56* – г. Керчь

[**Fig. 1.** Location of plots selected for collecting *Evernia mesomorpha* Nyl., *E. prunastri* (L.) Ach., *Xanthoria parietina* (L.) Th. Fr., *Cladonia rangiformis* Hoffm., and *Parmelia sulcata* Tayl. in the Crimean peninsula: 1 - Armyansk; 2-12 - Simferopol; 13-21 - Red caves; 22, 23 - Krasnolesye; 24-29 - Vysokoye; 30-34 -Sevastopol; 35 - Plateau of Ai-Petri; 36, 37 - Yalta; 38, 39 - The plateaus of Chatyr-Dag; 40 - Demerdzhi-Yaila; 41, 42 - Sudak; 43, 44 - Kurortnoe; 45-48 - Feodosia; 49-56 - Kerch]

На первом этапе исследований в летние периоды в 2015–2016 гг. взяты 11 проб эпифитных лишайников вида *Evernia mesomorpha* Nyl., произрастающих на заповедных территориях (горные массивы Ай-Петри, Чатыр-Даг (верхнее и нижнее плато), Демерджи), в 2017 г. – 10 проб лишайников видов *Xanthoria parietina* (L.) Th. Fr., *E. prunastri* (L.) Ach. и *E. mesomorpha*, произрастающих в парковых зонах урбанизированных территорий (города Симферополь, Керчь, Феодосия). Подробное описание методик отбора проб, осуществленного в 2015–2017 гг. (13 площадок), и определения содержания в них ртути представлены в работе [17].

Летом 2018 г. взяты 40 проб лишайников видов *X. parietina*, *E. prunastri*, *Cladonia rangiformis* Hoffm., *Parmelia sulcata* Tayl. в парковых и селитебных зонах городов Симферополь, Керчь, Феодосия, Севастополь, Судак, Ялта и на условно фоновых участках природных экосистем в районе Красных пещер, с. Высокое, с. Краснолесье, Карадагского природного заповедника. Также отобрана проба в г. Армянске, относящемся к северному региону полуострова. Дополнительно или при отсутствии лишайников брали образцы мхов (n=3) вида гриммия подушковидная *Grimmia pulvinata* (Hedw.) Sm. Пробы лишайников и мхов взяты со стволов взрослых деревьев тополя черного *Populus nigra* L., сосны крымской *Pinus nigra* subsp. *pallasiana* (Lamb.) Holmboe, платана кленолистного *Platanus* × *acerifolia* (Aiton) Willd., кустарников кизильника крымского *Cotoneaster tauricus* Pojark., боярышника Поярковой *Crataegus pojarkovae* Kossych. на высоте 1,5–2,0 м от поверхности земли. Современные названия таксонов лишайников приведены по базе данных Mycobank [24]. Отбор и подготовка к анализу проб лишайников включали очистку образцов от инородных частиц, высушивание при комнатной температуре, измельчение и перемешивание для достижения наибольшей однородности материала [25].

Определение содержания ртути в образцах сухой массы лишайников и мхов выполнено атомно-абсорбционным методом с использованием анализатора ртути с зеемановской коррекцией неселективного поглощения «РА–915М», пиролитической приставки «ПИРО–915+» и пакета программ RA915P в Международном инновационном научно-образовательном центре «Урановая геология» Томского политехнического университета (аналитик Н.А. Осипова). Ошибка определения ртути не превышала 10% (не менее 2 повторностей измерения), при этом нижний предел обнаружения составил 0,005 мкг/г. Высокая эффективность и чувствительность данного прибора с применением соответствующей методики определения ртути в лишайниках показаны в работах N. Panichev et al. (2019) и J.M. Esbri et al. (2015) [26, 27]. Для построения и контроля стабильности градуировочных характеристик при определении массовой доли ртути в твердых образцах лишайников использовали стандартный образец состава листа березы ЛБ-1 (ГСО 8923-2007).

Статистическая обработка полученных данных проведена в программе StatSoft STATISTICA for Windows 6.0 и Jamovi (Version 1.2) [28]. Так как

характер распределения содержания ртути в лишайниках согласно критериям Колмогорова–Смирнова и Лиллифорс, Шапиро-Уилка отличался от нормального, статистическую значимость различий между группами оценивали с помощью непараметрического критерия Манна–Уитни. Для описания полученных данных использовали значения среднего арифметического (M), стандартной ошибки (SD), медианы (Me), 25 и 75 перцентили (p25, p75), а также минимальные (min) и максимальные (max) значения концентраций ртути в образцах.

Результаты исследования и обсуждение

Расширенный мониторинг содержания ртути в эпифитных лишайниках, выполненный в настоящем исследовании в центральном, юго-западном, южном, юго-восточном и восточном регионах Крымского полуострова, выявил некоторые территориальные различия, как правило, в пределах значений кларка для наземных растений (0,012 мкг/г) [29] 0,306 мкг/г (рис. 2), при этом среднее содержание составило 0,079±0,040 мкг/г, (Me=0,070 мкг/г, p25=0,058 мкг/г, p75=0,089 мкг/г).

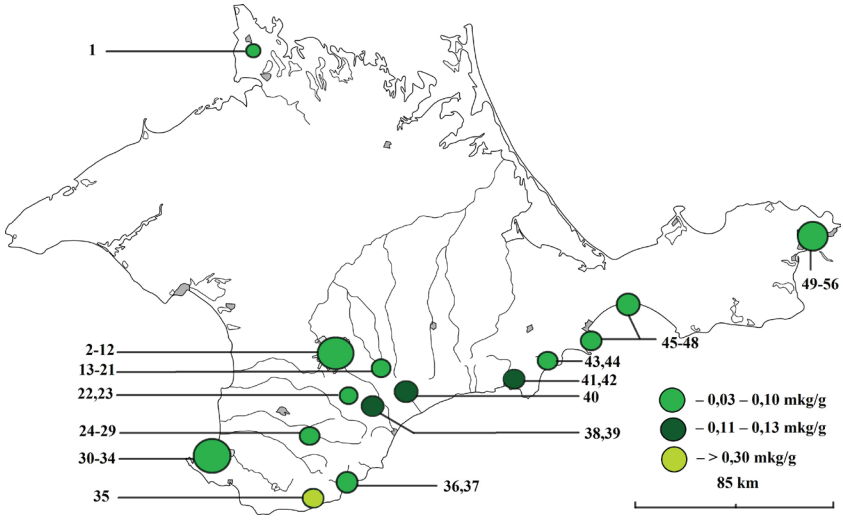


Рис. 2. Содержание ртути в лишайниках видов *Evernia mesomorpha* Nyl., *E. prunastri* (L.) Ach., *Xanthoria parietina* (L.) Th. Fr., *Cladonia rangiformis* Hoffm., *Parmelia sulcata* Tayl. на территории Крымского полуострова: *1* – г. Армянск; *2–12* – г. Симферополь; *13–21* – Красные пещеры; *22*, *23* – с. Краснолесье; *24–29* – с. Высокое; *30–34* – г. Севастополь; *35* – г. Ай-Петри; *36*, *37* – г. Ялта; 38, 39 – г. Чатыр-Даг; *40* – г. Демерджи; *41*, *42* – г. Судак; *43*, *44* – пгт. Курортное; *45–48* – г. Феодосия; *49–56* – г. Керчь

[**Fig. 2.** Mercury content in lichens *Evernia mesomorpha* Nyl., *E. prunastri* (L.) Ach., *Xanthoria parietina* (L.) Th. Fr., *Cladonia rangiformis* Hoffm., and *Parmelia sulcata* Tayl. in the Crimean peninsula: 1 - Armyansk; 2-12 - Simferopol; 13-21 - Red caves; 22, 23 - Krasnolesye; 24-29 - Vysokoye; 30-34 - Sevastopol; 35 - Plateau of Ai-Petri; 36, 37 - Yalta; 38, 39 - Plateaus of Chatyr-Dag; 40 - Demerdzhi-Yaila; 41, 42 - Sudak; 43,44 - Kurortnoe; 45-48 - Feodosia; 49-56 - Kerch]

В г. Симферополе отмечено аномальное превышение (1,16 мкг/г) среднекрымских значений содержания ртути в лишайниках. Оно предположительно связано со строительством многоэтажного дома на расстоянии 110 м от точки отбора и исключено из анализа.

