

## РЕГИОНАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИЗУЧЕНИЯ ПРИРОДЫ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ

УДК 550.462; 551.510.42

DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2017-1(108-116)

**А. А. ВИНОГРАДОВА\***, **Е. И. КОТОВА\*\***, **В. Ю. ТОПЧАЯ\*\*\***

\*Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН, Пыжевский пер., 3, Москва, 119017, Россия, [anvinograd@yandex.ru](mailto:anvinograd@yandex.ru)

\*\*Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики РАН, ул. Садовая, 3, Архангельск, 163000, Россия, [ecopp@yandex.ru](mailto:ecopp@yandex.ru)

\*\*\*Атлантическое отделение Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН, пр. Мира, 1-3, Калининград, 236022, Россия, [piwis@mail.ru](mailto:piwis@mail.ru)

### АТМОСФЕРНЫЙ ПЕРЕНОС ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В РАЙОНЫ СЕВЕРА ЕВРОПЕЙСКОЙ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

*Проанализированы десятилетние (2001–2010 гг.) закономерности в процессах дальнего переноса воздушных масс и тяжелых металлов к пяти пунктам севера европейской территории России. Рассмотрены пространственные и сезонные различия этих процессов. Использованы метод статистики обратных траекторий переноса воздушных масс и модельное описание дальнего переноса тяжелых металлов на субмикронных аэрозольных частицах. Выявлены наиболее значимые источники тяжелых металлов в разные сезоны для различных районов — промышленные центры Мурманской и Архангельской областей, а также более удаленные Свердловская, Ленинградская, Вологодская области, города Киров, Пермь, Норильск. Оценены средние показатели антропогенного загрязнения окружающей среды в фоновых районах Мурманской и Архангельской областей вдали от источников эмиссий. Полученные оценки для свинца и кадмия разумно соответствуют имеющимся измерениям. Показано, что в рассматриваемых районах только при очень высоких отношениях зимней антропогенной концентрации тяжелых металлов к летней (выше 170, что соответствует примерно 50 % случаев) можно в теплое время года пренебречь антропогенным воздействием на окружающую среду. В противном случае на не покрытую снегом поверхность почв и водоемов может осаждаться от 14 до 45 % антропогенного годового потока тяжелых металлов из атмосферы. Выявлено, что сочетание эффективностей источников и стоков при дальнем атмосферном переносе ТМ приводит к неоднородному загрязнению рассматриваемой территории, что должно учитываться при выборе так называемых фоновых (малозагрязненных) районов отдельно для каждой рассматриваемой примеси.*

Ключевые слова: окружающая среда, атмосфера, аэрозоли, антропогенное загрязнение, метод статистики траекторий, север европейской территории России.

**A. A. VINOGRADOVA\***, **E. I. KOTOVA\*\***, **V. Yu. TOPCHAYA\*\*\***

\*A. M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, per. Pyzhevsky, 3, Moscow, 119017, Russia, [anvinograd@yandex.ru](mailto:anvinograd@yandex.ru)

\*\*Federal Research Center for a comprehensive study of the Arctic RAS, ul. Sadovaya, 3, Archangel'sk, 163000, Russia, [ecopp@yandex.ru](mailto:ecopp@yandex.ru)

\*\*\*Atlantic Branch of the P.P. Shirshov Institute of Oceanology RAS, pr. Mira, 1-3, Kaliningrad, 236022, Russia, [piwis@mail.ru](mailto:piwis@mail.ru)

### ATMOSPHERIC TRANSPORT OF HEAVY METALS TO REGIONS OF THE NORTH OF THE EUROPEAN TERRITORY OF RUSSIA

*We examine the decadal (2001–2010) regularities in the processes of distant transport of air masses and heavy metals (HM) to five locations in the North of the European territory of Russia. The spatial and seasonal differences in these processes*

are considered. We use the back trajectories statistical method for the transport of air masses, and a model description of the distant transport of HM on submicron aerosol particles. The study revealed the most significant HM sources metals in different seasons for different regions, namely the industrial centers of Murmansk and Arkhangelsk oblasts, as well as the more distant Sverdlovsk, Leningrad and Vologda oblasts, and the cities of Kirov, Perm and Norilsk. The mean indicators of anthropogenic environmental pollution in the background areas of Murmansk and Arkhangelsk oblasts at a large distance from the emission sources were analyzed. The estimates obtained for lead and cadmium are in a reasonable agreement with available measurements. It is shown that it is only with high winter-summer ratios of anthropogenic HM concentration (higher than 170, which corresponds to about 50 % of cases) that anthropogenic impacts on the environment in a warm season can be neglected in the areas under consideration. Otherwise 14 to 45 % of the anthropogenic annual HM flux from the atmosphere can be deposited on the snow-free soils and water basins. It is found that a combination of the effectivenesses of sources and sinks during the distant transport of HM leads to uneven pollution of the territory under consideration, and this should be taken into account when selecting so-called background (low-pollution) areas separately for each pollutant involved.

Keywords: environment, atmosphere, aerosols, anthropogenic pollution, trajectory statistical method, North of the European territory of Russia.

## ВВЕДЕНИЕ

Загрязнение окружающей среды удаленных территорий при дальнем распространении примесей в атмосфере уже многие годы представляет собой ключевую проблему в сфере рационального природопользования, экологической и экономической политики. Воздушные массы могут за несколько суток переносить вещества на расстояния в тысячи километров [1, 2]. В результате даже самые удаленные от источников загрязнений территории (Арктика и Антарктика) не защищены полностью от антропогенного воздействия [3, 4]. Последствия распространения примесей в атмосфере и их осаждения на подстилающую поверхность выражаются в накоплении загрязняющих веществ в наземных природных объектах (вода, снег, лед, почва, растения и т. д.) [5, 6].

