

УДК 551.550.42

Атмосферный перенос антропогенных примесей в арктические районы России (1986–2010 гг.)

А.А. Виноградова¹, Т.Я. Пономарева^{2*}

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН
119017, г. Москва, Пыжевский пер., 3

²Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации «Гидрометцентр России»
123242, г. Москва, Большой Предтеченский пер., 11–13

Поступила в редакцию 6.02.2012 г.

Продлен (до 2010 г.) и проанализирован 25-летний ряд данных о переносе воздушных масс к трем пунктам в Российской Арктике, выявлены пространственные, сезонные и долговременные особенности в процессах переноса воздушных масс и антропогенных аэрозольных примесей в Российскую Арктику. Изменения циркуляции атмосферы за рассматриваемый 25-летний период 1986–2010 гг. привели к увеличению доли морских воздушных масс над северными островами Евразии, что может влиять на состав почв, речных и озерных вод, на условия существования сухопутной флоры и фауны Арктики.

Оценены средние (для 2001–2010 гг.) антропогенные части концентраций в воздухе и потоков на поверхность тяжелых металлов (Pb, Cd, As, Zn, Ni, Cr, Cu) и сажи в районах архипелагов Земля Франца-Иосифа и Северная Земля. Результаты работы можно использовать для анализа среднего антропогенного воздействия на окружающую среду при изучении долговременных процессов и вариаций различных характеристик в наземных средах, объектах и экосистемах в Российской Арктике.

Ключевые слова: атмосфера, антропогенное загрязнение, дальний перенос, многолетние тренды, Арктика, окружающая среда; atmosphere, anthropogenic pollution, long-range transport, long-term trends, Arctic environment.

Введение

Вопросы загрязнения Арктики вот уже три десятилетия интересуют научную общественность и политиков, а в последние 10 лет и более широкий круг населения, в связи с возможными экономическими и экологическими аспектами этого явления в условиях заметных климатических изменений на нашей планете. Арктика, являясь чрезвычайно важной составляющей («холодильником») климатической системы Северного полушария, оказывается также очень чувствительным регионом, дающим быстрые и не всегда предсказуемые отклики на изменения температуры, осадков, режима ветра и других параметров этой системы [1].

Результаты длительных регулярных наблюдений за составом атмосферы в Канадской Арктике (ст. Алерт) и на Аляске (ст. Бэрроу) [2] показывают снижение с начала 1990-х гг. концентраций характерных аэрозольных и газовых примесей антропогенного происхождения. Основными причинами этого считается уменьшение антропогенных выбросов в атмосферу с территории Европы благодаря значительным технологическим успехам в задаче

практической минимизации выбросов от различных производственных процессов, а также и с территории Севера Евразии в связи с распадом СССР и уменьшением его производственных мощностей. Однако наши последние исследования 20-летнего ряда данных (с 1986 по 2005 г.) о переносе воздуха и антропогенных тяжелых металлов в Российскую Арктику [3] показали тенденцию уменьшения загрязнения Севера России через атмосферу не только из-за уменьшения выбросов источников, но и в связи с некоторыми долговременными трендами в процессах циркуляции атмосферы над севером Евразии. Циркуляционный и эмиссионный эффекты оказались вполне сравнимы по величине.

Российская часть Арктики очень велика, она охватывает половину побережья Северного Ледовитого океана. Понятно, что реальный мониторинг загрязнения природных сред и объектов на такой площади имеет серьезные экономические и технические ограничения. Моделирование и оценка переноса в атмосфере антропогенных веществ являются альтернативным подходом к этой задаче — одним из методов изучения состояния окружающей среды [4–6].

В Арктике, в условиях низких температур и слабой инсоляции атмосферы, время жизни примесей в воздухе велико (зимой до 10 сут и более) и возможен атмосферный перенос загрязнений на

* Анна Александровна Виноградова (anvinograd@yandex.ru); Татьяна Яковлевна Пономарева (ponomareva_tya@mail.ru).

расстояния до 10 тыс. км. Для осуществления оценок такого мезомасштабного антропогенного воздействия необходима информация о параметрах выведения примесей из атмосферы по пути их распространения, которые зависят от метеоусловий и свойств поверхности и обычно определяются из косвенных оценок, сильно различаясь на территориях разных климатических зон [4, 7]. Особые методические трудности для таких исследований возникают при протяженных источниках загрязнений, а также в связи с многообразием условий циркуляции атмосферы, формирующих воздушные потоки. Поэтому расчеты с высоким пространственным и временным разрешением очень трудоемки и длительны.

Целью данной работы является продолжение (см. [3, 8, 9]) изучения переноса воздушных масс и антропогенных аэрозольных примесей в Российскую Арктику на основе продленного до 2010 г. ряда данных о дальнем переносе воздуха к трем пунктам, выявление закономерностей переноса антропогенных аэрозольных примесей. При этом неизменность методик получения, обработки и классификации данных, а также подходов к расчетам переноса загрязнений обеспечивает прозрачность и надежность процедуры «сшивания» и сравнения результатов. В ходе исследований выполнено следующее:

продлен (до 2010 г.) и проанализирован 25-летний ряд данных о переносе воздушных масс к трем пунктам в Российской Арктике;

выявлены пространственные, сезонные и долговременные особенности в процессах переноса воздушных масс в Российскую Арктику;

оценены средние соотношения вкладов (для 2000-х гг.) ряда крупных промышленных регионов-источников атмосферных выбросов тяжелых металлов (ТМ) и сажи в загрязнение этими примесями атмосферы и наземных объектов арктических районов с учетом новых наиболее современных сведений о пространственном распределении и мощностях эмиссии антропогенных источников загрязнения атмосферы.

