

А.А. Виноградова, Т.Я. Пономарева

Очищение арктической атмосферы путем выноса загрязнений в средние широты

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

Поступила в редакцию 25.12.2000 г.

Проведен статистический анализ пространственного распределения арктического воздуха в средних широтах, а также оценена эффективность атмосферного выноса примесей из Арктики по сравнению с традиционным механизмом очищения воздуха в процессе осаднения примесей на поверхность. Изучались 10-летние ряды 8-суточных прямых траекторий движения воздуха для трех пунктов наблюдений – Земля Франца-Иосифа, арх. Северная Земля и о. Врангеля. Расчеты траекторий проводились в Гидрометцентре России на изобарической поверхности 850 гПа для каждого дня одного зимнего месяца с 1986 по 1995 г.

Зимой атмосферный вынос является наиболее эффективным способом очищения арктической атмосферы: скорость эквивалентного процесса осаднения выше скоростей сухого и влажного осаднения на поверхность для консервативных примесей, переносимых на субмикронных аэрозольных частицах. По количеству таких примесей, удаляемых из атмосферы Арктики в целом за один зимний месяц, вклад процесса горизонтального выноса воздушными массами приблизительно вдвое превосходит вклад вертикального осаднения на поверхность.

До сих пор процессы загрязнения Арктики изучались лишь с точки зрения переноса примесей внутрь Арктического региона, хотя атмосферный вынос загрязнений отсюда – один из важнейших механизмов очищения атмосферы и всей экосистемы Арктики. В последнем случае примеси удаляются вообще за пределы Арктики, тогда как при осаднении на поверхность очищается атмосфера, но загрязняются другие составляющие природной среды (почва, снег, вода и т.д.). Экспериментальные наблюдения показывают, что зимой и весной воздушные массы, приходящие из Арктики в средние широты, могут содержать значительное количество антропогенных примесей [1–3]. Это связано с тем, что в холодную половину года загрязнения, принесенные в Арктику из промышленных областей, могут оставаться в арктической атмосфере до 10–15 сут и перемещаться там, как в огромном резервуаре, частично выходя обратно за пределы региона [4].

В последние 5 лет при решении различных климатических задач, связанных с дальним переносом воздуха и вещества в атмосфере, стал широко использоваться анализ больших массивов траекторий движения воздушных масс [5]. В частности, именно таким образом нами изучались сезонные закономерности в процессах переноса антропогенных примесей в Арктику [4, 6–8]. В данной статье, наоборот, сделана попытка статистически проанализировать частоту и дальность распространения арктического воздуха в средние широты, а также оценить эффективность выноса загрязнений из Арктики как одного из механизмов очищения арктической атмосферы.

Траектории движения воздушных масс и их распределения

Как было показано в [4, 7], зимой и весной время жизни консервативной (в отношении химических реакций) примеси в арктическом воздухе превышает 5 сут. Поэтому в данной статье анализировались 8-суточные прямые (уходящие) изобарические (для поверхности 850 гПа) траектории движения воздуха от трех пунктов в Российской Арктике – Земля Франца-Иосифа (ЗФИ) – 81,1° с.ш., 56,3° в.д., арх. Северная Земля (СЗ) – 79,5° с.ш., 95,4° в.д. и о. Врангеля (ВР) – 71,0° с.ш., 178,5° з.д. Траектории рассчитывались в Гидрометцентре России на 0 ч GMT с интервалом 6 ч для каждого дня одного зимнего месяца (с 11 января по 10 февраля) с 1986 по 1995 г. Таким образом, для каждого пункта массив состоял из 310 траекторий.

Анализ рассматриваемых траекторий показал, что значительная их часть – от 50% (для сибирского сектора Арктики) до 60–70% (для североатлантического и тихоокеанского секторов) – выходит в течение 8 сут за пределы Арктики (в наших исследованиях – за пределы окружности 70° с.ш.), определяя направления выноса арктических воздушных масс от пунктов наблюдений в средние широты.

Выход воздушных масс за пределы 70° с.ш.