В последние годы состоянию природы Арктики уделяется особое внимание в связи с важностью этого региона в процессе формирования глобального климата Земли [7–9]. Однако целый ряд региональных и даже локальных проблем может также быть связан с атмосферным переносом различных примесей (засоление почв, песчаные бури, дымовые шлейфы и т. д.) [10, 11]. Ярким примером этого является трансграничный перенос веществ из одной страны Европы в другую [12], который изучается в рамках международной программы ЕМЕР — European Monitoring and Evaluation Programme (<http://www.emep.int/>). В результате чисто геофизические процессы и явления оказываются определяющими для принятия важных решений в сфере геополитики.

Нами проанализированы многолетние закономерности и сезонные особенности процессов дальнего переноса воздушных масс и аэрозольных примесей к некоторым пунктам севера европейской территории России (ЕТР). При изучении распространения тяжелых металлов (ТМ) от российских источников антропогенного загрязнения выявлены наиболее значимые для севера ЕТР в разные сезоны источники ТМ. Кроме того, даны оценки средних показателей антропогенного загрязнения окружающей среды (концентрации ТМ в приземном воздухе и осадках, потоки ТМ на подстилающую поверхность) в так называемых фоновых районах Мурманской и Архангельской областей вдали от источников эмиссий.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе исследования мы изучали атмосферный перенос воздушных масс и антропогенных ТМ к пяти пунктам (импактным районам), расположенным на севере ЕТР вдали от источников загрязнения (рис. 1) — на Кольском полуострове, в Архангельской области, на архипелаге Земля Франца-Иосифа. Был использован метод статистики обратных траекторий, которые рассчитываются с помощью программы HYSPLIT4 на сайте ARL NOAA [13]. Для каждого пункта проанализированы ежедневные пятисуточные обратные траектории движения воздушных масс для января, апреля, июля и октября за 10 лет (2001–2010 гг.). Подход к анализу таких массивов и усовершенствованная методика расчетов переноса примеси подробно описаны в [14, 15]. Пространственное распределение траекторий для каждого месяца за 10 лет показывает среднее распределение воздушных масс, поступающих к пункту наблюдений. Считается, что дальний перенос ТМ в атмосфере происходит на субмикронных аэрозольных частицах в приземном слое перемешивания. Осаждение примеси на поверхность задается в виде экспоненты от времени переноса с константой — скоростью осаждения, которая в нашем подходе считается одинаковой для всех ТМ, но меняется от сезона к сезону. В [15] приведены конкретные значения скорости осаждения в разные сезоны для различных климатических зон, учитывающие свойства поверхности, режим осадков, снегозалегания, количество и качество растительности и т. п.

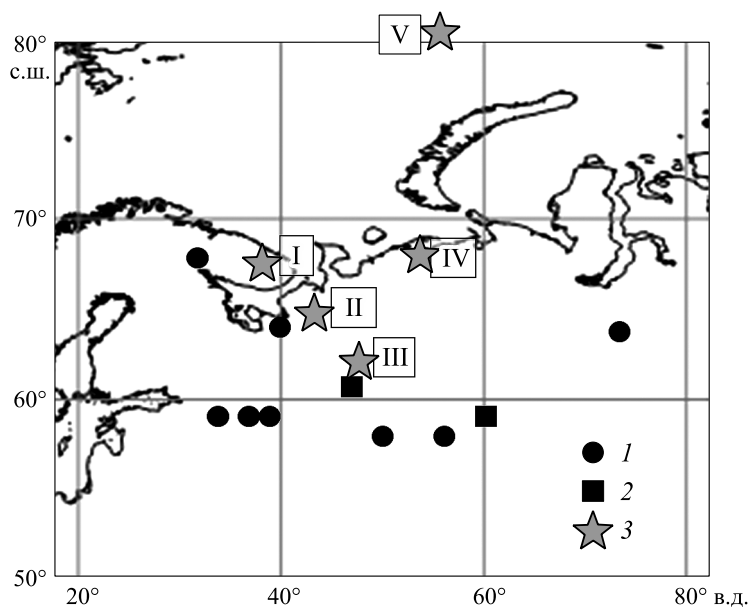


Рис. 1. Схема расположения наиболее значимых источников загрязнения тяжелыми металлами и точек, характеризующих рассматриваемые импактные районы.

I — Кольский п-ов (Кол); Архангельская область: II — центр (Арх\_Ц), III — юго-восток (Арх\_ЮВ); IV — Ненецкий заповедник (НЗ); V — архипелаг Земля Франца-Иосифа (ЗФИ). 1 — города; 2 — регионы; 3 — точки импактных районов.

В результате в каждой зоне летние значения скорости осаждения примеси на порядок и более превосходят зимние. Во время нахождения в воздухе ТМ считаются пассивными примесями в отношении физических и химических преобразований, которые могли бы изменить их скорость осаждения.

