

А.А. Виноградова, В.П. Шевченко, Т.Я. Пономарева, А.А. Ключиткин

Тренды 15-летних изменений в процессах переноса воздушных масс и антропогенных аэрозольных примесей в районе м. Лаптевых

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, г. Москва

Поступила в редакцию 4.01.2003 г.

Анализируются 15-летние (1986–2000 гг.) массивы ежедневных 5-суточных траекторий (прямых и обратных) движения воздушных масс в течение одного месяца (январь, апрель, июль, октябрь) из каждого сезона для географической точки, расположенной приблизительно в середине м. Лаптевых. Рассчитан сезонный ход средних атмосферных концентраций и выпадений на поверхность шести антропогенных химических элементов (As, Ni, Pb, V, Zn, Cd). Пятнадцатилетние изменения изучаемых характеристик оцениваются как линейные тренды скользящих 8-летних средних величин.

Показано, что в течение рассматриваемых 15 лет роль европейских промышленных регионов в загрязнении воздуха в районе м. Лаптевых уменьшалась, а азиатских, наоборот, увеличивалась. В результате изменения только процессов циркуляции атмосферы средние летние и весенние уровни загрязнения почти не менялись, а тренды изменений зимних и осенних величин приблизительно одинаковы и противоположны по знаку (увеличение зимой и уменьшение осенью). Годовые средние выпадения рассматриваемых аэрозольных микроэлементов на поверхность моря Лаптевых уменьшались не больше чем на 20%. Реально происходившее в эти годы снижение атмосферных выбросов большинства антропогенных примесей в Северной Евразии должно было еще усиливать этот эффект.

Синоптические и метеорологические особенности арктической атмосферы таковы, что в холодную часть года (зимой и весной) она содержит заметное количество антропогенных составляющих, принесенных в Арктику из среднеширотных промышленных регионов [1]. В результате при выпадении этих веществ на подстилающую поверхность происходит загрязнение снега, льда и воды Северного Ледовитого океана (СЛО). Причем для ряда микроэлементов (например, для свинца) атмосферный вклад в состав вод центральной части СЛО является определяющим [2]. Море Лаптевых – это район, где начинается циркумполярный дрейф арктических льдов, которые тают в проливе Фрама и в Гренландском море. Поэтому химический состав снега и льда из м. Лаптевых может оказать воздействие на состав и свойства вод центральной части СЛО и северной Атлантики. Предыдущая публикация авторов [3] была посвящена изучению влияния атмосферного аэрозоля на средний уровень загрязненности воздуха и вод в акватории м. Лаптевых в период с 1986 по 1995 г. Как показали последние наблюдения [4, 5], изменения целого ряда геофизических параметров (температура воздуха, осадки, граница вечной мерзлоты и т.д.), происходившие на рубеже второго и третьего тысячелетий, свидетельствуют о климатических сдвигах в Северном полушарии. Несомненно, что эти явления должны сказаться и на процессах, определяющих уровень и сезонные изменения загрязненности атмосферы в Арктике. Целью данной работы являлось исследование изменений условий циркуляции атмосферы, происшедших в центральной части Российской Арктики в течение 15 лет (с 1986 по 2000 г.), и их влияния на процессы переноса и осаждения на поверхность антропогенных аэрозольных примесей.

Методы и подходы

Для географической точки с координатами 77° с.ш., 125° в.д., расположенной приблизительно в центре м. Лаптевых (треугольник на рис. 1), анализировались 5-суточные прямые (уносящие) и обратные (приносящие) траектории движения воздуха, рассчитанные в Гидрометцентре России по изобарическим поверхностям 925 и 850 гПа на 0 ч GMT (с интервалом 6 ч), для каждого дня января, апреля, июля и октября с 1986 по 2000 г. Предполагая, что выбранные месяцы являются представительными для соответствующих сезонов, средние закономерности в изучаемых процессах, свойственные конкретному месяцу, можно считать характерными для всего времени года.