Методы и подходы

Пунктами наблюдений для наших исследований являются три точки в Российской Арктике, расположенные на Земле Франца-Иосифа (ЗФИ), 81,1° с.ш., 56,3° в.д., на арх. Северная Земля (СЗ), 79,5° с.ш., 95,4° в.д., и на о. Врангеля (ВР), 71,0° с.ш., 178,5° з.д. Для каждой из этих точек анализируются ежедневные 5-суточные прямые (воздух уходит от пункта) и обратные (воздух приходит к пункту) траектории движения воздушных масс для 4 мес (январь, апрель, июль и октябрь) на протяжении 25 лет (1986–2010 гг.). Траектории рассчитываются по данным Гидрометцентра России на 00 ч UTC (с интервалом 6 ч) на изобарических поверхностях 925 и 850 гПа, близких к наиболее вероятным высотам, где происходит дальний перенос воздушных масс. Для каждого пункта и каждого месяца обратные и прямые траектории (отдельно)

группируются за 10-летние периоды, затем анализируется их среднее пространственное распределение за 10 лет. Рассчитывается повторяемость поступления воздушных масс в пункты наблюдений из Европы, Азии, Америки, из Арктики (далее СЛО) и из Тихого и Атлантического океанов, а также повторяемость ухода воздуха на эти же территории. Обозначение «СЛО» в нашей классификации объединяет территорию Северного Ледовитого океана и его побережья (внутри круга широты 70° с.ш.), а также остальную более южную часть Гренландии. Для траекторий, рассчитанных на двух изобарических уровнях, результаты объединяются и усредняются. Предполагая, что выбранные месяцы являются представительными для соответствующих сезонов, анализируется сезонная изменчивость изучаемых процессов атмосферной циркуляции.

При переходе к расчетам переноса примесей производятся вторичная группировка и классификация траекторий с точки зрения возможности захвата атмосферных выбросов от крупных промышленных регионов Европы, Азии и Америки. Для каждого рассматриваемого региона-источника в расчетах используются средние параметры соответствующего ансамбля траекторий. Подчеркнем, что наш подход и все дальнейшие рассуждения и выводы относятся к так называемой консервативной примеси, пассивной по отношению к химическим преобразованиям в воздухе во время переноса, или к отдельным микроэлементам, идентификация которых возможна вне зависимости от конкретного химического состава аэрозольного вещества.

Решение уравнения баланса массы примеси в воздушном потоке во время ее переноса от источника i в пункт j можно представить в виде следующего выражения для концентрации C_{ij} примеси в пункте наблюдений j :

$$C_{ij} = Q_i(1 - \alpha_i)Z_{ij}, \quad (1)$$

где Q_i – мощность выбросов примеси источником i ; $\alpha_i \approx 0,15$ – доля примеси, оседающая на землю вблизи источника i . Функция Z_{ij} характеризует все атмосферные процессы, влияющие на перенос примеси по пути от источника i к пункту j [3]. В рамках предложенного подхода величины Z определяют потенциальные возможности того или иного региона-источника оказать воздействие на состав атмосферы в рассматриваемых пунктах. Они зависят от вероятности и скорости движения воздуха, которые определяются по траекториям, а также от скорости осаждения примеси из атмосферы во время переноса, которая зависит от свойств поверхности, температурных инверсий и режима осадков. При расчетах Z_{ij} учитывались эмпирические данные о пространственно-временных изменениях температурных инверсий в приземном слое тропосферы, статистические характеристики облачности и осадков в разных районах Арктики.

Скорость осаждения примеси на подстилающую поверхность представлялась нами в виде суммы скоростей сухого осаждения и осаждения осадками. Поскольку при дальнем переносе все рассматриваемые

мые химические элементы распространяются в воздухе преимущественно на аэрозольных частицах субмикронного размера [4], скорости их осаждения на подстилающую поверхность считались одинаковыми и неизменными по мере распространения от источника. Последнее допущение заметно упрощает задачу и не должно слишком искажать результат в условиях, когда источники и районы, для которых проводятся оценки, расположены в близких по своим свойствам климатических зонах, над которыми и происходит перенос примеси.

Обобщая литературные данные (ссылки приведены в [3]), получили следующие значения средней скорости осаждения примеси на поверхность, для которых проводились расчеты: зимой 0,05–0,07, весной 0,1–0,2, летом 0,9–1,2, осенью 0,4–0,8 см·с⁻¹. Эти значения типичны для антропогенных ТМ [10, 11], на оценки атмосферного переноса которых и нацелена в первую очередь данная работа.

Отличием нашего подхода от всех остальных является учет загрязненности арктических воздушных масс. В холодные месяцы (январь, апрель) скорость осаждения примеси на поверхность в Арктике очень мала, и заметная доля примеси остается в арктической атмосфере дольше 5 сут, перемещаясь там, как в огромном резервуаре. Предполагая, что воздух, приходящий в пункты наблюдений из самой Арктики, так же загрязнен, как и воздух в пункте наблюдений, и пренебрегая вкладом морского воздуха в концентрации антропогенных составляющих, результирующую среднюю (в течение месяца) концентрацию C_j примеси в районе пункта наблюдений j можно оценить из уравнения

$$C_j = \sum C_{ij} + q_j C_j, \quad (2)$$

где q_j – частота прихода арктических воздушных масс в пункт j , а суммирование ведется по всем источникам i . Вклад арктического воздуха – величина второго члена в правой части формулы (2) – значителен (40–65%). Весной он больше, чем зимой; для ВР (расположенного на 10° южнее, чем ЗФИ и СЗ) он несколько ниже. При расчетах летних и осенних концентраций вклад арктического воздуха можно не учитывать, так как в теплое полугодие скорости осаждения антропогенных примесей на порядок больше, чем в холодное время года, и в течение 5 сут воздух практически полностью очищается.

