

**НАВУКІ АБ ЗЯМЛІ**  
**EARTH SCIENCES**

УДК 504.054  
<https://doi.org/10.29235/1561-8331-2022-58-4-423-432>

Поступила в редакцию 01.06.2022  
Received 01.06.2022

**С. В. Какарека, Т. И. Кухарчик**

*Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь*

**ПОСТУПЛЕНИЕ СУРЬМЫ В АТМОСФЕРНЫЙ ВОЗДУХ  
НА ТЕРРИТОРИИ БЕЛАРУСИ: ИСТОЧНИКИ, УРОВНИ  
И МНОГОЛЕТНЯЯ ДИНАМИКА**

**Аннотация.** Обсуждаются результаты первой оценки поступления сурьмы в атмосферный воздух на территории Беларуси. Определены основные антропогенные источники выбросов сурьмы, разработаны удельные показатели выбросов и рассчитаны объемы ее поступления за период с 1990 по 2020 г. Показано, что валовые выбросы сурьмы изменились в диапазоне от 1,6 до 5,6 т в год с максимальными значениями в начале 1990-х годов и минимальными – в 2000 г. Выбросы сурьмы в 2020 г. на территории страны оценены в 2,4 т, вклад Беларуси в глобальные выбросы – в 0,1 %. Установлен нисходящий тренд выбросов сурьмы за 30-летний период и изменение вклада основных источников в валовые выбросы. Существенное снижение вклада стационарного сжигания топлива (с 66 до 14 %) обусловлено изменением топливного баланса; оно сопровождалось увеличением вклада истирания тормозов (от 34 до 61 %). Полученные данные могут быть использованы для моделирования переноса и рассеивания сурьмы, оценки риска для здоровья и экосистем, при разработке мероприятий по сокращению поступления сурьмы в окружающую среду.

**Ключевые слова:** сурьма, антропогенные выбросы, сжигание топлива, сжигание отходов, мобильные источники

**Для цитирования.** Какарека, С. В. Поступление сурьмы в атмосферный воздух на территории Беларуси: источники, уровни и многолетняя динамика / С. В. Какарека, Т. И. Кухарчик // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. хім. навук. – 2022. – Т. 58, № 4. – С. 423–432. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2022-58-4-423-432>

**S. V. Kakareka, T. I. Kukharchyk**

*Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*

**THE RELEASE OF ANTIMONY INTO THE ATMOSPHERIC AIR ON THE TERRITORY OF BELARUS:  
SOURCES, LEVELS AND LONG-TERM DYNAMICS**

**Abstract.** The results of the first assessment of the antimony release into the atmospheric air on the territory of Belarus are discussed. The main anthropogenic sources of antimony emission have been identified, the emission factors have been developed, and the volumes of antimony emission for the period from 1990 to 2020 have been calculated. It is shown that total antimony emissions varied in the range from 1.6 to 5.6 tons per year with maximum values in the early 1990 s, and minimal – in 2000. Antimony emission in 2020 on the territory of the country is estimated at 2.4 t, the contribution of Belarus to global emission is 0.1 %. Decreasing trend of antimony emission over a 30-year period and a change in the contribution of the main sources to total emission have been established. A significant decrease in the contribution of stationary combustion of fuel (from 66 to 14 %) is due to a change in the fuel balance and is accompanied by increase of the contribution of brake wear (from 34 to 61 %). The data obtained can be used to model the transport and dispersion of antimony, to assess health and ecosystems risks, and to develop measures to reduce the releases of antimony into the environment.

**Keywords:** antimony, anthropogenic emission, fuel combustion, waste incineration, mobile sources

**For citation.** Kakareka S. V., Kukharchyk T. I. The release of antimony into the atmospheric air on the territory of Belarus: sources, levels and long-term dynamics. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical Series*, 2022, vol. 58, no. 4, pp. 423–432 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2022-58-4-423-432>

**Введение.** Сурьма (Sb) – редкий элемент, металлоид, относящийся к 15-й группе периодической системы химических элементов и проявляющий токсические свойства [1, 2]. После поступления в атмосферу сурьма может включаться в региональный и глобальный атмосферный перенос и накапливаться по пищевой цепи [3, 4]. Считается, что современные концентрации сурьмы в окружающей среде в 50–100 раз выше, чем в доиндустриальную эпоху [3].

Еще в 1970-х годах Агентством по охране окружающей среды США (US EPA) сурьма и ее соединения были включены в список приоритетных загрязняющих веществ [1]. Согласно разделу 112 Закона о чистом воздухе США, сурьма входит в перечень опасных загрязнителей воздуха (HAP), насчитывающий 188 наименований, которые вызывают или подозреваются в том, что вызывают рак или другие серьезные последствия для здоровья человека или ущерб экосистемам [5]. Международное агентство по изучению рака (IARC) отнесло триоксид сурьмы ( $Sb_2O_3$ ) к группе веществ, которые подозреваются в канцерогенности для человека.

Использование сурьмы и ее соединений в медицинской практике для лечения различных заболеваний в течение последних 600 лет позволило накопить достаточно данных о побочных негативных последствиях попадания сурьмы в организм человека. Наиболее чувствительными мишенями являются дыхательные пути, сердце, желудочно-кишечный тракт, уровень глюкозы в сыворотке [1].