Для каждого месяца все обратные и все прямые траектории делились на группы по пространственным признакам: откуда приходят или куда уходят воздушные массы при движении по этим траекториям [6, 7]. При этом вся окружающая территория разбивалась на следующие части: материка (с подразделением на Европу, Азию и Америку), Арктика (область внутри 70° с.ш. плюс остальная более южная часть Гренландии) и океаны (Тихий и Атлантический отдельно). Как отмечалось в [3], во все сезоны года межгодовая изменчивость процессов атмосферной циркуляции в районе м. Лаптевых очень велика. Поэтому для повышения надежности результатов сначала рассчитывались 5-летние скользящие средние значения частоты реализации траекторий соответствующей группы, а затем по ним определялся линейный тренд изменения этой частоты во времени за рассматриваемые годы.

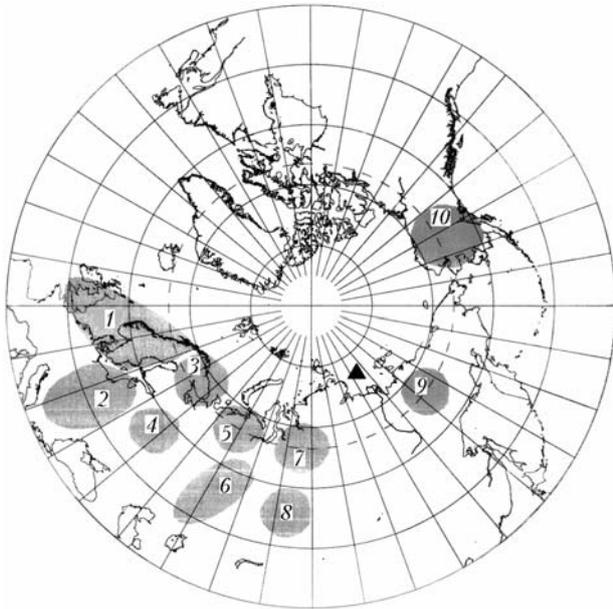


Рис. 1. Схематическое изображение крупных промышленных регионов, являющихся источниками загрязнения атмосферы в районе м. Лаптевых: 1 – Северная Европа; 2 – Центральная Европа; 3 – Кольский п-ов; 4 – центр европейской части бывшего СССР (ЦЕТС); 5 – Печорский бассейн; 6 – Урал; 7 – район Норильска; 8 – Кузбасс; 9 – Якутия; 10 – Аляска

Используемая нами методика оценок средних атмосферных концентраций аэрозольных примесей и их потоков на поверхность, базирующаяся на данных статистического анализа больших массивов траекторий движения воздуха для арктических районов, подробно описана в [8]. Она применима для химически неактивных атмосферных примесей, для которых величины скоростей осаждения на подстилающую поверхность можно считать следующими: $0,05-0,08 \text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$ зимой, $0,1-0,2 \text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$ весной, $0,9-1,2 \text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$ летом, $0,4-0,8 \text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$ осенью. В качестве примеров таких примесей можно назвать антропогенные тяжелые металлы, а также мышьяк и элементарный углерод (сажу).

Как показано в [3], десять крупных промышленных областей Северного полушария являются регионами-источниками загрязнения атмосферы в районе м. Лаптевых (см. рис. 1).

Для каждого региона можно оценить потенциальные возможности (различные в каждый сезон) влиять на уровень загрязнения атмосферы в пункте наблюдений. Для этого вводится так называемая функция эффективности переноса (ФЭП), величина которой для каждого региона-источника зависит от вероятности и скорости движения воздуха между этим источником и пунктом наблюдений. Значение ФЭП определяется также условиями вертикального перемешивания в приземном слое атмосферы и скоростью выведения примеси на поверхность во время переноса. В [3,8] приведены формулы и значения параметров для расчета величины ФЭП, в которых по данным многолетних наблюдений учтены сезонные различия характеристик температурных инверсий, облачности и осадков в центральной части Российской Арктики.

