

УДК 91

**ПОТОКИ СВИНЦА И КАДМИЯ ИЗ АТМОСФЕРЫ НА ПОВЕРХНОСТЬ  
НА ЕВРОПЕЙСКОЙ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ – ПО ДАННЫМ  
МЕЖДУНАРОДНОЙ ПРОГРАММЫ ЕМЕР**

**Виноградова А.А.**

*ФГБУН Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва,  
e-mail: anvinograd@yandex.ru*

Оценены средние для 2000-х годов потоки свинца и кадмия из атмосферы на поверхность в разных районах ЕТР, их внутригодовые вариации. В большинстве районов в годовых потоках свинца и кадмия на поверхность преобладают собственные антропогенные потоки от российских источников. Только для западных районов ЕТР годовые трансграничные (от европейских и других стран, включенных в анализ Программы ЕМЕР) и ветровые потоки превышают российские. Суммарные среднегодовые потоки на поверхность составляют  $(0,8 \pm 0,1)$  кгPb/км<sup>2</sup>/год и  $(0,030 \pm 0,005)$  кгCd/км<sup>2</sup>/год в центральной части ЕТР и примерно вдвое меньше в северных районах. Внутригодовые различия между зимними и летними суммарными потоками для каждого металла не превышают 2-3 раза. Сравнение с экспериментальными результатами других авторов показывает разумное соответствие полученных нами оценок, учитывая значительные межгодовые и пространственные вариации изучаемых характеристик. Полученные оценки могут быть использованы для сравнения с результатами модельных расчетов и экспериментальных наблюдений, а также для экономических и экологических оценок, анализа прогнозов и рисков.

**Ключевые слова:** окружающая среда, тяжелые металлы, антропогенное загрязнение, трансграничный атмосферный перенос, ветровое поднятие с поверхности

**LEAD AND CADMIUM FLUXES FROM ATMOSPHERE ONTO THE SURFACE IN  
EUROPEAN RUSSIA – FROM EMEP DATA**

**Vinogradova A.A.**

*A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow, e-mail: anvinograd@yandex.ru*

Annual Pb and Cd fluxes from atmosphere onto the surface (with their seasonal variations) were assessed for different regions of European Territory of Russia (ETR) in the mean for the 2000s. Own anthropogenic fluxes from Russian sources are prevailing almost on the whole ETR. Transboundary (from other countries) fluxes and wind (re-suspended from the surface) ones are higher only in the west regions. Total annual fluxes are  $(0,8 \pm 0,1)$  kgPb/km<sup>2</sup>/yr and  $(0,030 \pm 0,005)$  kgCd/km<sup>2</sup>/yr in the central parts of ETR, but they are two times less in the northern regions. Variations in a year between summer fluxes and winter ones for both metals are not higher than by 2-3 times. Comparison with experimental measured values (from other authors) shows our results quite reasonable, especially taking in mind sizable variations of fluxes under investigation in space and time. Our estimates may be used to compare with other modeled or measured results, as well as for economic and ecological analysis, forecasting or risk assessments.

**Keywords:** environment, heavy metals, transboundary atmospheric transport, anthropogenic pollution, wind resuspension from the surface

С точки зрения экологии свинец (Pb) и кадмий (Cd) являются химическими элементами первого класса опасности для человека и окружающей среды. Однако, как элементы терригенного происхождения, в естественных природных средах они содержатся в микро-количествах в соответствии с составом земной коры и почв. В густонаселенной Европе аэрозольные свинец и кадмий – микроэлементы как терригенного, так и антропогенного происхождения. При этом над каждой страной состав аэрозоля формируется в результате воздействия антропогенных источников самой страны, других стран (трансграничный перенос загрязнений), а также в результате ветрового поднятия и дальнейшего осаждения частиц пыли и почв, которые также могут частично содержать и антропогенные загрязнения.

