

УДК 574.5:669.79(292.471)

## Моделирование ртутной нагрузки на экосистемы разных территорий Крымского полуострова с использованием модели USEtox

Макарова А. С.<sup>1</sup>, Станкова А. И.<sup>1</sup>, Евстафьева Е. В.<sup>2</sup>, Евстафьева И. А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева  
Москва, Россия  
anmakarova@mail.ru

<sup>2</sup> Крымский Федеральный университет имени В. И. Вернадского  
Симферополь, Россия  
e.evstafeva@mail.ru

Одним из подходов к оценке экологической ситуации в международной практике является математическое моделирование, основанное на использовании в качестве первичной информации официальных данных об отходах и выбросах загрязнителей в атмосферу. Целью настоящей работы явилось определение ртутной нагрузки на экосистемы разных территорий Крымского полуострова по данным моделирования с использованием модели USEtox. В качестве исходной информации взяты данные из Формы 2-ТП (отходы) и первичные данные «Отчетов об образовании, обработке, утилизации, обезвреживании, транспортировании и размещении отходов производства и потребления за 2018 год крупными, средними и малыми предприятиями» на предмет наличия отходов I класса опасности по каждому предприятию, предоставляемые в Министерство экологии и природных ресурсов Республики Крым. На основании этих данных была рассчитана массовая доля ртутисодержащих отходов в их общем объеме, которая составила 0,02 %. В соответствии с долей определенного вида ртутисодержащих отходов в общем их объеме и количеством ртути, содержащейся в данном виде изделия (ртутные, люминесцентные лампы и термометры) по сведениям паспорта изготовителя на данное изделие, рассчитывалась доля ртути в этих отходах. Наибольшая, но как правило, не превышающая опасный уровень, нагрузка ионами и сульфидом ртути по расчетам ее миграции в средах приходится на водные экосистемы – пресные и морские; наименьшая – на атмосферный воздух и сельскохозяйственные почвы. Максимальная нагрузка, приближающаяся к предельно допустимой, по данным моделирования, отмечается в Керченской и Феодосийской акватории; химический след в пресных водоемах приблизительно одинаков на всей территории полуострова. Необходимы дальнейшие, в том числе эмпирические, исследования с учетом всех возможных источников поступления ртути в экосистемы Крымского полуострова.

*Ключевые слова:* ртуть, моделирование, наземные и водные экосистемы.

### ВВЕДЕНИЕ

Современная международная практика экологических исследований концептуально базируется на методологии экологического нормирования, которое основывается на биогеохимических принципах и учитывает природную устойчивость экосистем, существенно различающуюся в разных регионах (Башкин, 1993; Bashkin, 2002; Руководство по методологиям..., 2004). Методические подходы к оценке экологической ситуации заключаются в определении превышений экосистемных нормативов – критических нагрузок, – реальной нагрузкой разных загрязнителей (Slootweg et al., 2007). Для этого существуют два возможных пути: выполнение натуральных (эмпирических) мониторинговых исследований по определению содержания поллютанта в компонентах окружающей среды, и моделирование нагрузки конкретным поллютантом на основании данных об его эмиссии из техногенных источников и миграции в средах.

К числу глобальных загрязнителей, поступающих в компоненты экосистем даже на очень далеком расстоянии от локального источника загрязнения, относится ртуть (Chemical, Wastes..., 2021). По причине ее чрезвычайной опасности для экосистем и здоровья человека в 2013 году была принята Минаматская конвенция – межгосударственный договор, направленный на защиту здоровья людей и окружающей среды от антропогенных выбросов

ртути и её соединений (The Sustainable..., 2015; Минаматская конвенция..., 2017). Ртуть вызывает особую озабоченность, поскольку она способна аккумулироваться в трофических цепях, в большинстве которых конечным консументом является человек (Driscoll et al., 2013) и оказывать негативное воздействие в очень малых количествах (Grandjean et al., 2010; Mergler, Anderson, 2013).

Ранее нами были выполнен системный анализ присутствия ртути в различных компонентах экосистем на Крымском полуострове по собственным мониторинговым и литературным данным (Евстафьева и др., 2021).