Анализ рассматриваемых траекторий показал, что значительная их часть – от 50% (для сибирского сектора Арктики) до 60–70% (для североатлантического и тихоокеанского секторов) – выходит в течение 8 сут за пределы Арктики (в наших исследованиях – за пределы окружности 70° с.ш.), определяя направления выноса арктических воздушных масс от пунктов наблюдений в средние широты.

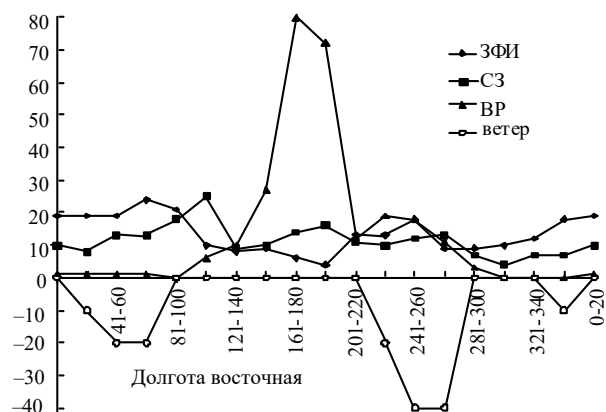


Рис. 1. Распределение частот пересечения параллели 70° с.ш. траекториями, выходящими из пунктов наблюдений ЗФИ, СЗ и ВР (число дней в месяце за 10 лет). Отрицательные значения – средняя меридиональная составляющая скорости ветра на широте 70° с.ш., когда она направлена на юг [9] ($\times -10 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$)

Рис. 1 дает представление о распределении потоков арктического воздуха, пересекающих широту 70° с.ш. Там же приведены значения средней меридиональной составляющей скорости ветра, когда она направлена на юг (отрицательные значения), на широте 70° с.ш., рассчитанные в [9] для января по 30-летнему ряду метеоданных для слоя тропосферы в пределах высот 0–6 км. Видно, что часть обнаруженных нами потоков из Арктики в более южные широты хорошо совпадает со средними евроазиатским и канадским. Однако наличие максимума частот выхода воздуха вблизи 180° в.д., и не только от расположенного недалеко о. Врангеля, но и от арх. Северная Земля, свидетельствует о мощном мери-

диональном воздухообмене в нижнем слое тропосферы (ниже 1,5 км), происходящем зимой на границе тихоокеанского сектора Арктики. В несколько меньшей степени это также справедливо и для североатлантического сектора.

Рассматриваемые траектории пересекают параллель 70° с.ш. в среднем через 3–5 сут после выхода из пунктов наблюдений. При этом в холодное время года 70–90% примесей, имевшихся в атмосфере в пунктах наблюдений, еще остаются в воздухе (при выборе зимних значений скоростей осаждения субмикронных частиц, содержащих антропогенные микроэлементы, в диапазоне $0,05\text{--}0,07\text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$ [7]).

