

УДК 502.4 (911.9)

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ПРИЗЕМНОГО АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА В ЮГО-ЗАПАДНОМ КРЫМУ ПО ДАННЫМ ЛИХЕНОИНДИКАЦИИ

Каширина Екатерина Сергеевна^{1,2},
e_katerina.05@mail.ru

Медведков Алексей Анатольевич³,
a-medvedkov@bk.ru

Новиков Антон Алексеевич^{1,4},
a_novik@bk.ru

¹ Филиал Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова в г. Севастополе, Россия, 299001, г. Севастополь, ул. Героев Севастополя, 7.

² Севастопольский государственный университет, Россия, 299001, г. Севастополь, наб. Корнилова, 1.

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Россия, 199991, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, 1.

⁴ Институт природно-технических систем, Россия, 299011, г. Севастополь, ул. Ленина, 28.

Актуальность. Лихеноиндикация широко применяется для оценки качества атмосферного воздуха. Для юго-западного Крыма оценка состояния атмосферного воздуха по данным лихеноиндикации проводится впервые.

Цель: проведение оценки качества атмосферного воздуха в юго-западном Крыму по данным лихеноиндикации.

Объекты: эпифитные лишайники, эверния сливовая (*Evernia prunastri*), рамалина мучнистая (*Ramalina farinacea*), фисция (*Physcia* Sp.), пармелия бороздчатая (*Parmelia sulcata*).

Методы. Для анализа в период с февраля по май 2018 г. отобрано 17 проб эпифитных кустистых лишайников в разных природно-ландшафтных условиях (предгорье, межгорные котловины, вершины гор) с учетом разного уровня антропогенной нагрузки. В пробах определено содержание семи элементов: Cu, Zn, Pb, Cd, Ni, Cr, Sr. Элементный состав лишайников определен методом атомно-абсорбционного спектрометрии.

Результаты. Выявлено, что к наиболее активно накапливаемым элементам в лишайниках юго-западного Крыма относятся Zn, Sr и Pb; менее активно накапливаются Cu, Cd, Ni и Cr. Анализ показал, что антропогенные источники загрязнения в большей степени индуцируются по содержанию в лишайниках Cu, Zn, Pb. Высокое содержание Sr индицирует аэрозольное влияние моря (как современной морской акватории через поступающие атмосферные осадки, так и палеоморского бассейна, что обусловлено денудацией морских отложений, микрочастицы которых присутствуют в атмосферном воздухе). Отмеченный относительно высокий уровень загрязнения атмосферного воздуха в г. Инкерман (входит в состав Большого Севастополя) обусловлен выбросами Севастопольской теплоэлектроцентрали (ТЭЦ), возле автозаправочной станции на трассе «Ялта–Севастополь» – выбросами автотранспорта, в сельских населенных пунктах Байдарской долины – выбросами от сжигания угля при печном отоплении. Выявлено, что данные по содержанию тяжелых металлов в лишайниках, отобранных в Чернореченском каньоне, могут считаться эталонными для определения фоновых параметров и уровня загрязнения приземной атмосферы в других районах юго-западного Крыма. Лишайники могут быть использованы для дополнения системы мониторинга состояния приземного воздуха в юго-западном Крыму.

Ключевые слова:

Лихеноиндикация, загрязнение воздуха, тяжелые металлы, экологический мониторинг, Крым, Севастополь.

Введение

Загрязнение атмосферного воздуха является одной из ключевых экологических проблем, которая типична для урбанизированных территорий с высокой степенью техногенно-преобразованных ландшафтов. По данным государственного мониторинга в 46 российских городах уровень загрязнения атмосферного воздуха в 2018 г. оценивался как высокий и очень высокий (индекс загрязнения атмосферы (ИЗА) более 7). В этих городах проживают 13,4 млн человек, что составляет 12 % городского населения России. К городам с максимально высоким ИЗА относятся 15 населенных пунктов, среди которых крупные промышленные центры: Братск, Красноярск, Норильск, Чита, Новокузнецк и др. [1].

Крымский полуостров относится к староосвоенным густонаселенным районам нашей страны со средней плотностью населения более 100 чел./км². В 2019 г. суммарные выбросы загрязняющих веществ от стационарных источников в атмосферный воздух на территории крупнейшего по численности населения города полуострова Севастополя составили 5,511 тыс. т, 98 % из которых приходится на газообразные и жидкие вещества. Ведущая роль в формировании выбросов принадлежит углеводородам (без учета летучих органических веществ), оксиду углерода и оксиду азота. В воздухе г. Севастополя за 2019 г. максимально-разовые концентрации достигали по взвешенным веществам 4,2 ПДК (февраль); по диок-

сиду серы 0,13 ПДК (июль); оксиду углерода 0,9 ПДК (июль); диоксиду азота 0,23 ПДК (июль); по формальдегиду 0,3 ПДК (июнь, июль) [2]. Как видно, регион характеризуется относительно низким уровнем загрязнения атмосферного воздуха.

Атмосферный воздух представляет собой один из самых мобильных компонентов окружающей среды, что затрудняет оценку уровня его загрязнения. Однако наиболее широкое распространение получили методы индикации с использованием биологических объектов – растений, мхов, лишайников. Лишайники чувствительны к загрязнению атмосферного воздуха и способны накапливать загрязняющие вещества в талломе [3, 4]. Применение методов биоиндикации с использованием лишайников позволяет оценить уровень накопленного загрязнения, что демонстрирует его эффективность по сравнению с другими подходами, особенно в условиях длительного, но неинтенсивного загрязнения [5]. Также изучение элементного состава лишайников даёт возможность проанализировать интенсивность выпадения аэрозольных частиц из приземного воздуха за несколько лет [6].

Методы лишеноиндикации для определения качества атмосферного воздуха получили широкое распространение как в России, так и других странах мира [7].

Наличие эпифитных кустистых и листовых лишайников, их количественные и качественные характеристики являются индикаторами качества атмосферного воздуха [8, 9]. Видовая структура сообществ лишайников отражает распространение наиболее и наименее чувствительных к тому или иному загрязняющему веществу видов. Например, для г. Элиста определено, что наиболее чувствительными к загрязнению являются калоплака зеленеватая (*Caloplaca chlorine*), пармелия бороздчатая (*Parmelia sulcata*), ксантория обманчивая (*Xanthoria fallax*) [10]. Для лесных экосистем степной зоны Ростовской области лучше адаптированы к загрязненным районам феофисция округлая (*Pheophyscia orbicularis*) и фисция щетинистая (*Physcia hispida*), которые используются для индикации условий среды [11].

Общее видовое разнообразие эпифитных лишайников рассматривается как индикационный признак антропогенного воздействия: при увеличении антропогенной нагрузки видовое разнообразие лишайников снижается. Для оценки также используются такие показатели, как встречаемость, проективное покрытие, размер таллома [12, 13]. На примере городов Краснодарского края показано, что видовое разнообразие лишенобиоты снижается по градиенту антропогенной нагрузки: от 89 видов из 13 семейств в г. Кропоткин, 84 видов из 10 семейств на территории транспортного узла – г. Усть-Лабинск; до 51 вида из 12 семейств – в промышленном г. Тимашевске [14]. На примерах г. Кемерово и г. Новосибирска при антропогенных нагрузках показано сокращение видового разнообразия лишенобиоты и общего проективного покрытия отдельных видов лишайников. При сохранении видового разнообразия лишенобиоты в городских парках г. Кемерово на 70–90 % сокращается их общее проективное покрытие и встречаемость [15, 16].

Элементный анализ талломов позволяет количественно оценить загрязнение атмосферного воздуха различными поллютантами. Подобные оценки выполнены для многих городов России (Краснодара, Кемерово, Усть-Лабинска, Казани и др.) [17, 18].

Для урбоэкосистемы г. Краснодара показано снижение содержания тяжёлых металлов (Cu, Pb, Cd, Zn) по градиенту городской застройки в центральной, периферийной, парковой, пригородной и фоновой зонах. Необходимо отметить, что фиксируется снижение содержания Cu в парковой зоне до уровня ниже, чем на фоновых участках [19]. Схожая картина убывания содержания тяжёлых металлов от центра города к периферии и фоновым участкам наблюдается в пределах других урбанизированных территорий России (Саратова [20], Уфы [21]) и стран мира (Литвы [22], Польши [23, 24], Новой Зеландии [25], Индии [26, 27], Чили [28], Турции [29]) и др.

