

УДК 574:549.291

## КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ СОДЕРЖАНИЯ РТУТИ В ПОДСИСТЕМАХ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ КРЫМСКОГО ПОЛУОСТРОВА<sup>1</sup>

© 2021 г. Е. В. Евстафьева<sup>а</sup>, \*, А. М. Богданова<sup>а</sup>, И. А. Евстафьева<sup>а</sup>,  
А. С. Макарова<sup>б</sup>, \*\*, В. П. Мешалкин<sup>б</sup>, Н. В. Барановская<sup>с</sup>

<sup>а</sup>Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь, Россия

<sup>б</sup>Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва, Россия

<sup>с</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

\*e-mail: e.evstafeva@mail.ru

\*\*e-mail: annmakarova@mail.ru

Поступила в редакцию 18.03.2021 г.

После доработки 22.03.2021 г.

Принята к публикации 23.03.2021 г.

Выполнен системный анализ содержания ртути в различных подсистемах окружающей среды Крымского полуострова, который включал: 1) оценку наличия естественных геохимических и антропогенных источников поступления ртути в подсистемы окружающей среды Крыма; 2) оценку нагрузки на территорию полуострова ртутьсодержащими отходами по официальным данным Министерства экологии Республики Крым в виде Форм 2-ТП (отходы); 3) анализ и обобщение литературных и собственных мониторинговых данных о содержании ртути в компонентах окружающей среды; 4) проведение мониторинговых исследований на территории городов полуострова, используя в качестве объектов-индикаторов накопления ртути листья тополя черного *Populus nigra* L. Анализ нагрузки по ртути, обусловленной ртутьсодержащими бытовыми отходами, в городах и административным районам показал ее возрастание на 25% с 2017 г. до 2018 г. Наибольшая нагрузка отмечена в городах Симферополе, Керчи и Севастополе, в Симферопольском и Сакском административных районах. На этих же территориях, согласно литературным данным, за прошлые годы отмечены значительные превышения содержания ртути в таких компонентах как морская вода и вода соленых озер, донные отложения, почва, а на промышленных северных территориях – в осадках. В то же время валовое содержание ртути в почвах вблизи полигонов твердых бытовых отходов и условно фоновых площадок на сельскохозяйственных, заповедных, селитебных территориях в 2018 г. не превышало предельно допустимых концентраций, а собственные данные содержания ртути в почве и растениях на селитебных, урбанизированных, заповедных и сельскохозяйственных территориях свидетельствуют об относительно благополучной ситуации в настоящее время, однако отмечены статистически значимые различия и более высокое содержание ртути на южнобережных территориях, что может быть обусловлено их природными особенностями. Необходимость учета мобильности распространения ртути в подсистемах окружающей среды Республики Крым обуславливает потребность в дальнейших системных исследованиях, в том числе по определению ртути в биосубстратах населения Крымского полуострова, являющегося важной интегральной характеристикой ее присутствия в биосфере.

**Ключевые слова:** ртуть, твердые бытовые отходы, биоиндикатор, экосистема, Республика Крым

**DOI:** 10.31857/S0040357121040059

### ВВЕДЕНИЕ

К числу приоритетных загрязнителей окружающей среды (ОС) относят тяжелые металлы, среди которых наиболее опасной и токсичной является ртуть [1–3]. Поступая в атмосферу, она может переноситься на большие расстояния, в связи с чем ртуть рассматривают как глобальный загрязнитель [2, 4]. Выпадая с осадками, она аккумулируется в почве и биоте, оказывая негативное

влияние даже в малых дозах, не превышающих условные допустимые величины. В связи с этим изучение распределения ртути и ее эффектов в компонентах экосистем актуально практически для любых территорий. Такие исследования предполагают выявление как локальных источников ртутного загрязнения естественного и искусственного происхождения, так и определение его доли в результате трансграничного переноса из источников, расположенных на других территориях.

На первый взгляд Крымский полуостров в отношении ртутного загрязнения представляется

<sup>1</sup> Специальный выпуск: “К юбилею Академика РАН Валерия Павловича Мешалкина”.

благополучным по причине отсутствия локальных источников в виде промышленных предприятий. Однако, остается вероятность значимого загрязнения в результате сжигания угля и образования твердых коммунальных отходов (ТКО) [5] и трансграничного переноса [1, 2]. Помимо этого, для ясного понимания ситуации в отношении присутствия ртути в ОС на Крымском полуострове необходимо располагать сведениями о естественных источниках ртутного загрязнения. Наконец, специфической особенностью Республики Крым является высокое качественное и количественное разнообразие природных (биогеохимических) условий и антропогенной нагрузки на ограниченную в географическом отношении территорию полуострова, что даже при сравнительно невысокой нагрузке ртутью может обуславливать синергизм негативных эффектов воздействия на экосистемы и здоровье населения. Из этого следует необходимость комплексного изучения распределения этого металла в различных компонентах среды с учетом влияющих на этот процесс факторов. Для формирования ясного представления о степени риска здоровью населения и экосистем полуострова в отношении этого приоритетного загрязнителя ОС необходимо обобщение и оценка имеющейся в открытом доступе информации.