Зная для каждого пункта j среднюю концентрацию примеси C_j в приземном слое перемешивания и скорость ее осаждения на поверхность K_j вблизи пункта наблюдений, можно оценить средний поток этой примеси на единицу поверхности за время t :

$$D_j = C_j K_j t. \quad (3)$$

В данной работе оценки атмосферных концентраций и выпадений на поверхность проводились для ряда химических элементов, которые далее будем называть тяжелыми металлами, – Pb, Cd, As, Zn, Ni, Cr, Cu, а также для сажи. Рассматривались только их антропогенные составляющие,

данные об эмиссиях которых в атмосферу имеются на сайте [12] и в сборнике [13].

Перенос воздушных масс

Основные особенности атмосферной циркуляции вблизи пунктов наблюдений, т.е. в Европейском, Евразийском и Тихоокеанском секторах Арктики, были выявлены в наших предыдущих работах и обобщены в [3]. Продление исследуемых геофизических рядов до 25 лет дает возможность рассматривать их как климатически значимые, анализируя долговременные тенденции их изменения, сопоставлять их с другими геофизическими параметрами, а также искать новые особенности, присущие последним годам наблюдений.

Высокая сезонная и межгодовая изменчивость пространственных распределений воздушных масс, приходящих к пунктам наблюдений или уходящих от них, обусловлена изменчивостью поля атмосферного давления и режимов циркуляции атмосферы. В [3] обсуждался целый ряд различных закономерностей переноса воздуха к рассматриваемым пунктам, обнаруженных на отрезке в 20 лет (1986–2005 гг.), которые в целом сохранились и в последующие 5 лет. Рассмотрим наиболее заметные различия, принципиальные с точки зрения переноса аэрозольных загрязнений к рассматриваемым пунктам.

В табл. 1 приведены значения линейных трендов повторяемости (доли случаев из 300) переноса воздушных масс с различных территорий на ЗФИ, СЗ, ВР в разные месяцы (по 5-летним скользящим средним значениям).

Видно, что в некоторых случаях тренды высоки с высокой достоверностью, что привело к принципиальному изменению состава воздушных масс на российском побережье СЛО (рис. 1).

Особенно это важно в летнее время, когда открыты от снега поверхности океана и прилегающей суши. В этом случае состав воздушных масс, формирующихся над сушей и над водной поверхностью, особенно различается. Так, из рис. 1 для июля видно, что на СЗ и ВР воздух, бывший ранее (в 1986–1995 гг.) смешанным континентальным и морским (почти в равных долях), стал в последние 10–15 лет преимущественно морским. Это может оказаться важным с точки зрения формирования состава почв, речных и озерных вод, а также для флоры и фауны Тихоокеанского региона Арктики.

С точки зрения загрязнения арктической атмосферы важен перенос воздуха с материков, где возможно его антропогенное загрязнение в промышленных и густонаселенных областях. Поэтому на рис. 1 представлены долговременные изменения повторяемости поступления воздушных масс на ЗФИ, СЗ и ВР с континентальных территорий (из Европы, Азии и Америки в целом) в разные месяцы в течение рассматриваемого периода с 1986 по 2010 г. (10-летние скользящие средние значения). Почти все линейные тренды указывают на снижение частот поступления воздуха с материков (табл. 1).

Таблица 1

Тренды изменений повторяемости переноса воздушных масс на ЗФИ, СЗ, ВР с различных территорий в разные месяцы (по 5-летним скользящим средним значениям). R^2 – коэффициент достоверности линейной аппроксимации. Выделены тренды с $R^2 > 0,35$ (жирный шрифт), $R^2 > 0,5$ (серый фон) и $R^2 > 0,7$ (черный фон)

Территория	Январь		Апрель		Июль		Октябрь	
	тренд. повтор/10 лет	R^2	тренд. повтор/10 лет	R^2	тренд. повтор/10 лет	R^2	тренд. повтор/10 лет	R^2
На ЗФИ								
Европа	-0,004	0,004	-0,11	0,72	-0,04	0,18	0,02	0,10
Азия	-0,04	0,40	-0,02	0,37	-0,02	0,13	0,01	0,01
СЛО	0,05	0,40	0,14	0,74	0,08	0,42	-0,04	0,13
Атлантика	-0,01	0,03	0,01	0,01	-0,04	0,36	0,01	0,02
На СЗ								
Европа	-0,0006	0,0001	-0,09	0,62	-0,08	0,65	-0,03	0,18
Азия	-0,03	0,10	-0,01	0,01	-0,05	0,34	-0,01	0,00
СЛО	0,01	0,01	0,05	0,28	0,13	0,52	0,003	0,001
Атлантика	0,01	0,29	0,02	0,49	-0,01	0,02	0,02	0,55
На ВР								
Азия	-0,08	0,38	-0,13	0,69	-0,13	0,73	-0,16	0,72
Америка	-0,07	0,59	-0,09	0,38	-0,04	0,61	-0,09	0,75
СЛО	0,14	0,45	0,16	0,87	0,14	0,52	0,20	0,63
Тихий океан	0,002	0,003	0,07	0,43	0,03	0,12	0,04	0,35