Минимальные уровни риска (MRL) для острого ингаляционного воздействия сурьмы составляют  $0,001 \text{ мг Sb/м}^3$ , хронического –  $0,0003 \text{ мг Sb/м}^3$ . MRL для острого перорального воздействия MRL составляет  $1 \text{ мг Sb/кг/сут}$ , среднего –  $0,0006 \text{ мг Sb/кг/сут}$  [1]. Утвержденные в Республике Беларусь нормативы содержания сурьмы пентасернистой (в пересчете на сурьму) и триоксида сурьмы (в пересчете на сурьму) в атмосферном воздухе населенных пунктов и мест массового отдыха населения составляют: ПДК максимальная разовая –  $40 \text{ мкг/м}^3$ , среднесуточная –  $20 \text{ мкг/м}^3$ , среднегодовая –  $8 \text{ мкг/м}^3$ ; величина ориентировочно безопасного уровня воздействия сурьмы –  $10 \text{ мкг/м}^3$  (постановление Министерства здравоохранения Республики Беларусь от 8 ноября 2016 г. № 113). Пыль сурьмы металлической относится ко второму классу опасности, ее соединений – ко второму или третьему классу опасности в зависимости от соединения.

В последнее десятилетие изучению техногенных потоков сурьмы и особенностям ее поведения в окружающей среде уделяется повышенное внимание [2–4, 6–10]. Однако, несмотря на внимание к исследованиям сурьмы, в отношении ее поступления в окружающую среду остается много пробелов. Сурьма не входит в перечень веществ, регулируемых международными соглашениями, такими как Протокол по тяжелым металлам к Женевской конвенции, соответственно не выполняется инвентаризация ее выбросов в рамках Программы ЕМЕП, отсутствует методическое обеспечение инвентаризации выбросов. В то же время детальная информация о выбросах сурьмы является необходимым условием оценки ее воздействия на здоровье и экосистемы, сокращения поступления в окружающую среду и снижения связанных с поступлением сурьмы рисков. В Беларуси оценки выбросов сурьмы не выполнялись.

Цель работы – оценить поступление сурьмы в атмосферный воздух на территории Беларуси от основных категорий антропогенных источников и изменение ее объемов за период с 1990 по 2020 г.

**Методы и исходные данные.** Оценка поступления сурьмы в атмосферный воздух от антропогенных источников основана на традиционной методологии с использованием коэффициентов выбросов и данных о деятельности. Основная формула расчета:

$$E = \sum V_m \cdot F_m, \quad (1)$$

где  $E$  – валовые выбросы сурьмы, т/год;  $V_m$  – интенсивность деятельности в секторе  $m$ , млн т/год;  $F_m$  – удельный показатель выброса сурьмы в секторе  $m$ , г/т.

Получение оценок выбросов сурьмы включало: идентификацию основных категорий источников выбросов сурьмы на территории Беларуси; разработку удельных показателей выбросов сурьмы для основных категорий источников; оценку интенсивности деятельности в категориях источников выбросов сурьмы и их динамики с 1990 по 2020 г.; расчет выбросов сурьмы по категориям источников и валовых за период с 1990 по 2020 г.

**Категории источников сурьмы.** Выбросы сурьмы в атмосферу происходят из природных и антропогенных источников, соотношение которых в глобальном масштабе в 1980-х годах, согласно [11], оценивалось в 41 и 59 % соответственно. Естественные источники в порядке убывания представлены следующим образом: частицы почвы, переносимые ветром, – 32,5 %, вулканы – 29,6 %, брызги морской соли – 23,3 %, лесные пожары – 9,2 % и биогенные источники – 12,1 %.

Антропогенные потоки сурьмы и их поступление в окружающую среду связаны с ее производством и последующим рассеянием при использовании, а также с поступлением вследствие непреднамеренного образования при сжигании топлива и отходов, металлургических и других производственных процессов. Ниже представлена информация, на основании которой выполнена идентификация источников выбросов сурьмы на территории Беларуси.

**Производство и использование.** Мировые объемы производства сурьмы в 2019 г. оцениваются в 162 тыс. т; основными производителями являются Китай (более 50 %), Российская Федерация и Таджикистан [12]. В Беларуси выплавка сурьмы ни из рудного сырья, ни из лома не осуществляется.

Сурьма нашла широкое применение для различных целей, при этом чаще всего она используется в виде сплавов с другими металлами (оловом, свинцом, медью и др.), а также в виде соединений. Сплавы сурьмы и олова применяются в электротехнике, сурьмы и свинца – для изготовления аккумуляторных пластин, кабельных оболочек, листов и труб химической аппаратуры; сурьмы с оловом, свинцом и медью (иногда с добавками цинка и висмута) – вкладышей подшипников скольжения [1]. Известно, что до 60 % первичной сурьмы используется в качестве антипирена в пластмассах и текстильных изделиях промышленного и бытового назначения [2]. Оксиды сурьмы (в основном триоксид сурьмы) используются для производства стекла, керамики, резины, пластмасс, текстиля, пигментов, пиротехники, клеев и антипиренов; соединения сурьмы – для изготовления регенерированных волокон, тормозных колодок и т. д. [7]. Это означает, что источниками поступления сурьмы в окружающую среду являются различные процессы, начиная от ее добычи и выплавки и заканчивая утилизацией отходов потребления, содержащих сурьму.

**Непреднамеренные выбросы сурьмы.** Поступление сурьмы в атмосферу при ее производстве, а также при производстве других цветных металлов обусловлено процессами плавки, при которых происходит улетучивание сурьмы. Ряд других промышленных процессов, в частности производство чугуна и стали, цемента, также являются источниками поступления сурьмы, содержащейся в сырье, в окружающую среду.

Сжигание топлива и в первую очередь угля – один из основных глобальных источников выбросов сурьмы [13]. Содержание сурьмы в углях, золе уноса и шлаках составляет 1,6, 2,8 и 1 ppm при зольности углей в 40 % соответствует улетучиванию одной трети сурьмы при их сжигании [14]. В странах СНГ средние содержания сурьмы в бурых и каменных углях составляют  $0,84 \pm 0,09$  и  $1,00 \pm 0,9$  г/т, а в золах –  $5,0 \pm 0,4$  и  $7,5 \pm 0,6$  г/т соответственно [15]. В углях Китая диапазон ее содержания варьирует от 0 до 159,05 г/т, среднеарифметическое значение составляет 1,27 г/т [6]. Сурьма содержится также в нефти, хотя данные о ее содержании весьма ограничены. Согласно работы [16], сырая нефть содержит 0,1–150 мкг Sb/кг.