В связи с этим целью настоящего исследования явился анализ ситуации в отношении ртутного загрязнения на территории Крымского полуострова по официальным, литературным и собственным мониторинговым данным. Для этого были поставлены следующие задачи:

- а) оценить наличие естественных геохимических и антропогенных источников поступления ртути в компоненты ОС Крымского полуострова;
- б) проанализировать и обобщить имеющиеся литературные и собственные мониторинговые данные о содержании ртути в компонентах ОС;
- в) по официальным данным оценить нагрузку ртутью производимыми на территории полуострова ртутьсодержащими отходами.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для общей характеристики нагрузки ртутью с ртутьсодержащими ТКО были проанализированы данные официальной отчетности Министерства экологии и природных ресурсов Республики Крым. К ним принадлежали следующие Формы 2-ТП (отходы) за 2018 г.:

- 1) Сведения об образовании, использовании, обезвреживании, транспортировании и размещении отходов производства и потребления по форме 2-ТП, систематизированные по федеральным округам и субъектам Российской Федерации;
- 2) Сведения об образовании, использовании, обезвреживании, транспортировании и размещении отходов производства и потребления по форме 2-ТП, систематизированные по субъектам РФ и классам опасности отходов для ОС;

3) Сведения об образовании, использовании, обезвреживании, транспортировании и размещении отходов производства и потребления по форме 2-ТП, систематизированные по видам экономической деятельности и по классам опасности для ОС;

4) Сведения об образовании, использовании, обезвреживании, транспортировании, размещении отходов производства и потребления по форме 2-ТП, систематизированные по видам отходов и классам опасности отходов для ОС, а также данные Межрегионального управления Роспотребнадзора по Республике Крым и г. Севастополю об отходах всех классов.

Данные были систематизированы и обобщены по административным районам Крымского полуострова. В соответствии с долей определенного вида ртутьсодержащих отходов в общем их объеме и количеством ртути, содержащейся в данном виде изделия в соответствии со сведениями паспорта изготовителя на данное изделие, рассчитывалась доля ртути в этих отходах, учитывая, что основная масса представлена ртутными и люминесцентными лампами и термометрами. Она составила 0.02% от общей массы ртутьсодержащих отходов. Следует отметить, что общий перечень ртутьсодержащих отходов также включал импульсные ртутьсодержащие реле, гальванические элементы, содержащие ртуть и ее соединения, бой стеклянных ртутных ламп и термометров с остатками ртути, ртуть, утратившую потребительские свойства в качестве рабочей жидкости, детали лабораторных приборов, содержащие ртуть.

Для анализа представленной в научной литературе информации о естественных и антропогенных источниках содержания ртути в компонентах-индикаторах загрязнения ОС (почве, воде, биосубстратах жителей полуострова, животных, высших и низших растениях, гидробионтах) на территории Крымского полуострова был выполнен поиск в общедоступных электронных базах Medline, Pubmed, Scopus, КиберЛенинка, GoogleAcademy, eLIBRARY.RU преимущественно за последние 20 лет. Проанализировано 67 источников литературы, из них данные 17 источников приведены в настоящей работе.

Для более полной характеристики присутствия ртути в компонентах ОС были выполнены собственные и совместные с Министерством экологии и природных ресурсов Республики Крым мониторинговые исследования содержания ртути в почве, осадках, растительных объектах по общепринятым методикам и рекомендациям [1, 5]. Для определения валового содержания ртути в почвенных образцах в 2019 г. были отобраны пробы на 7 условно фоновых мониторинговых площадках, расположенных в разных районах Крымского полуострова: в предгорной зоне на территории Зуйского поселкового совета в близости населенного пункта с. Баланово на границе леса и пашни, в предгорном районе г. Чатыр-Даг (се-

верный склон, дачный массив Мраморное), на территории Крымского природного заповедника (кордон Алабач), северного Крыма в районе с. Портовое вблизи к заповеднику “Лебяжий остров”, Карадагской станции фонового экологического мониторинга, на урбанизированных территориях (г. Алушта, г. Симферополь). Почвенные образцы отбирали цилиндрическим пробоотборником из нержавеющей стали с глубины 0–15 см методом “квадратного конверта” со стороной 1–2 м, при этом каждая проба была составлена из девяти точечных проб. Их отбор, хранение и транспортировка осуществлялись в соответствии с ГОСТ 17.4.4.02-84, МУ 2.1.7.730-99. Предварительная подготовка почвы для проведения анализа проводилась в соответствии с ГОСТ 29269-91. Проанализирована 21 проба почв (3 повторности измерений).

В дополнение к опубликованным ранее результатам исследования в целях изучения загрязнения атмосферного воздуха ртутью на сельских и урбанизированных территориях разных географических регионов полуострова произвели отбор 146 проб листьев тополя *Populus nigra* L. в конце вегетативного периода в августе–сентябре в г. Симферополе ( $n = 64$ ) в 2016–2017 гг. и в городах Ялте ( $n = 14$ ), Керчи ( $n = 22$ ), Армянске ( $n = 5$ ), Севастополе ( $n = 38$ ) в 2018 г. по регулярной сетке с шагом 0.5–2.0 км. Также были отобраны единичные пробы листьев в г. Феодосии ( $n = 3$ ). Листья отбирали в первичной сырой массе около 50–100 грамм (20–30 штук с одного дерева) с максимально возможным количеством ветвей, растущих в разных направлениях на примерно одно-возрастных деревьях на высоте 1.5–2.0 м от поверхности земли, и помещали в бумажные пакеты. Отбор и подготовка к анализу проб листьев включали высушивание при комнатной температуре, измельчение и перемешивание для достижения наибольшей однородности материала.

Содержание ртути в листьях тополя определяли атомно-абсорбционным методом с использованием анализатора ртути с зеэмановской 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 Е.Е. Ляпина). Ошибка определения ртути не превышала 10% (не менее 2 повторностей измерения), при этом нижний предел обнаружения составил 0.005 мкг/г. Для контроля измерений ртути использовали стандартный образец “Лист березы” (ГСО 8923-2007).