Целью настоящей работы явилась апробация другого подхода к определению ртутной нагрузки – моделирования ртутной нагрузки на различные подсистемы полуострова путем расчёта миграции ртути на основании отчетных данных об утилизации ртутных отходов в административных районах Республики Крым. В качестве используемой модели применяли модель USEtox, разработанную Обществом экологической токсикологии и химии (SETAC) и рекомендованную международными экологическими организациями.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

С помощью модели USEtox оценивают воздействие на окружающую среду, определяя техногенную миграцию химических веществ от производственных объектов, станций очистки сточных вод и пр. в окружающую среду через массовые потоки между заданными ячейками – компонентами окружающей среды.

USEtox рассматривает три разных типа выбросов в данные ячейки:

- в атмосферу (городской или континентальный воздух);
- в воду (пресная или морская);
- в почву (сельскохозяйственные или природные почвы).

Химические вещества распространяются в рассматриваемых компонентах окружающей среды в течение всего жизненного цикла, при этом их поступление может быть только в одну из рассматриваемых ячеек. В зависимости от процессов, которые происходят в ячейке, загрязняющее вещество может оставаться в ее пределах, трансформироваться в другое химическое соединение под действием физических, химических или биологических процессов, либо быть перенесено посредством трансмиссионных переносов в другой компонент окружающей среды, что представлено на рисунке 1 (Rosenbaum et al., 2008).

Моделирование распространения химических веществ с использованием USEtox позволяет оценить воздействие загрязнителя на экосистемы и здоровье человека. Для работы модели необходимы различные параметры, вводимые пользователем.

Поскольку именно антропогенные источники химического загрязнения, прежде всего, подлежат изучению, контролю и, при необходимости, ограничению, первоочередное внимание при анализе актуальности ртутного загрязнения на территории Крымского полуострова было уделено ртутьсодержащим отходам.

Для оценки их образования были использованы материалы официальной отчетности Министерства экологии и природных ресурсов Республики Крым. К ним принадлежали следующие Формы 2-ТП (отходы) за 2018 год:

1) Сведения об образовании, использовании, обезвреживании, транспортировании и размещении отходов производства и потребления по форме 2-ТП (отходы), 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 (отходы), систематизированные по субъектам РФ и классам опасности отходов для окружающей среды;

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

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



Рис. 1. Взаимодействие компонентов окружающей среды в системе USEtox (Rosenbaum et al., 2008)

Из этих отчетных форм были для дальнейшего анализа были использованы суммарные за год сведения, главным образом об общем количестве отходов по Республике Крым и Севастополю и ртутьсодержащих отходов различного вида. На основании этих данных была рассчитана массовая доля ртутьсодержащих отходов в их общем объеме, которая составила 0,02 %.

Кроме этого были проанализированы первичные данные «Отчетов об образовании, обработке, утилизации, обезвреживании, транспортировании и размещении отходов производства и потребления за 2018 год крупными, средними и малыми предприятиями» на предмет наличия отходов 1 класса опасности по каждому предприятию. По их результатам составлены таблицы (Excel), включившие в себя сведения о количестве отходов, имевшихся на начало года у предприятия, производимых к концу года количестве отходов и их обращении - передаче утилизирующим предприятиям для обезвреживания. В соответствии с адресной привязкой предприятий рассчитывался объем ртутьсодержащих отходов по городам и административным районам Республики Крым.

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. Следует отметить, что общий перечень ртутьсодержащих отходов при этом шире: сюда относятся также реле импульсные ртутьсодержащие; элементы гальванические,

содержащие ртуть и ее соединения; бой стеклянных ртутных ламп и термометров с остатками ртути; ртуть, утратившая потребительские свойства в качестве рабочей жидкости; детали приборов лабораторных, содержащие ртуть.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Модель USEtox 2.0 разработана в виде электронной таблицы Microsoft Excel, что обеспечивает её широкую доступность, в сравнении с более сложными, основанными на кодировании вариантами. Модель включает в себя несколько листов Excel, содержащих необходимую для расчётов информацию, доступную для модифицирования пользователем.

Для работы с моделью на практике, нужно иметь информацию о рассматриваемом веществе. Эта информация хранится в листе данных о веществах «Substance data». Лист данных о веществе (Substance data) включает такие параметры, как физико-химические характеристики, скорость деградации, токсичность, экотоксичность, фактор биоаккумуляции.