В рамках такого подхода средняя атмосферная концентрация примеси C в пункте наблюдений рассчитывается

для каждого сезона как сумма вкладов континентального C^{cont} и арктического C^{Arc} воздуха:

$$C = C^{\text{cont}} + C^{\text{Arc}} = \sum C_i + qC, \quad (1)$$

где C_i – средняя концентрация, создаваемая регионом i , пропорциональная соответствующей величине ФЭП и мощности атмосферных выбросов этого региона; q – средняя частота поступления воздуха из Арктики для зимы или весны (для лета и осени $C^{\text{Arc}} = 0$). Как показано в [8], зимой и весной в Арктике воздух и его составляющие эффективно перемешиваются. Поэтому введение второго члена в формуле (1) позволяет учесть загрязненность самой арктической атмосферы в предположении равномерного распределения примеси по всему пространству Арктики. Летом и осенью этот эффект отсутствует, так как скорость осаждения примеси на поверхность приблизительно на порядок выше, чем в остальные сезоны.

Средний поток антропогенной примеси на подстилающую поверхность рассчитывался так же, как в [7, 8], – по средней атмосферной концентрации этой примеси с использованием результатов статистического анализа распределений прямых траекторий переноса воздушных масс от пункта наблюдений.

Учитывая сильную межгодовую изменчивость в процессах циркуляции атмосферы, для получения представительных статистических характеристик траекторий, связывающих пункт наблюдений с каждым из регионов-источников, при расчете величин ФЭП необходимо усреднение по достаточно большому числу лет. Например, в [3, 8] это делалось по 10-летним массивам траекторий. В данном случае, когда мы хотели выявить временные тренды изменений ФЭП за 15 лет, усреднение проводилось для каждого сезона по 8-летним «скользящим» комплектам траекторий. Затем рассчитывались 8-летние средние значения ФЭП и по ним – тренды временных изменений ФЭП за 15 лет с помощью линейной аппроксимации. Атмосферная концентрация примеси и ее поток на поверхность определялись для каждого сезона в отдельности по начальному (1986–1993 гг.) и конечному (1993–2000 гг.) комплектам значений ФЭП, определенных по прямым регрессии. Мощности выбросов регионов-источников при этом фиксировались на значениях, приведенных в [9, 10], что позволило проанализировать влияние только изменения атмосферных процессов на уровень загрязненности воздуха в рассматриваемом районе Арктики.

Перенос воздушных масс

Результаты анализа пространственных распределений прямых и обратных траекторий приведены на рис. 2 для каждого сезона в виде двух гистограмм, характеризующих циркуляционные процессы в первые и последние 5 лет рассматриваемого 15-летнего периода (как результат линейной аппроксимации временных зависимостей 5-летних «скользящих» средних значений соответствующих частот). Видно, что в целом воздухообмен рассматриваемого района Арктики с различными окружающими территориями за 15 лет претерпел значительные изменения. В целом по нашим данным можно выделить следующие характерные черты в изменениях процесса воздухообмена в районе м. Лаптевых с 1986 по 2000 г.: 1) во все сезоны воздух после прохода над пунктом наблюдений все чаще оставался в Арктике и все реже уходил в Азию; 2) во все сезоны, кроме лета, все реже воздух посту-

пал в пункт наблюдений из Европы и все чаще – из Азии; 3) частота поступления воздуха из Арктики уменьшалась зимой и осенью, а весной, наоборот, возрастала; 4) зимой и весной морской воздух, поступающий сначала из Атлантики, в конце изучаемого 15-летнего периода стал приходиться с территории Тихого океана. Таким образом, в центральной части Российской Арктики в течение рассматриваемых 15 лет зимой и весной западный перенос постепенно сменялся восточным.