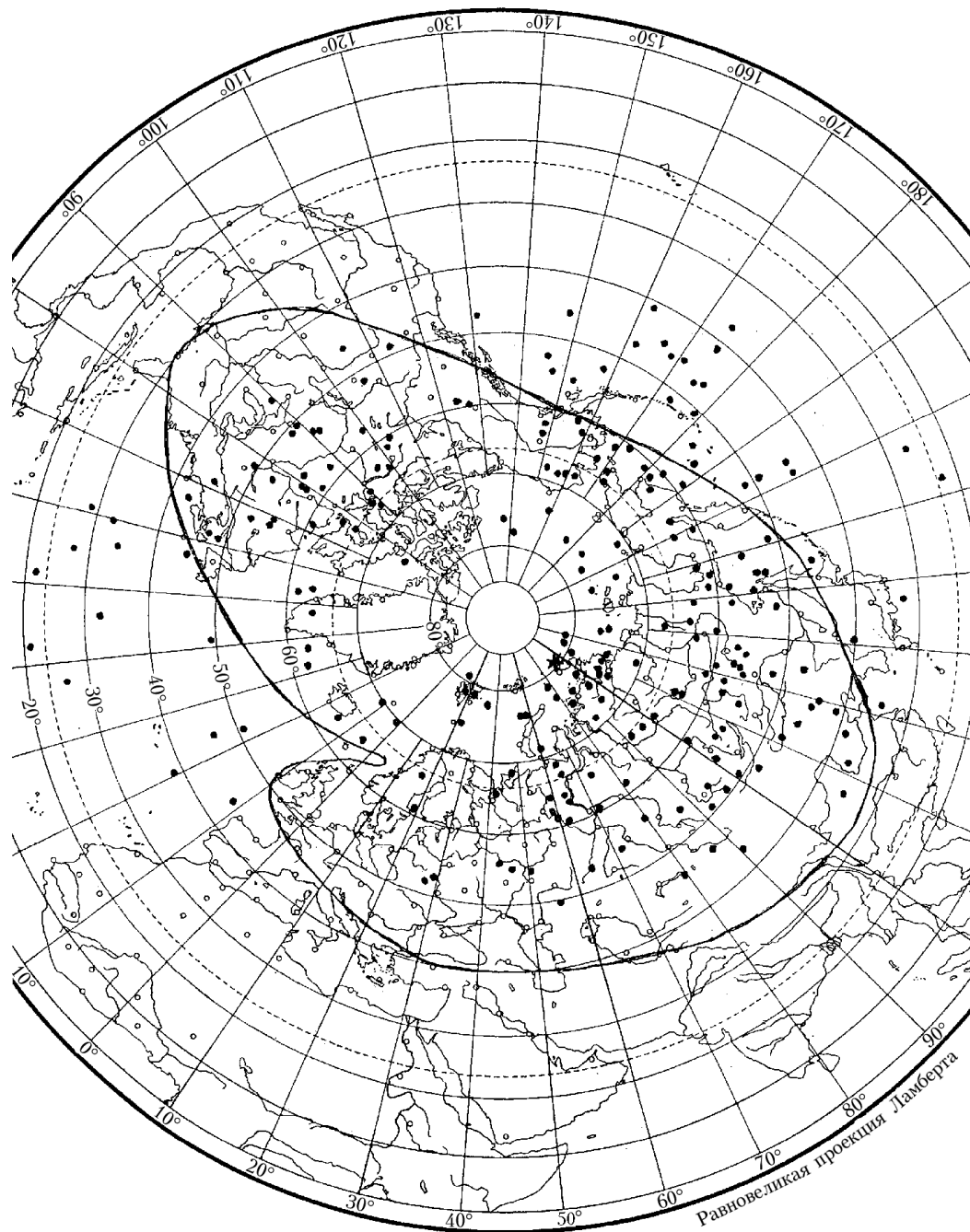


Рис. 2. Географическое положение самых южных точек всех траекторий для СЗ (черные точки). Сплошная кривая – среднее положение арктического фронта для января [1]

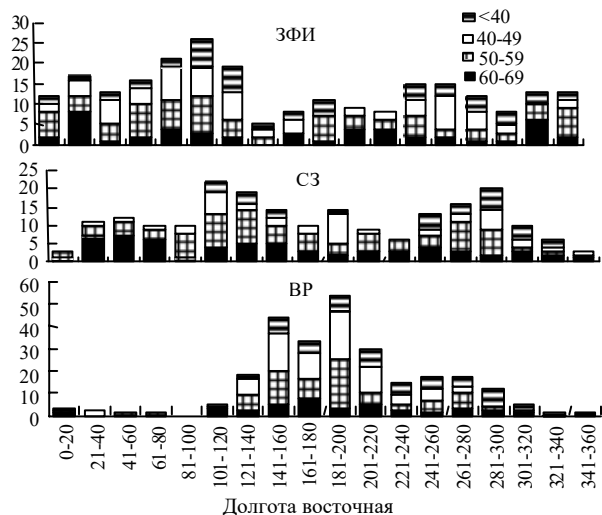


Рис. 3. Распределения по широтным поясам самых южных точек траекторий, уходящих от пунктов наблюдений (число дней из месяца за 10 лет)

Таблица 1
Характеристики распределений самых южных точек 8-суточных траекторий, уходящих из разных пунктов в зимнее время года

Долгота, град	Среднее время достижения южной точки, сут			Частота попадания южных точек в интервалы широт, %		
	ЗФИ	СЗ	ВР	ЗФИ	СЗ	ВР
60–69	6,8	6,8	5,9	15,5	20,0	11,9
50–59	6,5	6,6	5,7	25,5	25,5	25,8
40–49	7,2	7,3	6,2	21,3	12,6	28,7
< 40	7,2	7,6	7,1	15,5	9,0	18,1