К настоящему времени экспериментально доказано, что сурьма присутствует в очень высоких количествах в отходах и золе [1]. Было показано, что Sb становится летучей примерно при 800 °С, что выше, чем, например, Cd и Pb, но ниже температур, обычно преобладающих при горении. По данным [17], в Японии концентрация сурьмы в летучей золе при сжигании отходов составила 4,7 мкг/г (грамм).

Обогащение твердых частиц сурьмой в воздухе в зонах влияния автотранспорта было подтверждено исследованиями в Японии [17], Аргентине [18] и других странах [19]. Доминирующий вклад в выбросы сурьмы от автотранспорта вносит истирание тормозных колодок и незначительно – истирание шин [9].

Анализ доступных данных позволил определить следующие источники выбросов сурьмы в Беларуси:

в секторе «Стационарное сжигание топлива» – сжигание угля и мазута в энергетике, жилищно-коммунальном хозяйстве, промышленности, сельском и лесном хозяйстве и бытовом секторе;

в секторе «Промышленность» – производство чугунного литья, стали и цемента;

в секторе «Сжигание отходов» – сжигание муниципальных, промышленных и медицинских отходов;

в секторе «Мобильные источники» – истирание тормозных колодок.

**Удельные показатели выбросов.** Для получения удельных показателей выбросов были изучены последние издания Руководства по инвентаризации атмосферных выбросов ЕМЕП/ЕЕА (2019 г.) и AP-42 (1996 г.), проанализирована доступная литература по источникам и кадастрам выбросов в различных странах [1, 6, 9, 13, 20]. Выявлено, что коэффициенты выбросов сурьмы в последних изданиях Руководства ЕМЕП/ЕЕА, а также в других методических документах отсутствуют, однако в более ранних изданиях имеются некоторые данные по выбросам сурьмы.

Удельные показатели выбросов сурьмы при сжигании топлив были получены на основании данных о ее содержании в углях СНГ [14, 15], а также в мазутах различных стран [16, 21]; расчет удельных показателей осуществлялся с учетом эффективности пылеулавливания для различных категорий источников и возможного обогащения пыли (при сжигании угля).

Для процессов производства чугунного литья и стали принят фактор 0,008 г/т, что близко значению 0,01 г/т, использованному в Китае [8].

Удельные показатели выбросов сурьмы вследствие истирания тормозов, согласно обобщению [6, 22], варьируют от 31,8 до 220 мкг/авт-км. По данным [19], коэффициенты выбросов сурьмы составили  $11 \pm 7$  и  $86 \pm 42$  мкг/авт-км для легковых и большегрузных автомобилей соответственно. В данной инвентаризации использован удельный показатель выброса сурьмы 41,3 мкг/авт-км для легковых и грузовых автомобилей.

При сжигании различных видов отходов (промышленных, муниципальных, медицинских) в данной работе использован унифицированный удельный показатель выбросов сурьмы 3 г/т, что эквивалентно значениям, принятым в работах [8, 13]. В сводном виде полученные удельные показатели выбросов сурьмы приведены в табл.1.

Т а б л и ц а 1. Удельные показатели выбросов сурьмы от различных категорий источников, использованные при оценке выбросов сурьмы в Беларуси

T a b l e 1. Antimony emission factors from main anthropogenic sources used in the estimation of antimony emission in Belarus

Категория источника	Удельный показатель выброса сурьмы
Стационарное сжигание топлива	
Энергетика	
каменный уголь, г/т угля	0,095
мазут, г/т мазута	0,665
Сжигание топлива в жилищно-коммунальном хозяйстве, промышленности, сельском и лесном хозяйстве	
каменный уголь, г/т угля	0,045
мазут, г/т мазута	0,665
Сжигание топлива в бытовом секторе	
каменный уголь, г/т угля	0,150
мазут, г/т мазута	0,665
Промышленные процессы	
Производство чугунного литья, г/т литья	0,008
Производство цемента, г/т цемента	0,001
Производство стали, г/т стали	0,008
Мобильные источники	
Истирание тормозов, мкг/км-машину	41,3
Сжигание отходов, г/т отходов	3,0

**Данные о деятельности в основных секторах источников.** Издания Национального статистического комитета Республики Беларусь за период с 1990 по 2020 г. послужили основным источником информации для характеристики уровней активности в секторах, являющихся источниками выбросов сурьмы. Статистические данные были приведены к требуемому для выполнения расчетов классификатору видов деятельности.

**Результаты и их обсуждение.** Результаты расчета показали, что валовые выбросы сурьмы с 1990 по 2020 г. изменялись в диапазоне от 1,6 до 5,6 т в год (рис. 1). В 2020 г. выбросы сурьмы на территории страны оценены в 2,4 т. Максимальные выбросы характерны для периода 1990–1991 гг., минимальные – для 2000 г. В целом характерен нисходящий тренд выбросов сурьмы: в 2019–2020 гг. средние годовые выбросы были в 2,3 раза меньше, чем в 1990–1991 гг. При этом наиболее выраженное снижение выбросов сурьмы происходило до 2000 г.; в последующий период отмечается вариабельность значений.