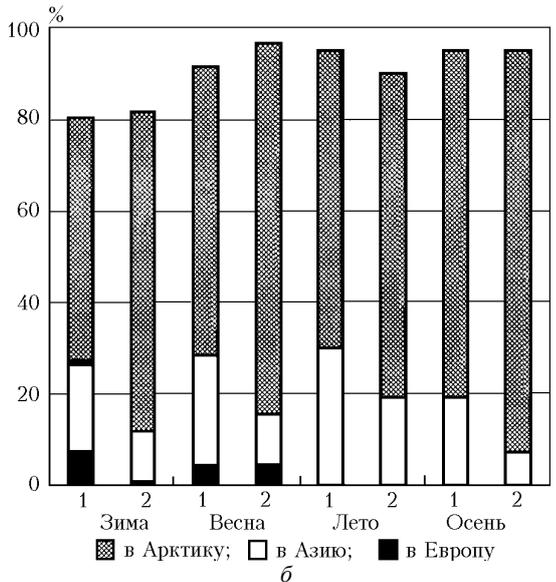
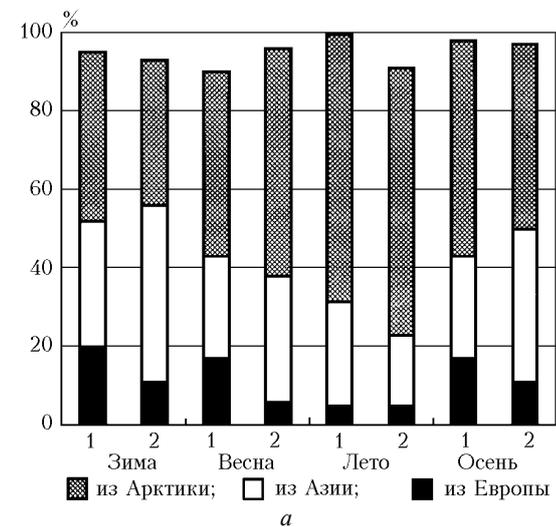


Рис. 2. Изменение частот поступления воздуха с различных территорий (а) и частот ухода воздуха на различные территории (б) в разные сезоны с 1986 по 2000 г. Крайние результаты линейной аппроксимации 5-летних средних величин: периоды 1986–1990 (1) и 1996–2000 гг. (2). Недостающие до 100% доли связаны с воздушными массами, приходящими с территории Америки и океанов и уходящими туда же

Перенос антропогенных микроэлементов на аэрозольных частицах

На рис. 3 приведены 8-летние средние значения ФЭП для наиболее значимых регионов-источников в разные сезоны, а также линейные тренды их изменений

на рассматриваемом временном интервале. Для лета тренды не рассчитывались из-за малой статистики (набираемой по восьми годам) для отдельных источников. Видно, что уменьшение доли европейского и, наоборот, увеличение доли азиатского воздуха за рассматриваемые 15 лет (см. рис. 2) в той или иной степени качественно отражаются и на изменениях потенциальных возможностей влиять на загрязнение атмосферы в пункте наблюдений соответственно европейских и азиатских регионов-источников. Так, например, значения ФЭП для Кольского п-ова и Северной Европы уменьшались, а для районов Кузбасса и Якутии увеличивались во все сезоны (см. рис. 3). Тренды же изменений величин ФЭП таких источников, как район Норильска, Урал и Печорский бассейн, расположенных вблизи границы между Европой и Азией, имеют разные знаки в разные сезоны.