Результаты этой части работы выражены в виде набора карт и таблиц пространственных распределений функции чувствительности  $Z$  к эмиссиям ТМ в атмосферу для каждого месяца и каждого пункта. Величина  $Z_{ij}$ , рассчитанная на сетке с ячейками ( $1^\circ \times 1^\circ$ ), показывает, какая доля примеси (в среднем за рассматриваемые годы), эмитированной за секунду в атмосферу с территории ячейки с координатами  $(ij)$ ,  $Q_{ij}$ , оказывается в кубометре приземного воздуха импактного района. Далее вклады всех ячеек  $C_{ij}$  суммируются и концентрация  $C$  примеси в воздухе вычисляется так:

$$C = \Sigma(C_{ij}) = \Sigma(Q_{ij} \times Z_{ij}). \quad (1)$$

Годовые антропогенные выбросы ТМ (свинец, кадмий, мышьяк, цинк, никель, хром и медь) в атмосферу с территории России, полученные по данным официальной статистики РФ для городов и регионов за 2007 и 2010 гг. [16, 17], также были распределены на координатной сетке ( $1^\circ \times 1^\circ$ ) и составили распределения  $Q_{ij}$ , необходимые для расчетов. Для терминологического удобства будем условно называть металлом и мышьяк, поскольку в нашем упрощенном подходе химические свойства переносимых примесей не учитываются. В качестве источников антропогенных ТМ рассмотрены 50 регионов и 83 города России, для которых имеются данные об эмиссии хотя бы одного из перечисленных ТМ. Величина эмиссии региона за вычетом эмиссий конкретных городов внутри региона, для которых имеется информация о выбросах ТМ, присваивалась достаточно грубо условному «центру» региона (соответствующей ячейке) или смещалась к месту расположения предполагаемых источников, не рассмотренных в [16, 17]. Распределять эти выбросы равномерно по территории региона нет оснований, так как антропогенные эмиссии ТМ, конечно, привязаны к городам и промышленным комплексам.

Конечным результатом работы стали оценки средних за 10 лет показателей загрязнения природной среды рассматриваемых пяти районов. Средняя концентрация какого-либо ТМ в воздухе импактного района для каждого месяца вычисляется по формуле (1). Затем, зная скорости осаждения ТМ и климатические характеристики осадков, можно рассчитать средние потоки ТМ на поверхность (в месяц и за год) и концентрации ТМ в снеговой и дождевой воде вблизи рассматриваемых пунктов [15]. Центральные месяцы считаются представительными для каждого сезона в целом, что позволяет анализировать сезонные вариации изучаемых процессов и величин.

### СЕЗОННЫЕ ВАРИАЦИИ АТМОСФЕРНОГО ПЕРЕНОСА ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В РАЗНЫЕ РАЙОНЫ СЕВЕРА ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ

Всего было рассчитано 20 распределений функции чувствительности  $Z$  (четыре сезона для каждого из пяти пунктов). От января к июлю область более эффективного переноса ТМ к импактному району сильно сжимается, что связано с увеличением скорости осаждения примесей на поверхность