На территории урбоэкосистем (n=34) средние значения содержания ртути составили 0,720±0,022 мкг/г (Me=0,067 мкг/г, p25=0,058 мкг/г, p75=0,086 мкг/г), при этом имели место значимые отличия ($p<0,05$) в разных городах: более высокие концентрации этого элемента в лишайниках, отобранных в г. Судак, по сравнению с городами Симферополь и Керчь.

Выявлены значимо ($0,006<p<0,020$) более высокие концентрации ртути в лишайниках, отобранных на заповедных, преимущественно южнобережных территориях (Me=0,105 мкг/г, p25=0,089 мкг/г, p75=0,160 мкг/г), чем в городских зонах (Me=0,067 мкг/г, p25=0,054 мкг/г, p75=0,086 мкг/г) и на других условно фоновых площадках (Me=0,071 мкг/г, p25=0,058 мкг/г, p75=0,089 мкг/г), относящихся к природным экосистемам, но не имеющих статус особо охраняемых природных территорий.

Кроме выявленной гетерогенности содержания ртути, обусловленной принадлежностью к разным типам экосистем, выявлена также географическая неоднородность содержания ртути в пробах эпифитных лишайников (таблица).

Содержание ртути в эпифитных лишайниках, отобранных на территории Крымского полуострова
[Mercury content in lichens in the territory of the Crimean peninsula]

Локализация площадки отбора [Location of the selection plot]	Вид лишайника/мха [Species of lichen/moss]	№ и характеристика площадки отбора [Number and characteristics of the selection plot]	Высота над уровнем моря, м над у.м. [Altitude above sea level, m]	Концентрация ртути, мкг/г [Hg concentration, mkg/g]	M±SD, mkg/g	Me (p25–p75), mkg/g
Северный регион [Northern region]						
г. Армянск [Armyansk]	*G. pulvinata*	1. Селитебная зона, 40 м от дороги [Residential area, 40 m from the road]	12	0,085	–	–
Центральный регион [Central region]						
г. Симферополь [Simferopol]	*X. parietina*	2. Ботанический сад, парковая зона [Botanic garden, park zone]	260	0,089	0,064±0,017	0,063 (0,051–0,080)
	X. parietina	3. Парковая зона у р. Салгир, 20 м от дороги [Park zone near the Salgir river, 20 m from the road]	240	0,063		
	X. parietina	4. Селитебная зона, 30 м от дороги и автомойки [Residential area, 30 m from the road and the car wash]	265	0,080		

Продолжение таблицы [Table (cont.)]

Локализация площадки отбора [Location of the selection plot]	Вид лишайника/мха [Species of lichen/moss]	№ и характеристика площадки отбора [Number and characteristics of the selection plot]	Высота над уровнем моря, м над у.м. [Altitude above sea level, m]	Концентрация ртути, мкг/г [Hg concentration, mkg/g]	M±SD, mkg/g	Me (p25–p75), mkg/g
	X. parietina	5. Парк Гагаринский, у р. Салгир [Park Gagarinskiy, near the Salgir River]	239	1,160		
	X. parietina	6. Селитебная зона, 10 м от дороги [Residential area, 10 m from the road]	251	0,065		
	X. parietina	7. Парковая зона у р. Салгир, 20 м от дороги [Park zone near the Salgir river, 20 m from the road]	244	0,051		
	X. parietina	8. Селитебная зона, школа [Residential area, school]	239	0,062		
	X. parietina	9. Парк Гагаринский, у р. Салгир [Park Gagarinskiy, near the Salgir river]	235	0,038		
	X. parietina	10. Парк Екатерининский, у р. Салгир [Park Ekaterininskiy, near the Salgir river]	245	0,063		
	X. parietina	11. Симферопольское водохранилище, 270 м от дороги [Reservoir Simferopolskoye, 270 m from the road]	300	0,047		
	E. prunastri	12. Симферопольское водохранилище, 435 м от дороги [Reservoir Simferopolskoye, 435 m from the road]	304	0,086		
Красные пещеры, 3 км от с. Перевальное-2, Симферопольский район [Red caves, 3 km from Perevalnoe-2, Simferopol district]	*E. prunastri*	13. Водопад Су-Учхан [Su-Uchkhan waterfall]	570	0,102	0,079±0,025	0,078 (0,064–0,093)
	X. parietina	14. Лесная зона [Forest zone]	516	0,092		
	E. prunastri.	15. Лесная зона, у реки [Forest zone, near the river]	475	0,127		
	X. parietina	16. 30 м от дороги [30 m from the road]	430	0,078		
	E. prunastri	17. Лесная зона [Forest zone]	512	0,087		
	E. prunastri	18. Лесная зона [Forest zone]	493	0,046		
	X. parietina	19. Лесная зона [Forest zone]	493	0,054		
	P. sulcata	20. Лесная зона [Forest zone]	493	0,069		
	X. parietina	21. 30 м от дороги [30 m from the road]	430	0,064		

Продолжение таблицы [Table (cont.)]

Локализация площадки отбора [Location of the selection plot]	Вид лишайника/мха [Species of lichen/moss]	№ и характеристика площадки отбора [Number and characteristics of the selection plot]	Высота над уровнем моря, м над у.м. [Altitude above sea level, m]	Концентрация ртути, мкг/г [Hg concentration, mkg/g]	M±SD, mkg/g	Me (p25–p75), mkg/g
с. Краснолесье, Симферопольский район [Krasnolesye, Simferopol district]	*P. sulcata*	22. Лесная зона [Forest zone]	585	0,089	0,066±0,010	0,066 (0,058–0,073)
	E. prunastri	23. Лесная зона [Forest zone]	585	0,058		
Юго-западный регион [Southwestern region]						
с. Высокое, Бахчисарайский район [Vysokoye, Bakhchisaray district]	*X. parietina*	24. Лесная зона [Forest zone]	378	0,060	0,064±0,021	0,063 (0,046–0,084)
	E. prunastri	25. Лесная зона [Forest zone]	378	0,037		
	C. rangiformis	26. Лесная зона [Forest zone]	378	0,084		
	E. prunastri	27. Лесная зона [Forest zone]	378	0,046		
	C. rangiformis	28. Лесная зона [Forest zone]	378	0,066		
	G. pulvinata	29. Лесная зона [Forest zone]	378	0,089		
г. Севастополь [Sevastopol]	*X. parietina*	30. Кладбище, 170 м от дороги [Cemetery, 170 m from the road]	36	0,070	0,060±0,019	0,053 (0,051–0,070)
	X. parietina	31. Селитебная зона, 100 м от дороги [Residential area, 100 m from the road]	140	0,053		
	X. parietina	32. Парк Ушакова балка, ООПТ, 215 м от моря [Park Ushakova balka, SPNA, 215 m from the sea]	17	0,088		
	X. parietina	33. Парк Максимова дача, ООПТ [Park Maksimova dacha, SPNA]	124	0,051		
	X. parietina	34. Мыс Фиолент, ООПТ, 30 м от моря [Fiolent foreland, SPNA, 30 m from the sea]	37	0,039		
Южный регион [Southern region]						
Ялтинский горно-лесной природный заповедник [Yalta Mountain and Forest Nature Reserve]	*E. prunastri*	35. Плато г. Ай-Петри, лесная зона [Plateau of Ai-Petri, forest zone]	1200	0,306	–	–

Продолжение таблицы [Table (cont.)]