В USEtox имеются две базы данных: одна для органических, и другая для неорганических веществ. База данных органических веществ содержит 3073 соединений, а неорганическая – 27 (металлы). Так как в нашей работе рассматриваются вещества, отсутствующие в базе данных USEtox, были добавлены дополнительные строки с данными для ионов ртути (II) и сульфида ртути, основанными на литературных источниках и на расчётах рекомендуемой USEtox программой EPI Suite. Одним из ключевых в наборе данных является значение коэффициента *n*-октанол/вода, на основе которого рассчитываются более сложные параметры, имеющие отношение к перераспределению вещества между средами, такие как коэффициент биоконцентрации, коэффициент распределения «органическое вещество-вода», коэффициент распределения «взвешенные частицы-вода» и др. (USEtox 2.0 Documentation..., 2017).

Информация для ввода данных о веществах представлена в таблице 1. Молекулярные массы приведены из периодической таблицы Менделеева. Коэффициент октанол-вода для ионной формы определен методом медленного перемешивания, а для сульфида ртути, ввиду сложности проведения эксперимента, использовалось значение, указанное в литературе (Benoit et al., 1999). Растворимость рассчитана с помощью программы EPI Suite. Константа Генри по умолчанию установлена на значении, указывающем на незначительный перенос неорганических веществ из почвы и воды в воздух путем испарения. Коэффициенты распределения для почвы, донных отложений, взвешенных веществ и растворенного органического углерода были взяты из данных Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ), доступных на сайте агентства (IAEA International..., 2010).

В качестве объекта исследования модели были выбраны 20 районов полуострова Крым, данные о которых были введены на листе «Landscape & indoor data». Данные листа включают в себя следующие параметры:

- площадь района;
- площадь моря, граничащего с исследуемым районом;
- доля пресных водоемов;
- доля необрабатываемой почвы;
- доля обрабатываемой (сельскохозяйственной) почвы;
- температура;
- скорость ветра у поверхности земли;
- количество осадков;
- доля стока (природных вод в моря);
- инфильтрация (доля проникновения атмосферных и поверхностных вод в почву);
- эрозия почв.

Для того, чтобы рассчитать коэффициенты переноса веществ были сформированы две матрицы: одна для ионов ртути, вторая – для ртути, связанной в сульфид. В качестве примера, на рисунке 2 показана подобная матрица переноса ионов ртути для Краснопереконского района.

Таблица 1

Данные, необходимые для ввода при использовании модели USEtox (IAEA..., 2010)

Параметр	Вещество	
	Hg(II)	HgS
Молярная масса, г/моль	200,6	232,6
$K_{ow}$ , л/л <sup>-1</sup>	0,5	25
Растворимость в воде при 25°C, мг/л	0	74203
Константа Генри (K <sub>H</sub> ), Па*м <sup>3</sup> *моль <sup>-1</sup>	1,10 <sup>-20</sup>	1,10 <sup>-20</sup>
Давление паров при 25°C, Па	0,26	н/п
Коэффициент распределения растворённый органический углерод/ вода, л/кг	251188,64	н/п
Коэффициент распределения взвешенные твёрдые частицы/ вода, л/кг	199526,23	н/п
Коэффициент распределения донные отложения- вода л/кг	79432,82	н/п
Коэффициент распределение почва-вода, л/кг	6300	н/п

Примечание: н/п – неприменимо; значение  $K_{ow}$  для сульфида по данным взято из литературы.