Статистическая обработка полученных данных проведена в программе StatSoft STATISTICA и Jamovi (Version 1.2). Учитывая, что характер распределения содержания ртути в образцах согласно критериям Колмогорова–Смирнова и Лиллифорс отличался от нормального, при сравнительном анализе данных использовали непараметрический

критерий Манна–Уитни, критерий Краскела–Уоллиса, оценке взаимосвязей – корреляционный анализ по Спирмену. Статистически значимыми считали различия при  $p < 0.05$ . Для описания полученных данных использовали значения медианы (Me), 25 и 75 перцентили ( $p_{25}$ ,  $p_{75}$ ), а также минимальные (min) и максимальные (max) значения концентраций.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

**Нагрузка ртутью территории Крымского полуострова с твердыми бытовыми отходами.** Общая доля отходов I класса опасности, образовавшихся на конец 2017 г., по данным Министерства экологии и природных ресурсов составила по Республике Крым и г. Севастополю 26.804 т и 4.862 т соответственно, что в общей сложности составило 31.723 т. Основную массу отходов I класса опасности составляли ртутьсодержащие отходы, главным образом ртутные и другие лампы (27.144 т) и ртутные термометры (0.765 т).

Анализ данных по объемам ртутьсодержащих отходов, производимых большими и малыми предприятиями Республики Крым в 2018 г., сгруппированных по городам и административным районам, показал, что общий их объем по сравнению с 2017 г. увеличился и составил для всего Крымского полуострова без данных по г. Севастополю 41.37561 т, т.е. на 10 т больше, что составляет приблизительно 25%. При этом имело место следующее их распределение по территории Крымского полуострова (табл. 1).

Доля ртути в этой общей массе отходов составила приблизительно 0.008 т. Исходя из приведенных данных максимальное количество ртутьсодержащих отходов имело место в г. Симферополе, Симферопольском р-не и г. Керчи, а с учетом сводных данных за 2017 г. – и в г. Севастополе. В целом, их количество в 5 и более раз выше в городах по сравнению с сельской местностью. Промышленные территории северного Крыма (г. Армянск и г. Красноперекоск), где располагаются наиболее крупные промышленные предприятия (например, завод “Титановые инвестиции – Крымский титан”), не проявили себя как существенные источники ртутного загрязнения из ТКО.

Для оценки почвенного загрязнения ртутью вблизи полигонов ТКО также были использованы данные Министерства экологии и природных ресурсов Республики Крым за 2018 г. по определению содержания ртути в почвах, прилегающих к полигонам ТКО. Анализ последних показал отсутствие каких бы то ни было превышений содержания ртути в поверхностном слое почв, расположенных вблизи к месту расположения отходов в 2018 г. (табл. 2).

Все приведенные значения были существенно ниже предельно допустимой концентрации (ПДК), равной 2.1 мг/кг согласно ГН 2.1.7.2041-06, однако прогрессивный рост нагрузки ртутью с ТКО

**Таблица 1.** Общая масса ртутьсодержащих отходов и доля в них ртути в городах и административных районах Республики Крым в 2018 г.

Место нахождения предприятий	Количество предприятий, шт.	Общая масса отходов 1-го класса опасности, т	Количество ртути, т
г. Симферополь и Симферопольский р-н	59	34.90166	0.00685
г. Керчь	14	2.05897	0.00041
г. Евпатория	9	0.6868	0.00014
г. Ялта	13	0.5828	0.00012
г. Алушта	4	0.5152	0.0001
г. Феодосия	7	0.63366	0.00013
г. Судак	4	0.6861	0.00014
г. Джанкой	5	0.5457	0.0001
г. Бахчисарай и Бахчисарайский р-н	6	0.076	1.5E-05
Сакский р-н	6	0.13422	0.00003
г. Красноперекоск	4	0.0827	0.00002
Ленинский р-н	5	0.122	0.00002
Белогорский р-н	1	0.0298	6E-06
Кировский р-н	4	0.0398	8E-06
Нижнегорский р-н	2	0.0059	1E-06
Октябрьский р-н	1	0.0328	6E-06
Первомайский р-н	1	0.0156	3E-06
Раздольненский р-н	1	0.0085	2E-06
Красногвардейский р-н	2	0.1886	0.00004
Советский р-н	1	0.0252	5E-06
Черноморский р-н	1	0.0036	7E-07
Всего		41.3756	0.00801

(за один только год на 25%) без учета поступления ртути из других антропогенных источников ртутного загрязнения указывает на необходимость более детального анализа этого пути поступления ртути в ОС.

К антропогенным источникам ртутного загрязнения в Крыму, кроме отходов и сжигания угля, можно отнести карьеры по добыче известняка, гранита, щебня, песка, железной руды и других полезных ископаемых [6], а также деятельность промышленных предприятий, аграрно-промышленных и коммунально-бытовых объектов [7]. В связи с этим, выделяют следующие техногенно загрязненные зоны полуострова, где могут присутствовать повышенные концентрации ртути [8]: Центральная возвышенная расчлененная равнина и Тарханкутское плато в центральной части полуострова, Армянско-Красноперекоский промышленный узел в северном регионе, города Симферополь, Керчь, Саки. По имеющимся литературным данным содержание ртути в техногенных аномалиях на территории Крымского полуострова в непосредственной близости к источнику загрязнения в отдельных случаях значительно превышает фоновые, приближаясь по значениям к природно аномальным концентрациям ртути [7].

Нами ранее были отмечены существенные превышения ртути, определяемые по ее содержанию во влажных осадках и рассчитанные по методикам Конвенции LRTAP [1, 9]. Они характеризуют усредненное атмосферное загрязнение в течение года, на территории промышленного северного Крыма, в то время как в других регионах Крыма (Центральном, Западном, Восточном, Южном) в 2009 г. такие превышения не были выявлены.