Локализация площадки отбора [Location of the selection plot]	Вид лишайника/мха [Species of lichen/moss]	№ и характеристика площадки отбора [Number and characteristics of the selection plot]	Высота над уровнем моря, м над у.м. [Altitude above sea level, m]	Концентрация ртути, мкг/г [Hg concentration, mkg/g]	M±SD, mkg/g	Me (p25–p75), mkg/g
Гор. округ Ялта [Yalta]	*P. sulcata*	36. Парк Ливадийский, ООПТ [Park Livadiyskiy, SPNA]	110	0,073	0,082±0,012	0,082 (0,073–0,090)
	E. prunastri.	37. Парковая зона, 40 м от дороги [Park zone, 40 m from the road]	237	0,090		
Крымский природный заповедник [Crimean Nature Reserve]	*E. mesomorpha*	38. Верхнее плато г. Чатыр-Даг [The upper plateau of Chatyr-Dag]	1500	0,104	0,130±0,042	0,130 (0,100–0,160)
	E. mesomorpha	39. Нижнее плато г. Чатыр-Даг [The lower plateau of Chatyr-Dag]	1300	0,161		
Демерджи-яйла, ООПТ [Demerdzhi-Yaila, protected areas]	*E. mesomorpha*	40. Южная Демерджи [South Demerdzhi]	1239	0,110	–	–
Юго-восточный регион [Southeastern region]						
г. Судак [Sudak]	*X. parietina*	41. Парковая зона, 100 м от моря [Park zone, 100 m from the sea]	12	0,102	0,106±0,006	–
	X. parietina	42. Парковая зона, 102 м от моря [Park zone, 102 m from the sea]	11	0,110		
Гор. округ Феодосия [Feodosia]	*X. parietina*	43. Пгт. Курортное, лесная зона [Kurortnoe, forest zone]	48	0,058	0,077±0,038	0,064 (0,054–0,089)
	X. parietina	44. Пгт. Курортное, лесная зона [Kurortnoe, forest zone]	48	0,089		
	X. parietina	45. 200 м от бассейнов очистных сооружений, 400 м от моря [200 m from the pools of treatment facilities, 400 m from the sea]	85	0,054		
	G. pulvinata	46. 100 м от бассейнов очистных сооружений, 300 м от моря [100 m from the pools of treatment facilities, 300 m from the sea]	60	0,070		

Окончание таблицы [Table (end)]

Локализация площадки отбора [Location of the selection plot]	Вид лишайника/мха [Species of lichen/ moss]	№ и характеристика площадки отбора [Number and characteristics of the selection plot]	Высота над уровнем моря, м над у.м. [Altitude above sea level, m]	Концентрация ртути, мкг/г [Hg concentration, mkg/g]	M±SD, mkg/g	Me (p25–p75), mkg/g
	X. parietina	47. 100 м от бассейнов очистных сооружений, 300 м от моря [100 m from the pools of treatment facilities, 300 m from the sea]	60	0,147		
	X. parietina	48. Пгт. Приморский, селитебная зона, 300 м от судостроительного завода [Primorskiy, residential area, 300 m from the shipyard]	15	0,041		
Восточный регион [Eastern region]						
г. Керчь [Kerch]	X. parietina	49. Городской пляж, 30 м от моря [City beach, 30 m from the sea]	30	0,077	0,071±0,01	0,068 (0,063–0,081)
	X. parietina	50. Парк Молодежный, 200 м от моря и дороги [Park Molodezhnyy, 200 m from the road and the sea]	52	0,067		
	X. parietina	51. Селитебная зона, 3 м от дороги [Residential area, 3 m from the road]	54	0,062		
	X. parietina	52. Парк Комсомольский, 240 м от автозаправочной станции [Park Komsomolskiy, 240 m from the gas station]	24	0,064		
	X. parietina	53. 20 м от приборостроительного завода [20 m from the shipyard]	21	0,086		
	X. parietina	54. Крепость Еникале [Enikale Fortress]	21	0,085		
	X. parietina	55. Селитебная зона, 5 м от дороги [Residential area, 5 m from the road]	40	0,068		
	X. parietina	56. Селитебная зона, 450 м от судостроительного завода [Residential area, 450 m from the shipyard]	1	0,061		

Примечание. ООПТ – особо охраняемые природные территории.
[*Note.* SPNA - Specially Protected Natural Area].

Так, обнаружено статистически значимо ($p<0,01$) более высокое содержание ртути в эпифитных лишайниках, произрастающих на фоновых участках, в заповедных и парковых зонах в южном регионе по сравнению с центральным, восточным и юго-западным регионами (рис. 3), что может быть обусловлено рядом причин.

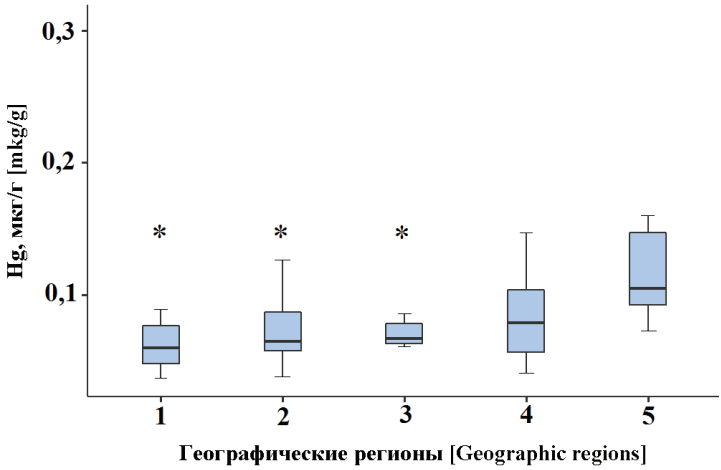


Рис. 3. Содержание ртути в эпифитных лишайниках, произрастающих в разных регионах Крымского полуострова: *1* – юго-западный; *2* – центральный; *3* – восточный; *4* – юго-восточный; *5* – южный регионы (по оси ординат – «содержание ртути, мкг/г», по оси абсцисс – «географические регионы», * – статистически значимые различия ($p<0,01$) по сравнению с южным регионом, критерий Манна–Уитни)
[**Fig. 3.** Mercury content in epiphytic lichens from different regions of the Crimean peninsula: 1 - Southwestern; 2 - Central; 3 - Eastern; 4 - Southeastern; 5 - Southern regions (on the X-axis - Mercury content, mkg/g; on the Y-axis - Geographic regions; * – Significant differences ($p<0.01$) compared to the southern region, Mann-Whitney test)]

Во-первых, среднегодовое количество осадков в периоды отбора проб на площадках № 35, 38–40 в южном регионе было выше, чем в другие годы, при этом лишайники рода *Evernia*, отобранные на вышеуказанных площадках, обладают более высокой аккумулятивной способностью [30]. Вторым фактором может являться наличие естественных ртутных рудопроявлений в местах глубинных разломов ортогональной системы и зонах геодинамической активности, расположенных в пределах Предгорной и Южнобережной металлогенических зон [15, 22, 23]. Также стоит отметить, что выявленные более высокие значения ртути на площадках Южного склона Главной гряды Крымских гор по сравнению с Предгорной зоной связаны с миграцией ртути с морскими аэрозолями [31], поскольку здесь отсутствуют значительные антропогенные источники поступления ртути. В свою очередь, кроме трансграничного атмосферного переноса и локальных источников, поставщиком ртути на территории южного берега может служить деятельность подводных грязевых вулканов [32].