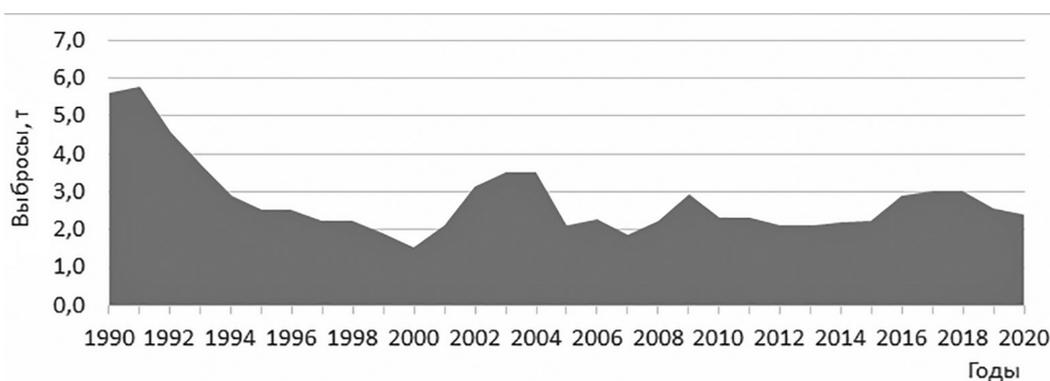


Рис. 1. Валовые выбросы сурьмы на территории Беларуси за период с 1990 по 2020 г., т в год

Fig. 1. Total antimony emissions on the territory of Belarus for the period from 1990 to 2020, t/year

Вклад Беларуси в глобальные выбросы сурьмы незначителен и оценивается в 0,1 % (сравнение для 2010 г.); глобальные оценки сурьмы взяты из работы [8]. Сравнение по отдельным странам и регионам осложняется отсутствием сопоставимых данных. Как следует из табл. 2, имеющиеся оценки получены для некоторых стран и/или регионов за разные годы. Не всегда очевиден перечень источников, для которых выполнены оценки. Например в США, для 1990–1993 гг. приводятся данные о выбросах с разбивкой на городские и сельские, точечные и рассеянные источники и т.д. Вероятно, система получения оценок также различается: в Австралии и США – это официальные данные (учет по источникам «снизу–вверх»), в Китае – расчет с использованием удельных показателей выбросов (инвентаризация «сверху–вниз»). Глобальные оценки получены для разных периодов с учетом природных и антропогенных [11] или только антропогенных источников [8, 13].

Как следует из имеющихся данных, в глобальном масштабе максимальные выбросы сурьмы от антропогенных источников характерны для 1980-х годов – около 3,6 тыс. т или 59 % суммарных выбросов [11], минимальные – для середины 1990-х – 1,6 тыс. т [13]. По данным [8], за период с 1995 по 2010 г. пик выбросов сурьмы (2,2 тыс. т) приходился на 2005 г. с постепенным снижением до 2010 г. (1,9 тыс. т). При этом выбросы сурьмы в атмосферный воздух в Китае характеризуются восходящим трендом [9]. В целом на Азию приходится около 57 % общемировых выбросов сурьмы, а Китай наряду с США и Японией входит в перечень крупнейших стран-эмитентов. По данным [3, 25], к 2050 г. ожидается увеличение глобальных объемов выбросов сурьмы до 4 тыс. т в год за счет увеличения сжигания отходов и производства в цветной металлургии (если не будут внесены серьезные изменения в эффективность контроля выбросов и сохранится действующее законодательство в отношении качества воздуха – сценарий с текущим законодательством).

Нисходящий тренд выбросов сурьмы на территории Беларуси обусловлен прежде всего изменением структуры потребления топлива за 30-летний период, в первую очередь существенным снижением объемов сжигания каменного угля. Если в начале 1990-х годов доминирующим источником выбросов сурьмы является стационарное сжигание топлива (66 % валовых выбросов), то в 2020 г. – истирание тормозных колодок (61 %) (рис. 2). В последние годы значительный вклад в выбросы сурьмы в Беларуси вносит также такая категория источников, как сжигание отходов: 26 % в 2010 г. и 23 % в 2020 г. Поступление сурьмы в атмосферный воздух от промышленных процессов (производство чугуна и стали, цемента) за весь рассматриваемый период не превышает 1 %.

Приведенные примеры соотношения вклада основных источников в валовые выбросы сурьмы на территории Беларуси не являются исчерпывающими. Как и в других странах, соотношение источников выбросов и их вклад на протяжении длительного времени менялись, что связано преимущественно с вариабельностью объемов сжигания отходов и/или объемов сжигаемого топлива и его структуры. Например, в 2002–2004 гг. сжигание отходов обеспечивало от 50 до 58 % суммарных выбросов сурьмы, в 2009 г. преобладал вклад стационарного сжигания топлива (44 %).

Следует отметить, что в глобальном масштабе сжигание топлива является основной категорией источников выбросов сурьмы [8, 13]. На преобладающий вклад сжигания топлива в выбросы сурьмы указано также в работе [6] при оценке выбросов сурьмы в Китае: сжигание угля обеспечивает 61,8 % суммарных выбросов; выплавка цветных металлов – 26,7 %, производства чугуна и стали – 1 % и сжигание твердых бытовых отходов – 7 %. В то же время более поздние