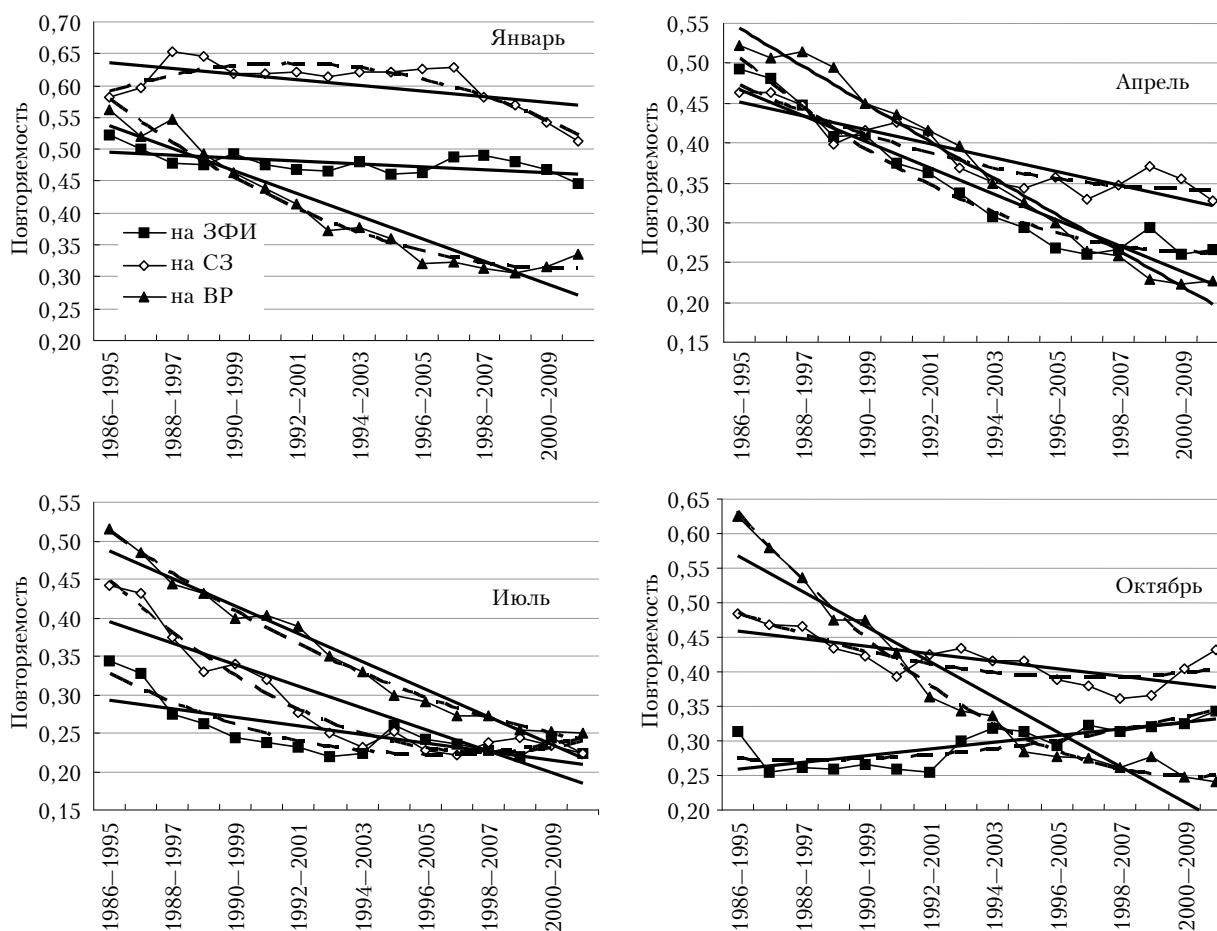


Рис. 1. Повторяемость поступления воздушных масс на ЗФИ, СЗ и ВР с континентальных территорий в январе, апреле, июле и октябре (10-летние скользящие средние значения). Сплошные и штриховые линии – линейные и квадратичные аппроксимации соответственно

Однако сравнение с данными работы [3] показывает уменьшение (с прибавлением последних 5-летних данных) абсолютных величин линейных трендов почти всех зависимостей. Исключения (см. рис. 1) составляют несколько более сложная зависимость для СЗ в январе, а также для ЗФИ в октябре, когда континентальные массы приходят туда, наоборот, все чаще (единственный случай из 12 рассмотренных), компенсируя весеннее и летнее снижение частот поступления воздуха с материков.

Что касается пространственного распределения траекторий, по которым воздух уходит от пунктов наблюдений, то в этих распределениях значимые линейные тренды за рассматриваемые годы почти не обнаружены. Уверенно можно утверждать лишь, что в октябре воздух стал чаще уходить от ВР на территорию Тихого океана при уменьшении частоты ухода в Арктику и в Азию. Это согласуется с данными [14, 15] об увеличении (на рубеже веков по сравнению с предшествовавшими 30 годами) меридиональной составляющей скорости ветра, направленной на юг, на широте 70° с.ш. в Тихоокеанском секторе вблизи 180° в.д.

Очень важно найти связи в долговременных особенностях рассматриваемых характеристик переноса воздуха в Арктику и, например, индексов циркуляции атмосферы или элементарных циркуляционных механизмов по классификации Б.Л. Дзердзеевского [16]. Возможно, такое исследование позволило бы выявить более детально циркуляционные процессы, определяющие перенос воздушных масс и загрязнений в разные части Российской Арктики. Однако эта задача выходит за рамки данной статьи и может быть предметом следующей публикации авторов.

Важно, что для всех зависимостей, представленных на рис. 1, более высока достоверность квадратичной аппроксимации (табл. 2), причем в большинстве случаев за счет замедления падения повторяемости поступления воздуха с суши в последние 5–10 лет, что хорошо видно на графиках.