Основное направление европейской международной научной программы ЕМЕР (European Monitoring and Evaluation

Programme) [8] состоит именно в оценке антропогенного воздействия стран Европы на окружающую среду, а также друг на друга. После 2009 года территория анализа ЕМЕР была расширена на ближайшие страны Азии, в том числе на азиатскую часть России, страны Закавказья, Средней Азии. В рамках ЕМЕР каждый год рассчитываются концентрации тяжелых металлов (ТМ) – Pb, Cd, Hg – в воздухе и их потоки на подстилающую поверхность в среднем для территории каждой страны, в том числе и потоки ТМ «страна на страну». При этом используются модельные подходы, учитывающие временную изменчивость атмосферной циркуляции, а также данные об эмиссиях в атмосферу рассматриваемых ТМ странами-участницами ЕМЕР (обобщение официальной статистики стран-участниц и результатов инвентаризации источников эмиссий в рамках самой ЕМЕР). Модельные оценки распространения ТМ в атмосфере и осаждения их на поверхность

выполняются Метеорологическим синтезирующим центром «Восток» (MSC-E), который ежегодно публикует соответствующие отчеты ЕМЕР на своем сайте [6].

Кроме того, ЕМЕР проводит собственный реальный мониторинг состава атмосферы в различных точках изучаемой территории. Систематические сопоставления экспериментально измеренных и рассчитанных потоков антропогенных ТМ позволили достаточно грубо оценить вклад процесса ветрового поднятия и перевевания частиц пыли и почвы в формирование суммарного потока ТМ на поверхность над различными территориями в пределах ЕМЕР.

В [2, 7] нами уже была показана перспективность использования данных ЕМЕР для оценок среднего антропогенного воздействия со стороны стран Европы на небольшие европейские районы – на примере Калининградской области и района Костомукшского заповедника в Карелии.

В настоящей работе, в отличие от предыдущих, оценки по результатам ЕМЕР делаются для разных районов ЕТР, площадь которой превышает площадь любой европейской страны. Вводя некоторые допущения о внутригодовых вариациях процессов формирования состава аэрозоля, рассчитываются возможные различия потоков свинца и кадмия на поверхность в холодное и теплое полугодия.

#### Подход к оценкам и данные ЕМЕР

Средние данные об антропогенных потоках ТМ на большую территорию ЕТР невозможно использовать для оценок антропогенного воздействия в конкретных областях и регионах. Хотя довольно очевидно, что средние оценки (приведенные к единице площади) могут грубо характеризовать средние годовые вертикальные потоки в фоновых (удаленных от источников этих металлов) районах центра ЕТР, поскольку площади источников антропогенных ТМ значительно меньше площади фоновых районов.

Наши оценки выполнены для шести условных зон ЕТР, расположенных по три

в двух широтных полосах: севернее 60° с.ш. (N) и примерно от 52° с.ш. до 60° с.ш. (M). Две западные зоны прижаты к западной границе России: северная (N1) граничит с Финляндией, а центральная (M1) – с Беларуссией, Латвией и Эстонией. Две восточные зоны (N2 и M2) расположены симметрично западным и примыкают к границе между Европой и Азией в соответствующих широтах. Две центральные зоны (N0) и (M0) расположены примерно посередине между соответствующими западными и восточными парами (приблизительно по меридиану на север от Пензы).

Для расчетов использовались таблицы количественных оценок годовых потоков антропогенных свинца (Pb) и кадмия (Cd) «страна на страну», а также данные о ветровых потоках ТМ на поверхность – для 2003-09 гг. из отчетов MSC-E [6] 2005-11 годов, соответственно. Межгодовая изменчивость исходных значений всех трех потоков велика, что обусловлено реальными различиями антропогенных эмиссий ТМ, метеорологических параметров и условий циркуляции атмосферы, а также изменением методики расчетов в рамках самой программы ЕМЕР в рассматриваемый период. Ветровые потоки W свинца и кадмия на поверхность в отчетах MSC-E не приведены численно, а лишь в виде гистограмм средних величин ветрового потока на единицу площади для каждой страны, что снижает точность считывания информации. Поэтому сначала все расчеты проводились нами для каждого года, а затем результаты усреднялись по семи годам.