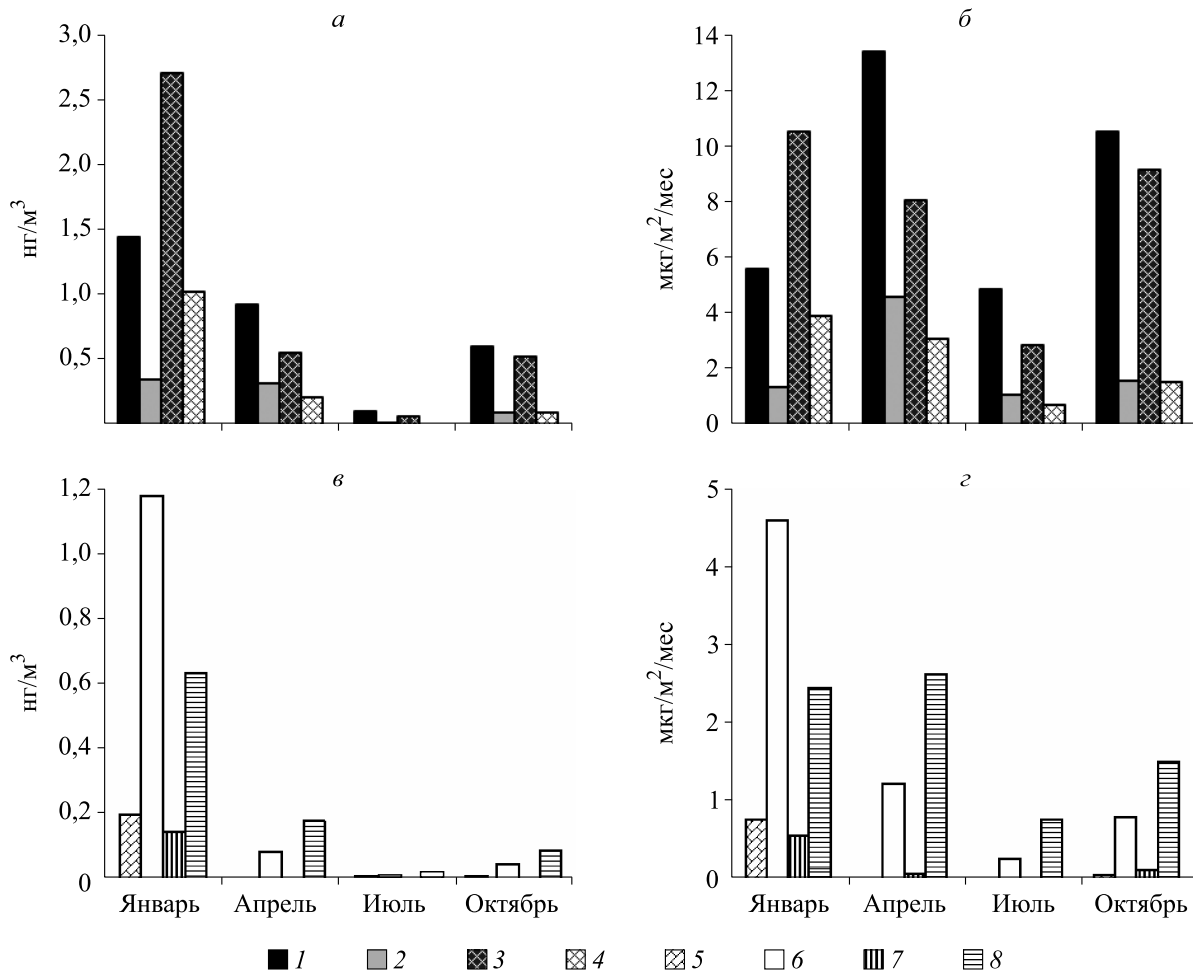
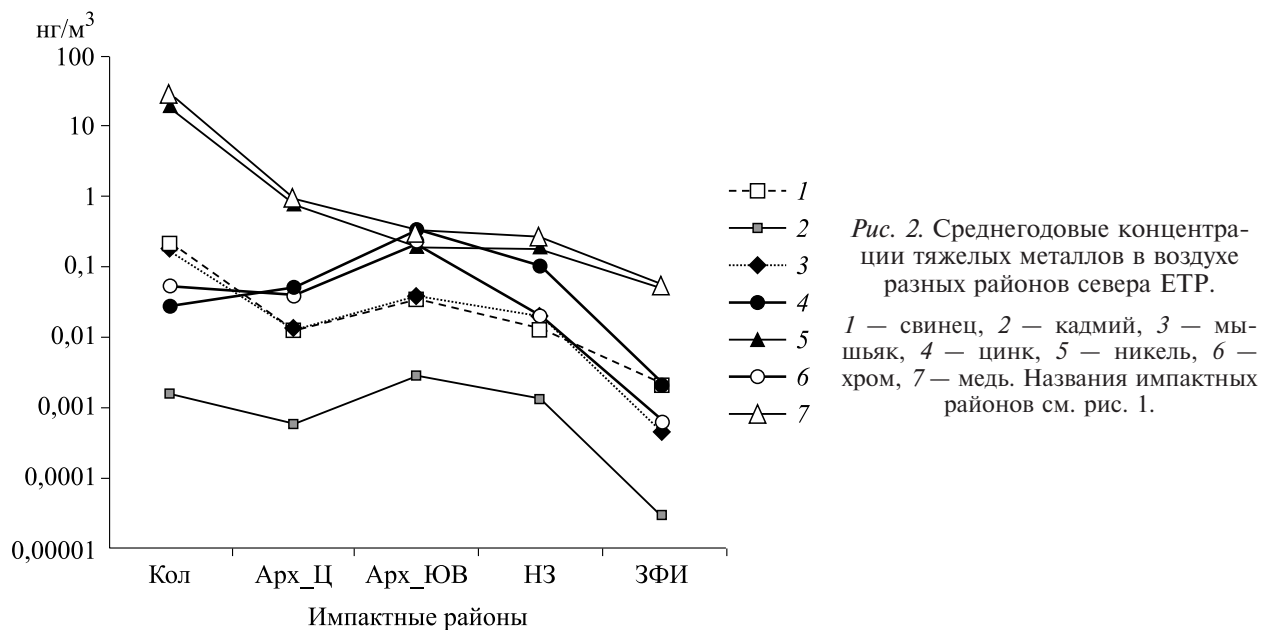
летом по сравнению с зимой. В одном и том же сезоне влияние источников ТМ (значение  $Z$ ) уменьшается по мере удаления от источника. Например, влияние источников Мурманской области уменьшается на два порядка на каждом шаге условного перемещения от пункта I к пункту II и, далее, к пункту III. Распределения  $Z$  для Ненецкого заповедника показаны в [18]. Область эффективного переноса ТМ архипелага Земля Франца-Иосифа включает мало материковых территорий, где расположены источники антропогенного влияния. Однако интересно и важно, имея в виду, например, эмиссии в атмосферу черного углерода (black carbon — BC) — продукта сгорания попутного газа при добыче нефти и газа, что эффективность переноса на архипелаг аэрозольных примесей от источников, которые уже созданы или планируются на шельфе арктических морей, может оказаться достаточно высока.