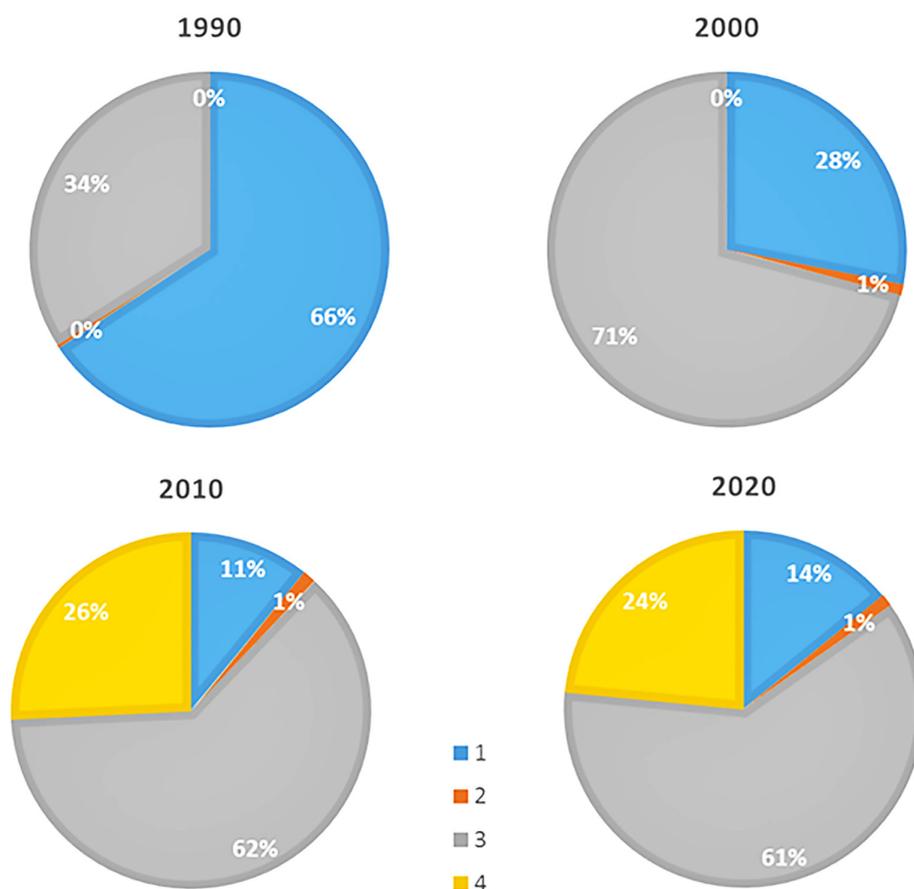


Рис. 2. Изменение вклада основных источников выбросов сурьмы на территории Беларуси за период 1990–2020 гг.: 1 – стационарное сжигание топлива, 2 – промышленные процессы, 3 – мобильные источники, 4 – сжигание отходов  
 Fig. 2. Change in the contribution of the main sources of antimony emissions on the territory of Belarus for the period 1990–2020: 1 – stationary fuel combustion, 2 – industrial processes, 3 – mobile sources, 4 – waste incineration

Т а б л и ц а 2. Сравнение оценок выбросов сурьмы в атмосферный воздух в разных странах  
 Table 2. Comparison of antimony emission estimates into the atmospheric air in different countries

Регион, страна	Годы, для которых выполнены оценки	Примеры объемов выбросов, т в год (год)	Оцениваемые источники выбросов	Ссылка
Австралия	2010–2021	7,5 (2010), 17 (2013), 11 (2021)	Нет данных	[23]
Китай	2005–2009	818 (2009)	Сжигание топлива, цветная и черная металлургия, истирание шин и тормозных колодок, сжигание отходов	[6]
	1949–2012	337,3 (1990), 566,1 (2000), 797,9 (2005), 1068,1 (2010), 1251,7 (2012)	То же	[9]
Китай, провинция Шаньдун	2005–2014	40,26 (2005), 51,36 (2014)	Сжигание угля	[24]
США	1990–1993	103	Точечные, площадные, дорожный и внедорожный транспорт	[5]
	2011–2021	40 (2011), 36,9 (2014), 55,7 (2017)	Сжигание топлива, черная и цветная металлургия, прочие промышленные процессы	[20]
Мир в целом	1980-е	6100	Природные и антропогенные	[11]
	Середина 1990-х	1561	Сжигание топлива, производство свинца, цинка, меди, чугуна и стали, сжигание бытовых отходов и осадка сточных вод	[13]
	1995–2010	2232 (2005), 1904 (2010)	Сжигание топлива, производство черных и цветных металлов, автомобильный транспорт, сжигание отходов	[8]

оценки для Китая показали, что к основным источникам выбросов сурьмы относятся следующие: сектор износа тормозов и шин, потребление угля промышленными котлами и сектор выплавки цветных металлов: 39,9, 20,1 и 11,5 % от общего объема выбросов сурьмы соответственно [9].

В США также на долю сжигания топлива приходится значительная часть выбросов сурьмы [20]. Так, в 2014 г. примерно 33 % общих выбросов сурьмы обусловлено сжиганием топлива, при этом основной вклад вносит сжигание угля в энергетике; цветная металлургия обеспечивает примерно 14,3 % выбросов сурьмы, черная металлургия – 2 % (0,8 т), производство цемента – 0,3 % (0,12 т). Значителен вклад прочих промышленных процессов (30 %), около 10 % из них приходится на химическую промышленность и нефтехимию, однако конкретизации источников сурьмы в секторе нет.

В целом полученные оценки выбросов сурьмы от антропогенных источников на территории Беларуси сопоставимы с оценками для других стран с учетом вклада Беларуси в активность основных секторов-источников выбросов в глобальном масштабе. Выполненный анализ свидетельствует о сложности проблемы оценки выбросов сурьмы, в отношении которой требуются измерения ее содержания в отходящих газах, летучей золе и пыли. Такие данные позволят в будущем уточнить факторы эмиссии и детализировать оценки. Более пристального внимания заслуживает такая категория источников сурьмы, как истирание тормозов и шин, поскольку образование твердых частиц в результате абразивного износа зависит, в частности, от плотности дорожного движения, схемы светофоров, скорости движения, тормозных усилий.