Таблица 2
Достоверности линейной и квадратичной аппроксимаций зависимостей, представленных на рис. 1. Жирным шрифтом выделена наиболее достоверная аппроксимация

Перенос на	Аппроксимация	Январь	Апрель	Июль	Октябрь
ЗФИ	линейная	0,34	0,9	0,51	0,55
	квадратичная	0,81	0,97	0,79	0,65
СЗ	линейная	0,36	0,79	0,8	0,54
	квадратичная	0,42	0,85	0,96	0,72
ВР	линейная	0,9	0,98	0,96	0,91
	квадратичная	0,97	0,98	0,98	0,99

Таким образом, в начале XXI в. перенос воздуха в российские районы Арктики с материков уже не становится реже, т.е. выявленное в [3] постепенное ослабление загрязнения окружающей среды в этих районах в результате перестройки атмосферной циркуляции приостановилось.

Косвенными факторами, подтверждающими наш вывод относительно изменения характера перестройки циркуляции атмосферы над Севером Евразии, могут служить, например, следующие результаты, свидетельствующие о завершении в начале 2000-х гг. некоего «климатического периода» (длившегося с конца 70-х – начала 80-х гг. XX в.): 1) анализ вековых изменений давления и температуры над Северной Атлантикой [17]; 2) уменьшение в 2001–2010 гг. абсолютной величины, а местами и знака тренда температуры приземного воздуха над Сибирью по сравнению со значениями для 30-летнего периода 1981–2010 гг. [18]; 3) анализ вековых изменений суммарной годовой продолжительности меридиональной и зональной групп циркуляции (по Б.Л. Дзердзеевскому) [16].

Антропогенное загрязнение Российской Арктики

На карте (рис. 2) отмечены промышленные регионы, которые (после анализа пространственного распределения траекторий переноса воздушных масс) мы рассматриваем в качестве возможных источников антропогенных загрязнений в атмосфере Российской Арктики: Северная и Центральная Европа, Кольский п-ов, центр европейской территории России (ЦЕТР), Печорский бассейн, Урал, район Норильска, Кузбасс, Якутия, Аляска, Канада. Понятно, что значимость их, с точки зрения потенциальных возможностей атмосферного переноса загрязнений, различна для разных районов Арктики.

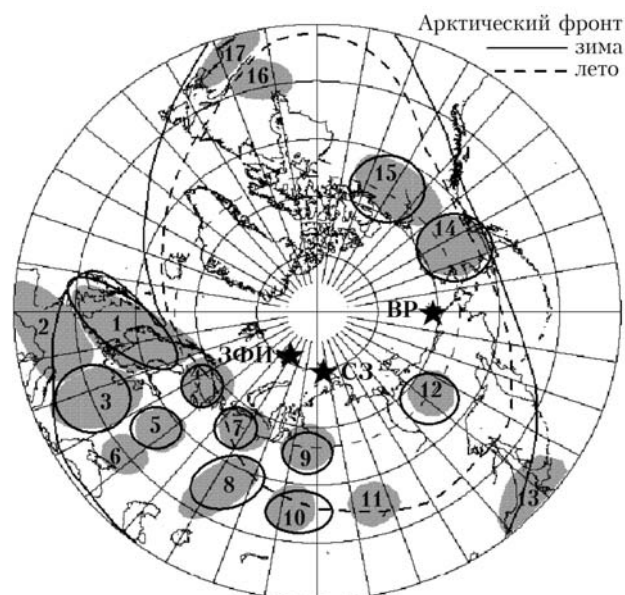


Рис. 2. Регионы-источники (овалы и круги) и пункты наблюдений (звездочки). Для данной работы актуальны: 1 – Северная Европа; 3 – Центральная Европа; 4 – Кольский полуостров; 5 – центр европейской территории России; 7 – Печорский бассейн; 8 – Урал; 9 – район Норильска; 10 – Кузбасс; 12 – Якутия; 14 – Аляска; 15 – Канада

На рис. 3 показаны соотношения потенциальных вкладов наиболее значимых регионов-источников в загрязнение воздуха на ЗФИ, СЗ и ВР [величины функции Z_{ij} из формулы (1)] и их изменения в течение рассматриваемых лет при условии равенства и неизменности эмиссий источников. Последнее условие дает возможность анализировать многолетние изменения этих соотношений, обусловленные только изменениями циркуляции атмосферы. Видно, что наиболее значимые регионы-источники аэрозольных загрязнений для ЗФИ и СЗ расположены на Кольском п-ове, в Северной Европе и в районе Норильска, а для ВР – на Аляске и в Якутии. Значения Z для этих регионов (и, следовательно, их вклады в загрязнение окружающей среды в Арктике) уменьшились за рассматриваемые 25 лет в 1,5–2 раза. В 2000-х гг. для некоторых

регионов-источников уменьшение замедлилось (влияние Норильска и Печорского бассейна на ЗФИ и СЗ, Аляски на ВР), а для других – прекратилось. Поэтому если не учитывать изменений эмиссий источников за последние 5–10 лет, то для рассматриваемых трех пунктов Российской Арктики можно и сейчас использовать оценки концентраций антропогенных ТМ в воздухе и их потоков на поверхность для 1996–2005 гг., полученные в работе [3].

О характере изменений антропогенных выбросов ряда ТМ в Европе в последние 20 лет можно судить по данным ЕМЕР для свинца и кадмия (рис. 4), приведенным в [12] в разделе модельных расчетов концентраций ТМ в воздухе над Европой.

Отметим, что данные об эмиссиях источников, размещенные на этом сайте в разных отчетах и разделах, отличаются друг от друга в 1,5–2 раза.