Отмечены статистически значимо (p=0,003) более высокие концентрации ртути в лишайниках, произрастающих на высоте от 500 до 1500 м над уровнем моря в предгорном и горном Крыму (рис. 4), по сравнению с более низко расположенными площадками отбора, что, помимо вышеуказанных климатических и геохимических особенностей этих территорий, объясняется тем, что Главная гряда Крымских гор является естественным барьером для содержащих ртуть переносимых масс атмосферного воздуха.

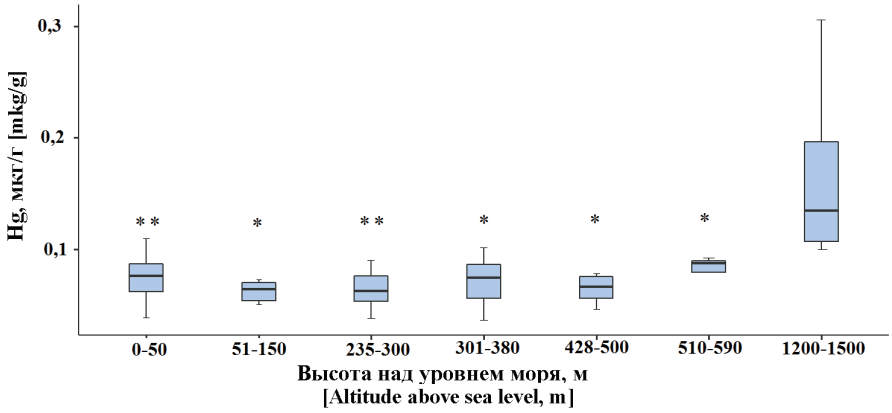


Рис. 4. Содержание ртути в эпифитных лишайниках, произрастающих на Крымском полуострове на разной высоте над уровнем моря (по оси ординат – «содержание ртути, мкг/г», по оси абсцисс – «высота над уровнем моря, м над у. м.», * – статистически значимые различия (p<0,05), ** – (p<0,01) по сравнению с высотой 1 200–1 500 м, критерий Манна–Уитни)
[**Fig. 4.** Mercury content in epiphytic lichens in the Crimean peninsula that are located at different altitude above sea level (on the X-axis - Mercury content, mkg/g; on the Y-axis - Altitude above sea level, m above sea level; *Significant differences (p<0.05), ** (p<0.01) compared to the altitude 1200-1500 m, Mann-Whitney test)]

Увеличение концентрации ртути на больших горных высотах согласуется с данными содержания этого металла в почвах в Китае [33] и сопоставимо с данными по мхам и лишайникам, отобранным на Тибетском плато (max=0,346 мкг/г) [34]. Обращает на себя внимание, что эти величины превышают в 1,5–2 раза среднекрымские уровни, в том числе концентрацию ртути в лишайнике, отобранном в 100 м от водопроводно-очистных сооружений (площадка № 47, г. Феодосия) и обнаружившем наиболее высокое содержание ртути.

Результаты настоящего исследования в целом сопоставимы с данными содержания ртути в эпифитных лишайниках, произрастающих в природных и городских экосистемах на территории Российской Федерации [30, 35, 36] и других стран [6, 26–27, 33, 34, 37–40], что дает основание полагать, что наблюдаемые для Крымского полуострова уровни являются относи-

тельно низкими с учетом кларка ртути в наземных растениях [29]. При этом основные источники поступления ртути в биосферу на исследуемых территориях имеют преимущественно естественное происхождение, однако это не исключает вероятность техногенного загрязнения, о чем свидетельствуют выявленные различия на территориях городов, и вклад которого может увеличиться при возрастающей интенсивности хозяйственного развития Республики Крым.

Заключение

Обнаружены относительно низкие концентрации ртути в эпифитных лишайниках, сопоставимые с данными в других регионах Российской Федерации и странах СНГ и варьирующие в пределах 0,037–0,306 мкг/г в зависимости от типа экосистемы (природная, частично трансформированная, урбоэкосистема) и географического региона (центральный, юго-западный, южный, юго-восточный, восточный) Крымского полуострова. При этом более высокое содержание ртути отмечено на мониторинговых площадках южного побережья по сравнению с центральным, восточным и юго-западным регионами и на высоте свыше 500 м над ур. м. в Предгорном и Горном Крыму, что может быть обусловлено атмосферно-геохимическими особенностями исследуемых территорий (количество осадков, атмосферный перенос, морские аэрозоли, подводный вулканизм, ртутные металлогенические зоны), а также более высокой способностью рода *Evernia* к аккумуляции металлов в талломе. При преимущественно природной обусловленности выявленных различий данные по разному содержанию ртути в лишайниках городов дают основания полагать, что вклад техногенного источника при возрастающей интенсивности хозяйственного развития Республики Крым будет возрастать.

Литература

1. World Health Organization/ United Nations Environment Programme (WHO/UNEP). Guidance for identifying populations at risk from mercury exposure. World Health Organization, Geneva, Switzerland : Inter-Organization Programme for the Sound Management of Chemicals, 2008. 167 p. URL: https://www.who.int/foodsafety/publications/chem/mercuryexposure.pdf (дата обращения: 31.03.2020).
2. Li W.C., Tse H.F. Health risk and significance of mercury in the environment // Environmental Science and Pollution Research. 2015. Vol. 22, № 1. PP. 192–201. doi: 10.1007/s11356-014-3544-x
3. Travnikov O., Dastoor A., Friedman C., Ryzhkov A., Selin N., Song S. Global mercury modelling: update of modelling results in the global mercury assessment 2013. Arctic Monitoring and Assessment Programme, Oslo, Norway / UNEP Chemicals Branch, Geneva, Switzerland : Narayana Press, 2013. 36 p.
4. Pirrone N., Keating T. Hemispheric Transport of Air Pollution 2010: Part B-Mercury. New York ; Geneva : United Nations Publication, 2010. 213 p.