Как и в отношении других загрязняющих веществ, важным представляется получение пространственно распределенных выбросов для определения зон повышенных рисков и проведения исследований с учетом путей и интенсивности поступления в окружающую среду. Как указано в работе [26], требуется развитие междисциплинарных исследований для понимания мобильности и путей переноса сурьмы в окружающей среде с целью предотвращения ее накопления в токсичных концентрациях по пищевой цепи. Это тем более актуально для Беларуси, поскольку пока отсутствуют данные о содержании сурьмы в природных компонентах и уровнях их загрязнения, несмотря на сопоставимые с некоторыми тяжелыми металлами объемы ее поступления в атмосферный воздух.

**Заключение.** Впервые для территории Беларуси получены оценки выбросов сурьмы. С использованием разработанных удельных показателей выбросов для основных категорий источников рассчитаны объемы поступления сурьмы в атмосферный воздух за период с 1990 по 2020 г. Установлено, что валовые выбросы сурьмы с 1990 по 2020 г. изменялись в диапазоне от 1,6 до 5,6 т в год. Максимальные объемы выбросов характерны для периода 1990–1991 гг., минимальные – для 2000 г. Наиболее выражен нисходящий тренд выбросов сурьмы для периода с 1990 по 2000 г., в последующие годы отмечается вариабельность значений. В целом в 2019–2020 гг. средние годовые выбросы были в 2,3 раза меньше, чем в 1990–1991 гг. Показано изменение соотношения основных источников выбросов за 30-летний период, выражающееся прежде всего в снижении доли сжигания топлива.

Полученные результаты могут быть использованы для моделирования переноса и рассеивания сурьмы, оценки риска для здоровья человека и экосистем при разработке мероприятий по сокращению поступления сурьмы в окружающую среду.

**Благодарности.** Работа выполнена в рамках Государственной программы научных исследований «Природные ресурсы и окружающая среда» подпрограммы 10.1 «Природные ресурсы и их рациональное использование», № госрегистрации 20210126 (2021–2025) и договора с Институтом Пауля Шеррера (PSI), Швейцария (№ PSI-INM 01-2022), № госрегистрации 20220255 (2022).

**Acknowledgements.** The study has been performed within the State Program of Scientific Research «Natural resources and environment», subprogram «Natural resources and their rational use», state registration 20210126 (2021–2025) and the contract with Paul Scherrer Institute, Switzerland (PSI), state registration 20220255 (2022).

#### Список использованных источников

1. Toxicological Profile for Antimony and Compounds [Electronic resource] / The Agency for Toxic Substances and Disease Registry. The Environmental Protection Agency. – U.S. Public Health Service, 2019. – Mode of access: <https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp23.pdf>. – Data of access: 15.02.2022.
2. Antimony speciation in the environment: Recent advances in understanding the biogeochemical processes and ecological effects / M. He [et al.] // *J. Environ. Sci. (China)*. – 2019. – Vol. 75. – P. 14–39. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2018.05.023>
3. Antimony contamination and its risk management in complex environmental settings: A review / N. Bolan [et al.] // *Environment International*. – 2022. – Vol. 158. – P. 106908. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106908>
4. Characteristics, Accumulation, and Potential Health Risks of Antimony in Atmospheric Particulate Matter / J. Jiang [et al.] // *ACS Omega*. – 2021. – Vol. 6, N 14. – P. 9460–9470. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c06091>
5. National air pollutant emission trends, 1900–1998 [Electronic resource] / U.S. Environmental Protection Agency. 2000. – Mode of access: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/2000ETJA.PDF?Dockkey=2000ETJA.PDF>. – Data of access: 10.02.2022.
6. Anthropogenic Atmospheric Emissions of Antimony and Its Spatial Distribution Characteristics in China / H. Tian [et al.] // *Environ. Sci. Technol.* – 2012. – Vol. 46. – P. 3973–3980. <https://doi.org/10.1021/es2041465>
7. A review of the environmental chemical behavior, detection and treatment of antimony / Y. Zhang [et al.] // *Environmental Technology & Innovation*. – 2021. – Vol. 24. – P. 102026. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.102026>
8. A Comprehensive Global Inventory of Atmospheric Antimony Emissions from Anthropogenic Activities, 1995–2010 / H. Tian [et al.] // *Environmental science & technology*. – 2014. – Vol. 48. – P. 10235–10241. <https://doi.org/10.1021/es405817u>
9. Quantitative assessment of atmospheric emissions of toxic heavy metals from anthropogenic sources in China: historical trend, spatial distribution, uncertainties, and control policies / H. Z. Tian [et al.] // *Atmos. Chem. Phys.* – 2015. – Vol. 15. – P. 10127–10147. <https://doi.org/10.5194/acp-15-10127-2015>
10. Antimony contamination, consequences and removal techniques: A review / J. Li [et al.] // *Ecotoxicol Environ Saf.* – 2018. – Vol. 156. – P. 125–134. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.03.024>
11. Nriagu, J. O. Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soils by trace metals / J. O. Nriagu, J. M. Pacyna // *Nature*. – 1988. – Vol. 1988333. – P. 134–139. <https://doi.org/10.1038/333134a0>
12. Mineral commodity summaries 2021 / U. S. Geological Survey. – U.S. Geological Survey, 2021. – 200 p. <https://doi.org/10.3133/mcs2021>
13. Pacyna, J. M. An assessment of global and regional emissions of trace metals to the atmosphere from anthropogenic sources worldwide / J. M. Pacyna, E. G. Pacyna // *Environ Rev.* – 2001. Vol. 9, N 4. – P. 269–298. <http://doi.org/10.1139/a01-012>
14. Зырянов, В. В. Зола уноса – техногенное сырье / В. В. Зырянов, Д. В. Зырянов. – М: Маска, 2009. – 320 с.
15. Юдович, Я. Э. Ценные элементы в углях / Я. Э. Юдович, М. П. Кетрис. – Екатеринбург: УрО РАН, 2006. – 538 с.
16. Filby, R. H. A comparison of INAA and ICP-MS for trace element determination in petroleum geochemistry / R. H. Filby, S. D. Olsen // *J. Radioanal. Nucl. Chem.* – 1994. – Vol. 180. – P. 285–294.
17. Clarification of the predominant emission sources of antimony in airborne particulate matter and estimation of their effects on the atmosphere in Japan / A. Iijima [et al.] // *Environ. Chem.* – 2009. – Vol. 6, N 2. – P. 122–132. <https://doi.org/10.1071/EN08107>
18. Antimony: a traffic-related element in the atmosphere of Buenos Aires, Argentina / D. R. Gómez [et al.] // *J. Environ. Monit.* – 2005. – Vol. 7. – P. 1162–1168. <https://doi.org/10.1039/b508609d>