В промышленных зонах в лишайниках увеличивается содержание тяжелых металлов. Например, в районе угледобывающего производства «Каражыра» (Казахстан) средняя концентрация Zn в лишайнике составляла 80,0 мг/кг, что в 2,0 раза превышает фоновый показатель; средняя концентрация Cu – 37,8 мг/кг, что выше фона в 3,0 раза; Pb – 2,9 мг/кг, что соответствует 2,8 фоновым уровням [30]. В районах деятельности нефтедобывающего комплекса Томской области в лишайниках выявляются повышенные концентрации, относительно фоновых районов, таких элементов, как Sc, Fe, Cr, Zn, As, Br, Rb, Ba, Au, тогда как в зоне влияния Томск-Северской промышленной агломерации рассматриваемые биоиндикаторы характеризуется повышенным накоплением Ca, Sr, Sb, Th, U и лантаноидов [31]. К локальным источникам тяжелых металлов прибавляются принесенные атмосферой из других районов. На примере содержания Pb в лишайниках, собранных в канадских нефтеносных песках Атабаски (Альберта), показан вклад в загрязнение региональных (46 %), местных (32 %) и глобальных (22 %) источников [32].

Лишеноиндикация также используется для определения фоновых параметров состояния атмосферного воздуха. Для целей фонового мониторинга анализируется содержание элементного состава тяжёлых металлов в лишайниках, отобранных на особо охраняемых природных территориях (ООПТ) и отдаленных от источников загрязнения территориях.

Для ООПТ г. Твери анализируется элементный состав тяжелых металлов. Так, во всех пробах, отобранных на ООПТ г. Твери, присутствуют Al, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn, единично отмечено наличие Co, Mo, Sb [33].

Для Крымского полуострова фоновые значения содержания тяжелых металлов в лишайниках приведены для следующих ООПТ: заповедника «Кара-Даг» и заказника «Аю-Даг». Приводятся данные о содержании 25 элементов в лишайниках трех видов: кладония оленевидная (*Cladonia rangiformis*), кладония свернутая (*Cladonia convoluta*) и эверния сливовая (*Evernia prunastri*) [34]. Для разных районов Республики Крым определено содержание ртути в эпифитных лишайниках [35].

Для юго-западного Крыма оценка состояния атмосферного воздуха по данным лишеноиндикации проводится впервые.

Материалы и методы исследования

В период с февраля по май 2018 г. отобрано 17 проб эпифитных кустистых и листовых лишайников в юго-

западной части Крымского полуострова (рис. 2). Пробоотбор осуществлялся в сообществах, сложенных, преимущественно, следующими видами лишайников: эверния сливовая (*Evernia prunastri*), рамалина мучнистая (*Ramalina farinacea*), фиция (*Physcia* Sp.), пармелия бороздчатая (*Parmelia sulcata*) (рис. 1).



Рис. 1. Анализируемые виды лишайников: а) эверния сливовая (*Evernia prunastri*); б) рамалина мучнистая (*Ramalina farinacea*); в) фиция *Physcia* Sp.; д) пармелия бороздчатая (*Parmelia sulcata*) (фото Е.С. Кашириной)

Fig. 1. Analyzed lichen species: a) *Evernia prunastri*; b) *Ramalina farinacea*; c) *Physcia* Sp.; d) *Parmelia sulcata* (photo by E.S. Kashirina)

Все пробы смешанные, но со значительным преобладанием эвернии сливовой (*Evernia prunastri*). Эпифитные лишайники отобраны на следующих видах деревьев: можжевельник высокий (*Juniperus excelsa*), граб восточный (*Carpinus orientalis*), бук европейский (*Fagus sylvatica*), ясень высокий (*Fraxinus excelsior*), а также кустарников терна (*Prunus spinosa*) и др.

Пробы отбирались с учетом природно-ландшафтной структуры и мозаики современного природопользования, особенностей расположения источников загрязнения: вдоль автотрасс, в зоне аэротехногенного воздействия промышленных предприятий, в сельских населенных пунктах и на удаленных от источников загрязнения площадках (рис. 2). В данной статье рассмотрены пробы, отобранные: а) в предгорной зоне разнотравных степей, шибляковых зарослей, лесостепи и дубовых лесов и б) в зоне широколиственных и сосновых лесов северного макро-

склона гор (согласно ландшафтной схеме Е.А. Позаченюк [36]).

Пробы лишайников отобраны в районе Внутренней гряды Крымских гор, в западной части Южного берега Крыма и на вершине горных отрогов Ай-Петринской яйлы (рис. 2). Относительно административных границ большая часть проб (14 шт.) отбирались в г. Севастополе, остальные (3 шт.) – на территории Республики Крым.

Пробы №№ 1–5 отобраны в западной части Чернореченского каньона на участках можжевельниковых редколесий. Точка № 5 расположена на дне каньона в полидоминантном пойменном лесу. Пробные площади удалены от источников загрязнения, входят в зону строгой охраны ландшафтного заказника «Байдарский». Пробы отобраны с ветвей граба восточного (грабинника) (*Carpinus orientalis*), сосны крымской (Палласа) (*Pinus nigra* subsp. *pallasiana*), можжевельника высокого (*Juniperus excelsa*).

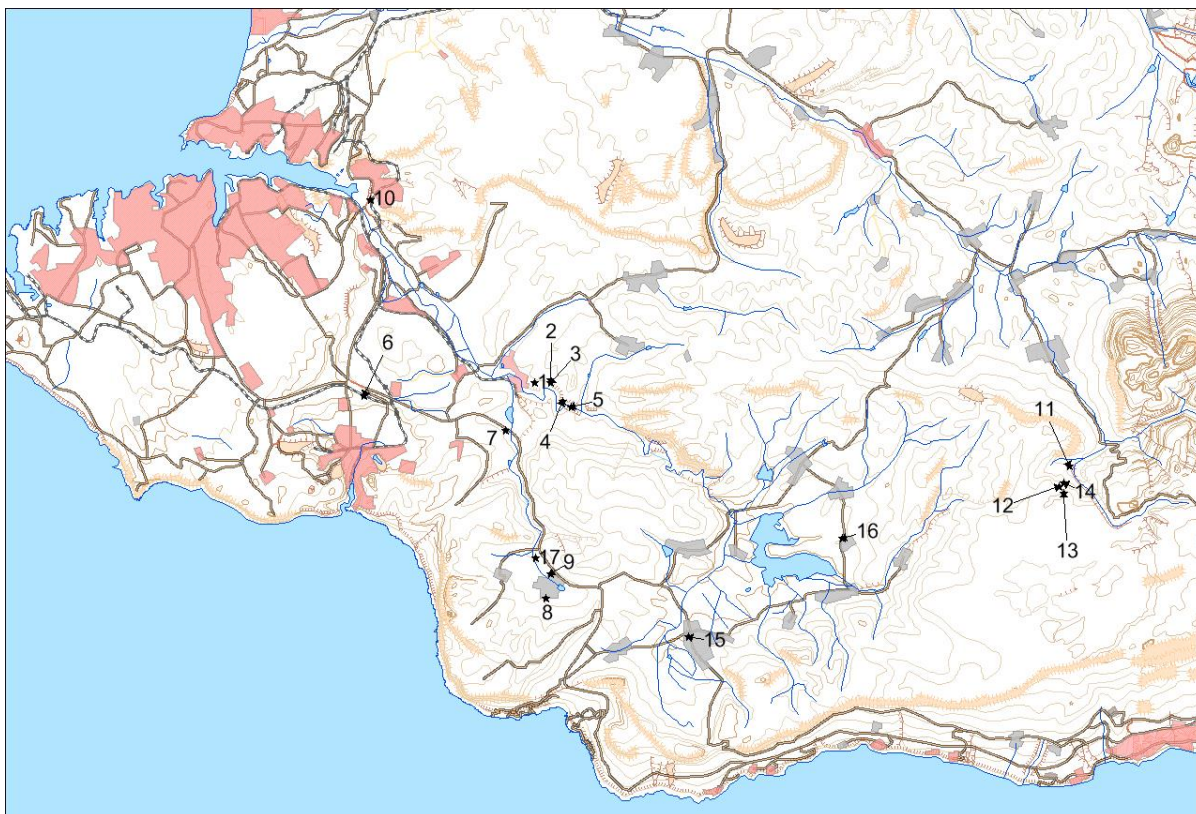


Рис. 2. Схема расположения точек отбора проб лишайников в юго-западном Крыму
Fig. 2. Layout of sampling points for lichens in the southwestern Crimea

Проба № 6 отобрана возле АЗС «ТЭС», в 10–15 м от автомобильной трассы «Севастополь–Ялта». Эпифитные лишайники отобраны с деревьев посаженного вдоль дороги ясеня (*Fraxinus* Sp.) на высоте 0,5–2 м. Пробная площадь расположена на выровненном склоне Балаклавской долины с основным источником выбросов – автомобильным транспортом.

Проба № 7 отобрана в долине р. Сухая, в нижней части котловины в районе г. Гасфорта и Гасфортовского пруда (217 м над у.м.), возле автодороги «Севастополь–Ялта». Расстояние от дороги составило около 20 м. Необходимо отметить, что ближе к автотрассе в данном районе лишайников не обнаружено. Эпифитные лишайники были отобраны с кустарников терна (*Prunus spinosa*), деревьев дуба скального (*Quercus petraea*) и груши лохолистной (*Pyrus elaeagnifolia*) на высоте 0,5–1,5 м.