5. Obrist D., Kirk J.L., Zhang L., Sunderland E.M., Jiskra M., Selin N.E. A review of global environmental mercury processes in response to human and natural perturbations: Changes of emissions, climate, and land use // Ambio. 2018. Vol. 47, № 2. PP. 116–140. doi: 10.1007/s13280-017-1004-9
6. Bargagli R. Moss and lichen biomonitoring of atmospheric mercury: A review // Science of The Total Environment. 2016. № 572. PP. 216–231. doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.07.202
7. Kuldeep S., Bhattacharya P. Lichen as a Bioindicator Tool for Assessment of Climate and Air Pollution Vulnerability: Review // International Research Journal of Environmental Sciences. 2015. Vol. 4. PP. 107–117.
8. Anicic M.U., Gordana V., Milica T. Biomonitoring of Air Pollution Using Mosses and Lichens: A Passive & Active Approach – State of the Art Research & Perspectives. Air, Water and Soil Pollution Science and Technology Series. New York, United States : Nova Science Publishers Inc., 2016. 236 p.
9. Robertus Y.V., Puzanov A.V. Characteristics of the manifestation of transboundary pollutants transfer on the territory of Altai // Geography and Natural Resources. 2017. Vol. 38, № 4. PP. 349–356. doi: 10.1134/S1875372817040060
10. Osipova N.A., Filimonenko K.A., Talovskaya A.V., Yazikov E.G. Geochemical Approach to Human Health Risk Assessment of Inhaled Trace Elements in the Vicinity of Industrial Enterprises in Tomsk, Russia // Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal. 2015. Vol. 21, № 6. PP. 1664–1685. doi: 10.1080/10807039.2014.972912
11. Makarova A., Kruchina E., Fedoseev A., Borisov D., Suchkova D. Estimating Mercury Footprint In The Regions Of The Russian Federation // Proc. of International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM: Surveying Geology & Mining Ecology Management. Sofia, Bulgaria, 2018. PP. 387–394. doi: 10.5593/sgem2018/5.2/S20.052
12. Komov V.T., Ivanova E.S., Poddubnaya N.Y., Gremyachikh V.A. Mercury in soil, earthworms and organs of voles Myodes glareolus and shrew Sorex araneus in the vicinity of an industrial complex in Northwest Russia (Cherepovets) // Environmental monitoring and assessment. 2017. Vol. 189, № 3. P. 104. doi: 10.1007/s10661-017-5799-4
13. Tatsii Y.G., Udachin V.N., Amino P.G. Environmental geochemistry of mercury in the area of emissions of the Karabashmed copper smelter // Geochemistry International. 2017. Vol. 55, № 10. PP. 935–945. doi: 10.1134/S0016702917100093
14. Mirzoyeva N., Gulina L., Gulin S., Plotitsina O., Stetsuk A., Arkhipova S., Korkishko N., Eremin O. Radionuclides and mercury in the salt lakes of the Crimea // Chinese journal of oceanology and limnology. 2015. Vol. 33, № 6. PP. 1413–1425. doi: 10.1007/s00343-015-4374-5
15. Радченко А.И. Распределение ртути в ландшафтно-геохимических зонах Крыма // Минералогический журнал. Киев, 1999. Т. 21, № 1. С. 79–84.
16. Рябинин А.И., Боброва С.А., Мальченко Ю.А., Салтыкова Л.В. Нейтронно-активационный многоэлементный мониторинг источников питьевых вод в регионе г. Севастополя (1992–2010 гг.) // Мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды. Основные результаты и пути развития / Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН: тезисы докладов Всероссийской научной конференции. М., 2017. С. 498–499.
17. Евстафьева Е.В., Богданова А.М., Большунова Т.С., Барановская Н.В., Осипова Н.А. Содержание ртути в эпифитных лишайниках на территории Республики Крым // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330, № 7. С. 93–103. doi: 10.18799/24131830/2019/7/2180
18. Портал Правительства Республики Крым. URL: meco.rk.gov.ru/ru/structure/60 (дата обращения: 31.03.2020).
19. Эколого-ресурсный потенциал Крыма. История формирования и перспективы развития / Е.Ю. Барабошкин, Т.А. Барабошкина, Е.П. Каюкова и др. ; под ред. Е.Ю. Барабошкина, Е.В. Ясеневой. СПб. : ВВМ, 2016. Т. 1. 435 с.

20. Драган Н.А. Сравнительная оценка качества почвенных ресурсов Крыма // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. География. Геология. 2011. Т. 24, №. 2–1. С. 260–266.
21. Анализ тенденций социально-экономического развития Республики Крым / под ред. Ю.П. Майданевич. Симферополь : ПОЛИПРИНТ, 2019. 362 с.
22. Геология ртутных месторождений и рудопроявлений Украины / В.И. Скаржинский, И.Р. Белоус, С.И. Кирикилица и др. ; под ред В.И. Скаржинского. Киев : Наукова думка, 1975. 285 с.
23. Аксенов Е.М., Беляев Е.В., Садыков Р.К. Минерально-сырьевой потенциал твердых полезных ископаемых Крымского федерального округа // Разведка и охрана недр. 2015. № 9. С. 38–46.
24. Mycobank. URL: www.mycobank.org (дата обращения: 31.03.2020).
25. Bargagli R., Nimis P.L. Guidelines for the use of epiphytic lichens as biomonitors of atmospheric deposition of trace elements // Monitoring with Lichen – Monitoring Lichens. NATO Science Series (Series IV: Earth and Environmental Sciences). 2002. № 7. PP. 295–299. doi: 10.1007/978-94-010-0423-7_23
26. Panichev N., Mokgalaka N., Panicheva S. Assessment of air pollution by mercury in South African provinces using lichens Parmelia caperata as bioindicators // Environmental Geochemistry and Health. 2019. Vol. 41. PP. 2239–2250. doi: 10.1007/s10653-019-00283-w
27. Esbri J.M., Lopez-Berdonces M.A., Fernandez-Calderon S., Higueras P., Diez S. Atmospheric mercury pollution around a chlor-alkali plant in Flix (NE Spain): An integrated analysis // Environmental Science and Pollution Research. 2015. Vol. 22. PP. 4842–4850. doi: 10.1007/s11356-014-3305-x
28. The Jamovi Project (2020). Jamovi. (Version 1.2). URL: https://www.jamovi.org (accessed: 31.03.2020).
29. Добровольский В.В. Основы биогеохимии : учебник для студ. вузов. М. : Академия, 2003. 400 с.
30. Ляпина Е.Е. Геоэкологические особенности ртутной нагрузки на территорию Томской области по данным биомониторинговых исследований // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1 (2).
31. Плотицына О.В., Стецюк А.П., Поповичев В.Н. Распределение ртути в воде соленых озер северо-западной части Крыма, Черного моря и севастопольских бухт // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон. 2014. № 28. С. 225–230.
32. Шнюков Е.Ф., Нетребская Е.Я. Глубинное геологическое строение грязевых вулканов Черного моря // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2014. Т. 2, № 36. С. 66–79.
33. Zhang H., Yin R.S., Feng X.B., Sommar J., Anderson C.W.N., Sapkota A., Fu X., Larssen T. Atmospheric mercury inputs in montane soils increase with elevation: evidence from mercury isotope signatures // Scientific Reports. 2013. Vol. 3 (3322). PP. 1–8. doi: 10.1038/srep03322
34. Shao J.J., Liu C.B., Zhang Q.H., Fu J.J., Yang R.Q., Shi J.B., Cai Y., Jiang G.B. Characterization and speciation of mercury in mosses and lichens from the high-altitude Tibetan Plateau // Environmental geochemistry and health. 2017. Vol. 39, № 3. PP. 475–482. doi: 10.1007/s10653-016-9828-y
35. 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. 2016. Vol. 75, № 18. e1260. doi: 10.1007/s12665-016-6062-y
36. Тарханов С.Н. Влияние аэротехногенного загрязнения на покрытие стволов деревьев эпифитными лишайниками в лесных насаждениях Северо-Двинского бассейна

и Беломорско-Кулойского плато // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2016. Т. 1, № 349. С. 37–47. doi: 10.17238/issn0536-1036.2016.1.37
37. Bozkurt Z. Determination of airborne trace elements in an urban area using lichens as biomonitor // Environmental monitoring and assessment. 2017. Vol. 189. № 11. PP. 573. doi: 10.1007/s10661-017-6275-x
38. Klapstein S.J., Walker A.K., Saunders C.H., Cameron R.P., Murimboh J.D., O'Driscoll N.J. Spatial distribution of mercury and other potentially toxic elements using epiphytic lichens in Nova Scotia // Chemosphere. 2020. Vol. 241. e125064. doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.125064
39. Weiss-Penzias P.S., Bank M.S., Clifford D.L., Torregrosa A., Zheng B., Lin W., Wilmers C.C.. Marine fog inputs appear to increase methylmercury bioaccumulation in a coastal terrestrial food web // Scientific Reports. 2019. Vol. 9. e17611. doi: 10.1038/s41598-019-54056-7
40. Ndlovu N.B., Frontasyeva M.V., Newman R.T., Maleka P.P. Active biomonitoring of atmospheric pollution in the Western Cape (South Africa) using INAA and ICP-MS // Journal of Radioanalytical and Nuclear. 2019. Vol. 322. PP. 1549–1559. doi: 10.1007/s10967-019-06823-z

Поступила в редакцию 25.07.2019 г.; повторно 09.04.2020 г.;
принята 30.04.2020 г.; опубликована 19.06.2020 г.