Учитывая наличие последних, истинное положение с присутствием ртути в ОС на сегодняшний день невозможно без характеристики естественных источников ртутного загрязнения, а также прямого определения ее содержания в различных компонентах экосистем.

**Естественные геохимические и антропогенные источники поступления ртути на территории Крымского полуострова.** Приведенные выше данные свидетельствуют о том, что в качестве потенциально наиболее загрязненных ртутью территорий в результате образования ртутьсодержащих отходов на Крымском полуострове могут рассматриваться главным образом территории городов. Однако, нагрузка ртутью может быть весьма существенной и из других источников, как антропогенных, так и естественных. В связи с этим помимо оценки производимых на полуострове ртутьсодержащих отходов

**Таблица 2.** Валовое содержание ртути в почве поблизости к объекту размещения отходов, мг/кг

Место нахождения площадки	Северная часть	Западная часть	Южная часть	Восточная часть	Фон
г. Джанкой	0.037	0.018	0.018	0.023	0.017
г. Евпатория	<0.019	0.018	0.021	0.016	0.012
г. Саки	0.018	0.02	0.015	0.019	0.018
пгт. Мирный	0.021	0.017	0.024	0.042	0.017
г. Бахчисарай	0.014	0.023	0.018	0.02	0.012
пгт. Кировское	0.031	0.03	0.024	0.025	0.031
пгт. Октябрьское	0.033	0.022	0.022	0.029	0.015
пгт. Красногвардейское	0.019	0.015	0.017	0.016	0.016
Бахчисарайский район, с. Табачное	0.024	0.024	0.031	0.025	0.017
Бахчисарайский район, с. Вилино	0.038	0.036	0.055	0.052	0.016
г. Керчь	0.03	0.107	0.029	0.035	0.111
пгт. Раздольное	0.033	0.018	0.013	0.018	0.012
пгт. Ленино	0.029	0.031	0.032	0.027	0.028
г. Щелкино	0.033	0.026	0.027	0.02	0.028
пгт. Багерovo	0.023	0.026	0.037	0.028	0.028
пгт. Нижнегорский	0.033	0.036	0.03	0.026	0.031
пгт. Советский	0.024	0.033	0.03	0.027	0.024
г. Белогорск	0.03	0.05	0.033	0.027	0.033
г. Симферополь	0.021	0.029	0.021	0.048	0.018
пгт. Черноморское	0.373	0.046	0.061	0.086	0.028

был выполнен анализ литературных данных, рассматривающих наличие на территории Крымского полуострова естественных геохимических и антропогенных источников поступления ртути в ОС. По данным А.И. Радченко [7] общая масса этого металла в биосфере Крыма оценивается в  $10 \times 10^{-9}$  т, из них  $0.2 \times 10^{-9}$  т находится в коренных породах,  $0.34 \times 10^{-9}$  т – в почвах, а наибольшая доля –  $1.12 \times 10^{-9}$  и  $8.5 \times 10^{-9}$  т – приходится на гидросферу и атмосферу соответственно. При этом, учитывая особенности геологического строения, местонахождение природных источников ртути, ландшафтно-геохимические условия, а также антропогенную нагрузку, выделяют следующие области: 1) Горный Крым, где характерно наличие природных источников ртути, особенно в Предгорном Крыму в виде глубинных разломов ортогональной системы с ртутными рудопоявлениями и зонами геодинамической активности и антропогенных источников (карьеры по разработке стройматериалов, промышленные предприятия, автодороги, аграрно-промышленные и коммунально-бытовые объекты); 2) Равнинный Крым, в котором основным источником поступления ртути в биосферу является грязевой вулканизм, а также деятельность промышленных предприятий в основном северного Присивашья (Армянско-Краснопереконский промузел) и орошение полей водами Северо-Крымского канала до прекращения его деятельности в 2014 г.; 3) Керченский полуостров, где характерно как наличие природных источников поступления ртути (гря-

зевые вулканы), так и техногенных в виде промышленных предприятий г. Керчи.

Таким образом, по данным этого автора, с позиций представленности естественных и техногенных источников ртути на полуострове отдельно следует рассматривать Горный Крым, Равнинный Крым и Керченский полуостров. Для Горного Крыма характерны ртутные рудопоявления в местах глубинных разломов ортогональной системы (флишевой толще и изверженных породах верхнего триаса и средней юры) и Предгорной и Южнобережной металлогенических зонах геодинамической активности [6, 7]. Так, в Предгорной зоне расположены Лозовское, Альминское и Мало-Салгирское ртутные рудопоявления, в Южнобережной зоне – Веселовское, Приветненское и Перевальненское рудопоявления. В Равнинном Крыму, на Керченском полуострове и в прибрежных зонах как естественный источник поступления ртути в биосферу выделяют деятельность грязевых вулканов [10].

Несмотря на то, что естественные источники ртути в соответствии с требованиями отечественных гигиенических нормативов не представляют угрозы для жизнеобитания, отдельные участки влияния некоторых из них в ряде случаев рассматриваются как локальные геопатогенные зоны. Например, согласно классификации геохимических ландшафтов Крыма, разработанной Л.Н. Новиковой, Ю.А. Новиковым [8], в таких ландшафтных зонах как прибрежная лиманно-

морская зона низменной солонцово-солончаковой равнины, сухие степи слаборасчлененной равнины, лесостепные и аквальные озерно-(лиманно-) морские зоны присутствие ртути можно считать относительно низким. Однако этот металл можно считать элементом накопления в почвах среднегорных горнолесных ландшафтов, избыточным – для низкогорных широколиственно-лесных зон.