Пробы № 8 и 9 отобраны в Варнутской долине в районе с. Гончарное: № 8 – на южной окраине села, у реки, ближе к лесным массивам, № 9 – возле автотрассы «Севастополь–Ялта», в районе поворота на немецкое кладбище, на расстоянии 5 м от дороги. Все эпифитные лишайники отобраны с кустарников терна (*Prunus spinosa*). В районе сельской застройки кустистых и листовых лишайников не обнаружено. Основные источники загрязнения в Варнутской долине – автотранспорт и выбросы от дымовых труб сельских домов, которые отапливаются углем и дровами.

Проба № 10 отобрана около г. Инкермана в роще фисташки туполистной (*Pistacia mutica*). Необходимо отметить очень малое количество лишайников в роще.

Инкерман – один из самых экологически «грязных» микрорайонов Севастополя: здесь расположена Севастопольская ТЭЦ, автотрасса «Севастополь–Симферополь», предприятия по производству строительных материалов, крупное винодельческое предприятие «Инкерманский завод марочных вин» и другие производства.

Пробы эпифитных лишайников №№ 11–14 отобраны в районе Большого каньона Крыма, расположенного на северном макросклоне Главной гряды Крымских гор. Проба № 11 отобрана в низовье, в районе русла р. Сары-Узень (572 м над у.м.), № 12 – на склоне северной экспозиции г. Сары-Кая на высоте около 700 м, № 13 – на вершине г. Аю-Тешик (1031 м) и № 14 – на склоне г. Аю-Тешик. Это отдаленный от источников выбросов район Крыма. Пробы отобраны с ветвей бука европейского (*Fagus sylvatica*) и осины (*Populus* Sp.).

Пробы №№ 15–17 отобраны в Байдарской и Варнутской долинах. Проба № 15 отобрана в с. Орлиное возле автотрассы «Гончарное–Ялта», № 16 и 17 – вдоль автотрассы между селами Россошанка и Новобобровское, где основной источник загрязнения – автотранспорт. Кроме того, дома в селах отапливаются углем и дровами.

Необходимо отметить, что большая часть проб отобрана в границах ООПТ – ландшафтного заказника регионального значения «Байдарский». В черте городской застройки г. Севастополя кустистые лишайники практически не встречаются, что, возможно, связано с засушливым климатом и исходными степными экосистемами.

В растениях юго-западного Крыма (лишайниках) определено содержание семи элементов: Cu, Zn, Pb, Cd, Ni, Cr, Sr. Пробы растений озолены «сухим» методом при температуре 400–450 °С в течение 5 часов (т. е. процент золы посчитали при озолении пробы до 450°, на полученную навеску и производился пересчет). Зола растворена в 1М HNO₃. Элементный анализ проводился на атомно-абсорбционном спектрометре фирмы «Hitachi» с эффектом Зимана в пламени ацетилен-воздух при температуре 1800 °С. Проведенные методом атомно-абсорбционной спектрометрии измерения массовых долей элементов осуществлялись в соответствии со всеми методическими рекомендациями руководящего документа РД 52.18.191-2018.

Наряду с указанными методическими подходами проведен статистический анализ влияния разных факторов (азрации, абсолютной влажности воздуха, положения на склоне, экспозиции, уклона и абсолютной высоты дневной поверхности) на особенности накопления загрязняющих веществ в лишайниках. Это произведено в форме покомпонентного расчета линейного коэффициента корреляции Пирсона, принимающего значения в диапазоне от –1 (обратная зависимость) до 1 (прямая зависимость), а значения коэффициента в диапазоне от –0,3 до 0,3 свидетельствуют о слабой взаимосвязи или о ее отсутствии.

Результаты исследования и их обсуждение

Территория юго-западного Крыма представлена ландшафтами разнотравных степей, шибляковых зарослей, лесостепи равнинных территорий Гераклейского полуострова и северной части Севастополя, а также биоценозами дубовых лесов Предгорья. Широколиственные и сосновые леса покрывают склоны Крымских гор; горные луга и горная лесостепь представлены на закарстованных плато Байдарской и Ай-Петринской яйл, а также в межгорных котловинах. Южный берег Крыма – это ландшафты субсубтропических лесов и редколесий [36].

Основными источниками загрязнения атмосферного воздуха рассматриваемой территории является автотранспорт, объекты тепловой энергетики, горнодобывающие и другие промышленные предприятия. Необходимо отметить, что промышленный комплекс юго-западного Крыма представлен предприятиями пищевой промышленности, электротехники, судоремонт, функционирование которых не сопровождается значительными выбросами загрязняющих веществ в приземную атмосферу. Среди стационарных источников наибольший вклад в загрязнение атмосферного воздуха оказывают такие предприятия, как Севастопольская теплоэлектроцентраль (ТЭЦ) (работает на природном газе, угле и мазуте) и Балаклавское рудоуправление им. А.М. Горького, добывающее флюсовый известняк. В целом в городе расположено 116 котельных [2]. Ежегодно объем выбросов Севастопольской ТЭЦ достигает 2 тыс. т. Максимальная интенсивность автотранспортного потока в городской черте Севастополя достигает 2 тыс. автомобилей в час (по данным учетов на остановке Памятник Матросу Кошке, ул. Пожарова, перекрестке 5-го км Бала-

клавского шоссе). Вне урбанизированных зон на прилегающих автотрассах интенсивность транспортного потока составляет около 500 автомобилей в час (20-й км шоссе «Севастополь–Ялта»), повышается до 1000 автомобилей в час в районе Инкермана и снижается до 150 автомобилей в час в горной сельской местности (с. Орлиное). Более того, в Байдарской и Варнутской долинах расположено более 2000 частных домов, которые долгое время отапливались донецким углем, отличающимся высоким содержанием углерода, водорода, азота, серы, тяжелых металлов (свинец, цинк, хром, мышьяк и др.). Особенно отчетливо сжигание угля маркируется по накоплению свинца в растениях-биоиндикаторах [6].

С другой стороны, приморское положение юго-западного Крыма и частая повторяемость ветров (94,8 % дней в году) способствуют рассеиванию загрязнения. Накоплению же загрязняющих веществ способствуют овражно-балочный рельеф Гераклейского плато и котловинные условия в горных районах.

Содержание элементов в лишайниках юго-западного Крыма показано в табл. 1.

Таблица 1. Содержание элементов в лишайниках юго-западного Крыма, мг/кг абс. сухого вещества

Table 1. Element content in lichens of the southwestern Crimea, mg/kg abs. dry matter

| № пробы Sample no. | Cu | Zn | Pb | Cd | Ni | Cr | Sr |
|-----------------------|------|------|------|-------|-------|-----|------|
| 1 | 1,5* | 20,8 | 2,7 | 0,08 | <0,08 | 1,2 | 10,8 |
| 2 | 1,7 | 25,7 | 4,9 | 0,10 | <0,08 | 1,2 | 15,2 |
| 3 | 1,8 | 18,4 | 4,9 | <0,04 | 1,6 | 1,2 | 4,7 |
| 4 | 1,4 | 16,9 | 2,4 | <0,04 | 0,9 | 1,0 | 3,9 |
| 5 | 2,7 | 27,8 | 7,1 | 0,12 | 1,0 | 2,1 | 3,2 |
| 6 | 4,9 | 56,0 | 7,3 | <0,04 | 1,6 | 2,1 | 4,3 |
| 7 | 1,8 | 19,7 | 3,1 | 0,04 | <0,08 | 0,6 | 11,3 |
| 8 | 1,5 | 15,4 | 2,0 | <0,04 | 0,6 | 0,7 | 6,7 |
| 9 | 1,9 | 26,6 | 3,6 | 0,05 | 0,5 | 0,4 | 7,8 |
| 10 | 11,7 | 43,5 | 23,0 | 0,20 | 1,8 | 2,1 | 17,2 |
| 11 | 1,3 | 32,5 | 5,9 | 0,31 | 0,3 | 0,3 | 10,8 |
| 12 | 2,0 | 32,4 | 5,2 | 0,32 | 1,0 | 0,5 | 8,8 |
| 13 | 2,1 | 24,8 | 4,2 | 0,15 | 0,7 | 0,5 | 7,0 |
| 14 | 2,7 | 23,2 | 3,4 | 0,12 | 0,5 | 0,5 | 9,0 |
| 15 | 4,4 | 41,0 | 7,3 | 0,22 | 1,1 | 0,6 | 7,2 |
| 16 | 3,1 | 34,0 | 6,2 | 0,22 | 1,6 | 1,0 | 13,1 |
| 17 | 1,8 | 20,7 | 3,2 | 0,14 | 0,3 | 0,4 | 4,5 |

* Красным выделены три максимальных показателя для каждого элемента, зеленым – три минимальных/Three maximum indicators for each element are highlighted in red, three minimum indicators – in green.

Для каждого элемента рассмотрены концентрации на разных пробных площадях (рис. 3, 4).