компонент ОС, из которого поступает вещество	городской уровень						региональный уровень					глобальный уровень				
	airU	airC	fr.waterC	sea.waterC	nat.soilC	agr.soilC	airG	fr.waterG	oceanG	nat.soilG	agr.soilG	airG	fr.waterG	oceanG	nat.soilG	agr.soilG
airU	-1,11E+02	5,04E-02	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
airC	1,10E+02	-1,33E+01	3,03E-21	9,69E-24	2,23E-25	2,23E-25	9,49E-05	0	0	0	0	0	0	0	0	0
fr.waterC	2,56E-01	8,91E-04	-4,07E+00	0	2,02E-06	2,02E-06	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
sea.waterC	0	2,08E-01	8,74E-01	-2,78E-03	0	0	0	0	8,67E-09	0	0	0	0	0	0	0
nat.soilC	0	9,63E-02	0	0	-2,43E-06	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
agr.soilC	0	1,09E-02	1,25E-01	0	0	-2,43E-06	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
airG	0	1,30E+01	0	0	0	0	-4,18E-01	3,92E-23	1,14E-24	1,47E-25	1,47E-25	0	0	0	0	0
fr.waterG	0	0	0	0	0	0	3,52E-04	-4,89E-01	0	1,41E-06	1,41E-06	0	0	0	0	0
oceanG	0	0	0	2,75E-03	0	0	3,17E-01	5,52E-02	-1,95E-03	0	0	0	0	0	0	0
nat.soilG	0	0	0	0	0	0	9,99E-02	0	0	-1,99E-06	0	0	0	0	0	0
agr.soilG	0	0	0	0	0	0	1,15E-04	4,32E-03	0	0	0	0	0	0	-1,99E-06	0

Рис. 2. Структура матрицы USEtox, полученной для Краснопереконского района

Компоненты окружающей среды (ОС) в матрице на рисунке 2 имеют следующие обозначения (U – городской, C – континентальный, G – глобальный уровни):

- airU/C/G – воздушные массы;
- fr.waterC/G – пресноводные объекты;
- sea.waterC/G – морская вода;
- agr.soilC – обрабатываемые почвы;
- oceanG – океанические воды.

В столбцах матрицы указаны компоненты окружающей среды, из которых вещество поступает, а в рядах – компоненты ОС, принимающее это вещество.

Диагональные элементы содержат коэффициенты удаления вещества для компонента ОС, включающие в себя адвекцию, деградацию и промежуточную скорость удаления (1/день).

Недиагональные элементы матрицы отражают промежуточное количество поступающего в различные среды вещества (1/день).

Далее получаем массы переносимого вещества с помощью уравнения:

$$\vec{m}(t) = -[k]^{-1} \times S,$$

где: [k] – коэффициент переноса вещества; S – эмиссия, кг/день.

В уравнении каждый из множителей является отдельным этапом расчётов. На первом этапе необходимо получить значения коэффициентов переноса вещества. Множитель  $[k]^{-1}$  в данном уравнении – это обратная матрица коэффициентов переноса веществ, рассчитанных USEtox. Она была получена с помощью использования функции MS Excel – МОБР(MINVERSE). Результатом является обратная матрица с теми же размерами, что и первоначальный массив.

Для того, чтобы получить второй множитель, который является вторым этапом расчёта для вычисления массы переносимого вещества, были учтены данные об образовании отходов за 2018 год для крупных и малых предприятий Крыма в зависимости от района.

Исходя из данных по образованию РСО, предоставленных отделением Росприроднадзора по республике Крым и Севастополю, были сформированы таблицы с суммарным распределением отходов по каждому из районов. Данные были предоставлены в форме 2-ТП.

Были учтены два вида РСО: источники света и термометры. Для расчёта непосредственно количества ртути в отходах, были приняты следующие данные о содержании ртути в единице изделия, формирующего вид отхода (табл. 2)

Таблица 2

Данные о содержании ртути в изделиях

Вид отхода	Ртутьсодержащая лампа	Термометр
Масса 1 штуки, г	100	10
Масса ртути в изделии, мг	0,005	1000

Далее, с использованием материалов Методологии определения и количественной оценки поступлений ртути в окружающую среду (Методология определения..., 2013), рассчитаны количества вещества, поступающие в воду, почву, воздух.

В методике предлагаются три сценария по утилизации отходов, представленные в таблице 3.

Таблица 3

Предварительные факторы распределения ртути на выходе по умолчанию для термометров (Методология..., 2013)

Фактическая ситуация по организации утилизации отходов	Факторы распределения на выходе по умолчанию		
	Воздух	Вода	Земля
Отсутствие или очень ограниченные данные по отдельному сбору термометров. Все или самые обычные отходы собираются и обрабатываются публично контролируемым способом	0,1	0,3	0,6
Отсутствие или очень ограниченные данные по отдельному сбору термометров. Отсутствует или широко распространен неформальный сбор и обработка обычных отходов	0,2	0,3	0,5
Отдельный сбор термометров с высокой скоростью сбора. Все или самые обычные отходы собираются и обрабатываются публично контролируемым способом	0,1	0,3	0,6

В нашей работе был принят сценарий № 1, так как данные об утилизации известны только для крупных предприятий. Таким образом, были получены массы ртути, поступающей в компоненты ОС (кг/день), указанные в таблице 4.