Можно выделить наиболее значимые источники антропогенных ТМ для каждого из рассматриваемых пяти районов севера ЕТР (см. рис. 1). Из формулы (1) следует, что наибольшим будет вклад от ячеек с высокими значениями эмиссий и/или функции чувствительности  $Z$ , которая резко убывает в теплое время года по сравнению с холодным, а также по мере удаленности от импактного района. Понятно, что состояние окружающей среды в районе пункта I сильно зависит от ближайших источников Мурманской области, это проявляется в загрязнении всеми изучаемыми ТМ. Хотя в январе, когда перенос примесей в атмосфере может быть особенно долгим, важны вклады мощных источников Zn и Cr — Свердловской области и г. Тихвина. Роль последних источников в загрязнении воздуха пункта II еще выше, а вместе с тем увеличивается значимость выбросов ближайшего г. Архангельска и городов Вологодской области (Вологды и Череповца). Для юго-востока Архангельской области (пункт III) источники ТМ совершенно другие: здесь наиболее важны эмиссии от промышленных предприятий Свердловской и Архангельской областей (Cd и As), а также г. Кирова (Zn). Значимое влияние Мурманской области, как и для всех материковых районов севера ЕТР, остается только в отношении загрязнения Ni и Cu. Ненецкий заповедник (пункт IV) имеет свои особенности: здесь также важны мощные удаленные источники Свердловской и Мурманской областей (Cd, Zn и Cr), а весной и осенью в содержание хрома вносит заметный вклад промышленность г. Перми. Самая северная точка V, архипелаг Земля Франца-Иосифа, оказывается под воздействием заполярных источников ТМ, не только Мурманской области, но и района Норильска. Однако и здесь зимой чувствуется вклад удаленной Свердловской области — в загрязнение теми ТМ, которые этот регион выбрасывает в атмосферу в особенно больших количествах (Cd, As, Zn, Cr). Летом на архипелаге значимы выбросы Нового Уренгоя, поскольку загрязнения от более удаленных источников сюда просто не доходят.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Величины среднегодовых концентраций рассматриваемых ТМ в приземном воздухе для пяти районов севера ЕТР представлены на рис. 2. Общий уровень антропогенного загрязнения воздуха на архипелаге Земля Франца-Иосифа на порядок и более ниже, чем в материковых районах. Пункт I (Кольский п-ов) особенно загрязнен никелем и медью, поступающими от предприятий Мурманской области. Высокая мощность выбросов этих источников заметна даже на удаленных островах архипелага. Район юго-востока Архангельской области более других загрязнен цинком и хромом. Также довольно высок уровень средней концентрации цинка в воздухе вблизи Ненецкого заповедника, несмотря на значительную удаленность этого района. Последние два обстоятельства указывают на необходимость осторожного выбора так называемых фоновых районов при различных оценках и сравнениях.

Рассмотрим сезонные вариации концентраций в воздухе и потоков на поверхность двух пар антропогенных металлов: Ni и Cu, а также Zn и Cr — в двух пунктах Архангельской области (II и III). Как отмечалось выше, наиболее значимые источники этих пар металлов в данных районах принципиально различаются. Типичному характеру сезонных изменений концентрации ТМ в воздухе удаленного от источников района соответствует максимум зимой и минимум летом (рис. 3). Это связано с большей эффективностью атмосферного переноса (меньшей скоростью осаждения) примеси над заснеженной холодной поверхностью, чем над этой же поверхностью, но, условно говоря, более «шершавой» и теплой в летнее время года. Однако для величины потока ТМ на поверхность эта закономерность в сезонном ходе не всегда сохраняется, поскольку поток непосредственно определяется количеством и агрегатным состоянием осадков в разные сезоны. Количество жидких осадков, которые наиболее эффективно вымывают аэрозоли (и ТМ вместе с ними) из подоблачного слоя атмосферы, на севере ЕТР всегда максимально летом. Отметим изменение характера годового хода



Никель: 1 — Арх\_Ц, 2 — Арх\_ЮВ; медь: 3 — Арх\_Ц, 4 — Арх\_ЮВ; цинк: 5 — Арх\_Ц, 6 — Арх\_ЮВ; хром: 7 — Арх\_Ц, 8 — Арх\_ЮВ.



потоков никеля по сравнению с годовым ходом его атмосферных концентраций в обоих районах Архангельской области, и то же самое в районе юго-востока области для хрома (см. рис. 3). Увеличение потоков этих металлов в апреле по сравнению с январем связано с появлением весной жидких осадков, которые более эффективно вымывают примеси из атмосферы на поверхность при еще достаточно больших их концентрациях в воздухе.

В табл. 1 приведены разные характеристики загрязнения окружающей среды рассмотренных материковых районов — всего 28 комплектов значений для четырех импактных районов и семи ТМ. Этот материал, полученный для сравнительно небольшого региона с более или менее однородными климатическими и метеорологическими условиями, позволяет сделать некоторые общие выводы об атмосферном переносе и осаждении ТМ на севере ЕТР.

Во-первых, в соответствии с сезонными вариациями потоков ТМ на поверхность (см. рис. 3) концентрации их в снеговой воде к моменту таяния снега везде больше, чем в среднем в дождевой воде в теплые сезоны. Это вообще характерно для северных районов, где период снегозалежания больше полугода, и за это время, при максимальных антропогенных потоках ТМ из атмосферы на поверхность, происходит накопление примесей в снеге.

Таблица 1

Средние показатели антропогенного загрязнения ТМ окружающей среды материковых районов Севера ЕТР от российских источников за период 2001–2010 гг.