Как видно, наиболее высокая концентрация Cu отмечена в пробах, отобранных в г. Инкерман, – более 11 мг/кг, что в 2 раза выше следующего показателя для АЗС «ТЭС». На повышенное содержание Cu возле АЗС «ТЭС» могут оказывать влияние прилегающие виноградники, которые обрабатываются медным купоросом. Также относительно высокие концентрации Cu отмечены в Байдарской долине, в с. Орлиное. Минимальные показатели содержания Cu зафиксированы в Чернореченском каньоне и в Боль-

шом каньоне Крыма, что обусловлено их отдаленным положением от основных источников загрязнения в регионе. В целом содержание Си не превышает дан-

ные по придорожным районам Лагонакского нагорья (Северный Кавказ), где показатель находится в диапазоне 3,4–10,5 мг/кг [37].

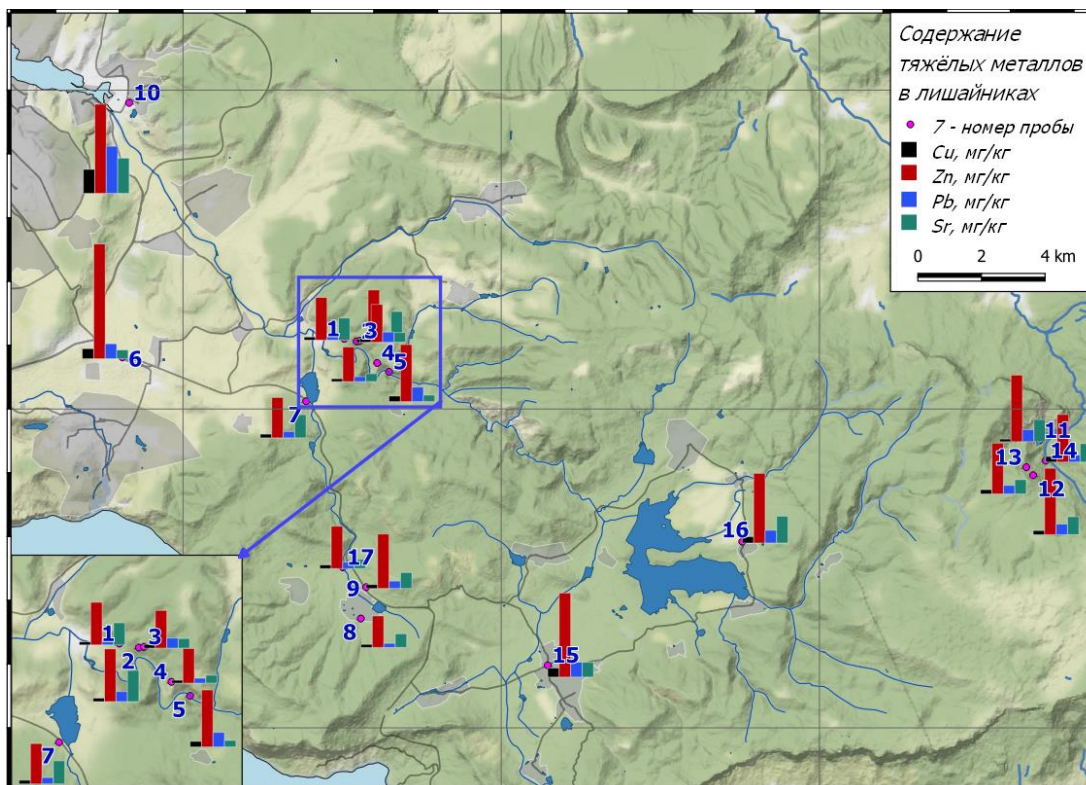


Рис. 3. Содержание тяжёлых металлов в лишайниках (макроэлементы)

Fig. 3. Content of heavy metals in lichens (macronutrients)

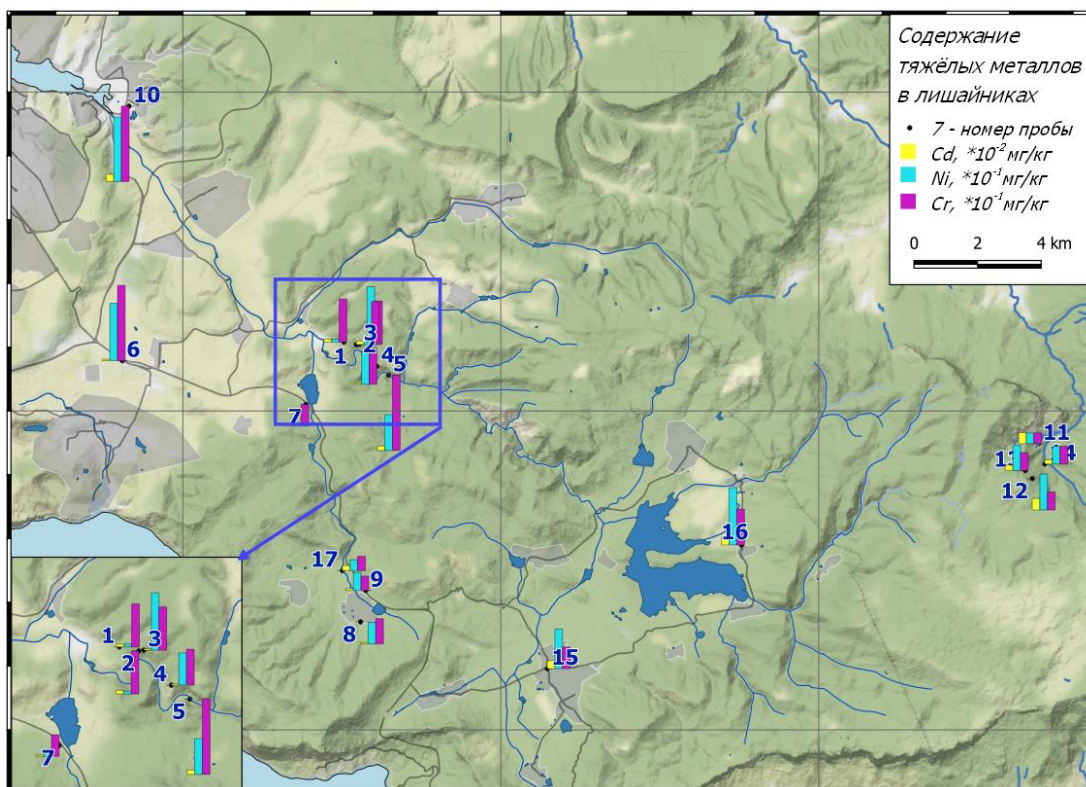


Рис. 4. Содержание тяжёлых металлов в лишайниках (микроэлементы)

Fig. 4. Content of heavy metals in lichens (trace elements)

Максимальная концентрация Zn отмечена в районе АЗС «ТЭС» на шоссе регионального значения «Севастополь–Ялта». Также относительно высокие концентрации Zn зафиксированы на площадках в г. Инкерман и в Байдарской долине, в с. Орлиное. Минимальные концентрации Zn отмечены возле с. Гончарное в Варнутской долине.

Содержание Pb отчетливо свидетельствует о его повышенной концентрации в промышленном районе – г. Инкерман. В г. Инкерман отмечена наиболее высокая концентрация Pb, в 3 раза превышающая другие пробы. На остальных пробных площадках содержание Pb находится в диапазоне 2,4–7,3 мг/кг абс. сухого вещества. Необходимо отметить, что не все пробы лишайников, отобранные у автодорог, характеризуются сравнительно высоким содержанием Pb. Для сравнения отметим, что для тех же видов лишайников Лагонакского плато (Кавказ) содержание Pb варьирует от 4,6 до 16,6 мг/кг абс. сухого вещества, причем в придорожной полосе содержание Pb также не всегда показывает пик [37].

Содержание Cd в лишайниках находится в диапазоне от <0,04 до 0,32 мг/кг абс. сухого вещества. Относительно высокие концентрации Cd отмечены в пробах, отобранных в районе Большого каньона Крыма, а также в г. Инкерман и с. Орлиное. Относительно высокое содержание Cd в пробах внутреннего горного района Крыма может быть связано с природными геохимическими аномалиями или трансграничным переносом загрязняющих веществ. Повышенное содержание данного элемента в г. Инкерман и с. Орлиное позволяет судить о его антропогенной природе (аэротехногенном привносе). По данным фонового мониторинга Южного берега Крыма [34] содержание Cd в лишайниках находится в диапазоне 0,09–0,31 мг/кг абс. сухого вещества, т. е. полученные результаты по юго-западному Крыму не превышают фоновых значений. Данные по Лагонакскому нагорью Кавказа показывают более высокое содержание Cd – не менее 0,4 мг/кг абс. сухого вещества [37]. Для склонов Маркхотского хребта максимальное содержание Cd в лишайниках эверния сливовая (*Evernia prunastri*) достигает 0,3 мг/кг абс. сухого вещества [38].