Далее, имея достаточно данных, были рассчитаны массы вещества в компонентах окружающей среды для ионов ртути и сульфида ртути, с использованием коэффициентов переноса, полученных в USEtox. Пример результатов расчётов для районов представлен на рисунке 3.

При переводе подвижной ртути в стабильную форму (HgS) сокращаются массы, находящиеся в компоненте ОС «sea water» (морская вода).

Таблица 4

Массы ртути, поступающей в компоненты ОС, кг/день

Район	Компоненты ОС		
	Воздух	Вода	Земля
Красноперекоский	4,96E-07	0	9,42E-06
Джанкойский	3,74E-06	0	7,10E-05
Раздольненский	5,82E-08	0	1,11E-06
Черноморский	2,47E-08	0	4,68E-07
Первомайский	1,07E-07	0	2,03E-06
Красногвардейский	1,29E-06	0	2,45E-05
Нижегорский	4,04E-08	0	7,68E-07
Советский	1,73E-07	0	3,28E-06
Сакский	6,37E-07	0	1,21E-05
Симферопольский	5,26E-03	1,21E-02	4,73E-02
Белогорский	0,00E+00	0	0,00E+00
Бахчисарайский	6,85E-08	0	1,30E-06
Алуштинский	3,30E-06	0	6,27E-05
Ялтинский	3,79E-06	0	7,21E-05
Судакский	4,70E-06	0	8,93E-05
Кировский	2,73E-07	0	5,18E-06
Феодосийский	4,51E-06	0	8,57E-05
Ленинский	8,36E-07	0	1,59E-05
Керченский	1,32E-05	0	2,51E-04
Армянский	1,30E-08	0	2,47E-07
Евпаторийский	1,79E-06	1,23E-06	2,86E-05

Затем были рассчитаны концентрации ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ) веществ в компонентах ОС районов Крыма. Затем концентрации переведены в доли ПДК. По полученным значениям были построены диаграммы химического следа для исследуемых в модели веществ:  $\text{Hg}^{2+}$  (рис. 4) и  $\text{HgS}$  (рис. 5).

Красной линией обозначен уровень, за пределами которого значения химического следа должны вызывать опасение (превышение ПДК). Полученные диаграммы наглядно показывают, что среди объектов окружающей среды, основным акцептором загрязняющего вещества являются пресная и морская вода.

В определенной степени эти результаты согласуются с эмпирическими данными мониторинговых исследований, которые показали в целом благополучную ситуацию в отношении присутствия ртути в компонентах экосистем, но более высокое ее содержание на прибрежных территориях морской акватории (Богданова и др., 2020). Однако следует иметь в виду, что использованные в данной работе официальные данные представляют не все виды ртутьсодержащих отходов (например, элементы гальванические, содержащие ртуть и ее соединения; бой стеклянных ртутных ламп и термометров с остатками ртути; ртуть, утратившая потребительские свойства в качестве рабочей жидкости; детали приборов лабораторных, содержащие ртуть). Помимо этого, реальная нагрузка таким мобильным тяжелым металлом как ртуть и при отсутствии промышленных источников ртутного