#### Антропогенные потоки

Для наших оценок взяты годовые потоки на ЕТР в целом от источников самой ЕТР ( $F_R$ ) и от всех стран, включенных в систему анализа ЕМЕР, (F). При делении на площадь ЕТР (S) эти величины дают антропогенные потоки на единицу площади поверхности – российский (D) от самой ЕТР и трансграничный (T) от остальных стран:

$$D = F_R / S; T = (F - F_R) / S. \quad (1)$$

Таблица 1

Исходные данные по годовым потокам Pb и Cd на поверхность для трех зон ЕТР, рассчитанные по данным ЕМЕР, и стандартные отклонения их межгодовых вариаций, мкг/км<sup>2</sup>/год.

	Зона на ЕТР	Российский, D	Трансграничный, T	Ветровой, W
Свинец	N1	0,041 ± 0,031	0,101 ± 0,062	0,17 ± 0,04
	M1	0,069 ± 0,055	0,37 ± 0,22	0,44 ± 0,07
	M0	0,37 ± 0,35	0,13 ± 0,08	0,16 ± 0,09
Кадмий	N1	0,0021 ± 0,0011	0,0046 ± 0,0019	0,0031 ± 0,0016
	M1	0,0041 ± 0,0014	0,017 ± 0,006	0,0088 ± 0,0028
	M0	0,016 ± 0,007	0,0043 ± 0,0021	0,0047 ± 0,0017

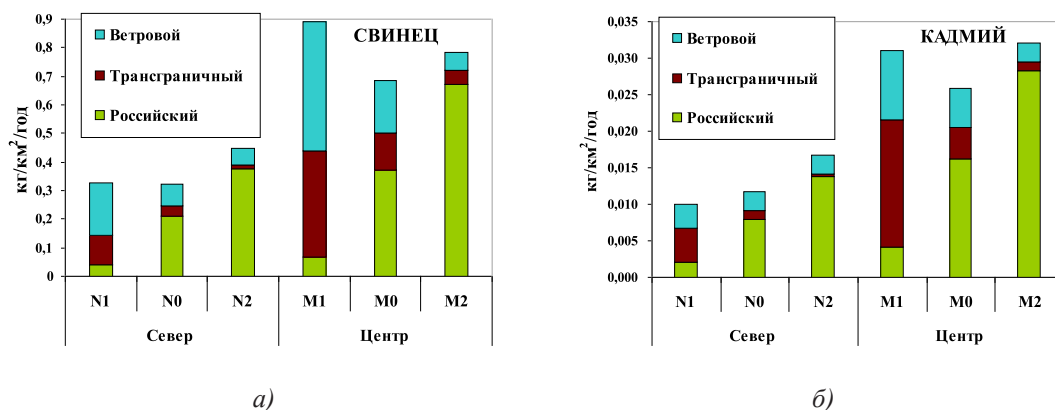


Рис. 1. Годовые потоки свинца (а) и кадмия (б) разного происхождения (и их сумма) на территориях шести зон ЕТР (см. текст)

Эти значения присваиваются зоне М0 – как оценки российского и трансграничного потоков для фоновых районов центральной части ЕТР.

Учитывая, что площади сопредельных на западной границе стран Z (Эстония, Латвия, Беларусь и Финляндия) малы по сравнению с площадью ЕТР, можно считать, что потоки ТМ (на единицу площади) на западной границе России примерно равны средним потокам на территориях этих стран. Тогда, используя величины потоков ТМ на каждую из четырех стран от ЕТР ( $F_{RZ}$ ) и от всех стран ( $F_Z$ ), по формулам (1) получим собственный российский ( $D_Z$ ) и трансграничный ( $T_Z$ ) потоки на поверхность вблизи границы ЕТР с этими странами. В качестве оценок антропогенных потоков (российского и трансграничного) для зоны N1 рассматриваем потоки  $D_Z$  и  $T_Z$ , рассчитанные для Финляндии, а для зоны M1 – результаты усреднения потоков  $D_Z$  и  $T_Z$ , рассчитанных для трех стран Z (Эстония, Латвия и Беларусь).