Авторский коллектив:
Богданова Анна Михайловна – м.н.с. отдела медико-экологического мониторинга с оценкой риска Центральной научно-исследовательской лаборатории, Медицинская академия им. С.И. Георгиевского, Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского (Россия, 295007, г. Симферополь, пр. Академика Вернадского, 4).
ORCID iD: https://orcid.org/0000-0002-3041-6328
E-mail: annuta2607@yandex.ru
Евстафьева Елена Владимировна – д-р биол. наук, профессор, зав. кафедрой физиологии нормальной, Медицинская академия им. С.И. Георгиевского, Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского (Россия, 295007, г. Симферополь, пр. Академика Вернадского, 4).
ORCID iD: http://orcid.org/0000-0002-8331-4149
E-mail: e.evstafeva@mail.ru
Барановская Наталья Владимировна – д-р биол. наук, профессор отделения геологии, Инженерная школа природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет (Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30).
E-mail: nata@tpu.ru
Ляпина Елена Евгеньевна – канд. геол.-мин. наук, с.н.с. лаборатории физики климатических систем, Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3).
E-mail: eeldv@mail.ru
Тымченко Светлана Леонидовна – канд. мед. наук, доцент кафедры физиологии нормальной Медицинской академии им. С.И. Георгиевского, Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского (Россия, 295007, г. Симферополь, пр. Академика Вернадского, 4).
ORCID iD: https://orcid.org/0000-0003-3298-6743
E-mail: rybqa@yahoo.com
Большунова Татьяна Сергеевна – канд. геол.-мин. наук, ведущий инженер отдела экологического нормирования, АО «ТомскНИПИнефть» (Россия, 634027, г. Томск, пр. Мира, 72).
E-mail: BolshunovaTS@gmail.com

Для цитирования: Богданова А.М., Евстафьева Е.В., Барановская Н.В., Ляпина Е.Е., Тымченко С.Л., Большунова Т.С. Территориальные особенности распределения ртути в эпифитных лишайниках Крымского полуострова // Вестн. Том. гос. ун-та. Биология. 2020. № 50. С. 135–156. doi: 10.17223/19988591/50/7

For citation: Bogdanova AM, Evstafeva EV, Baranovskaya NV, Lyapina EE, Tymchenko SL, Bolshunova TS. Mercury in epiphytic lichens of the Crimean peninsula. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya = Tomsk State University Journal of Biology.* 2020;50:135-156. doi: 10.17223/19988591/50/7
In Russian, English Summary

Anna M. Bogdanova[1], Elena V. Evstafeva[1], Natalia V. Baranovskaya[2], Elena E. Lyapina[3], Svetlana L. Tymchenko[1], Tatiana S. Bolshunova[2]

[1] V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Medical Academy Named after S.I. Georgievsky, Simferopol, Russian Federation
[2] National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation
[3] Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russian Federation
[4] Tomsk Oil and Gas Research and Design Institute, Tomsk, Russian Federation

Mercury in epiphytic lichens of the Crimean peninsula

Current environmental concerns are associated with elevated levels of mercury (Hg) contamination, and monitoring studies are needed to estimate mercury atmospheric emissions as one of the hazardous global pollutants. Therefore, epiphytic lichens could be used as the most sensitive bioindicators of such environmental contamination. The presence of Hg in the air within the Russian Federation is connected with its emission from local sources of anthropogenic and natural origin and also atmospheric transport from other areas of mercury contamination. To date, few studies report mercury distribution in the Crimean peninsula and the data are still fragmentary. The aim of this study was to use the lichens *Evernia mesomorpha* Nyl., *E. prunastri* (L.) Ach., *Xanthoria parietina* (L.) Th. Fr., *Cladonia rangiformis* Hoffm., and *Parmelia sulcata* Tayl., collected from various rural and urban regions of the Crimean peninsula, to assess Hg contamination.

The sampling areas were located within central, southwestern, southern, southeastern and eastern regions of the Crimean peninsula (*See Fig. 1 and Table*) and included those characterized by the mercury ore deposits in the metallogenic zones of the southern Crimea foothills and coastal area and the Kerch peninsula as well as industrial activities (mining and quarrying) located within the Crimean peninsula (45°24'N; 34°00'E). All measurements of Hg concentration in epiphytic lichens (n=60; samples collected between 2015 and 2018) were conducted using a model RA-915 atomic absorption spectrometer (Lumex, "Uranium Geology International Center", Tomsk, Russia) with a PYRO-915 attachment. This instrument had been previously used with high efficiency for total mercury determination in lichens (Panichev N et al., 2019; Esbri JM et al., 2015).

All data on Hg concentration in epiphytic lichens from different Crimean regions are summarized in Table and it was in the range of 0.037-0.306 mkg/g (*See Fig. 2*) with a median (Me) value of 0.070 mkg/g (p25=0.058 mkg/g, p75=0.089 mkg/g). In urban territories (n=34), median Hg concentration was found to be 0.067 mkg/g (p25=0.058 mkg/g, p75=0.086 mkg/g) and in natural ecosystems it was 0.084 mkg/g (p25=0.060 mkg/g, p75=0.100 mkg/g). It was found that epiphytic lichens from the protected and park areas in the southern region contain the highest Hg concentrations ($p<0.01$) compared to the central, eastern and southwestern regions (*See Fig. 3*). The results of Hg determination in lichens demonstrate higher Hg concentrations ($p=0.003$) in samples collected in Crimean foothills and mountains (500 to 1000 m above sea level) compared to the lowlands (*See Fig. 4*). The latter reflects the role of the Main Ridge of the Crimean mountains as a natural barrier for the Hg transported with air

masses as well as natural sources and geochemical characteristics of the monitored areas (precipitation, marine aerosols, underwater volcanoes, geological deposits of Hg minerals). The obtained results do not point to significant signs of atmospheric air pollution with Hg using epiphytic lichens as bioindicators because Hg concentration in all analyzed samples was relatively low and comparable to background Hg concentrations in other regions of the Russian Federation and other CIS countries. Revealed variations are dependent on the ecosystem type and also could be explained by the geographical diversity of the Crimean peninsula. Although the present research suggests that most of Hg is derived from natural sources it can be hypothesized that Hg concentrations in the environment might be increasing in future as a result of human activity mainly through intensification of agriculture and industry in Crimea.

The paper contains 4 Figures, 1 Table and 40 References.

Key words: biosubstrate; bioaccumulation; lichenoindication; heavy metals; the Republic of Crimea.