Hg(II)				HgS			
район	комп. ОС	м/день	м (Hg)	район	комп. ОС	м/день	м (Hg)
Красноперекоский	airU	0E+00	6,66E-11	Красноперекоский	airU	0E+00	9,70E-15
	airC	5E-07	6,00E-08		airC	0E+00	8,74E-12
	fr.waterC	0E+00	7,79E-06		fr.waterC	0E+00	8,19E-06
	sea.waterC	0E+00	1,02E+01		sea.waterC	0E+00	4,12E+00
	nat.soilC	9E-06	7,21E-05		nat.soilC	1E-05	4,84E-04
	agr.soilC	0E+00	6,97E-06		agr.soilC	0E+00	4,67E-05
Джанкойский	airU	0E+00	2,42E-10	Джанкойский	airU	0E+00	1,33E-14
	airC	4E-06	3,43E-07		airC	0E+00	1,88E-11
	fr.waterC	0E+00	5,86E-05		fr.waterC	0E+00	6,16E-05
	sea.waterC	0E+00	2,22E+01		sea.waterC	0E+00	8,94E+00
	nat.soilC	7E-05	5,43E-04		nat.soilC	7E-05	3,65E-03
	agr.soilC	0E+00	5,23E-05		agr.soilC	0E+00	3,51E-04
Раздольненский	airU	0E+00	8,04E-15	Раздольненский	airU	0E+00	1,82E-18
	airC	6E-08	3,88E-08		airC	0E+00	8,78E-12
	fr.waterC	0E+00	1,40E-05		fr.waterC	0E+00	1,46E-05
	sea.waterC	0E+00	1,02E+01		sea.waterC	0E+00	4,12E+00
	nat.soilC	1E-06	8,52E-06		nat.soilC	1E-06	5,68E-05
	agr.soilC	0E+00	8,02E-07		agr.soilC	0E+00	5,28E-06
Черноморский	airU	0E+00	7,67E-15	Черноморский	airU	0E+00	1,81E-18
	airC	2E-08	4,54E-08		airC	0E+00	1,07E-11
	fr.waterC	0E+00	6,02E-06		fr.waterC	0E+00	6,18E-06
	sea.waterC	0E+00	1,26E+01		sea.waterC	0E+00	5,05E+00
	nat.soilC	5E-07	3,65E-06		nat.soilC	5E-07	2,41E-05
	agr.soilC	0E+00	3,51E-07		agr.soilC	0E+00	2,24E-06

Рис. 3. Массы ионов ртути II в различных компонентах окружающей среды

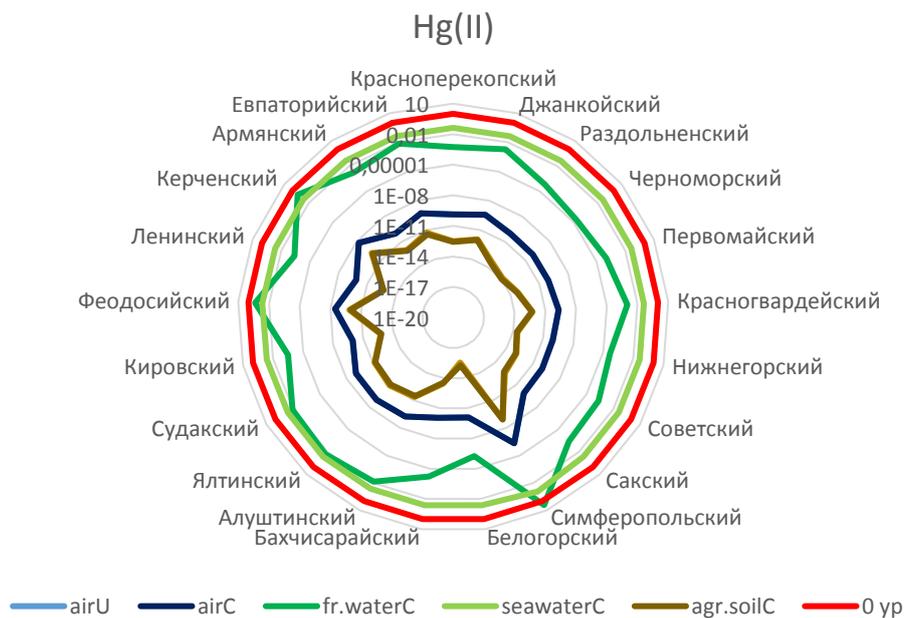


Рис. 4. Диаграмма химического следа для ионов ртути

загрязнения может быть существенно выше вследствие сжигания топлива и мусора, а также в результате трансграничного переноса, что указывает на необходимость дальнейших исследований по определению химического следа этого опасного загрязнителя и его влияния на экосистемы и здоровье человека в таком курортно-рекреационном регионе как Крым.