Содержание никеля в большей степени отражает антропогенное влияние с максимумом в промышлен-

ном районе – г. Инкерман, и возле АЗС «ТЭС» на автотрассе. Вместе с тем отмечается относительно высокая концентрация Ni в Чернореченском каньоне и в с. Орлиное Байдарской долины. На трех пробных площадках концентрация Ni ниже чувствительности прибора.

Содержание Sr в лишайниках варьирует от 0,4 до 2,1 мг/кг абс. сухого вещества. Содержание Sr в лишайниках не отражает расположение антропогенных источников загрязнения. Так, относительно высокое содержание Sr отмечено в промышленном районе г. Инкерман и возле АЗС «ТЭС», и одновременно в Чернореченском каньоне, в зоне строгой охраны ООПТ.

Содержание Sr в лишайниках варьируется от 3,2 до 17,2 мг/кг абс. сухого вещества. Содержание Sr не позволяет дифференцировать его источники на естественные и антропогенные. Максимальное содержание стронция среди отобранных проб отмечено в г. Инкерман. Однако второй по величине показатель отмечен в Чернореченском каньоне – районе, отдаленном от промышленных источников загрязнения.

В разрезе отдельных пробных площадей можно отметить абсолютное преобладание Zn во всех пробах. Zn отличается высокой биофильностью, особенно по отношению к лишайникам. Необходимо отметить, что Sr также обладает высокой биофильностью. Применительно к литолого-генетическим особенностям территории Крыма отметим, что карбонатные породы – один из главных резервуаров Sr, что объясняет высокое содержание элементов в большинстве проб.

В целом высокие концентрации тяжелых металлов отмечены в пробах лишайников, отобранных в промышленном районе г. Инкерман, возле АЗС «ТЭС» на трассе «Севастополь–Ялта» и в с. Орлиное в Байдарской межгорной котловине. Минимальный уровень содержания тяжелых металлов отмечен в пробах лишайников, отобранных в Чернореченском каньоне и в Варнутской долине возле с. Гончарное.

Факторный анализ влияния аэрации, положения на склоне, абсолютной влажности воздуха, экспозиции склона, уклона и высоты местности на содержание тяжелых металлов в лишайниках выявил слабую корреляцию по большинству параметров (табл. 2).

Таблица 2. Влияние некоторых абиотических факторов на содержание тяжелых металлов в лишайниках

Table 2. Influence of some abiotic factors on the content of heavy metals in lichens

| Фактор/Factor | Cu | Zn | Pb | Cd | Ni | Cr | Sr |
|---------------------------------------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Аэрация/Aeration | -0,0003* | 0,2606 | -0,0934 | 0,3601 | 0,3158 | -0,1910 | -0,4348 |
| Положение на склоне Slope position | 0,0459 | 0,4381 | -0,0068 | 0,3620 | 0,4418 | 0,0816 | -0,3731 |
| Влажность /Humidity | 0,1994 | 0,0434 | 0,1476 | -0,0989 | 0,0874 | -0,0828 | 0,1164 |
| Экспозиция/Exposition | 0,1719 | -0,0549 | 0,2475 | 0,0962 | -0,1581 | 0,0232 | 0,2722 |
| Уклон/Slope | -0,3307 | -0,3074 | -0,2190 | 0,1236 | -0,0961 | -0,1326 | 0,0351 |
| Высота/Height | -0,2301 | 0,0640 | -0,1973 | 0,6799 | -0,0254 | -0,6023 | -0,1165 |

*Оттенками красного выделена положительная связь, синего – обратная, яркие цвета – значения выше, бледные – ниже.

*Shades of red indicate a positive relationship, blue – the reverse, bright colors – values higher, pale – lower.

Хорошо заметно, что морфометрические особенности дневной поверхности и данные о количестве влаги, содержащейся в одном кубическом метре воздуха, слабо коррелируют с концентрацией тяжелых металлов в лишайниках, поскольку значительная часть коэффициентов имеет значения по модулю меньше 0,3 (связь слабая). Выявлено, что наиболее

значимые факторы – абсолютная высота, положение на склоне и интенсивность обмена/перемешивания воздуха (аэрация), оказывают влияние на концентрацию Zn, Cd, Cr и Ni. При этом слабая аэрация вблизи антропогенных источников выбросов приводит к повышенной концентрации тяжелых металлов в лишайниках (рис. 5).

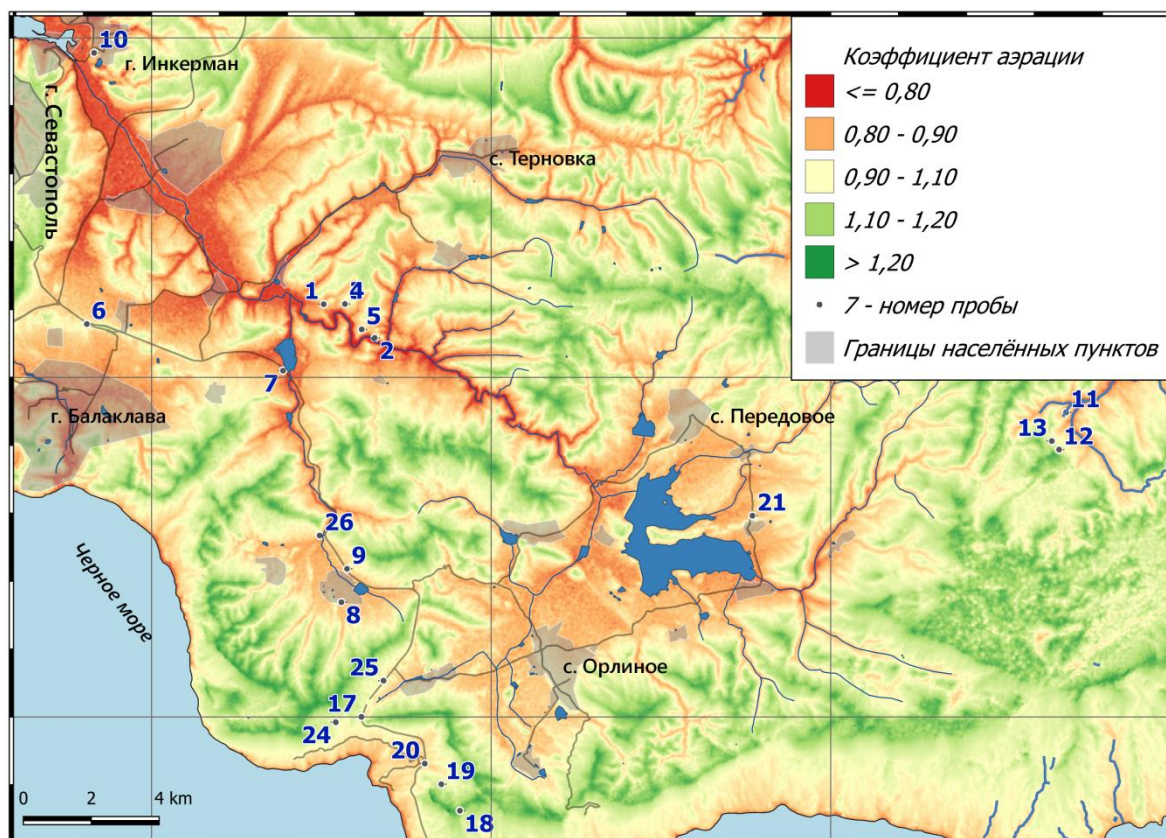


Рис. 5. Расположение точек отбора относительно аэрационных условий территории
Fig. 5. Location of sampling points in different aeration conditions of the territory

Индекс аэрации позволяет оценивать интенсивность рассеивания загрязняющих веществ. Значения индекса ниже 1 указывают на области с пониженными скоростями ветра, тогда как значения выше 1 указывают на зоны, где ветровой поток характеризуется его наибольшими скоростями. Для расчета индекса использовались следующие данные: цифровая модель рельефа, карта скоростей и направлений ветра с его средненными значениями, и учитывалось расстояние, на котором просчитывается эффект затухания ветра.

На рис. 5 отчетливо заметно, что точка 10 с максимальными концентрациями оцениваемых элементов расположена ближе всего к Севастопольской бухте и урбанизированной части г. Инкерман. Для этого же района характерна слабая аэрация, что приводит к относительно высокой концентрации тяжелых металлов в лишайниках.

Заклучение

Элементный анализ содержания тяжелых металлов в лишайниках юго-западного Крыма позволил сделать следующие выводы:

1. К наиболее активно накапливаемым металлам в лишайниках юго-западного Крыма можно отнести Zn, Sr и Pb. Менее активно накапливаются Cu, Cd, Ni, Cr.
2. Проведенный анализ показал, что антропогенные источники загрязнения в большей степени фиксируются по содержанию в лишайниках Cu, Zn, Pb.
3. Отмеченный относительно высокий уровень загрязнения атмосферного воздуха в г. Инкерман обусловлен выбросами Севастопольской ТЭЦ, возле АЗС на трассе «Ялта–Севастополь» – выбросами автотранспорта, в сельских населенных пунктах Байдарский долины – выбросами от сжигания угля при печном отоплении.
4. Данные по содержанию тяжелых металлов в лишайниках, отобранных в Чернореченском каньоне, могут считаться эталонными для определения фоновых параметров и уровня загрязнения атмосферы в других районах юго-западного Крыма.
5. Высокое содержание Sr обусловлено литологическими особенностями территории (широким развитием морских отложений) и влиянием акватории Чёрного моря.