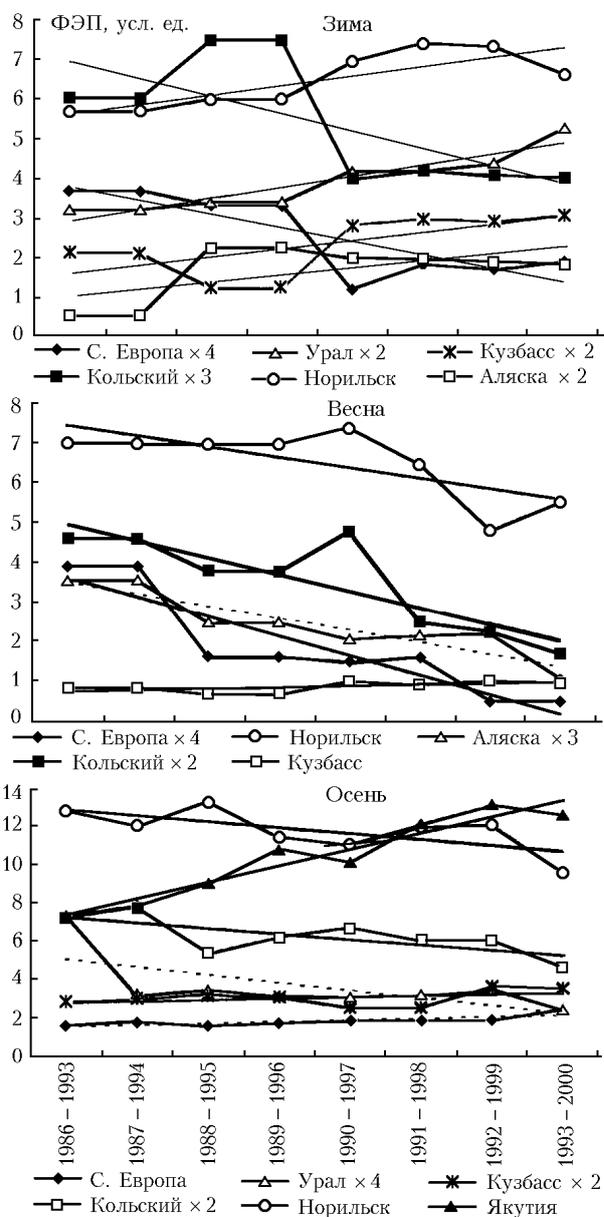


Рис. 3. Изменения ФЭП наиболее значимых регионов-источников в разные сезоны. Линейные тренды 8-летних средних величин

Рассмотрим влияние отмеченных выше изменений в процессах переноса воздушных масс и величин ФЭП регионов-источников на уровень загрязненности атмосферы в районе м. Лаптевых шестью антропогенными микроэлементами (As, Ni, Pb, V, Zn, Cd), являющимися приоритетными для изучения из-за их негативного воздействия на окружающую среду и человека [11].

В табл. 1 суммированы сведения об изменении за 15 лет средних атмосферных концентраций, рассчитанных по формуле (1) с учетом данных [9, 10] о составе и мощности эмиссии евро-азиатских регионов-источников, этих шести микроэлементов в пункте наблюдений и их средних потоков на поверхность м. Лаптевых в разные сезоны. На рис. 4 на примере свинца показаны сезонные изменения средних величин атмосферной концентрации аэрозольной примеси и ее потока на поверхность м. Лаптевых (662 тыс. км²). Качественно аналогичные гистограммы можно построить и для остальных пяти

микроэлементов. Таким образом, в течение 15 лет весной средние атмосферные концентрации антропогенных микроэлементов почти не менялись, а зимой и осенью их относительные изменения приблизительно одинаковы по величине и противоположны по знаку (увеличение зимой и уменьшение осенью). Некоторое количественное отличие изменения потоков на поверхность по сравнению с соответствующими изменениями атмосферных концентраций связано с вариациями условий очищения арктической атмосферы в этот период. Как отмечалось ранее, воздушные массы после прохода через пункт наблюдений все чаще оставались в Арктике, не выходя южнее широты 70° с.ш. (см. рис. 2). В результате в процессе очищения арктической атмосферы возрастала роль «вертикального» механизма осаждения примеси на поверхность по сравнению с «горизонтальным» выносом из Арктики воздушными потоками (см. подробнее [12]).