В то же время в прибрежных зонах могут отмечаться более высокие фоновые уровни ртути, что связано с местонахождением морской впадины Черного моря в Средиземноморском альпийском ртутном поясе, а также в сероводородном зарождении вод этого бассейна. Так, наиболее высокое содержание ртути в поверхностных водах было ранее отмечено у прибрежной линии Керченского пролива и в южном регионе [11]. По данным авторов [11], в целом, подверженными загрязнению ртутью считаются Каркинитский залив, Феодосийский залив, акватории г. Севастополя, г. Ялты, а также районы расположения метановых сипов, углеводородных залежей и газовых гидратов.

Таким образом, приведенные выше литературные данные свидетельствуют о том, территория Крымского полуострова и прилегающих акваторий Черноморского бассейна может представлять значительный интерес с точки зрения присутствия естественных геохимических источников ртутного загрязнения.

**Ртуть в компонентах окружающей среды на территориях различного типа Крымского полуострова.** Более определенная оценка ситуации с ртутным загрязнением биосферы возможна при прямом определении ее присутствия в компонентах ОС. Результаты поиска данных о содержании ртути в различных средах на территории Республики Крым позволили выявить некоторые закономерности ее распределения, однако, в целом, следует отметить их фрагментарный характер, не позволяющий составить интегрированную картину распределения ртути в средах на территории полуострова. Обобщение литературных данных по содержанию ртути в различных компонентах ОС представлены в табл. 3.

Как следует из приведенных данных, в ряде случаев выявляется достаточно высокое содержание ртути, превышающие существующие нормативы для почвы (2.1 мг/кг) (МУ 2.1.7.730-99, ГН 2.1.7.2041-06) и водной толщи ( $5 \times 10^{-4}$  мг/л) (ГН 2.1.5.1315-03), а также ПДК ртути в сухой массе растительного сырья (0.02 мг/кг) и в мясе морских млекопитающих (0.3–1.0 мг/кг) (СанПиН 2.3.2.560-96). В целом они отмечены на тех территориях, которые выше рассматривались как критичные в отношении загрязнения ртутью.

Данные собственных мониторинговых исследований в отношении различных компонентов ОС свидетельствовали об относительно благополучной ситуации с ртутным загрязнением в местах отбора почвенных проб. В почвах исследуемых

площадок выявлены того же порядка величины содержания ртути, что и по данным Министерства экологии и природных ресурсов в почвах поблизости полигонов ТКО, что намного ниже допустимой величины ПДК 2.1 мг/кг почвы (табл. 4).

Для более объективной оценки атмосферного загрязнения ртутью было выполнено ее определение в растительных объектах, являющихся своеобразными накопительными планшетами, а именно эпифитных лишайниках как высокочувствительных индикаторах многолетней эмиссии тяжелых металлов. Так, по результатам выполненных в 2015–2018 гг. собственных исследований [23] в парковых зонах г. Симферополь ( $n = 9$ ), содержание ртути находилось в пределах 0.038–1.16 мг/кг, в то время как на селитебных площадках города ( $n = 3$ ) оно составило 0.062–0.080 мг/кг. В целом, на территории исследуемых городов средние значения содержания ртути составили  $0.720 \pm 0.022$  мг/кг ( $n = 34$ ), при этом в г. Судак отмечены более высокие концентрации ( $p < 0.05$ ) по сравнению с городами Симферополь и Керчь. Сравнительный анализ выявил более низкие значения ртути ( $0.006 < p < 0.020$ ) в лишайниках, произрастающих на территории городских и природных экосистем в разных регионах полуострова, по сравнению с условно-фоновыми и заповедными участками южного побережья. В свою очередь, отмечено более высокое содержание ртути ( $p < 0.01$ ) в эпифитных лишайниках, произрастающих в южном регионе по сравнению с центральным, восточным и юго-западным регионами. Также отмечены более высокие ( $p = 0.003$ ) концентрации ртути в лишайниках, произрастающих на высоте 500–1500 м над уровнем моря в предгорном и горном Крыму по сравнению с более низко расположенными площадками отбора.

В целом сопоставление полученных результатов и данных фоновых содержаний ртути в эпифитных лишайниках некоторых других регионов Российской Федерации [25, 26] и стран [27, 28] позволяют заключить, что наблюдаемые для Крымского полуострова значения являются относительно низкими.

Как было отмечено выше, имея основания полагать, что на урбанизированных и промышленных территориях содержание ртути может быть более высоким, было выполнено ее определение в листьях тополя в пгт. Перевальном, городах Симферополе, Севастополе, Керчи, Ялте, Феодосии, Армянске. Последний находится вблизи наиболее крупных промышленных объектов Крыма – завода “Титановые инвестиции – Крымский титан” и содового завода. Распределение медианных значений содержания ртути в сухой массе листьев тополя для разных городов составили 0.018 мг/кг в городах Керчи и Армянске, 0.021 мг/кг в городах Севастополе и Ялте, 0.026 мг/кг в г. Симферополе, при этом минимальное содержание (0.007 мкг/кг) сопоставимо с кларком ртути в наземных растениях (0.012 мг/кг), а максимальное