Показатель	Тяжелый металл						
	Pb	Cd	As	Zn	Ni	Cr	Cu
<i>Кольский полуостров. I</i>							
$C_{cp}$ , нг/м <sup>3</sup>	0,215	0,002	0,178	0,029	19,4	0,056	28,3
$C_1/C_7$	13	13	11	928	9	21	11
$D$ , мкг/м <sup>2</sup>	29,7	0,2	25,2	1,6	2901	5,9	4015
$D_s$ , мкг/м <sup>2</sup>	14,4	0,1	11,9	1,5	1304	3,3	1898
$C_s$ , мкг/л	0,120	0,001	0,099	0,012	10,9	0,028	15,8
$C_r$ , мкг/л	0,0347	0,0002	0,0302	0,0002	3,7	0,0058	4,8
<i>Архангельская область. Центр. II</i>							
$C_{cp}$ , нг/м <sup>3</sup>	0,013	0,001	0,013	0,051	0,77	0,04	0,96
$C_1/C_7$	173	332	<b>93</b>	950	<b>14</b>	<b>167</b>	<b>44</b>
$D$ , мкг/м <sup>2</sup>	0,87	0,03	0,98	2,65	103	2,49	92
$D_s$ , мкг/м <sup>2</sup>	0,73	0,03	0,78	2,51	65	2,14	66
$C_s$ , мкг/л	0,008	0,0003	0,008	0,026	0,68	0,023	0,69
$C_r$ , мкг/л	0,0003	0,00001	0,0004	0,0003	0,082	0,0007	0,0552
<i>Архангельская область. Юго-восток. III</i>							
$C_{cp}$ , нг/м <sup>3</sup>	0,037	0,003	0,040	0,327	0,196	0,228	0,333
$C_1/C_7$	308	3019	1544	208	<b>15</b>	<b>39</b>	<b>63</b>
$D$ , мкг/м <sup>2</sup>	2,20	0,15	2,04	20,6	26,0	22,0	28,1
$D_s$ , мкг/м <sup>2</sup>	1,95	0,14	1,95	17,7	16,5	15,6	21,1
$C_s$ , мкг/л	0,021	0,001	0,020	0,187	0,174	0,164	0,222
$C_r$ , мкг/л	0,0005	0,00001	0,0002	0,0060	0,020	0,0137	0,0147
<i>Ненецкий заповедник. IV</i>							
$C_{cp}$ , нг/м <sup>3</sup>	0,014	0,001	0,021	0,107	0,183	0,021	0,271
$C_1/C_7$	1484	1800	1589	1949	<b>91</b>	2569	433
$D$ , мкг/м <sup>2</sup>	0,45	0,04	0,63	3,16	8,9	0,64	11,0
$D_s$ , мкг/м <sup>2</sup>	0,42	0,04	0,59	3,04	6,8	0,61	9,12
$C_s$ , мкг/л	0,003	0,0003	0,004	0,020	0,046	0,004	0,061
$C_r$ , мкг/л	0,0001	0,000005	0,0001	0,0003	0,0074	0,0001	0,0064

Примечание.  $C_{cp}$  — среднегодовая концентрация в воздухе;  $C_1/C_7$  — отношение январской и июльской атмосферных концентраций;  $D$  — суммарный годовой поток на поверхность;  $D_s$  — поток на поверхность за время ее покрытия снегом;  $C_s$  и  $C_r$  — концентрации в снеговой (к моменту весеннего таяния) и дождевой воде. Жирным шрифтом выделены отношения  $C_1/C_7 < 170$  (см. текст).

Во-вторых, обнаружена (с коэффициентом достоверности  $R^2 = 0,90$ ) зависимость

$$D_s/D = 0,085 \ln (C_1/C_7) + 0,34, \quad (2)$$

связывающая долю ТМ, выпадающую на заснеженную поверхность в течение года ( $D_s/D$ ), с глубиной сезонного хода концентрации ТМ в приземном воздухе ( $C_1/C_7$ ). Таким образом, даже при постоянстве концентрации ТМ в воздухе в течение года ( $C_1/C_7 = 1$ ) на снежную поверхность выпадало бы около 34 % его полного антропогенного годового потока, что вполне соответствует годовому режиму осадков на севере ЕТР.

В-третьих, медианное значение  $C_1/C_7 = 170$  делит все данные (см. табл. 1) на две половины, различающиеся по значимости антропогенного влияния на окружающую среду рассмотренных материковых районов в разные сезоны. При  $C_1/C_7 > 170$  более 86 % ТМ выпадает в течение года на заснеженную поверхность, обеспечивая очень высокие значения отношения концентраций ТМ в снеговой и дождевой воде  $C_s/C_r > 30$ . Следовательно, в этих случаях можно считать, что антропогенное воздействие на окружающую среду (по ТМ) происходит главным образом в холодное время года. Соотношение потоков ТМ на поверхность (зима:лето) в среднем примерно 6:1. К моменту снеготаяния ТМ накапливаются в снежном покрове (или во льду) и весной за довольно короткое время вбрасываются в поверхностные объекты. Однако, скатываясь по не оттаявшей еще почве и льду в понижения рельефа и на поверхности водоемов, они в большей степени оказывают влияние на состав вод рек и озер, чем на состав почв. Вторая половина данных соответствует  $C_1/C_7 < 170$ , когда в среднем 63 % (0,45–0,86 %) годового потока ТМ выпадает на заснеженную поверхность, а в теплое время года из атмосферы в почвы и водоемы может попадать до 45 % ТМ. Соответственно, и среднее отношение концентраций ТМ  $C_s/C_r$  составляет 10 (от 3 до 30). В этих случаях антропогенным влиянием на окружающую среду региона нельзя пренебрегать в течение всего года, хотя оно все равно больше в холодный сезон. Соотношение потоков ТМ на поверхность (зима:лето) в среднем примерно 2:1.

Сравнение полученных средних десятилетних оценок параметров загрязнения окружающей среды с измеренными величинами затруднено тем, что измерения обычно проводятся в определенный момент времени, и многолетние ряды измерений редки, а места экспериментальных наблюдений не совпадают с пунктами наших оценок. Кроме того, в теплые сезоны в удаленных от антропогенных источников районах антропогенный вклад в общий поток ТМ из атмосферы на поверхность мал. Большую часть в суммарном потоке составляют терригенные ТМ, которые поступают в составе аэрозоля, образующегося в результате ветрового поднятия частиц почвы и пыли с поверхности (куда также могут входить и антропогенные вещества, осевшие на поверхность ранее) [19]. И, наконец, значительную роль в загрязнении окружающей среды ЕТР играют другие европейские страны — при трансграничном атмосферном переносе ТМ [19, 20].