Особое внимание следует обратить на частый вынос арктического воздуха (особенно от о. Врангеля) далеко в средние широты Тихого океана (см. рис. 3). Эти воздушные массы, двигаясь на юг, пересекают область арктического фронта (см. рис. 2), где должно происходить эффективное вымывание примесей осадками на подстилающую поверхность, т.е. в воды северной части Тихого океана. Здесь же должны меняться и физические свойства этого воздуха: повышение температуры и влажности достаточно быстро будет превращать его в типичный морской тихоокеанский воздух.

Механизмы очищения арктической атмосферы

Зная закономерности пространственного распределения траекторий от каждого пункта и применяя предложенную в [4] методику, получим зимние распределения консервативной примеси через 8 сут после ее ухода из рассматриваемых пунктов (табл. 2).

Таблица 2

Пункт наблюдений	Зимние распределения консервативной примеси через 8 сут после ее ухода из разных пунктов наблюдений, %		
	Уходит из Арктики, g	Оседает в Арктике, f	Остается в арктической атмосфере
ЗФИ	44,6	32,8	22,6
СЗ	43,7	16,9	39,4
ВР	60,5	17,1	22,4

Для расчета этих характеристик использовались параметры осаднения примесей на подстилающую поверхность, приведенные в [8] на основании многолетних данных об осадках и облачности для зимы в Арктике. Естественно, что распределения в табл. 2 несколько отличаются от тех, что приведены в [8] для 5-суточных траекторий, поскольку доля примеси, оседающей на поверхность в Арктике, непосредственно определяется длительностью временного интервала, за который она рассчитывается.

Если чисто формально описать процесс атмосферного (горизонтального) выноса примеси из Арктики экспоненциальной зависимостью от времени с фиктивной «скоростью осаднения», то можно сравнить ее со скоростями сухого осаднения на поверхность и осаднения осадками (рис. 4). Видно, что зимой наиболее эффективным (обладающим большей скоростью при прочих равных условиях) механизмом удаления примесей из арктической атмосферы является вынос воздушными потоками за пределы региона. Лишь в североатлантическом секторе его «скорость осаднения» сравнима со скоростью сухого осаднения на поверхность. Осаждение же осадками зимой везде малоэффективно.

Отметим, что средние (по трем пунктам) процентные соотношения скоростей трех механизмов очищения с точностью до 1–2% соответствуют аналогичным зимним соотношениям, рассчитанным по 5-суточным траекториям [8] (если считать, что других механизмов удаления примесей из арктической атмосферы нет).

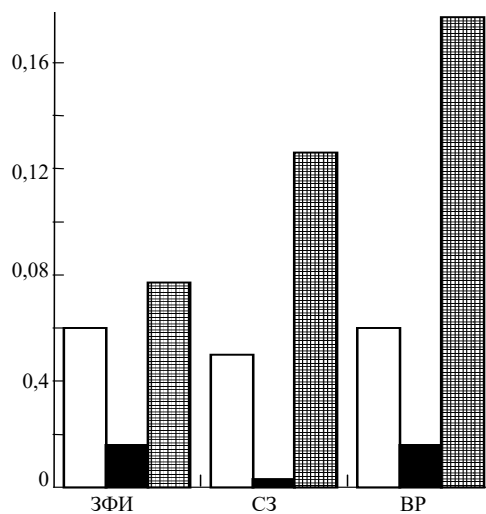


Рис. 4. Сравнение трех механизмов очищения арктической атмосферы по скоростям осаднения на поверхность для трех пунктов наблюдений ($\text{см} \cdot \text{с}^{-1}$): □ – сухое осаднение; ■ – осаднение осадками; ▨ – вынос воздушными массами

Эффективность выноса примесей воздушными потоками из Арктики в целом

В холодную половину года в арктической атмосфере воздушные массы и примеси активно перемешиваются [4, 7, 8]. Поэтому для грубых оценок можно предположить, что зимой арктическая атмосфера полностью перемешана. Тогда значение концентрации какой-либо примеси C постоянно на всей территории внутри 70° с.ш., в том числе и на ее границе. Среднюю высоту слоя перемешивания H также будем считать одинаковой на всей территории Арк-