Таким образом, эпифитные кустистые и листовые лишайники могут быть использованы для дополнения существующей системы мониторинга состояния атмосферного воздуха в юго-западном Крыму. Полученные результаты представляют основу для создания специализированной базы данных, необходимой для прогнозирования атмосферно-

экологической ситуации в меняющихся условиях внешней среды (изменение циркуляционных процессов, появление новых источников экологической опасности и т. д.).

Работа выполнена при поддержке проекта РНФ № 20-47-01001.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2018 году». URL: http://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady/ (дата обращения: 18.03.2020).
2. Ежегодный доклад о состоянии и об охране окружающей среды города Севастополя за 2019 год. URL: <https://spn.sev.gov.ru/ekologicheskoe-sostoyanie-sevastopolya/doklad-o-sostoyanii-i-ob-okhrane-okruzhayushchey-sredy-goroda-sevastopolya/> (дата обращения: 26.06.2022).
3. Rola K. Insight into the pattern of heavy-metal accumulation in lichen thalli // *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*. – 2020. – V. 61. – 126512 URL: <https://doi.org/10.1016/j.jtjtemb.2020.126512> (дата обращения 15.05.2022).
4. Heavy-metal tolerance of photobiont in pioneer lichens inhabiting heavily polluted sites / K. Rola, E. Latkowska, B. Myśliwa-Kurczel, P. Osyczka // *Science of The Total Environment*. – 2019. – V. 679. – P. 260–269.
5. Comparison of the heavy metal bioaccumulation capacity of an epiphytic moss and an epiphytic lichen / A. Basile, S. Sorbo, G. Aprile, B. Conte, R. Castaldo Cobianchi // *Environmental Pollution*. – 2008. – V. 151. – Iss. 2. – P. 401–407. URL: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.07.004> (дата обращения 15.05.2022).
6. Особенности накопления тяжелых металлов кустистыми эпифитными лишайниками в республиках Алтай и Хакасия / В.П. Шевченко, Д.П. Стародымова, А.А. Афанасьева, А.Ю. Бычков, Я.В. Бычкова, В.В. Конева, А.С. Саввичев // *Фундаментальные исследования*. – 2014. – № 12. – С. 2373–2377.
7. Spatial distribution of mercury and other potentially toxic elements using epiphytic lichens in Nova Scotia / S.J. Klapstein, A.K. Walker, C.H. Saunders, R.P. Cameron, J.D. Murimboh, N.J. O'Driscoll // *Chemosphere*. – 2020. – V. 241. – 125064 URL: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125064> (дата обращения 15.05.2022).
8. Зеленская Т.Г., Еременко Р.С., Степаненко Е.Е. Изучение состояния атмосферного воздуха заказника «Русский лес» г. Ставрополя методом лишайноиндикации // *Вестник Красноярского государственного аграрного университета*. – 2012. – № 9. – С. 94–97.
9. Biodiversity of epiphytic lichens and heavy metal contents of *Flavoparmelia caperata* thalli as indicators of temporal variations of air pollution in the town of Montecatini Terme (central Italy) / S. Loppi, L. Frati, L. Paoli, V. Bigagli, C. Rossetti, C. Bruscoli, A. Corsini // *Science of The Total Environment*. – 2004. – V. 326. – Iss. 1–3. – P. 113–122. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2003.12.003> (дата обращения 15.05.2022).
10. Стаселько Е.А., Сангаджиев М.М., Берикова Б.В. Лишайники как индикаторы экологического зонирования урбанизированных территорий // *Геология, география и глобальная энергия*. – 2013. – № 3 (50). – С. 178–186.
11. Засоба В.В., Меденец Е.Ю. Видовое разнообразие эпифитных лишайников как индикационный признак антропогенного влияния на лесные экосистемы степной зоны // *Юг России: экология, развитие*. – 2008. – № 4. – С. 46–52.
12. Инсаров Г.Э., Мучник Е.Э., Инсарова И.Д. Эпифитные лишайники в условиях загрязнения атмосферы Москвы: методология долговременного мониторинга // *Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем*. – 2010. – Т. 23. – С. 276–295.
13. Edge and land-use effects on epiphytic lichen diversity in the forest-steppe ecotone of the Mongolian Altai / M. Hauck, S. Javkhan, D. Lkhagvadorj, B. Bayartogtokh, C. Dulamsuren, C. Leuschner // *Flora – Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*. – 2012. – V. 207. – Iss. 6. – P. 450–458. URL: <https://doi.org/10.1016/j.flora.2012.03.008> (дата обращения 15.05.2022).
14. Криворотов С.Б., Манилова О.Ю. К изучению лишайнобиоты некоторых урбозкосистем Северо-Западного Кавказа // *Грани познания*. – 2019. – № 6 (65). – С. 84–87.
15. Романова Е.В. Лишайники биоиндикаторы атмосферного загрязнения г. Кемерово // *Вестник Томского государственного университета. Биология*. – 2012. – № 4 (20). – С. 203–214.
16. Романова Е.В., Седельникова Н.В. Лишайники – биоиндикаторы атмосферного загрязнения Новосибирской городской агломерации. – Новосибирск: Гео, 2010. – 98 с.
17. Анищенко Л.Н., Сафранкова Е.А. Лихенофлора малых городов и поселков городского типа Брянской области: биоразнообразие и использование в биоиндикации // *Вестник Оренбургского государственного университета*. – 2013. – № 6 (155). – С. 28–32.
18. Тарханов С.Н. Состояние эпифитного лишайникового покрова в условиях загрязнения атмосферы Зимнебережно-Архангельского района // *Лесной вестник*. – 2002. – № 5. – С. 45–53.
19. Сионова Н.А., Криворотов С.Б. Использование эпифитных лишайников как биоиндикаторов загрязнения атмосферного воздуха урбозкосистемы г. Краснодара // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки*. – 2007. – № 1. – С. 83–85.
20. Ерофеева И.А. Анализ содержания тяжелых металлов в эпифитных лишайниках в условиях городской среды // *Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н.И. Вавилова*. – 2013. – № 3. – С. 20–23.
21. Анализ содержания тяжелых металлов и соединений серы в лишайниках *Parmelia sulcata* в условиях городской среды / Н.Н. Красногорская, Е.А. Клеттер, Р.Р. Сулейманова, С.Е. Журавлева // *Современные проблемы науки и образования*. – 2012. – № 2. – С. 338–347.
22. Similarities and differences in geochemical distribution patterns in epiphytic lichens and topsoils from kindergarten grounds in Vilnius / R. Taraškevičius, J. Motiejūnaitė, R. Zinkutė, A. Eigminienė, L. Gedminienė, Ž. Stankevičius // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2017. – V. 183. – Pt. B. – P. 152–165. URL: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.08.013> (дата обращения 15.05.2022).
23. Parzych A., Zdunczyk A., Astel A. Epiphytic lichens as bioindicators of air pollution by heavy metals in an urban area (northern Poland) // *Journal of Elementology*. – 2016. – V. 21. – № 3. – P. 781–795.
24. Zakrzewska M., Klimek B. Trace element concentrations in tree leaves and lichen collected along a metal pollution gradient near Olkusz (Southern Poland) // *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. – 2018. – V. 100. – P. 245–249. URL: <https://doi.org/10.1007/s00128-017-2219-y> (дата обращения 15.05.2022).
25. Kularatne K.I.A., de Freitas C.R. Epiphytic lichens as biomonitors of airborne heavy metal pollution // *Environmental and Experimental Botany*. – 2013. – V. 88. – P. 24–32.
26. Recent advances in lichenology: modern methods and approaches in biomonitoring and bioprospection / Eds. D.K. Upreti, P.K. Divakar, V. Shukla, R. Bajpai. – India, New Delhi: Springer, 2015. – P. 87–118.
27. Lichen as quantitative biomonitors of atmospheric heavy metals deposition in Central India / R. Bajpai, D.K. Upreti, S.K. Dwivedi, S. Nayaka // *Journal of Atmospheric Chemistry*. – 2009. – V. 63. – P. 235–246.
28. Changes in epiphytic lichen diversity are associated with air particulate matter levels: the case study of urban areas in Chile / Z. Varela, G. López-Sánchez, M. Yáñez, C. Pérea, J.A. Fernández,