Для учета этих эффектов использовались данные из [19, 20] для всей ЕТР (табл. 2), а полученные нами оценки для свинца и кадмия сравнивались с данными работы [21], в которой указаны результаты проводившихся в 1990-х гг. измерений потоков химических веществ с атмосферными осадками на территории Карелии. Полный поток ТМ на поверхность, как говорилось выше, формируется из трех (антропогенной, ветровой и трансграничной) составляющих:  $D_{tot} = D_a + D_w + D_{tr}$ . Наши оценки рассматриваются для пункта III (юго-восток Архангельской области), который, как предполагается, по природным условиям должен быть наиболее из рассмотренных близок к средним условиям на ЕТР.

Таблица 2

**Сравнение полученных оценок для района Архангельской области (юго-восток) с результатами измерений в Карелии в 1996 г., по [21]**

Параметр	Pb	Cd	Источник
Антропогенный поток $D_a$ , мкг/м <sup>2</sup> /год	2,2	0,15	Оценка данной работы
Ветровой поток $D_w$ , мкг/м <sup>2</sup> /год	100	5	Средний для ЕТР, по [19]
Трансграничный поток $D_{tr}$ , мкг/м <sup>2</sup> /год	$D_a \times 19$	$D_a \times (2/3)$	Коэффициенты для всей ЕТР из [20]
Полный поток $D_{tot}$ , мкг/м <sup>2</sup> /год	144	5,25	Оценка данной работы, 2001–2010 гг.
Полная концентрация в снеговой воде $C_{s-tot}$ , мкг/л	0,45	0,002	
Измеренный годовой поток на поверхность, мкг/м <sup>2</sup> /год	180	70	Данные сравнения, Карелия, 1996 г., по [21]
Измеренная концентрация в снеговой воде, мкг/л	0,3	0,11	

Полные концентрации Pb и Cd в снеговой воде  $C_{s-tot}$  вычисляются по долям выпадения на снег за год  $D_s/D$  антропогенных частей (см. табл. 2) — без ветровых потоков.

Для свинца рассчитанные и измеренные величины близки, а для кадмия оба измеренных параметра значительно выше рассчитанных (см. табл. 2). Для оправдания расхождений сравниваемых величин можно предложить несколько аргументов: пространственные (Карелия и Архангельская область) и долговременные (1990-е и 2000-е гг.) различия в процессах атмосферного переноса и режиме осадков; долговременные тренды эмиссий Pb и Cd в России и зарубежной Европе. Действительно, в Карелии должно быть больше, чем в Архангельской области, заметно влияние эмиссий Белоруссии, являющейся мощным источником кадмия в атмосфере [19]. Кроме того, выбросы кадмия странами Европы в 1990-е гг. были примерно в 1,5–2 раза больше, чем в 2000-х гг., а выбросы свинца в эти годы почти не менялись [20]. С учетом этих замечаний, по нашему мнению, данные табл. 2 показывают разумное соответствие рассчитанных и измеренных годовых потоков Pb и Cd на поверхность и концентраций их в снеговой воде на севере ЕТР. К сожалению, для остальных рассматриваемых ТМ такие сравнения невозможны из-за отсутствия сведений о трансграничных и ветровых потоках.

### ВЫВОДЫ

По результатам анализа многолетних закономерностей в процессах дальнего переноса воздушных масс и антропогенных ТМ к пяти пунктам севера ЕТР выявлены наиболее значимые антропогенные источники ТМ — это промышленные центры не только ближних Мурманской и Архангельской областей, но и более удаленных Свердловской, Ленинградской, Вологодской областей, городов Киров, Пермь, Норильск.

Рассчитанные пространственные распределения функции чувствительности к потенциальным источникам загрязнений позволяют прогнозировать и анализировать влияние различных имеющихся и проектируемых источников ТМ и других аэрозольных примесей на окружающую среду рассматриваемых районов Севера России. В частности, можно ожидать повышения загрязнения черным углеродом (сажей) даже такого удаленного района, как архипелаг Земля Франца-Иосифа, в случае разработки новых месторождений нефти и газа на северном шельфе России.

Обнаружение общего аналитического выражения, связывающего степень накопления антропогенных ТМ в снегу с относительной глубиной сезонного хода их концентрации в воздухе, представляет собой оригинальный результат, позволяющий делать выводы о степени загрязненности природных сред на подстилающей поверхности по данным о загрязнении приземного воздуха.

В результате оценки средних показателей антропогенного загрязнения окружающей среды в рассматриваемых районах Мурманской и Архангельской областей вдали от источников эмиссий выявлено, что полученные оценки для свинца и кадмия соответствуют имеющимся результатам измерений. Очевидно, что загрязнение рассматриваемой территории неоднородно, и это необходимо учитывать отдельно для каждой рассматриваемой примеси при выборе так называемых фоновых (малозагрязненных) районов.