**Таблица 3.** Содержание ртути в различных компонентах окружающей среды Республики Крым

Компонент	Территория	Концентрация ртути	Литературный источник
Атмосфера	Республика Крым	0.00000155 мг/м <sup>3</sup>	[12]
	г. Симферополь	0.00000299 мг/м <sup>3</sup>	
Почвы	Коренные породы почв	0.012–10.0 мг/кг	[7]
	Экологически чистые участки	0.008–3.0 мг/кг	
	г. Керчь, промышленная площадка	28.0 мг/кг	
	г. Симферополь, селитебные участки	0.3–4.5 мг/кг	Собственные данные
	с. Перекоп, селитебные участки	0.03–0.5 мг/кг	
Водная толща	Булганакское грязевулканическое поле, воды сопок	0.01 мг/л	[13]
	Прибрежные зоны Северо-западного и Севастопольского регионов	0.000003–0.0006794 мг/л	[14]
	Северо-восточная часть Черного моря	0.00003–0.00034 мг/л	[15]
	Шельф северо-западной части Черного моря	0.00003–0.002676 мг/л	[10]
	Соленые озера: оз. Киятское;	0.000363 мг/л	[16]
	Морская вода возле оз. Кызыл-Яр	0.000369 мг/л	[17]
	Западная часть Азовского моря	0.0001–0.00014 мг/л	[18]
Донные отложения	Восточный бассейн Сакского озера, побережье Каламитского залива	0.037 мг/кг	[19]
	Прибрежные зоны Севастопольского региона	0.03–1.88 мг/кг	[20]
	Шельф северо-западной части Черного моря	0.012–0.083 мг/кг	[10]
	оз. Сасык-Сиваш	0.38 мг/кг	
	оз. Кызыл-Яр	0.5 мг/кг	[16, 17]
	оз. Мойнаки	0.4 мг/кг	
	Западная часть Азовского моря	10.9–62 мг/кг	[18]
Водоросли	Бухты Севастопольского региона, южного и восточного побережья Крыма (ульва)	0.0007–0.0023 мг/кг	[21]
	Балаклавская бухта, Севастопольский регион (донные диатомовые водоросли)	0.051–1.5 мг/кг	[22]
Морская биота	Бухты Севастопольского региона, южного и восточного побережья Крыма (фазеолина, мидия, донный ихтиоцен, рыбы, дельфины)	0.0023–0.4 мг/кг	[21]
Лишайники	Г. Армянск	0.085 мг/кг	[23]
	Симферопольский район	0.064–0.079 мг/кг	
	Г. Севастополь	0.060 ± 0.019 мг/кг	
	С. Высокое Бахчисарайского района	0.064 ± 0.021 мг/кг	
	Гор. округ Ялта	0.082 ± 0.306 мг/кг	
	Г. Судак	0.106 ± 0.006 мг/кг	
	Г. Феодосия	0.077 ± 0.038 мг/кг	
Г. Керчь	0.071 ± 0.01 мг/кг		

Таблица 3. Окончание

Компонент	Территория	Концентрация ртути	Литературный источник
Высшие растения. Листья тополя <i>Populus nigra f. Pyramidalis</i>	Г. Армянск	0.0129–0.0245 мг/кг	Собственные данные
	Г. Симферополь и Симферопольский район	0.0072–0.0681 мг/кг	
	Гор. округ Севастополь	0.0101–0.0317 мг/кг	
	Г. Керчь	0.0106–0.0319 мг/кг	
	Г. Ялта	0.0136–0.0393 мг/кг	
	Гор. округ Феодосия	0.020–0.0205 мг/кг	
Человек (волосы)	Жители: г. Симферополь	0.134 мг/кг	Собственные данные, [24]
	Центрального региона	0.15–1.16 мг/кг	
	Северного региона	0.136 мг/кг	
	Северо-западного региона	0.091 мг/кг	
	Западного региона	0.095 мг/кг	
	Юго-западного региона	0.098 мг/кг	
	Восточного региона	0.081 мг/кг	
	Южного региона	0.078 мг/кг	
	Южного региона	0.172 мг/кг	

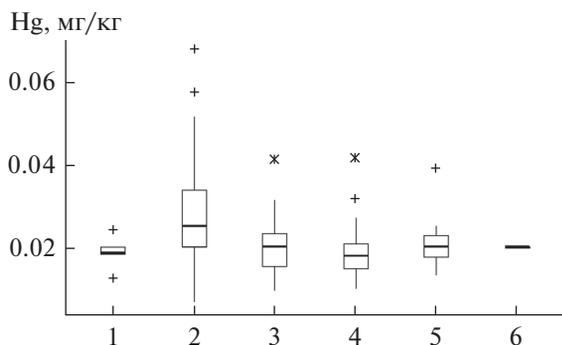
Таблица 4. Валовое содержание ртути в почвах мониторинговых площадок в 2019 г., расположенных в разных географических регионах Крымского полуострова

Месторасположение и характеристики площадки	Координаты площадки	Содержание ртути, мг/кг
с. Мраморное, Симферопольский район (центральный регион), селитебная зона, садовый участок	44°48'50.4" N 34°14'51.5" E	0.001
с. Баланово, Белогорский район (центральный регион), селитебная зона, садовый участок	45°00'12.8" N 34°19'45.3" E	0.027
Крымский природный заповедник (южный регион), кордон Алабач, западный склон г. Роман-Кош	44°36'46.5" N 34°14'36.6" E	0.04
г. Симферополь (центральный регион), Железнодорожный р-н, селитебная зона	44°57'43.6" N 34°05'22.5" E	0.042
с. Портовое, Раздольненский район (северо-западный регион), государственный природный заповедник "Лебяжьих островов"	45°51'16.0" N 33°29'34.6" E	0.042
Карадагская научная станция им. Т.И. Вяземского, г. Феодосия (юго-восточный регион), пгт. Курортное, станция фонового экологического мониторинга	44°56'12.7" N 35°13'15.1" E	0.061
г. Алушта (южный регион), парковая зона	44°4'49.5" N 34°23'53.7" E	0.135

содержание составило 0.068 мг/кг в селитебной зоне г. Симферополя. Сравнительный анализ показал, что в содержание ртути в листьях тополя, произрастающих на территории г. Севастополя и Керчи значительно ниже ( $p < 0.001$ ), чем в г. Симферополе (рис. 1).