Мы исключили из анализа южные районы ЕТР, поскольку развитая в работе методика в этом случае должна опираться на результаты ЕМЕР для большого количества более южных стран с менее надежными оценками как эмиссий ТМ в атмосферу, так и их потоков на поверхность.

Полученные таким образом значения российского D и трансграничного T потоков в трех стартовых зонах (табл. 1) экстраполируются на оставшиеся три зоны, учитывая преимущественно западный перенос воздушных масс в рассматриваемых широтах Северного полушария. Для восточной зоны M2:

$$D^{M2} = 2D^{M0} - D^{M1}; T^{M2} = (T^{M0} \times T^{M0}) / T^{M1}. \quad (2)$$

Для северных зон трансграничные потоки (и российские  $D^{N0}$  и  $D^{N2}$  аналогично):

$$T^{N0} = (T^{N1} \times T^{M0}) / T^{M1}; T^{N2} = (T^{N0} \times T^{M2}) / T^{M0}. \quad (3)$$

### Ветровые потоки

Значения ветровых потоков W свинца и кадмия присваиваются рассматриваемым стартовым зонам так же, как антропогенные потоки (табл. 1): средний ветровой поток для всей ЕТР – зоне M0, для Финляндии – зоне N1, усредненный для трех приграничных стран Z – зоне M1.

Экстраполяция значений ветрового потока на три оставшиеся зоны не проводилась, поскольку нет никаких разумных физических механизмов, которые бы связывали ветровые потоки на разных территориях ЕТР. Три оставшиеся зоны (N0, N2, M2) удалены от крупных промышленных районов, характеризуются сходными климатическими условиям и имеют поверхность, преимущественно покрытую лесом. Мы предположили для них равные значения ветрового потока каждого металла, несколько меньшие среднего значения для ЕТР, присвоенного зоне M0 (табл. 1 и рис. 1).

### Сопоставление годовых потоков разного происхождения

В среднем по ЕТР (зона M0) в годовых потоках свинца и кадмия чуть больше половины составляют собственные российские антропогенные потоки – рис. 1. Трансграничный поток важен для западных районов ЕТР, но преобладающим он является только для кадмия, а для свинца там больше вклад ветрового потока, который, по-видимому, содержит значительную долю ТМ антропогенного происхождения. На востоке ЕТР абсолютно преобладают антропогенные потоки ТМ от собственных российских источников.

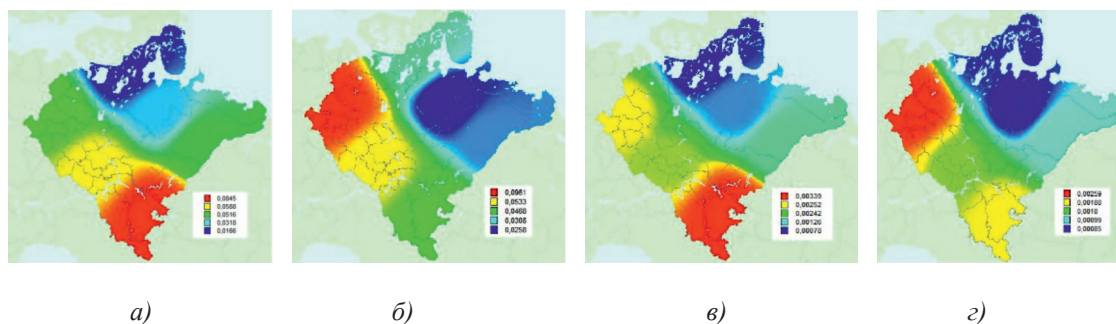


Рис. 2. Среднемесячные потоки свинца (а, б) и кадмия (в, з) на поверхность в разных зонах ЕТР для холодного (а, в) и теплого (б, з) полугодий

Получены следующие средние оценки суммарных годовых потоков свинца и кадмия из атмосферы на поверхность ЕТР в 2000-х годах: на севере (полоса N) 0,37 кгPb/км<sup>2</sup>/год и 0,013 кгCd/км<sup>2</sup>/год; в центральной полосе (M) 0,79 кгPb/км<sup>2</sup>/год и 0,030 кгCd/км<sup>2</sup>/год. Ориентируясь на данные табл. 1, можно утверждать, что межгодовые вариации могут превышать 100% от средних величин. Однако в пределах каждой полосы относительное стандартное отклонение не превышает 20–30% для северных районов и вдвое меньше – для центральных (за счет больших средних величин).