Таблица 1

Изменения средних атмосферных концентраций микроэлементов и их средних потоков на поверхность м. Лаптевых (662 тыс. км²) с 1986–1993 гг. (начало) до 1993–2000 гг. (конец)

| Элемент | Зима | | Весна | | Лето | Осень | |
|------------------------|--|-------|----------------|-------|---------|-------------------|-------|
| | Начало | Конец | Начало | Конец | Среднее | Начало | Конец |
| | <i>Концентрации, нг·м⁻³</i> | | | | | | |
| As | 0,13 | 0,17 | 0,14 | 0,12 | 0,019 | 0,16 | 0,12 |
| Ni | 0,41 | 0,50 | 0,47 | 0,39 | 0,074 | 0,51 | 0,39 |
| Pb | 1,2 | 1,6 | 0,86 | 0,86 | 0,075 | 1,35 | 1,0 |
| V | 0,30 | 0,40 | 0,17 | 0,16 | 0,014 | 0,33 | 0,22 |
| Zn | 0,73 | 1,1 | 0,60 | 0,66 | 0,023 | 0,80 | 0,70 |
| Cd | 0,030 | 0,042 | 0,028 | 0,027 | 0,0024 | 0,035 | 0,029 |
| Изменение концентраций | Растут в 1,3 раза | | Слабо падают | | – | Падают в 1,3 раза | |
| | <i>Потоки, кг·мес⁻¹</i> | | | | | | |
| As | 70 | 100 | 145 | 130 | 60 | 350 | 260 |
| Ni | 220 | 300 | 480 | 430 | 230 | 1100 | 870 |
| Pb | 630 | 950 | 870 | 940 | 240 | 3000 | 2200 |
| V | 150 | 220 | 170 | 170 | 44 | 730 | 490 |
| Zn | 390 | 640 | 610 | 720 | 73 | 1800 | 1500 |
| Cd | 17 | 26 | 28 | 30 | 7,3 | 77 | 64 |
| Изменение потоков | Растут в 1,5 раза | | Меняются слабо | | – | Падают в 1,3 раза | |

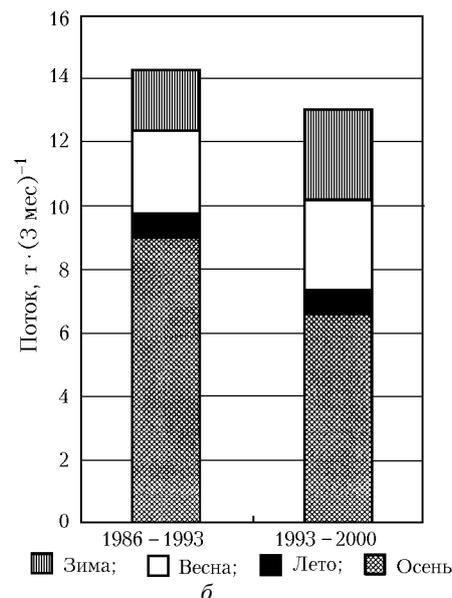
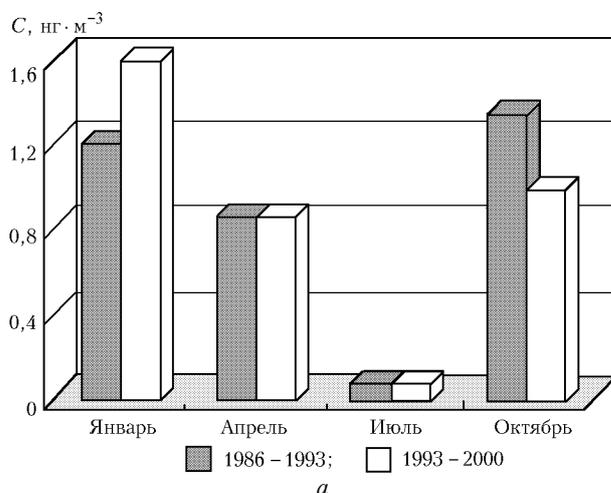