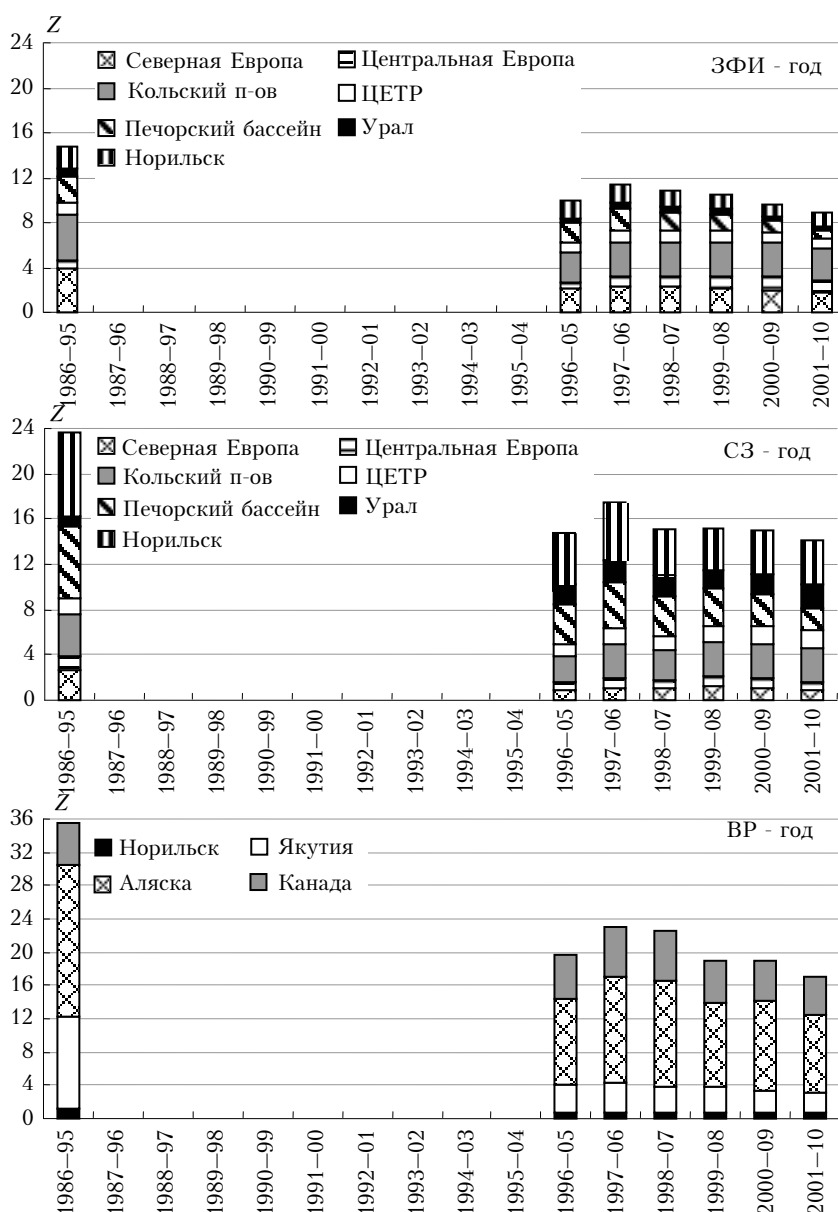


Рис. 3. Изменение в течение рассматриваемых лет соотношения потенциальных вкладов Z наиболее значимых регионов-источников в загрязнение воздуха на ЗФИ, СЗ и ВР при условии равенства и неизменности эмиссий источников

Однако, видимо, качественно основные закономерности изменений они отражают: выбросы свинца за рассматриваемый период снизились на порядок, а кадмия – в 2–3 раза; в России снижение значительно меньше, в последние 10 лет его нет вообще, а выбросы кадмия к 2009 г. даже выросли.

Исходя из данных за 2007 г., опубликованных в [13], и результатов оценок [12] системы ЕМЕР для 2000–2010 гг. для европейских стран, в наши расчеты были заложены значения выбросов антропогенных примесей в атмосферу рассматриваемыми регионами-источниками, приведенные в табл. 3.

Таблица 3
Значения антропогенных выбросов в атмосферу ряда ТМ и сажи в 2001–2010 гг., принятые для расчетов по данным [12, 13]

Регион-источник	Антропогенные выбросы в атмосферу, т/год							
	Pb	Cd	As	Zn	Ni	Cr	Cu	Сажа
Северная Европа	400	16	50	1120	370	140	160	–
Центральная Европа	1200	68	87	4000	610	160	650	–
Кольский п-ов	8,1	–	3,6	0,0	350,8	0,6	798	1860
ЦЕТР	14,4	–	6,6	12,4	1,3	62,4	24	3340
Печорский бассейн	0,01	–	0,00	0,00	0,00	0,02		1010
Урал	222	17	191	1252	161	688	595	6300
Норильск	19	5	1	–	427	–	474	30
Кузбасс	1,0	–	7,2	2,5	0,1	3,5	1	9750

Примечание. «–» – информация отсутствует.

Полученные в этом случае средние (за 2001–2010 гг.) концентрации в приземном воздухе и потоки на подстилающую поверхность рассматриваемых примесей в Российской Арктике представлены в табл. 4.

Таблица 4
Средние за 2001–2010 гг. показатели антропогенного воздействия на окружающую среду в Российской Арктике

Примесь	Средние за год концентрации в приземном воздухе, нг/м ³		Суммарные годовые потоки на подстилающую поверхность, мкг/м ² /год (г/км ² /год)	
	ЗФИ	СЗ	ЗФИ	СЗ
Pb	0,081	0,061	6,8	4,3
Cd	0,0043	0,0041	0,35	0,27
As	0,011	0,019	0,88	1,2
Zn	0,26	0,22	21	15
Ni	0,11	0,13	9,9	9,5
Cr	0,030	0,063	2,4	3,9
Cu	0,16	0,20	14	15
Сажа	0,53	1,2	39	82

Размах сезонных изменений атмосферных концентраций антропогенных примесей таков: на ЗФИ в 2,5–3 раза больше зимой и меньше летом, по сравнению со средними значениями, на СЗ – в 1,5 раза больше зимой и в 5–10 раз меньше летом. Потоки на поверхность имеют обратный сезонный ход: зимой и весной в 1,5–5 раз меньше, чем летом и осенью, за счет большего количества осадков в теплые сезоны. Величины потоков на поверхность в табл. 4 несколько меньше полученных в [3], где

для оценок использовались эмиссии источников за 2000 г., что хорошо согласуется с постепенным падением антропогенных выбросов ТМ в атмосферу в Европе (рис. 4).