Интересно отметить, что анализ зависимости концентрации ртути от высоты над уровнем моря точки отбора листьев тополя показал слабую, но значимую положительную связь ( $r = 0.39$ ;  $p < 0.01$ ), как и в случае с содержанием ртути в эпифитных

лишайниках. Однако более высокие уровни ртути в листьях тополя отмечены в центральном регионе (г. Симферополь, населенные пункты Симферопольского района), в то время как в лишайниках они выявлены на территориях южного региона. Это можно объяснить тем, что листья являются сезонным планшетом для индикации ртутного загрязнения атмосферы, в отличие от многолетних лишайников. В целом, полученные данные о содержании ртути в листьях тополя, отобранных на городских территориях Крымского полуострова, со-



**Рис. 1.** Содержание ртути в листьях тополя на урбанизированных территориях разных географических регионов Крымского полуострова: 1 – северный, 2 – центральный, 3 – юго-западный, 4 – восточный, 5 – южный, 6 – юго-восточный; \* – значимые различия ( $p < 0.001$ ) по сравнению с центральным регионом, критерий Краскела–Уоллиса.

поставимы со средними региональными значениями в других городах Российской Федерации [29, 30].

Полученные результаты позволили заключить, что содержание ртути в растительных субстратах (листья тополя, эпифитные лишайники) на территории г. Симферополя и в других исследуемых регионах Крымского полуострова в сравнении с данными, полученными на других территориях Российской Федерации, является относительно низким. В то же время имеет место территориальная неоднородность в ее распределении с превышением содержания ртути в конкретных локусах.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ имеющихся данных, на основании которых можно судить о потенциальном риске и фактическом содержании ртути в компонентах ОС, свидетельствует о том, что территория Крымского полуострова может представлять интерес в отношении ртутного загрязнения и негативного латентного влияния на экосистемы и здоровье населения. Потенциальный риск выражается в наличии естественных геохимических и антропогенных источников ртутного загрязнения в виде карьеров по добыче известняка, гранита, щебня, песка, железной руды и других полезных ископаемых, а также деятельности промышленных предприятий, аграрно-промышленных и коммунально-бытовых объектов. Оценка нагрузки ртутью с ртутьсодержащими бытовыми отходами, представляющими на сегодняшний день проблему для Крымского полуострова, по городам и административным районам показал ее возрастание на 25% с 2017 до 2018 гг. Наибольшая нагрузка отмечена в городах Симферополе, Керчи и Севастополе, в сельской местности – Симферопольском и Сакском районах. На этих же территориях по литературным данным за прошлые годы отмечены значительные превышения содержания ртути в таких компонентах среды

как морская вода и вода соленых озер, донные отложения, почва. В то же время ее валовое содержание в почвах вблизи полигонов твердых бытовых отходов и условно фоновых площадок на территориях разного типа (сельскохозяйственных, заповедных, селитебных) в 2018 г. не превышало ПДК, а собственные данные определения ртути во влажных осадках и растительных объектах на территориях различного типа (селитебных, урбанизированных, заповедных, сельскохозяйственных) в северном, центральном, юго-западном, восточном, южном и юго-восточном географических регионах Республики Крым свидетельствуют об относительно благополучной ситуации на сегодняшний день, однако отмечены статистически значимые различия и более высокое содержание ртути на урбанизированных центральных и фоновых южнобережных территориях, что может быть обусловлено их природными особенностями, а также атмосферным переносом ртути с сопредельных территорий.

Имеющаяся информация в совокупности с изложенными в статье результатами собственных исследований позволяет, с одной стороны, констатировать относительно благополучную ситуацию в отношении ртутного загрязнения, а с другой стороны, учитывая мобильность ртути, особенно в условиях жаркого климата, экстенсивный рост техногенной нагрузки, а также наличие существенных естественных источников, указывает на необходимость дальнейших системных исследований данной проблемы. Важное место в них, на наш взгляд, должно занять определение ртути в организме человека, являющееся важной интегральной характеристикой ее присутствия в ОС, поскольку характеризует суммарное поступление из всех сред в организм человека. Это позволит более объективно оценить степень риска как для здоровья людей, так и экологическим системам Крымского полуострова, имеющего важное социальное и курортно-рекреационное значение.

Анализ ртути выполнен при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-29-24212). Сбор проб выполнен в рамках поддержанного федеральным государственным автономным образовательным учреждением высшего образования “Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского” гранта № ВГ 06/2020, АААА-А20-120012090158-7.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Spranger T., Lorenz U., Gregor H.D.* Manual on methodologies and criteria for modeling and mapping critical loads and levels and air pollution effects, risks and trends. Berlin: Fed. Environ. Agency (Umweltbundesamt), UBA-Texte, 2004.
2. *Slootweg J., Maximilian P., Hettelingh J.* Progress in the modelling of critical thresholds and dynamic modelling, including impacts on vegetation in Europe. CCE Status Report. The Netherlands: National Institute for Public Health and the Environment, 2010.