19. Real-world emission factors for antimony and other brake wear related trace elements: size-segregated values for light and heavy duty vehicles / N. Bukowiecki [et al.] // *Environ Sci Technol.* – 2009. – Vol. 43, N 21. – P. 8072–8. <https://doi.org/10.1021/es9006096>. PMID: 19924925
20. National Emissions Inventory (NEI). 2022. [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.epa.gov/air-emissions-inventories/national-emissions-inventory-nei>. – Data of access: 1.03.2022
21. Kitto, M. E. Trace-element patterns in gasolines for use in source apportionment // *Air & Waste.* – 1993. – Vol. 43, N 10. <https://doi.org/10.1080/1073161X.193.10467213>
22. Emission factor for antimony in brake abrasion dusts as one of the major atmospheric antimony sources / A. Iijima [et al.] // *Environmental science & technology.* – 2008. – Vol. 42, N 8. – P. 2937–2942. <https://doi.org/10.1021/es702137g>
23. 2019/2020 Data within Australia – Antimony & compounds from all sources [Electronic resource]. – Mode of access: <http://www.npi.gov.au/npidata/action/load/summary-result/criteria/destination/ALL/substance/10/source-type/ALL/substance-name/Antimony%2B%2526%2Bcompounds/subthreshold-data/Yes/year/2020>. – Data of access: 10.04.2022.
24. Fan, J. Atmospheric Emissions of As, Sb, and Se from Coal Combustion in Shandong Province, 2005–2014 / J. Fan, Y. Wang // *Pol. J. Environ. Stud.* – 2016. – Vol. 25, N 6. – P. 2339–2347. <https://doi.org/10.15244/pjoes/63656>
25. Future trends of global atmospheric antimony emissions from anthropogenic activities until 2050 / J. Zhou [et al.] // *Atmospheric Environment.* – 2015. – Vol. 120. – P. 385–392. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.09.018>
26. Bioavailability of Arsenic and Antimony in Terrestrial Ecosystems: A Review / S. Bagherifam [et al.] // *Pedosphere.* – 2019. – Vol. 29, is. 6. – P. 681–720. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(19\)60843-X](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(19)60843-X)

## References

1. The Agency for Toxic Substances and Disease Registry. The Environmental Protection Agency *Toxicological Profile for Antimony and Compounds*. U. S. Public Health Service, 2019. Available at: <https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp23.pdf> (accessed 15 February 2022).
2. He M., Wang N., Long X., Zhang C., Ma C., Zhong Q., Wang A., Wang Y., Pervaiz A., Shan J. Antimony speciation in the environment: Recent advances in understanding the biogeochemical processes and ecological effects. *Journal of Environmental Sciences*. 2019, vol. 75, pp. 14–39. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2018.05.023>
3. Bolan N., Kumar M., Singh E., Kumar A., Singh L., Kumar S., Keerthanan S., Hoang S. A., El-Naggar A., Vithanage M., Sarkar B., Wijesekara H., Diyabalanage S., Sooriyakumar P., Vinu A., Wang H., Kirkham M. B., Shaheen S. M., Rinklebe J., Siddique K. H. M. Antimony contamination and its risk management in complex environmental settings: A review. *Environment International*. 2022, vol. 158, 106908. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106908>
4. Jiang J., Wu Y., Sun G., Zhang L., Li Z., Sommar J., Yao H., Feng X. Characteristics, Accumulation, and Potential Health Risks of Antimony in Atmospheric Particulate Matter. *ACS Omega*. 2021, vol. 6, no. 14, pp. 9460–9470. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c06091>
5. U. S. Environmental Protection Agency. *National air pollutant emission trends, 1900–1998*. 2000. Available at: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/2000ETJA.PDF?Dokey=2000ETJA.PDF> (accessed 10 February 2022).
6. Tian H., Zhao D., Cheng K., Lu L., He M., Hao J. Anthropogenic Atmospheric Emissions of Antimony and Its Spatial Distribution Characteristics in China. *Environmental science & technology*. 2012, vol. 46, pp. 3973–3980. <https://doi.org/10.1021/es2041465>
7. Zhang Y., Ding C., Gong D., Deng Y., Huang Y., Zheng J., Xiong S., Tang R., Wang Y., Su L. A review of the environmental chemical behavior, detection and treatment of antimony. *Environmental Technology & Innovation*. 2021, vol. 24, pp. 102026. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.102026>
8. Tian H. Z., Zhou J., Zhu C., Zhao D., Gao J., Hao J., He M., Liu K., Wang K., Hua S. A Comprehensive Global Inventory of Atmospheric Antimony Emissions from Anthropogenic Activities, 1995–2010. *Environmental science & technology*. 2014, vol. 48, pp. 10235–10241. <https://doi.org/10.1021/es405817u>
9. Tian H. Z., Zhu C. Y., Gao J. J., Cheng K., Hao J. M., Wang K., Hua S. B., Wang Y., Zhou J. R. Quantitative assessment of atmospheric emissions of toxic heavy metals from anthropogenic sources in China: historical trend, spatial distribution, uncertainties, and control policies. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2015, vol. 15, pp. 10127–10147. <https://doi.org/10.5194/acp-15-10127-2015>
10. Li J., Zheng B., He Y., Zhou Y., Chen X., Ruan S., Yang Y., Dai C., Tang L. Antimony contamination, consequences and removal techniques: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2018, vol. 156, pp. 125–134. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.03.024>
11. Nriagu J. O., Pacyna J. M. Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soils by trace metals. *Nature*, 1988, vol. 333, pp. 134–139. <https://doi.org/10.1038/333134a0>
12. *Mineral commodity summaries 2021*. U. S. Geological Survey. 2021. 200 p. <https://doi.org/10.3133/mcs2021>
13. Pacyna J. M., Pacyna E. G. An assessment of global and regional emissions of trace metals to the atmosphere from anthropogenic sources worldwide. *Environmental Reviews*, 2001, vol. 9, no. 4, pp. 269–298. <http://doi.org/10.1139/a01-012>
14. Zyryanov V. V., Zyryanov D. V. *Fly ash is a man-made raw material*. Moscow: Maska Publ., 2009. 320 p. (in Russian).
15. Yudovich Ya. E., Ketris M. P. *Valuable Trace Elements in Coals*. Ekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2006. 538 p. (in Russian).
16. Filby R. H., Olsen S. D. A comparison of INAA and ICP-MS for trace element determination in petroleum geochemistry. *Journal of Radioanalytical Chemistry*, 1994, vol. 180, pp. 285–294.