#### Внутригодовые изменения потоков ТМ

Как показывают наши предыдущие работы [1, 4], потоки антропогенных ТМ на поверхность качественно могут меняться в течение года чрезвычайно разнообразно в различных фоновых районах севера ЕТР. Характер этих вариаций определяется как расположением источников ТМ, так и природными (климатическими и метеорологическими) особенностями конкретного региона. При этом в большинстве случаев внутригодовые изменения потока антропогенного ТМ вписываются между двумя основными граничными ситуациями: (I) в холодную половину года поток примерно на порядок выше, чем в теплую; (II) потоки холодного и теплого полугодий примерно равны друг другу. Вблизи источников летние потоки могут оказаться больше зимних, и, наоборот, в очень удаленных районах, например, на крайнем севере ЕТР, летом потоки антропогенных ТМ могут быть меньше зимних на два и более порядков.

Для этих крайних случаев, исходя из величины D годового российского потока для каждой рассматриваемой зоны, получим выражения для расчетов среднемесячных потоков для зимнего ( $D^W$ ) и летнего ( $D^S$ ) полугодий:

#### Схема I:

$$D^W = (10/66) \times D;$$

$$D^S = (1/66) \times D + (1/6) \times W \quad (4)$$

#### Схема II:

$$D^W = (1/12) \times D;$$

$$D^S = (1/12) \times D + (1/6) \times W. \quad (5)$$

Аналогично вычисляются зимние и летние трансграничные потоки –  $T^W$  и  $T^S$ .

Результаты усреднения оценок по формулам (4) и (5) показаны на рис. 2, по которому можно сравнить изменения среднего уровня загрязненности окружающей среды различных районов ЕТР в течение года. Диапазон наиболее вероятных изменений величин потоков Pb и Cd для холодного и теплого полугодий (сравнивая результаты для схем I и II) не превышает 2–3 раз, но более точные количественные оценки сильно зависят от неопределенностей введенных нами пространственных изменений трех составляющих суммарных потоков ТМ.

Заметим также, что при введенных нами величинах ветровых потоков в фоновых районах ЕТР (табл. 1 и рис. 1) летние потоки Pb и Cd на поверхность, имеющие в это время в значительной степени ветровую природу, преобладают над российскими и трансграничными потоками повсеместно, за исключением восточных районов. А для кадмия летом – и в центральных районах ЕТР ветровая составляющая потока на поверхность примерно равна потоку от российских источников.

#### Сравнения с результатами других авторов

К сожалению, данных для сравнения полученных оценок с реально измеренными величинами очень мало. Из табл. 2 видно, что в районах ЕТР, заведомо удаленных от антропогенных источников ТМ, вели-

чины антропогенных российских потоков значительно превышают результаты более ранних модельных оценок [4], особенно для кадмия. Скорее всего, это связано с разными исходными данными по антропогенным эмиссиям ТМ в атмосферу, на которых основаны оценки MSC-E и [4]. Наоборот, суммарные годовые потоки ТМ неплохо соответствуют измеренным величинам, особенно для свинца.

внутригодовые изменения потоков каждого ТМ не превышают 2-3 раз.

Полученные оценки разумно соответствуют экспериментально измеренным другими авторами потокам свинца и кадмия из атмосферы на поверхность в изучаемых районах ЕТР, учитывая значительные межгодовые и пространственные вариации.