Funding: This study was funded by the V.I. Vernadsky Crimean Federal University's Development Program for 2015-2024, within the projects "Academic mobility of young scientists in Russia 2017". Mercury analysis was financially funded by the Russian Foundation for Basic Research (Project No 18-29-24212\18) and the State Assignment (theme No AAAA-A17-117013050031-8).

The Authors declare no conflict of interest.

References

1. *World Health Organization/ United Nations Environment Programme (WHO/ UNEP)*. Guidance for identifying populations at risk from mercury exposure. World Health Organization, Geneva, Switzerland: Inter-Organization Program for the Sound Management of Chemicals; 2008. 167 p. [Electronic resource]. Available at: https://www.who.int/foodsafety/publications/chem/mercuryexposure.pdf (accessed 31.03.2020).
2. Li WC, Tse HF. Health risk and significance of mercury in the environment. *Environ Sci Pollut Res*. 2015;22(1):192-201. doi: 10.1007/s11356-014-3544-x
3. Travnikov O, Dastoor A, Friedman C, Ryzhkov A, Selin N, Song S. Global mercury modelling: update of modelling results in the global mercury assessment 2013. Arctic Monitoring and Assessment Programme, Oslo, Norway/ UNEP Chemicals Branch, Geneva, Switzerland: Narayana Press; 2013. 36 p. [Electronic resource]. Available at: https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/13772/Report_Modelling_update_of_the_GMA2013.pdf.pdf?sequence=1&isAllowed=y (accessed 31.03.2020).
4. Pirrone N, Keating T. Hemispheric Transport of Air Pollution 2010: Part B-Mercury. New York and Geneva: United Nations Publication; 2010. 213 p. [Electronic resource]. Available at: https://www.unece.org/fileadmin/DAM/env/lrtap/Publications/11-22145-Part-B.pdf (accessed 31.03.2020).
5. Obrist D, Kirk JL, Zhang L, Sunderland EM, Jiskra M, Selin NE. A review of global environmental mercury processes in response to human and natural perturbations: Changes of emissions, climate, and land use. *Ambio*. 2018;47(2):116-140. doi: 10.1007/s13280-017-1004-9
6. Bargagli R. Moss and lichen biomonitoring of atmospheric mercury: A review. *Science of the Total Environment*. 2016;572:216-231. doi:10.1016/j.scitotenv.2016.07.202
7. Kuldeep S, Bhattacharya P. Lichen as a Bioindicator Tool for Assessment of Climate and Air Pollution Vulnerability: Review. *Int Research J Environmental Sciences*. 2015;4:107-117.
8. Anicic MU, Gordana V, Milica T. Biomonitoring of Air Pollution Using Mosses and Lichens: A Passive & Active Approach – State of the Art Research & Perspectives. Air, Water and Soil Pollution Science and Technology Series. New York, United States: Nova Science Publishers Inc.; 2016. 236 p.

9. Robertus YV, Puzanov AV. Characteristics of the manifestation of transboundary pollutants transfer on the territory of Altai. *Geography and Natural Resources*. 2017;38(4):349-356. doi: 10.1134/S1875372817040060
10. Osipova NA, Filimonenko KA, Talovskaya AV, Yazikov EG. Geochemical Approach to Human Health Risk Assessment of Inhaled Trace Elements in the Vicinity of Industrial Enterprises in Tomsk, Russia. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*. 2015;21(6):1664-1685. doi: 10.1080/10807039.2014.972912
11. Makarova A, Kruchina E, Fedoseev A, Borisov D, Suchkova D. Estimating Mercury Footprint In The Regions Of The Russian Federation. In: *International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM: Surveying Geology & mining Ecology Management*. Proc. of the 18th Conference. Sofia, Bulgaria. 2018:387-394. doi: 10.5593/sgem2018/5.2/S20.052
12. Komov VT, Ivanova ES, Poddubnaya NY, Gremyachikh VA. Mercury in soil, earthworms and organs of voles Myodes glareolus and shrew Sorex araneus in the vicinity of an industrial complex in Northwest Russia (Cherepovets). *Environmental Monitoring and Assessment*. 2017;189(3):104. doi: 10.1007/s10661-017-5799-4
13. Tatsii YG, Udachin VN, Amino PG. Environmental geochemistry of mercury in the area of emissions of the Karabashmed copper smelter. *Geochemistry International*. 2017;55(10):935-945. doi: 10.1134/S0016702917100093
14. Mirzoyeva N, Gulina L, Gulin S, Plotitsina O, Stetsuk A, Arkhipova S, Korkishko N, Eremin O. Radionuclides and mercury in the salt lakes of the Crimea. *Chinese J Oceanology and Limnology*. 2015;33(6):1413-1425. doi: 10.1007/s00343-015-4374-5
15. Radchenko AI. Raspredeleniye rtuti v landshaftno-geokhimicheskikh zonakh Kryma [Mercury distribution in landscape-geochemical areas of Crimea]. *Mineralogicheskiy Zhurnal*. 1999;21(1):79-84. In Russian
16. Ryabinin AI, Bobrova SA, Mal'chenko YA, Saltykova LV. Neytronno-aktivatsionnyy mnogoelementnyy monitoring istochnikov pit'yevykh vod v regione g. Sevastopolya (1992-2010 gg.) [Neutron-activation multi-element monitoring of drinking water sources in the region of the city of Sevastopol (1992-2010)]. In: *Monitoring sostoyaniya i zagryazneniya okruzhayushchey sredy. Osnovnyye rezul'taty i puti razvitiya.* Materialy nauch. konf. [Monitoring of the state and environmental pollution. Main results and ways of development. Proc. of the Sci. Conf. (Moscow, Russia, 20-22 March, 2017)]. Moscow; 2017. pp. 498-499. Available at: https://www.sgu.ru/sites/default/files/textdocsfiles/2017/04/04/theses_pem2017.pdf (accessed 31.03.2020). In Russian
17. Evstafeva EV, Bogdanova AM, Bolshunova TS, Baranovskaya NV, Osipova NA. Mercury content in the epiphytic lichens of Crimea Republic. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2019;330(7):93-103. doi: 10.18799/24131830/2019/7/2180 In Russian, English Summary
18. *Portal Pravitel'stva Respubliki Krym* [Portal of the Government of the Republic of Crimea] [Electronic resource]. Available at: meco.rk.gov.ru/ru/structure/60 (accessed 31.03.2020). In Russian
19. Baraboshkin EY, Baraboshkina TA, Kayukova EP, Krylov OV, Yaseneva EV, Yasenev AV. Ekologo-resursnyy potentsial Kryma. Istoriya formirovaniya i perspektivy razvitiya. T. 1 [Ecological and resource potential of the Crimea. History of formation and development prospects. Vol. 1]. St. Petersburg: BBM Publ.; 2016. 435 p. [Electronic resource]. Available at: https://www.rfbr.ru/rffi/ru/books/o_2060326#1 (accessed 31.03.2020). In Russian
20. Dragan NA. Comparative estimation of quality of soil resources of Crimea. *Uchenyye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta imeni V.I. Vernadskogo. Geografiya. Geologiya = Scientific Notes of V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Geography. Geology*. 2011;24(2-1):260-266. In Russian