17. Iijima A., Sato K., Fujitani Y., Fujimori E., Saito Y., Tanabe K., Ohara T., Kozawa K., Furuta N. Clarification of the predominant emission sources of antimony in airborne particulate matter and estimation of their effects on the atmosphere in Japan. *Environmental Chemistry* 2009, vol. 6, no. 2, pp. 122–132. <http://doi.org/10.1071/EN08107>

18. Gómez D. R., Fernanda Gine M., Sanchez Bellato A. C., Smichowski P. Antimony: a traffic-related element in the atmosphere of Buenos Aires, Argentina. *Journal of Environmental Monitoring*. 2005, vol. 7, pp. 1162–1168. <http://doi.org/10.1039/b508609d>

19. Bukowiecki N., Lienemann P., Hill M., Figi R., Richard A., Furger M., Rickers K., Falkenberg G., Zhao Y., Cliff S. S., Prevot A. S., Baltensperger U., Buchmann B., Gehrig R. Real-world emission factors for antimony and other brake wear related trace elements: size-segregated values for light and heavy duty vehicles. *Environmental Science & Technology*. 2009, vol. 43, no. 21, pp. 8072–8. <http://doi.org/10.1021/es9006096>

20. *National Emissions Inventory (NEI)*. 2022. Available at: <https://www.epa.gov/air-emissions-inventories/national-emissions-inventory-nei> (accessed 1 March 2022).

21. Kitto, M. E. Trace-element patterns in gasolines for use in source apportionment. *Air&Waste*, 1993, vol. 43, pp. 10. <http://doi.org/10.1080/1073161X.193.10467213>

22. Iijima A., Sato K., Yano K., Kato M., Kozawa K., Furuta N. Emission factor for antimony in brake abrasion dusts as one of the major atmospheric antimony sources. *Environmental science & technology*. 2008, vol. 42, no. 8, pp. 2937–2942. <https://doi.org/10.1021/es702137g>

23. *2019/2020 Data within Australia – Antimony & compounds from all sources*. Available at: <http://www.npi.gov.au/npidata/action/load/summary-result/criteria/destination/ALL/substance/10/source-type/ALL/substance-name/Antimony%2B%2526%2Bcompounds/subthreshold-data/Yes/year/2020> (accessed 10 April 2022).

24. Fan J., Wang Y. Atmospheric Emissions of As, Sb, and Se from Coal Combustion in Shandong Province, 2005–2014. *Polish Journal of Environmental Studies*. 2016, vol. 25, no. 6, pp. 2339–2347. <https://doi.org/10.15244/pjoes/63656>

25. Zhou J., Tian H., Zhu C., Hao J., Gao J., Wang Y., Xue Y., Hua S., Wang K. Future trends of global atmospheric antimony emissions from anthropogenic activities until 2050. *Atmospheric Environment*, 2015, vol. 120, pp. 385–392. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.09.018>

26. Bagherifam S., Brown T. C., Fellows C. M., Naidu R. Bioavailability of Arsenic and Antimony in Terrestrial Ecosystems: A Review. *Pedosphere*, 2019, vol. 29, no. 6, pp. 681–720. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(19\)60843-X](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(19)60843-X)

### Информация об авторах

*Какарека Сергей Витальевич* – д-р техн. наук, профессор, зав. лаб. Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, Минск, Республика Беларусь). E-mail: [sk001@yandex.ru](mailto:sk001@yandex.ru). <https://orcid.org/0000-0002-4267-0948>

*Кухарчик Тамара Иосифовна* – д-р географ. наук, доцент, гл. науч. сотрудник. Институт природопользования Национальной академии наук Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, Минск, Республика Беларусь). E-mail: [tkukharchyk@gmail.com](mailto:tkukharchyk@gmail.com). <https://orcid.org/0000-0003-3434-1244>

### Information about the authors

*Kakareka Sergey V.* – D. Sc. (Engineering), Professor, Head of the Laboratory. Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, Skoriny str., 220076, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: [sk001@yandex.ru](mailto:sk001@yandex.ru). <https://orcid.org/0000-0002-4267-0948>

*Kukharchyk Tamara I.* – D. Sc. (Geography), Associate Professor, Chief Researcher. Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, Skoriny str., 220076, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: [tkukharchyk@gmail.com](mailto:tkukharchyk@gmail.com). <https://orcid.org/0000-0003-3434-1244>