Результаты исследования показывают разнообразие возможностей таких модельных оценок антропогенного воздействия на удаленные и труднодоступные территории, позволяют делать прогнозы и предостерегают от обобщения результатов, полученных для одного района, сезона или одной примеси, на большие территории, другие временные масштабы и другие поллютанты.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (14–05–00059).*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Barrie L. A.** Arctic air pollution: an overview of current knowledge // *Atm. Environ.* — 1986. — Vol. 20, N 4. — P. 643–663.
2. **Виноградова А. А.** Микроэлементы в составе арктического аэрозоля (обзор) // *Изв. АН. Физика атмосферы и океана.* — 1993. — Т. 29, № 4. — С. 437–456.
3. **Shevchenko V., Lisitzin A., Vinogradova A., Stein R.** Heavy metals in aerosols over the seas of the Russian Arctic // *Sci. of the Total Environ.* — 2003. — Vol. 306. — P. 11–25.
4. **Копейкин В. М., Репина И. А., Гречко Е. И., Огородников Б. И.** Измерение содержания сажевого аэрозоля над водной поверхностью в Южном и Северном полушариях // *Оптика атмосферы и океана.* — 2010. — Т. 23, № 6. — С. 444–450.



5. **Persistent Toxic Substances, Food Security and Indigenous Peoples of the Russian North** // Final Report. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP). — Oslo, 2004. — 192 p.
6. **Шевченко В. П., Стародымова Д. П., Кутенков С. А., Виноградова А. А., Гордеев В. В., Демина Л. Л., Иванова Ю. А., Филиппов А. С.** Содержание тяжелых металлов в кустистых эпифитных лишайниках Карелии как индикатор атмосферного переноса загрязняющих веществ // Современные проблемы науки и образования [Электронный ресурс]. — <http://www.science-education.ru/97-4692> (дата обращения 02.06.2014).
7. **Quinn P. K., Bates T. S., Baum E., Doubleday N., Fiore A. M., Flanner M., Fridlind A., Garrett T. J., Koch D., Menon S., Shindell D., Stohl A., Warren S. G.** Short-lived pollutants in the Arctic: their climate impact and possible mitigation strategies // Atmos. Chem. Phys. — 2008. — Vol. 8, N 6. — P. 1723–1735.
8. **Serreze M., Barry R.** Processes and impacts of Arctic Amplification: A research synthesis // Global and Planetary Change. — 2011. — Vol. 77, N 1–2. — P. 85–96.
9. **Алексеев Г. В.** Арктическое измерение глобального потепления // Лед и снег. — 2014. — № 2 (126). — С. 53–62.
10. **Шевченко В. П., Коробов В. Б., Лисицын А. П., Алешинская А. С., Богданова О. Ю., Горюнова Н. В., Грищенко И. В., Дара О. М., Завернина Н. Н., Куртеева Е. И., Новичкова Е. А., Покровский О. С., Сапожников Ф. В.** Первые данные о составе пыли, окрасившей снег на Европейском севере России в желтый цвет (март 2008 г.) // Докл. РАН. — 2010. — Т. 431, № 5. — С. 1–5.
11. **Ситнов С. А., Горчаков Г. И., Свириденков М. А., Копейкин В. М., Пономарёва Т. Я., Карпов А. В.** Влияние атмосферной циркуляции на эволюцию и радиационный форсинг дымового аэрозоля на европейской части России летом 2010 г. // Исследование Земли из космоса. — 2013. — № 2. — С. 28–41.
12. **Топчая В. Ю., Виноградова А. А.** Антропогенная нагрузка свинцом и кадмием на окружающую среду Калининградской области РФ — по данным программы EMEP // Фундаментальные исследования. — 2014. — № 12–7. — С. 1463–1467.
13. **Лаборатория** воздушных ресурсов (Air Resource Laboratory) NOAA [Электронный ресурс]. — <http://www.arl.noaa.gov/ready/> (дата обращения 2.06.2014).
14. **Виноградова А. А., Пономарёва Т. Я.** Атмосферный перенос антропогенных примесей в арктические районы России (1986–2010 гг.) // Оптика атмосферы и океана. — 2012. — Т. 25, № 6. — С. 475–483.
15. **Виноградова А. А.** Дистанционная оценка влияния загрязнения атмосферы на удаленные территории // Геофизические процессы и биосфера. — 2014. — Т. 13, № 4. — С. 5–20.
16. **Ежегодник** выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух городов и регионов Российской Федерации за 2007 год / Ред. В. Б. Миляев. — СПб.: ОАО «НИИ Атмосфера», 2008. — 204 с.
17. **Ежегодник** выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух городов и регионов Российской Федерации за 2010 год / Ред. А. Ю. Недре. — СПб.: ОАО «НИИ Атмосфера», 2011. — 560 с.
18. **Виноградова А. А., Веремейчик А. О.** Модельные оценки содержания антропогенной сажи (black carbon) в атмосфере Российской Арктики // Оптика атмосферы и океана. — 2013. — Т. 26, № 6. — С. 443–451.
19. **Ilyin I., Pozovskaya O., Sokovych V., Travnikov O., Aas W.** Heavy metals: Transboundary pollution of the Environment // EMEP Status Report 2009 [Электронный ресурс]. — [http://msceast.org/reports/2\\_2009.pdf](http://msceast.org/reports/2_2009.pdf) (дата обращения 02.06.2014).
20. **Travnikov O., Ilyin I., Rozovskaya O., Varygina M., Aas W., Uggerud H. T., Mareckova K., Wankmueller R.** Long-term Changes of Heavy Metal Transboundary Pollution of the Environment (1990–2010) // EMEP Status Report 2/2012 [Электронный ресурс]. — [http://msceast.org/reports/2\\_2012.pdf](http://msceast.org/reports/2_2012.pdf) (дата обращения 02.06.2014).
21. **Лозовик П. А., Потапова И. Ю.** Поступление химических веществ с атмосферными осадками на территорию Карелии // Водные ресурсы. — 2006. — Т. 33, № 1. — С. 111–118.

*Поступила в редакцию 2 июня 2015 г.*