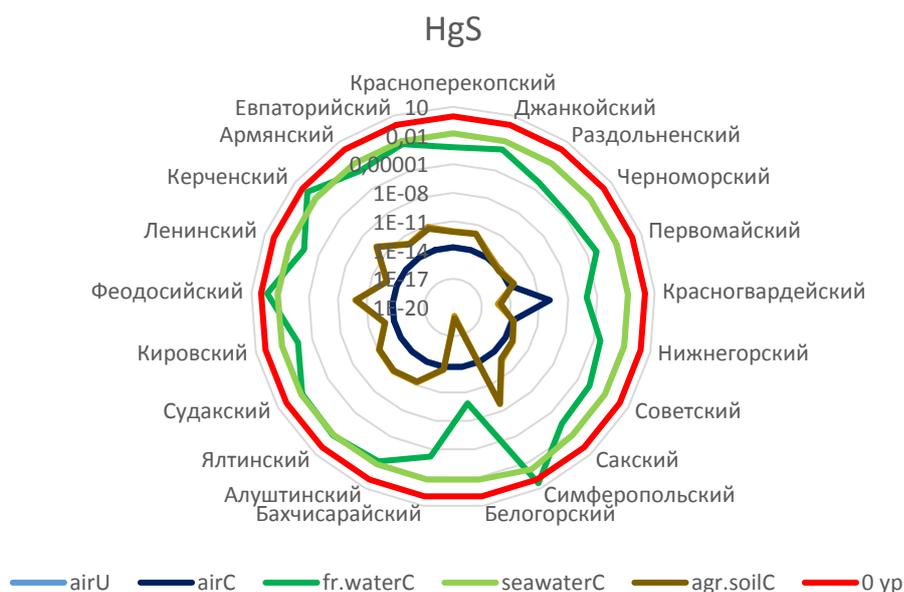


Рис. 5. Диаграмма химического следа для сульфида ртути

## ВЫВОДЫ

С использованием модели USEtox на основании данных статистической отчетности по твердым бытовым отходам рассчитана ртутная нагрузка на компоненты экосистем для разных районов Республики Крым.

Наибольшая нагрузка ионами и сульфидом ртути по расчетам ее миграции между средами приходится на водные экосистемы – пресные и морские; наименьшая – на атмосферный воздух и сельскохозяйственные почвы.

Максимальная нагрузка, приближающаяся к предельно допустимой, по данным моделирования, отмечается в Керченской и Феодосийской акватории; химический след в пресных водоемах приблизительно одинаков на всей территории полуострова.

Необходимы дальнейшие, в том числе эмпирические, исследования с учетом всех возможных источников поступления ртути в экосистемы Крымского полуострова.

**Финансирование.** Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта № 18-29-24212.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Acknowledgment:** The authors gratefully acknowledge financial support from the research grant № 18-29-24212 of Russian Foundation of Basic Research.

**Conflict of interest:** The authors declare no conflict of interest.

## Список литературы

- Башкин В. Н., Евстафьева Е. В., Снакин В. В. Биогеохимические основы экологического нормирования. – М.: Наука, 1993. – 304 с.
- 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 // Вестник Томского государственного университета. Биология. – 2020. – № 50. – С. 135–156.
- Евстафьева Е. В., Богданова А. М., Евстафьева И. А., Макарова А. С., Мешалкин В. П., Барановская Н. В. Комплексный анализ содержания ртути в подсистемах окружающей среды Крымского полуострова // Теоретические основы химической технологии. – 2021. – Т. 55, № 4. – С. 452–462.

Методология определения и количественной оценки источников поступления ртути в окружающую среду, справочный отчет и руководство по уровню 2 инвентаризации. Отдел ЮНЕП по химическим веществам, Женева, Швейцария. [Электронный ресурс]. – 2013. – Режим доступа: <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/11819> (просмотрено 20.04.2019)

Минаматская конвенция о ртути [Электронный ресурс]. – 2017. – Режим доступа: [http://www.mercuryconvention.org/Portals/11/documents/Booklets/Minamata\\_convention\\_Russian.pdf](http://www.mercuryconvention.org/Portals/11/documents/Booklets/Minamata_convention_Russian.pdf) (просмотрено 17.09.2018).

Руководство по методологиям и критериям моделирования и картирования критических нагрузок и уровней, влияния атмосферных загрязнений, а также рисков и трендов: Конвенция ЭКЕ ООН по трансграничному загрязнению воздуха на большие расстояния. – 2004. – 307 с.

Bashkin V. N., Howarth R. W. Modern Biogeochemistry. – New York-Boston-Dordrecht-London-Moscow: Kluwer Academic Publishers, 2002. – 561 p.