- P. Matos, C. Branquinho, J.R. Aboal // *Ecological Indicators*. – 2018. – V. 91. – P. 307–314. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.04.023> (дата обращения 15.05.2022).
29. Koz B., Celik N., Cevik U. Biomonitoring of heavy metals by epiphytic lichen species in Black Sea region of Turkey // *Ecological Indicators*. – 2010. – V. 10. – Iss. 3. – P. 762–765. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2009.11.006> (дата обращения 15.05.2022).
30. Евлампиева Е.П., Панин М.С. Накопление цинка, меди и свинца лишайником в районе угледобывающего месторождения «Каражыра» // *Вестник томского государственного университета*. – 2008. – № 314. – С. 196–200.
31. Большунова Т.С., Рихванов Л.П., Барановская Н.В. Элементный состав лишайников как индикатор загрязнения атмосферы // *Экология и промышленность России*. – 2014. – № 11. – С. 26–31.
32. Graney J.R., Edgerton E.S., Landis M.S. Using Pb isotope ratios of particulate matter and epiphytic lichens from the Athabasca Oil Sands Region in Alberta, Canada to quantify local, regional, and global Pb source contributions // *Science of The Total Environment*. – 2019. – V. 654. – P. 1293–1304. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.047> (дата обращения 15.05.2022).
33. Кутикова А.О., Мейсунова А.Ф. Содержание металлов в лишайниках из особо охраняемых природных территорий города Твери // *Вестник Тверского государственного университета. Серия: химия*. – 2016. – № 1. – С. 152–158.
34. Фоновые уровни накопления тяжелых металлов, макро- и микроэлементов некоторыми видами лишайников на особо охраняемых природных территориях южного и юго-восточного побережья Крыма / Н.А. Голубкина, В.А. Лапченко, Е.В. Лапченко, Т.С. Науменко, Е.С. Крайнюк, Н.А. Багрикова // *Бюллетень Государственного Никитского ботанического сада*. – 2019. – № 130. – С. 26–35.
35. Содержание ртути в эпифитных лишайниках на территории Республики Крым / Е.В. Евстафьева, А.М. Богданова, Т.С. Большунова, Н.В., Барановская Н.А. Осипова // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2019. – Т. 330. – № 7. – С. 93–103.
36. Современные ландшафты Крыма и сопредельных акваторий: монография // науч. ред. Е.А. Позаченюк. – Симферополь: Бизнес-Информ, 2009. – 672 с.
37. Криворотов С.Б., Рагульская Е.А. Эпифитные лишайники как биоиндикаторы загрязнения тяжелыми металлами горных лесных фитоценозов Лагонакского нагорья (северо-западный Кавказ) // *Экология: рациональное природопользование и безопасность жизнедеятельности: Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции, с международным участием*. – Майкоп: Адыгейский государственный университет, 2017. – С. 41–43.
38. Криворотов С.Б., Микаелян Л.А., Рагульская Е.А. Лишайники как индикаторы состояния лесных экосистем южного склона Маркотхского хребта (северо-западный Кавказ) // *Бисосфера и человек: Материалы международной научной конференции*. – Майкоп: ООО «Электронные издательские технологии», 2019. – С. 67–69.

Поступила 27.06.2022 г.

Информация об авторах

Каширина Е.С., кандидат географических наук, старший преподаватель кафедры геоэкологии и природопользования Филиала Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова в г. Севастополе; доцент Института развития города Севастопольского государственного университета.

Медведков А.А., кандидат географических наук, доцент кафедры физической географии мира и геоэкологии географического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.

Новиков А.А., старший преподаватель кафедры геоэкологии и природопользования Филиала Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова в г. Севастополе; младший научный сотрудник Института природно-технических систем.

UDC 502.4 (911.9)

ASSESSMENT OF THE SURFACE ATMOSPHERIC AIR STATE IN THE SOUTHWESTERN CRIMEA ACCORDING TO LICHENOINIFICATION DATA

Ekaterina S. Kashirina^{1,2},
e_katerina.05@mail.ru

Aleksey A. Medvedkov³,
a-medvedkov@bk.ru

Anton A. Novikov^{1,4},
a_novik@bk.ru

¹ Branch of Lomonosov Moscow State University in the city of Sevastopol,
7, Heroes of Sevastopol street, Sevastopol, 299001, Russia.

² Institute of urban development, Sevastopol state University,
1, Kornilov embankment, Sevastopol, 299001, Russia.

³ Lomonosov Moscow State University,
1, Leninskie gory, Moscow, 199991, Russia.

⁴ Institute of Natural and Technical Systems,
28, Lenin street, Sevastopol, 299011, Russia.

Relevance. Lichenoindication is widely used to assess the quality of atmospheric air. For southwestern Crimea, the assessment of the state of atmospheric air based on lichenification data is carried out for the first time.

The aim of the research is to assess the quality of atmospheric air in southwestern Crimea according to lichen detection data.

The objects of the study are epiphytic lichens, *Evernia prunastri*, *Ramalina farinacea*, *Physcia*, *Parmelia sulcata*.

Methods. For analysis in the period from February to May 2018, 17 samples of epiphytic fruticose lichens were taken in different landscape conditions (foothills, intermontane basins, mountain tops), taking into account different levels of anthropogenic load. The samples contain seven elements: Cu, Zn, Pb, Cd, Ni, Cr, Sr. The elemental composition of lichens was determined using an atomic absorption spectrometer.

Results. It was revealed that the most actively accumulated metals in the lichens of southwestern Crimea are Zn, Sr and Pb; less active accumulation of Cu, Cd, Ni and Cr. The analysis showed that anthropogenic sources of pollution are to a greater extent induced by the content of Cu, Zn, Pb in lichens. The high Sr content is due to its ability to replace calcium in potassium-containing minerals in carbonate rocks, which are widespread in the region. The noted relatively high level of air pollution in the city of Inkerman is due to emissions from the Sevastopol combined heat and power plant, near the gas station on the Yalta–Sevastopol highway – emissions from vehicles, in rural settlements of the Baydarsky valley – emissions from coal burning with stove heating. It was revealed that the data on the content of heavy metals in lichens sampled in the Chernorechensky canyon can be considered a reference for determining the background parameters and the level of pollution of the surface atmosphere in other regions of southwestern Crimea. Lichens can be used to supplement the monitoring system for surface air pollution in southwestern Crimea during atmospheric transport.

Key words:

Lichenoindication, air pollution, heavy metals, ecological monitoring, Crimea, Sevastopol.

The research was supported by the RSF project no. 20-47-01001.

REFERENCES

1. Gosudarstvenny doklad «O sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchey sredy Rossiiskoy Federatsii v 2018 godu» [State report «On the state and environmental protection of the Russian Federation in 2018»]. Available at: http://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady/ (accessed 18 March 2020).
2. *Ezhгодny doklad o sostoyanii okruzhayushchey prirodnoy sredy v g. Sevastopole v 2019 g.* [Annual report on the state of the natural environment in Sevastopol in 2019]. Available at: <https://spn.sev.gov.ru/ekologicheskoe-sostoyanie-sevastopolya/doklad-o-sostoyanii-i-ob-okhrane-okruzhayushchey-sredy-goroda-sevastopolya/> (accessed 26 June 2022).
3. Rola K. Insight into the pattern of heavy-metal accumulation in lichen thalli. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 2020, vol. 61, 126512. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2020.126512> (accessed 15 May 2022).
4. Rola K., Latkowska E., Myśliwa-Kurdziel B., Osyczka P. Heavy-metal tolerance of photobiont in pioneer lichens inhabiting heavily polluted sites. *Science of The Total Environment*, 2019, vol. 679, pp. 260–269.
5. Basile A., Sorbo, S. Aprile G., Conte B., Castaldo Cobiainchi R. Comparison of the heavy metal bioaccumulation capacity of an epiphytic moss and an epiphytic lichen. *Environmental Pollution*, 2008, vol. 151, Iss. 2, pp. 401–407. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.07.004> (accessed 15 May 2022).
6. Shevchenko V.P., Starodymova D.P., Afanaseva A.A., Bychkov A.Yu., Bychkova Ya.V., Koneva V.V., Savvichev A.S. Features of heavy metal accumulation by bushy epiphytic lichens in the Altai and Khakassia republics. *Fundamentalnye issledovaniya*, 2014, no. 12, pp. 2373–2377. In Rus.
7. 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, 125064. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125064> (accessed 15 May 2022).