Обратим внимание, что результат для антропогенной сажи нельзя считать сколько-нибудь точным, так как неизвестно ее распределение по размерам аэрозольных частиц, на которых она далее распространяется воздушными массами. Пока негласно предположено, что распределение такое же, как и у ТМ, и в дальний перенос вовлекается сажа на субмикронных частицах. Кроме того, как источники

сажи в атмосфере не учтены пожары и другие процессы горения биомассы, отопление большого количества северных небольших поселков и стоянок, сжигание попутного газа и др.

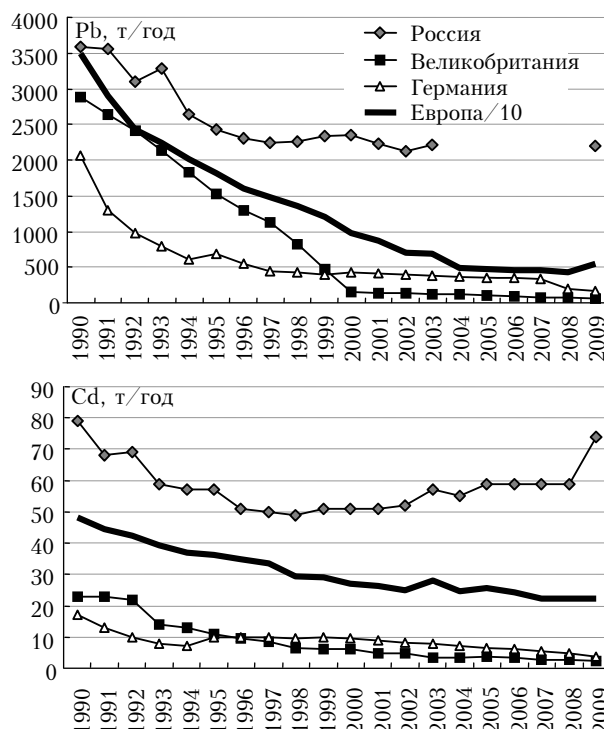


Рис. 4. Долговременные изменения эмиссии свинца и кадмия с территорий Европы в целом, России, Великобритании и Германии с 1990 по 2009 г. по данным [12]

По результатам сравнения с данными экспериментальных измерений в основном в летнее время в отдельных арктических районах России [3, 9, 19, 20] полученные оценочные значения описывают уровень антропогенного загрязнения изучаемых территорий с точностью до порядка величины (т.е. отличия могут быть в 2–3 раза в обе стороны). Кроме того, еще раз подчеркнем, что средняя (за месяц и за 10 лет) концентрация примеси в воздухе никогда не измеряется на практике, результаты конкретных наблюдений могут еще больше отличаться от средних величин, приведенных в табл. 4. Больше пригодны для сравнения с экспериментом потоки примесей на поверхность, поскольку они обычно измеряются интегрально в течение длительного времени (недели, месяц и т.д.).

Отметим, что факт невысоких концентраций всех рассмотренных ТМ в воздухе Российской Арктики (существенно ниже ПДК) не является подтверждением полного благополучия окружающей среды арктических территорий. В [21] показано, что, в результате накопления в течение долгого времени (годы) в элементах пищевых цепочек, содержание этих жизненно опасных микроэлементов в мясе и печени рыб, животных и птиц может даже в арктических районах превышать ПДК для пищевых продуктов.

Заключение

Изменения циркуляции атмосферы за рассматриваемый 25-летний период 1986–2010 гг. привели к существенному изменению качественного состава атмосферного воздуха на северных островах Евразии: он стал более морским. Особенно это должно быть заметно в Центральном и Тихоокеанском секторах Российской Арктики летом и в начале осени, когда поверхности суши и океана не закрыты снегом и льдом и состав континентального воздуха сильно отличается от морского. Обнаруженные сдвиги могут повлиять на состав почв, речных и озерных вод, на условия существования сухопутной флоры и фауны Арктики.

Обнаружено, что изменения циркуляции атмосферы на севере Евразии в 2000-х гг. уже не привели к заметному уменьшению вкладов антропогенных источников в загрязнение окружающей среды Российской Арктики, как это было в 80-е и 90-е гг. XX в. Изменения уровня загрязнения окружающей среды в Арктике в последние годы определялись в основном изменениями антропогенной эмиссии источников.

Оценены средние (для 2001–2010 гг.) антропогенные части концентраций в воздухе и потоков на поверхность тяжелых металлов (Pb, Cd, As, Zn, Ni, Cr, Cu) и сажи в разных районах Российской Арктики, а также их сезонные вариации. Эти величины можно использовать для анализа среднего антропогенного воздействия на окружающую среду при изучении долговременных процессов и вариаций различных характеристик в наземных средах, объектах и экосистемах.

Авторы благодарны РФФИ за финансовую поддержку – грант № 11-05-00300.