Приведенные оценки могут быть использованы для сравнения с результатами

**Таблица 2**

Сравнение полученных оценок с результатами других авторов, потоки за год или месяц, мкг/м<sup>2</sup>

Металл	Оценки данной работы	Данные сравнения	Комментарии
Свинец	30–400 *	0,45–30	Удаленные районы севера ЕТР. Расчеты, 2000-е
	300 **	110–260	Карелия (разброс по территории). Измерения, 1996
	15–45 ***	30–50	Архангельская обл. Измерения, 2004-05
Кадмий	2–13 *	0,03–0,2	Удаленные районы севера ЕТР. Расчеты, 2000-е
	10 **	50–90	Карелия (разброс по территории). Измерения, 1996
	0,5–1,5 ***	3–11	Архангельская обл. Измерения, 2004-05

Примечания. \* Российский поток за год [1,4]. \*\* Суммарный поток за год [5]. \*\*\* Суммарный поток за месяц в теплом полугодии (по концентрациям в осадках из [3]).

Довольно низкие оценки потоков Сd на поверхность для зоны N1 по сравнению с измеренными – как в целом за год в Карелии [5], так и отдельно по месяцам в теплом полугодии в Архангельской обл. [3] могут объясняться более высоким вкладом реальных ветровых потоков, чем предполагалось в расчетах.

### Выводы

Показано, что в большинстве районов ЕТР в годовых потоках свинца и кадмия на поверхность преобладают собственные антропогенные потоки от российских источников. Для западных районов ЕТР годовые трансграничные и ветровые (перевание почв и пыли) потоки превышают российские. Суммарные среднегодовые потоки на поверхность составляют  $(0,8 \pm 0,1)$  кгPb/км<sup>2</sup>/год и  $(0,030 \pm 0,005)$  кгCd/км<sup>2</sup>/год в центральной части ЕТР и примерно вдвое меньше в северных районах.

В отношении внутригодовых изменений потоков ТМ на поверхность характерны следующие качественные тенденции: для свинца – на западе ЕТР летние потоки выше зимних, в центре ЕТР они примерно равны друг другу, а на востоке, наоборот, летом потоки на поверхность ниже, чем зимой; для кадмия – на западе ЕТР летние потоки примерно равны зимним, в центре ЕТР зимой потоки выше летних, а на востоке эта разница ещё увеличивается. В целом

модельных расчетов и экспериментальных наблюдений, а также для оценок экономических и экологических прогнозов и рисков.

**Благодарности:** Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 14-05-00059.

### Список литературы

1. Виноградова А.А. Дистанционная оценка влияния загрязнения атмосферы на удаленные территории // Геофизические процессы и биосфера. – 2014. – Т. 13. № 4. – С. 5–20.
2. Виноградова А.А., Иванова Ю.А. Антропогенное загрязнение природных сред в районе Костомукшского заповедника (Карелия) при дальнем переносе аэрозольных примесей в атмосфере // Оптика атмосферы и океана. – 2011. – Т. 24. № 6. – С. 493–501.
3. Виноградова А.А., Котова Е.И. Изменчивость содержания металлов в атмосферных осадках и в водах озер на северо-западе России // Экология. Экономика. Информатика (6-11 сентября 2015). Сборник статей в 2 т. Южный федеральный университет: Изд-во Южного федерального университета. Ростов-на-Дону, 2015. Т. 1: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем, 2015. – С. 86–95. ISBN 978-5-9275-1643-8.
4. Виноградова А.А., Котова Е.И., Топчая В.Ю. Атмосферный перенос антропогенных тяжелых металлов в северные районы европейской России // География и природные ресурсы. – 2015. В печати.
5. Лозовик П.А., Потапова И.Ю. Поступление химических веществ с атмосферными осадками на территорию Карелии // Водные ресурсы. – 2006. – Т. 33. № 1. – С. 111–118.
6. Метеорологический синтезирующий центр «Восток» URL: <http://www.msceast.org>
7. Топчая В.Ю., Виноградова А.А. Антропогенная нагрузка свинцом и кадмием на окружающую среду Калининградской области РФ – по данным программы ЕМЕП // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 12–7. – С. 1463–1467. URL: [www.rae.ru/fs/?section=content&op=show\\_article&article\\_id=10005652](http://www.rae.ru/fs/?section=content&op=show_article&article_id=10005652)
8. European Monitoring and Evaluation Programme (EMEP). URL: <http://www.emep.int>