21. *Analiz tendentsiy sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya Respubliki Krym: Monografiya* [Analysis of trends in the socio-economic development of the Republic of Crimea: Monograph]. Maydanevich YP, editor. Simferopol: POLIPRINT Publ.; 2019. 362 p. [Electronic resource]. Available at: http://ieu.cfuv.ru/sites/default/files/2019-03/%D0%A1%D0%B1%D0%BE%D1%80%D0%BD%D0%B8%D0%BA2019.pdf (accessed 31.03.2020). In Russian
22. *Geologiya rtutnykh mestorozhdeniy i rudoproyavleniy Ukrainy* [Geology of mercury deposits and occurrences of Ukraine]. Skarzhinskiy VI, editor. Kiev: Naukova dumka Publ.; 1975. 285 p. In Russian
23. Aksenov EM, Belyayev EV, Sadykov RK. Industry potencial of solid industry minerals of Crimean Federal District. *Prospect and Protection of Mineral Resources*. 2015;9:38-46. In Russian
24. *Mycobank* [Electronic resource]. Available at: www.mycobank.org (accessed 31.03.2020).
25. Bargagli R, Nimis PL. Guidelines for the Use of Epiphytic Lichens as Biomonitors of Atmospheric Deposition of Trace Elements. *Monitoring with Lichens – Monitoring Lichens. NATO Science Series (Series IV: Earth and Environmental Sciences)*. 2002;7:295-299. doi: 10.1007/978-94-010-0423-7_23
26. Panichev N, Mokgalaka N, Panicheva S. Assessment of air pollution by mercury in South African provinces using lichens Parmelia caperata as bioindicators. *Environmental Geochemistry and Health,* 2019;41:2239-2250. doi: 10.1007/s10653-019-00283-w
27. Esbri JM, Lopez-Berdonces MA, Fernandez-Calderon S, Higueras P, Diez S. Atmospheric mercury pollution around a chlor-alkali plant in Flix (NE Spain): An integrated analysis. *Environ Sci Pollut Res*. 2015;22:4842-4850. doi: 10.1007/s11356-014-3305-x
28. The Jamovi Project (2020). Jamovi. (Version 1.2). [Electronic resource]. Available at: https://www.jamovi.org (accessed 31.03.2020).
29. Dobrovolskiy VV. Osnovy biogeokhimii: uchebnik dlya stud. VUZov [Fundamentals of biogeochemistry: A textbook for students of universities]. Moscow: Academiya Publ.; 2003. 400 p. In Russian
30. Lyapina EE. Geoecological features of the mercury load on the territory of the Tomsk region according to the data of biomonitoring research. *Modern Problems of Science and Education*. 2015;1(2). In Russian, English Summary
31. Plotitsyna OV, Stetsyuk AP, Popovichev VN. Raspredelenie rtuti v vode solenykh ozer severo-zapadnoy chasti Kryma, Chernogo morya i sevastopol'skikh bukht [Mercury distribution in waters of the North-Western Crimea Salt Lakes, Black Sea and Sevastopol Bays]. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*. 2014;28:225-230. In Russian
32. Shnyukov YF, Netrebskaya EY. Deep geological structure of mud volcanoes in the Black Sea. *Geologiya i poleznyye iskopayemyye Mirovogo okeana = Geology and Minerals of the World Ocean*. 2014;2(36):66-79. In Russian
33. Zhang H, Yin RS, Feng XB, Sommar J, Anderson CWN, Sapkota A, Fu X, Larssen T. Atmospheric mercury inputs in montane soils increase with elevation: Evidence from mercury isotope signatures. *Scientific Reports*. 2013;3(3322):1-8. doi: 10.1038/srep03322
34. Shao JJ, Liu CB, Zhang QH, Fu JJ, Yang RQ, Shi JB, Cai Y, Jiang GB. Characterization and speciation of mercury in mosses and lichens from the high-altitude Tibetan Plateau. *Environmental Geochemistry and Health*. 2017;39(3):475-482. doi: 10.1007/s10653-016-9828-y
35. Mezhibor AM, Bolshunova TS, Rikhvanov LP. Geochemical features of sphagnum mosses and epiphytic lichens in oil and gas exploitation areas (the case of Western Siberia, Russia). *Environmental Earth Sciences*. 2016;75(18):1260. doi: 10.1007/s12665-016-6062-y
36. Tarkhanov SN. Influence of aerotechnogenic pollution on the tree trunks coverage by epiphytic lichens in the forest plantations of the Northern Dvina basin and the White SeaKuloi plateau. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*. 2016;1(349):37-47. doi: 10.17238/issn0536-1036.2016.1.37 In Russian, English Summary

37. Bozkurt Z. Determination of airborne trace elements in an urban area using lichens as biomonitor. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2017;189(11):573. doi: 10.1007/s10661-017-6275-x
38. Klapstein SJ, Walker AK, Saunders CH, Cameron RP, Murimboh JD, O'Driscoll NJ. Spatial distribution of mercury and other potentially toxic elements using epiphytic lichens in Nova Scotia. *Chemosphere*. 2020;241:e125064. doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.125064
39. Weiss-Penzias PS, Bank MS, Clifford DL, Torregrosa A, Zheng B, Lin W, Wilmers CC. Marine fog inputs appear to increase methylmercury bioaccumulation in a coastal terrestrial food web. *Scientific Reports*. 2019;9:e17611. doi: 10.1038/s41598-019-54056-7
40. Ndlovu NB, Frontasyeva MV, Newman RT, Maleka PP. Active biomonitoring of atmospheric pollution in the Western Cape (South Africa) using INAA and ICP-MS. *J Radioanalytical and Nuclear*. 2019;322:1549-1559. doi: 10.1007/s10967-019-06823-z

Received 25 July 2019; Revised 09 April 2020;
Accepted 30 April 2020; Published 19 June 2020.

Author info:
Bogdanova Anna M, Junior Researcher, Department of Environmental Health Monitoring with Risk Assessment, Central Scientific Research Laboratory, Medical Academy Named after S.I. Georgievsky, V.I. Vernadsky Crimean Federal University, 4 Academic Vernadsky Pr., Simferopol 295007, Russian Federation.
ORCID iD: https://orcid.org/0000-0002-3041-6328
E-mail: annuta2607@yandex.ru
Evstafeva Elena V, Dr. Sci. (Biol.), Professor, Head of the Normal Physiology Department, Medical Academy Named after S.I. Georgievsky, V.I. Vernadsky Crimean Federal University, 4 Academic Vernadsky Pr., Simferopol 295007, Russian Federation.
ORCID iD: http://orcid.org/0000-0002-8331-4149
E-mail: e.evstafeva@mail.ru
Baranovskaya Natalia V, Dr. Sci. (Biol.), Division for Geology, School of Earth Sciences & Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Pr., Tomsk 634050, Russian Federation.
E-mail: nata@tpu.ru
Lyapina Elena E, Cand. Sci. (Geol.-Min.), Researcher, Laboratory of Physics of Climatic Systems, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 10/3 Academichesky Pr, Tomsk 634055, Russian Federation.
E-mail: eeldv@mail.ru
Tymchenko Svetlana L, Cand. Sci. (Med.), Assoc. Professor, Normal Physiology Department, Medical Academy Named after S.I. Georgievsky, V.I. Vernadsky Crimean Federal University, 4 Academic Vernadsky Pr., Simferopol 295007, Russian Federation.
ORCID iD: https://orcid.org/0000-0003-3298-6743
E-mail: rybqa@yahoo.com
Bolshunova Tatiana S, Cand. Sci. (Geol.-Min.), Engineer, Department of Environmental Regulation, Tomsk Oil and Gas Research and Design Institute, 72 Mira Pr., Tomsk 634027, Russian Federation.
E-mail: BolshunovaTS@gmail.com