1. Алексеев Г.В., Радионов В.Ф., Александров Е.И., Иванов Н.Е., Харланенкова Н.Е. Климатические изменения в Арктике и северной полярной области // Проблемы Арктики и Антарктики. 2010. № 1(84). С. 67–80.
2. Sharma S., Andrews E., Barrie L.A., Jdren J.A., Lavoué D. Variations and sources of the equivalent black carbon in the high Arctic revealed by long-term observations at Alert and Barrow: 1989–2003 // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. D14208. doi:10.1029/2005JD006581.
3. Виноградова А.А., Пономарева Т.Я. Источники и стоки антропогенных микроэлементов в атмосфере Арктики: тенденции изменения с 1981 по 2005 г. // Оптика атмосфер. и океана. 2007. Т. 20, № 6. С. 471–480.
4. Гальперин М., Софиев М., Гусев А., Афиногенова О. Подходы к моделированию трансграничного загрязнения атмосферы Европы тяжелыми металлами. М.: ЕМЕП/МЦЦ-В, 1995. Отчет 7/95. 85 с.
5. Polissar A.V., Hopke P.K., Harris J.M., Bodhaine B.A., Dutton E.G. Source regions for atmospheric aerosol measured in the Western Arctic // J. Aerosol Sci. 1998. V. 29, suppl. 1. P. S513–S514.
6. Малышкин А.В., Поддубный В.А., Маркелов Ю.И., Береснев С.А., Горда С.Ю., Сакерин С.М., Смирнов А.В. Средний Урал в системе AEROSIBNET: предварительный анализ влияния региональных источников аэрозольного загрязнения атмосферы // Оптика атмосфер. и океана. 2007. Т. 20, № 6. С. 497–500.
7. Виноградова А.А., Максименков Л.О., Позгарский Ф.А. Влияние промышленности Норильска и Урала на окружающую среду различных районов Сибири // Оптика атмосфер. и океана. 2008. Т. 21, № 6. С. 479–485.
8. Vinogradova A.A. Anthropogenic pollutants in the Russian Arctic atmosphere: sources and sinks in spring and summer // Atmos. Environ. 2000. V. 34, N 29–30. P. 5151–5160.
9. Виноградова А.А., Пономарева Т.Я. Сезонные изменения атмосферных концентраций и выпадений антропогенных примесей в Российской Арктике // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2001. Т. 37, № 6. С. 761–770.
10. Akereolu F.A., Barrie L.A., Olson M.P., Oikawa K.K., Pacyna J.M., Keeler G.J. The flux of anthropogenic trace metals into the Arctic from the mid-latitudes in 1979/80 // Atmos. Environ. 1994. V. 28, N 8. P. 1557–1572.
11. Pacyna J.M., Bartonova A., Cornille P., Maenhaut W. Modeling of long-range transport of trace elements. A case study // Atmos. Environ. 1989. V. 23, N 1. P. 107–114.
12. URL: <http://www.msceast.org>
13. Ежегодник выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух городов и регионов Российской Федерации за 2007 год. СПб., 2008. 204 с.
14. Виноградова А.А. Меридиональные потоки массы и энергии вблизи границы Арктики // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2007. Т. 43, № 3. С. 314–326.
15. Сорокина С.А., Эзау И.Н. Меридиональный поток энергии в Арктике по данным архива радиозондирования IGRA // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2011. Т. 47, № 5. С. 622–633.
16. Кононова Н.К. Классификация циркуляционных механизмов Северного полушария по Б.Л. Дзердзеевскому. М.: Воентехиздат, 2009. 372 с.
17. Бышев В.И., Нейман В.Г., Романов Ю.А., Серых И.В. О фазовой изменчивости некоторых характеристик современного климата в регионе Северной Атлантики // Докл. РАН. 2011. Т. 438, № 6. С. 817–822.

18. Комаров В.С., Лавриненко А.В., Ильин С.Н., Ломакина Н.Я., Горев Е.В. Долговременные изменения температуры в пограничном слое атмосферы над территорией Сибири. Часть 1. Изменение среднегодовой температуры // Оптика атмосфер. и океана. 2011. Т. 24, № 8. С. 684–690.
19. Виноградова А.А., Максименков Л.О., Погарский Ф.А. Атмосферный перенос антропогенных тяжелых металлов с территории Кольского полуострова на поверхность Белого и Баренцева морей // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2008. Т. 44, № 6. С. 812–821.
20. Виноградова А.А., Максименков Л.О., Погарский Ф.А. Промышленные комплексы Заполярья – источники антропогенных тяжелых металлов в окружающей среде Российской Арктики // Изменение окружающей среды и климата: природные и связанные с ними техногенные катастрофы. Т. 3, ч. 2. Природные процессы в полярных областях Земли / Отв. ред. В.М. Котляков. М.: ИГ РАН, ИФЗ РАН, 2008. 376 с. С. 193–203.
21. *Persistent Toxic Substances, Food Security and Indigenous Peoples of the Russian North. Final Report.* Norway, Oslo: AMAP, 2004. 192 p.

A.A. Vinogradova, T.Ya. Ponomareva. Atmospheric transport of anthropogenic impurities to the Russian Arctic (1986–2010).

The 25-year line of data concerning air mass transport to three points in the Russian Arctic has been extended till 2010 and analyzed. The atmospheric transport of aerosol anthropogenic impurities to the Russian Arctic has been studied with its spatial, seasonal and long-term features. Changes in atmospheric circulation through 25 years (1986–2010) lead to the increase of the share of marine air masses over the northern islands of Eurasia. It can have effect on compositions of soils, river and lake waters, as well as living conditions of the Arctic flora and fauna. For the last decade (2001–2010) the average anthropogenic air concentrations of heavy metals (Pb, Cd, As, Zn, Ni, Cr, Cu) and soot, as well as their average fluxes onto the surface were estimated in the regions of Franz Josef Land and Severnaya Zemlya archipelagos. The results of the work can be used to study long-term varying processes and parameters of different land and marine objects and ecosystems in the Russian Arctic under anthropogenic influence.