Benoit J. M., Mason R. P., Gilmour C. C. Estimation of mercury-sulfide speciation in sediment pore waters using octanol-water partitioning and implications for availability to methylating bacteria // Environmental Toxicology and Chemistry – 1999. – Vol. 18, N 10. – P. 2138–2141.

Chemical, Wastes and Climate Change Interlinkages and Potential for Coordinated Action: Report of Secretariats of the Basel, Rotterdam, Stockholm Conventions (BRS), and Minamata Convention on Mercury (MC). – 2021. – 78 p.

Driscoll C. T., Mason R. P., Chan H. M., Jacob D. J., Pirrone N. Mercury as a Global Pollutant: Sources, Pathways, and Effects // Environmental Science & Technology. – 2013. – Vol. 47. – P. 4967–4983.

Grandjean P., Sato H., Murata K., Eto K. Adverse effects of methylmercury: environmental health research implications // Environ Health Perspect – 2010. – Vol. 118, N 8. – P. 1137–1145.

IAEA International Atomic Energy Agency: Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments, International Atomic Energy Agency // Technical Reports Series – 2010. – N 472. – P. 55–56.

Mergler D., Anderson H. A. Methylmercury Exposure and Health Effects in Humans: A Worldwide Concern // Science. – 2013. – Vol. 341. – P. 1430.

Rosenbaum R. K., Bachmann T. M., Gold L. S. USEtox – the UNEP-SETAC toxicity model: recommended characterisation factors for human toxicity and freshwater ecotoxicity in life cycle impact assessment // International Journal of Life Cycle Assessment. – 2008. – N 13. – P. 532–546.

Slootweg J., Hettelingh J.-P., Posch M., Schütze G., de Vries W., Spranger T., Reinds G. J., van't Zelfde M., Dutchak S., Ilyin I. European critical loads of cadmium, lead and mercury and their exceedances // Water, Air, and Soil Pollution. – 2007. – Focus 7. – P. 371–377.

The Sustainable Development Goals (SDGs) and the Minamata Convention on Mercury. [Электронный ресурс]. – 2015. – Режим доступа: <https://www.undp.org/content/dam/undp/library/Environment%20and%20Energy/Chemicals%20and%20Waste%20Management/Mercury%20&%20SDGs.pdf> (просмотрено 17.09.2018).

USEtox 2.0 Documentation – International Center hosted at the Technical University of Denmark [Электронный ресурс]. – 2017. – Режим доступа: <http://usetox.org> (просмотрено 20.04.2019).

**Makarova A. S., Stankova A. I., Evstafeva E. V., Evstafeva I. A. Modeling of mercury load on ecosystems of different territories of Crimean Peninsula using USEtox model // Ekosistemy. 2022. Iss. 29. P. 80–89.**

In international practice one of the approaches to assess the environmental situation is mathematic modeling, based on the official data on wastes and emissions of pollutants into the atmosphere as primary information. The aim of this project was to determine the mercury load on ecosystems of different territories of the Crimean Peninsula using the approach proposed by USEtox model. Numerous waste-related data was collected from the Ministry of Ecology and Natural Resources of the Republic of Crimea and from «Reports on generation, processing, utilization, transportation and disposal of production and consumption waste for 2018 by large, medium and small scale enterprises» to identify class I hazardous waste for each enterprise. Based on these data, the mass fraction of mercury-containing wastes in their total volume was calculated, which was equal to 0.02%. Mercury fraction in these wastes was further computed to the amount of mercury contained in the specific type of products like mercury fluorescent lamps and mercury thermometers in accordance with the manufacturer's passport of this items. The calculations of mercury migration in the environment revealed the greatest load of mercury ions and sulfide (usually not exceeding recommended level) for aquatic ecosystems - fresh and marine water; the least - for atmospheric air and agricultural soils. According to modeling data, the maximum load approaching the maximum permissible level, was recorded in Kerch and Feodosia aquatic ecosystems; the mercury trace in fresh water bodies was approximately the same throughout the peninsula. It is recommended to continue the research to study all possible sources of mercury input into the ecosystems of the Crimean Peninsula.

*Key words:* mercury, modelling, terrestrial and water ecosystems.

Поступила в редакцию 15.02.22  
Принята к печати 24.03.22