Рис. 4. Сезонные изменения средних атмосферных концентраций свинца (а) и его выпадений (за 3 мес в каждом сезоне и за год) на поверхность м. Лаптевых (б)

Таблица 2

Изменения средних годовых потоков (т·год⁻¹) микроэлементов на поверхность м. Лаптевых с 1986–1993 гг. (начало) до 1993–2000 гг. (конец)

| Элемент | As | Ni | Pb | V | Zn | Cd |
|--------------|-----|-----|------|-----|------|------|
| Начало | 1,9 | 6,1 | 14,2 | 3,3 | 8,6 | 0,39 |
| Конец | 1,6 | 5,5 | 13,0 | 2,8 | 8,8 | 0,38 |
| Начало/конец | 1,2 | 1,1 | 1,1 | 1,2 | 0,98 | 1,03 |

Таким образом, по нашим оценкам, в период с 1986 по 2000 г. только за счет воздействия изменений в процессах переноса воздушных масс годовые средние выпадения на поверхность моря Лаптевых таких элементов, как As, Ni, Pb и V, уменьшались, но не более чем на 20% (табл. 2 и рис. 4,б). Этому способствовали сезонные различия абсолютных значений средних потоков на поверхность, а именно тот факт, что осенью выпадения аэрозолей на поверхность в районе м. Лаптевых максимальны (см. табл. 1). Годовые потоки на поверхность Cd и Zn практически не изменялись, что связано с увеличением во все сезоны значений ФЭП для района Кузбасса, в атмосферных выбросах которого велико относительное содержание этих элементов. Если же учесть уменьшение мощностей антропогенных выбросов в Европе и в промышленных районах бывшего СССР, происходившее в 90-х гг. [13], то можно утверждать, что потоки антропогенных аэрозольных примесей на поверхность моря Лаптевых в последние 15 лет прошлого столетия уменьшались.

Выводы

1. В процессах движения воздушных масс через акваторию м. Лаптевых в период с 1986 по 2000 г. можно выделить различные направленные изменения, свойственные как отдельным сезонам, так и всему году в целом: а) во все сезоны воздух после прохода над пунктом наблюдений все чаще оставался в Арктике и все реже уходил в Азию; б) во все сезоны, кроме лета, все реже воздух поступал в пункт наблюдений из Европы и все чаще – из Азии; в) с территории Тихого океана.

2. Потенциальные возможности различных регионов-источников участвовать в загрязнении атмосферы в районе м. Лаптевых изменялись неодинаково: а) во все сезоны влияние Кольского п-ова и Северной Европы уменьшалось и, наоборот, районов Кузбасса и Якутии – увеличивалось; б) тренды изменения влияния таких регионов, как район Норильска, Урал и Печорский бассейн, имеют разные знаки в разные сезоны.

3. Предполагая, что в течение 15 лет с 1986 по 2000 г. мощности атмосферных выбросов крупных промышленных регионов Европы и азиатской части России не менялись, средние атмосферные концентрации шести антропогенных микроэлементов, переносимых на аэрозольных частицах (As, Ni, Pb, V, Zn и Cd), и их средние потоки на подстилающую поверхность изменялись следующим образом:

– концентрации в воздухе весной практически не менялись, а зимой и осенью соответственно возраста-

ли и убывали приблизительно в 1,3 раза, летом концентрации антропогенных примесей столь малы, что их изменения трудно оценить, да и влияние их ничтожно;

– потоки на поверхность м. Лаптевых зимой возрастали приблизительно в 1,5 раза, весной почти не менялись, а осенью уменьшались примерно в 1,3 раза, однако суммарные годовые потоки этих элементов на м. Лаптевых в течение рассматриваемых 15 лет слабо падали.

В заключение еще раз подчеркнем, что происходившее в 90-е гг. в Европе и в азиатской части России уменьшение антропогенных выбросов рассматриваемых микроэлементов в атмосферу должно еще ослаблять эффект загрязнения атмосферного аэрозоля и подстилающей поверхности в центральной части Российской Арктики в конце XX в.