3. Минаматская конвенция о ртути. ЮНЕП, ООН, 2013.
4. Pirrone N., Keating T. Hemispheric Transport of Air Pollution 2010: Part B-Mercury. N.Y.: United Nations Publication, 2010.
5. Романов А.В., Игнатъева Ю.С., Морозова И.А., Сперанская О.А., Цитцер О.Ю. Ртутное загрязнение в России: проблемы и рекомендации. ГУП МО: Коломенская типография, 2016.
6. Аксенов Е.М., Беляев Е.В., Садыков Р.К. Минерально-сырьевой потенциал твердых полезных ископаемых Крымского федерального округа // Разв. охр. недр. 2015. № 9. С. 38.
7. Радченко А.И. Распределение ртути в ландшафтно-геохимических зонах Крыма // Минералог. журн. 1999. Т. 21. № 1. С. 79.
8. Новикова Л.Н., Новиков Ю.А. Геохимическая классификация ландшафтов Крыма и их техногенное загрязнение // Уч. зап. Крым. фед. унив. им. В.И. Вернадского. Геогр. Геол. 2008. Т. 21. № 3. С. 231.
9. Евстафьева Е.В., Нараев Г.П., Сологуб Н.А., Карпенко С.А. Подходы к оценке риска от действия тяжелых металлов на наземные экосистемы на территории Республики Крым // Пробл. анал. риска. 2015. Т. 12. № 5. С. 6.
10. Костова С.К., Поповичев В.Н., Егоров В.Н., Плотичина О.В., Артемов Ю.Г. Распределение ртути в воде и донных отложениях в местах локализации струйных метановых газовыделений со дна Черного моря // Морск. экол. журн. 2006. Т. 5. № 2. С. 47.
11. Егоров В.Н., Гулин С.Б., Поповичев В.Н., Мирзоева Н.Ю., Терещенко Н.Н., Лазоренко Г.Е., Малахова Л.В., Плотичина О.В., Малахова Т.В., Проскурин В.Ю., Сидоров И.Г., Гулина Л.В., Стецюк А.П., Марченко Ю.Г. Биогеохимические механизмы формирования критических зон в Черном море в отношении загрязняющих веществ // Морск. экол. журн. 2013. Т. 12. № 4. С. 5.
12. Фурсов В.З. Ртуть в атмосфере некоторых регионов // Тез. Сов. по геохимии ИМГРЭ. Ужгород, 1989.
13. Корженевский В.В., Квитницкая А.А. Фитоиндикация сульфидионных явлений на грязевулканических брекчиях в Крыму // Экосист., их оптим. охр. 2009. Т. 20. С. 32.
14. Плотичина О.В., Стецюк А.П., Поповичев В.Н. Распределение ртути в воде соленых озер северно-западной части Крыма, Черного моря и Севастопольских бухт // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2014. № 28. С. 225.
15. Севостьянова М.В., Павленко Л.Ф., Кораблина И.В. Современный уровень загрязнения акватории Черного моря нефтепродуктами и тяжелыми металлами // Морские биологические исследования: достижения и перспективы. 2016. С. 210.
16. 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 // Chin. J. Oceanol. Limnol. 2015. V. 33. № 6. P. 1413.
17. Стецюк А.П. Содержание ртути в донных осадках озер Крыма // Мат. I Международного экологического форума в Крыму. Севастополь: Филиал МГУ им. М.В. Ломоносова в г. Севастополе, 2017. С. 100.
18. Петренко О.А., Жугайло С.С., Авдеева Т.М., Себах Л.К., Шепелева С.М., Иванюта А.П. Результаты мониторинговых исследований водной среды Азовского моря // Мат. VI Международной конференции Современные проблемы экологии Азово-Черноморского региона. Керчь: Изд-во ЮгНИРО, 2010. С. 27.
19. Попов Ю.В., Гулов О.А., Васенко В.И. О строении и составе толщи илов Сакского озера (Крым) // Отечественная геология. 2015. № 3. С. 45.
20. Petrov A., Nevrova E. Database on Black Sea benthic diatoms (Bacillariophyta): its use for a comparative study of diversity peculiarities under technogenic pollution impacts // Ocean Biodiversity Inf. 2007. V. 202. № 37. P. 153.
21. Костова С.К. Ртуть в гидробионтах Черного моря // Материалы III Всероссийской конференции по водной токсикологии Антропогенное влияние на водные организмы и экосистемы. Т. 1. Борок, 2008. С. 41.
22. Petrov A., Nevrova E., Terletskaia A., Milyukin M., Demchenko V. Structure and taxonomic diversity of benthic diatoms assemblage in a polluted marine environment (Balaklava Bay, Black Sea) // Pol. Bot. J. 2010. V. 55. № 1. P. 183.
23. 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. Томск. гос. унив. Биол. 2020. № 50. С. 135.
24. Богданова А.М., Евстафьева Е.В. Ртуть в компонентах окружающей среды и ее влияние на сердечно-сосудистую систему жителей г. Симферополь // Мат. Второй Всероссийской научно-практической конференции Актуальные проблемы биоразнообразия и природопользования. Симферополь: АРИАЛ, 2019. С. 33.
25. 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) // Environ. Earth Sci. 2016. V. 75. № 18. P. 1260.
26. Тарханов С.Н. Влияние аэротехногенного загрязнения на покрытие стволов деревьев эпифитными лишайниками в лесных насаждениях Северо-Двинского бассейна и Беломорско-Кулойского плато // Изв. высш. учебн. завед. Лесн. журн. 2016. Т. 1. № 349. С. 37.
27. Bargagli R. Moss and lichen biomonitoring of atmospheric mercury: A review // Sci. Total Environ. 2016. № 572. P. 216.
28. 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. V. 241. P. 125064.
29. Юсупов Д.В., Рихванов Л.П., Робертус Ю.В., Ляпина Е.Е., Турсуналиева Е.М., Барановская Н.В., Осипова Н.А. Ртуть в листьях тополя на урбанизированных территориях юга Сибири и Дальнего Востока // Экол. пром-сть. Росс. 2018. Т. 22. № 12. С. 56.
30. Зволинский В.П., Андрианов В.А., Ермакова Л.И., Булаткина Е.Г. Процесс загрязнения ртутью кроны деревьев и оценка ее сезонного накопления на условно чистой и урбанизированной территориях // Изв. Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2015. Т. 3. № 39. С. 26.