8. Zelenskaya T.G., Eremenko R.S., Stepanenko E.E. Study of the atmospheric air condition of the reserve «Russian forest» in Stavropol by the method of lichenoidication. *Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2012, no. 9, pp. 94–97. In Rus.
9. Loppi S., Frati L., Paoli L., Bigagli V., Rossetti C., Bruscoli C., Corsini A. Biodiversity of epiphytic lichens and heavy metal contents of *Flavoparmelia caperata* thalli as indicators of temporal variations of air pollution in the town of Montecatini Terme (central Italy). *Science of The Total Environment*, 2004, vol. 326, Iss. 1–3, pp. 113–122. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2003.12.003> (accessed 15 May 2022).
10. Staselko E.A., Sangadzhiev M.M., Berikova B.V. Lichens as indicators of ecological zoning of urbanized territories. *Geologiya, geografiya i global'naya energiya*, 2013, no. 3 (50), pp. 178–186. In Rus.
11. Zasoba V.V., Medenets E.Yu. Species diversity of epiphytic lichens as an indicative sign of anthropogenic influence on forest ecosystems of the steppe zone. *Yug Rossii: ekologiya, razvitie*, 2008, no. 4, pp. 46–52. In Rus.
12. Inсарov G.E., Muchnik E.E., Inсарova I.D. Epiphytic lichens in the conditions of Moscow atmosphere pollution: methodology of long-term monitoring. *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem*, 2010, vol. 23, pp. 276–295. In Rus.
13. Hauck M., Javkhlan S., Lkhagvadorj D., Bayartogtokh B., Dulamsuren C., Leuschner C. Edge and land-use effects on epiphytic lichen diversity in the forest-steppe ecotone of the Mongolian Altai. *Flora – Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 2012, vol. 207, Iss. 6, pp. 450–458. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.flora.2012.03.008> (accessed 15 May 2022).
14. Krivorotov S.B., Manilova O.Yu. To the study of the lichen biota of some of the urban ecosystems of the Northwest Caucasus. *Grani poznaniya*, 2019, no. 6 (65), pp. 84–87. In Rus.
15. Romanova E.V. The Lichens are the bioindicators of air pollution in Kemerovo. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya*, 2012, no. 4 (20), pp. 203–214. In Rus.
16. Romanova E.V., Sedelnikova N.V. *Lishainiki – bioindikatory atsmofernoy zagryazneniya Novosibirskoy gorodskoy aglomeratsii* [Lichens-bioindicators of atmospheric pollution in the Novosibirsk city agglomeration]. Novosibirsk, Geo Publ., 2010. 98 p.
17. Anishchenko L.N., Safrankova E.A. Lichenoflora of small towns and urban-type settlements of the Bryansk region: biodiversity and use in bioindication. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2013, no. 6 (155), pp. 28–32. In Rus.
18. Tarkhanov S.N. State of epiphytic lichen cover in the conditions of atmospheric pollution in the Zimniberezhno-Arkhangelsk region. *Lesnoy vestnik*, 2002, no. 5, pp. 45–53. In Rus.
19. Sionova N.A., Krivorotov S.B. Use of epiphytic lichens as bioindicators of atmospheric air pollution in the urban ecosystem of Krasnodar. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Severo-Kavkazskii region. Estestvennye nauki*, 2007, no. 1, pp. 83–85. In Rus.
20. Erofeeva I.A. Analysis of the content of heavy metals in epiphytic lichens in the urban environment. *Vestnik Saratovskogo gosagrouniversiteta im. N.I. Vavilova*, 2013, no. 3, pp. 20–23. In Rus.
21. Krasnogorskaya N.N., Kletter E.A., Suleimanova R.R., Zhuravleva S.E. Analysis of the content of heavy metals and sulfur compounds in lichens of *Parmelia sulcata* in the urban environment. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*, 2012, no. 2, pp. 338–347. In Rus.
22. Taraškevičius R., Motiejūnaitė J., Zinkutė R., Eigminienė A., Gedminienė L., Stankevičius Ž. Similarities and differences in geochemical distribution patterns in epiphytic lichens and topsoils from kindergarten grounds in Vilnius. *Journal of Geochemical Exploration*, 2017, vol. 183, Pt. B, pp. 152–165. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.08.013> (accessed 15 May 2022).
23. Kularatne K.I.A., de Freitas C.R. Epiphytic lichens as biomonitors of airborne heavy metal pollution. *Environmental and Experimental Botany*, 2013, vol. 88, pp. 24–32.
24. Parzych A., Zdunczyk A., Astel A. Epiphytic lichens as bioindicators of air pollution by heavy metals in an urban area (northern Poland). *Journal of Elementology*, 2016, vol. 21, no. 3, pp. 781–795.
25. Zakrzewska M., Klimek B. Trace element concentrations in tree leaves and lichen collected along a metal pollution gradient near Olkusz (Southern Poland). *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2018, vol. 100, pp. 245–249. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00128-017-2219-y> (accessed 15 May 2022).
26. *Recent advances in lichenology: modern methods and approaches in biomonitoring and bioprospection*. Eds. D.K. Upreti, P.K. Divakar, V. Shukla, R. Bajpai. India, New Delhi, Springer, 2015. pp. 87–118.
27. Bajpai R., Upreti D.K., Dwivedi S.K., Nayaka S. Lichen as quantitative biomonitors of atmospheric heavy metals deposition in Central India. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 2009, vol. 63, pp. 235–246.
28. Varela Z., López-Sánchez G., Yáñez M., Pérea C., Fernández J.A., Matos P., Branquinho C., Aboal J.R. Changes in epiphytic lichen diversity are associated with air particulate matter levels: the case study of urban areas in Chile. *Ecological Indicators*, 2018, vol. 91, pp. 307–314. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.04.023> (accessed 15 May 2022).
29. Koz B., Celik N., Cevik U. Biomonitoring of heavy metals by epiphytic lichen species in Black Sea region of Turkey. *Ecological Indicators*, 2010, vol. 10, Iss. 3, pp. 762–765. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2009.11.006> (accessed 15 May 2022).
30. Evlampieva E.P., Panin M.S. Nakoplenie tsinka, medi i svintsya lishaynikom v rayone ugledobyvayushchego mestorozhdeniya «Karazhyra» [Accumulation of zinc, copper and lead by lichen in the area of the Karazhyra coal Deposit]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2008, no. 314, pp. 196–200.
31. Bolshunova T.S., Rikhvanov L.P., Baranovskaya N.V. Ultimate composition of lichens as indicator of aerial contamination. *Ecology and Industry of Russia*, 2014, no. 11, pp. 26–31. In Rus.
32. Graney J.R., Edgerton E.S., Landis M.S. Using Pb isotope ratios of particulate matter and epiphytic lichens from the Athabasca Oil Sands Region in Alberta, Canada to quantify local, regional, and global Pb source contributions. *Science of The Total Environment*, 2019, vol. 654, pp. 1293–1304. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.047> (accessed 15 May 2022).
33. Kutikova A.O., Meisurova A.F. The metal content of the lichens of the specially protected natural territories of the city of Tver. *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: khimiya*, 2016, no. 1, p. 152–158. In Rus.
34. Golubkina N.A., Lapchenko V.A., Lapchenko E.V., Naumenko T.S., Krainyuk E.S., Bagrikova N.A. Background levels of accumulation of heavy metals, macro- and microelements by some types of lichens on specially protected natural territories of the southern and South-Eastern coast of Crimea. *Byulleten Gosudarstvennogo Nikitskogo botanicheskogo sada*, 2019, no. 130, pp. 26–35. In Rus.
35. Evstafeva E.V., Bogdanova A.M., Bolshunova T.S., Baranovskaya N.V., Osipova N.A. Elemental composition of lichens as an indicator of atmospheric pollution. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 7, pp. 93–103. In Rus.
36. *Sovremennye landshafty Kryma i sopredelnykh akvatoriy*. Monografiya [Modern landscapes of the Crimea and adjacent water areas: monograph]. Scientific editor E.A. Pozachenyuk. Simferopol, Business-Info Publ., 2009. 672 p.
37. Krivorotov S.B., Ragulskaya E.A. Epifitnye lishayniki kak bioindikatory zagryazneniya tyazhelymi metallami gornyykh-lesnykh fitotsenozov Lagonakskogo nagorya (severo-zapadny Kavkaz). *Ekologiya: ratsionalnoe prirodopolzovanie i bezopasnost zhiznedeyatelnosti. Sbornik materialov Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Epiphytic lichens as bioindicators of heavy metal pollution from mining and forest phytocenoses of the Lagonaki plateau (Northwest Caucasus)]. Maykop, Adyghe State University Publ., 2017. pp. 41–43.
38. Krivorotov S.B., Mikaelyan L.A., Ragulskaya E.A. Lishainiki kak indikatory sostoyaniya lesnykh ekosistem yuzhnogo sklona Markotkhskogo khrebtta (severo-zapadny Kavkaz). *Materialy mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii. Biosfera i chelovek* [Lichens as indicators of the state of forest ecosystems of the southern slope of the Markotkh ridge (North-West Caucasus)]. Maikop, Electronic Publishing technologies LLC Publ., 2019. pp. 67–69.

Received 27 June 2022.

Information about the authors

Ekaterina S. Kashirina, Cand. Sc., senior teacher, Branch of Lomonosov Moscow State University in the city of Sevastopol; associate professor, Institute of urban development.

Aleksey A. Medvedkov, Cand. Sc., associate professor, Lomonosov Moscow State University.

Anton A. Novikov, senior teacher, Branch of Lomonosov Moscow State University in the city of Sevastopol; junior researcher, Institute of Natural and Technical Systems.