Авторы благодарны академику А.П. Лисицыну за поддержку.

Работа финансировалась Российско-Германской лабораторией им. Отто Шмидта (грант ONR «Strata formation on Russian continental margin» – проект № 1257) и Российским фондом фундаментальных исследований (гранты ¹ 00-05-64389 и 00-15-98623).

1. *Виноградова А.А.* Микроэлементы в составе арктического аэрозоля (обзор) // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 1993. Т. 29. № 4. С. 437–456.
2. *Шевченко В.П., Лисицын А.П., Виноградова А.А., Смирнов В.В., Серова В.В., Штайн Р.* Аэрозоли Арктики – результаты десятилетних исследований // Оптика атмосфер. и океана. 2000. Т. 13. № 6–7. С. 551–576.
3. *Виноградова А.А., Шевченко В.П., Пономарева Т.Я., Клювиткин А.А.* Вклад атмосферных аэрозолей в загрязнение вод моря Лаптевых // Оптика атмосфер. и океана. 2002. Т. 15. № 5–6. С. 435–440.
4. *Мохов И.И., Демченко П.Ф., Елисеев А.В., Хон В.Ч., Хворостьянов Д.В.* Оценки глобальных и региональных изменений климата в XIX–XXI веках на основе модели ИФА РАН с учетом антропогенных воздействий // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2002. Т. 38. № 5. С. 629–642.
5. *Arctic Pollution 2002.* Oslo, Norway: AMAP, 2002. 111 p.
6. *Виноградова А.А., Егоров В.А.* О возможностях дальнего атмосферного переноса загрязнений в Российскую Арктику // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 1996. Т. 32. № 6. С. 796–802.
7. *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.
8. *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.
9. *Pacyna J.M., Semb A., and Hanssen J.E.* Emission and long-range transport of trace elements in Europe // Tellus. 1984. V. 36B. N 3. P. 163–178.
10. *Pacyna J.M., Ottar B., Tomza U., and Maenhaut W.* Long-range transport of trace elements to Ny-Alesund, Spitsbergen // Atmos. Environ. 1985. V. 19. N 6. P. 857–864.
11. *Арктика на пороге третьего тысячелетия (ресурсный потенциал и проблемы экологии)* // СПб.: Наука, 2000. 247 с.
12. *Виноградова А.А., Бурова Л.П.* О механизмах очищения арктической атмосферы // Докл. РАН. 2001. Т. 379. N 3. С. 377–380.
13. *Pacyna J.M.* Source inventories for atmospheric trace metals // Atmospheric Particles / Ed. by R.M. Harrison and R. Van Grieken. 1998. P. 385–423.

A.A. Vinogradova, V.P. Shevchenko, T.Ya. Ponomareva, A.A. Klyuvitkin. **15-year trends in the processes of air mass and anthropogenic aerosol transport over the Laptev Sea.**

Analysis of 15-year (1986–2000) daily 5-day forward and backward trajectories of air mass motion for one month (January, April, July, October) in each season is performed for a geographic point located roughly at the center of the Laptev Sea. The seasonal behavior of mean atmospheric concentrations and surface deposition of six anthropogenic chemical elements (As, Ni, Pb, V, Zn, Cd) is calculated. The 15-year variations in the studied characteristics are estimated as linear trends of 8-year moving averages.

It is shown that for the 15-year analyzed the role of European regions in pollution of the Laptev Sea has decreased, while the role of Asian regions, to the contrary, has increased. As a result of variation in only atmospheric circulation processes, the summer and spring pollution levels almost did not change, while the trends of winter and fall levels were almost identical, but with the opposite sign (increase in winter and decrease in fall). The annual mean depositions of the considered aerosol microelements on the surface of the Laptev Sea decreased by no more than 20%. The actual decrease of atmospheric emissions of anthropogenic pollutants that occurred in Eurasia over these years should further enhance this effect.