тики. Тогда среднее количество примеси D , оседающее за месяц на поверхность всей Арктики, можно оценить с помощью выражения

$$D = (N/8) CHSf, \quad (1)$$

где f – доля примеси, оседающая на поверхность в Арктике в течение 8 сут; $S = 2,3 \cdot 10^{13} \text{ м}^2$ – площадь, ограниченная параллелью 70° с.ш. Аналогично, подставляя в формулу (1) вместо f величину доли примеси g , уходящей за пределы Арктики за 8 сут, можно оценить среднее количество этой примеси G , уходящее за месяц из Арктики с воздушными массами. Усредняя значения f и g из табл. 2 по трем рассмотренным пунктам и считая, что полученные значения приблизительно характеризуют соответствующие процессы в любой точке Арктического региона и применимы для всей Арктики в целом, оценим среднее отношение этих потоков как $G : D = 2,2$.

Относительный вклад механизма горизонтального выноса примеси воздушными потоками в процесс очищения воздуха в какой-либо точке Арктического региона зависит от местоположения рассматриваемого пункта. В частности, большие значения «скорости осаждения» для этого механизма на ВР (см. рис. 4) связаны, по-видимому, с тем, что этот пункт расположен значительно южнее двух других и находится, как отмечалось ранее, в зоне активного воздухообмена Арктики со средними широтами. Наоборот, для тех районов Арктики, где такой воздухообмен ослаблен, эффективность рассматриваемого механизма очищения атмосферы может быть меньше, чем для изучаемых нами пунктов. Поэтому, чтобы сделать независимые количественные оценки уходящих потоков примесей из Арктики в целом, попытаемся использовать результаты работы [9], относящиеся ко всему Арктическому региону.

Средний поток примеси, выносимой из Арктики воздушными массами, можно оценить, зная средние распределения вдоль параллели 70° с.ш. ее концентрации $C(l)$, значений высоты слоя перемешивания $H(l)$ и средней скорости движения воздуха в южном направлении $V(l)$. Тогда количество примеси G_0 , уходящее за время t на юг через воображаемую стенку высотой H на широте 70° с.ш., можно рассчитать по формуле

$$G_0 = t \int [C(l)H(l)V(l)] dl, \quad (2)$$

где dl – линейный элемент длины дуги вдоль параллели 70° с.ш., а интегрирование ведется вдоль всей параллели. Упростим расчеты, по-прежнему считая, что воздушные массы и примеси в Арктике зимой полностью перемешаны. Вынося постоянные C и H в формуле (2) из-под интеграла, получим

$$G_0 = t [CH \int V(l)] dl. \quad (3)$$

Сравнивая выражения (1) и (3), легко видеть, что при таких грубых оценках соотношение вкладов процессов осаждения на поверхность и выноса за пределы Арктики не зависит от конкретной примеси и величины средней высоты слоя перемешивания. Подставляя $V(l)$ из [9] (см. рис. 1) и выбирая длительность t , равную одному месяцу, получим, что отношение вкладов горизонтального выноса, оцененного из (3), и вертикального осаждения, оцененного из (1), $G_0 : D = 2$. Если

использовать значения D , рассчитанные в [8] по 5-суточным траекториям, то можно получить $G_0 : D = 1,6$.

Таким образом, различные оценки дают очень близкие результаты, что позволяет сделать вывод, что зимой для Арктики в целом вклад процесса горизонтального очищения атмосферы (вынос за пределы региона) приблизительно вдвое превосходит вклад вертикального очищения (осаждение на поверхность). Эта оценка должна быть справедлива (с той точностью, с которой справедлива пространственная экстраполяция результатов, полученных для трех пунктов в Российской Арктике, на всю территорию Арктического региона) для всех консервативных в химическом отношении примесей, переносимых зимой в северных широтах на субмикронных аэрозольных частицах, для которых можно считать значения скорости осаждения на поверхность равными $0,05\text{--}0,07 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$.

Количественные оценки

Рассмотрим в качестве примера такой примеси типично антропогенный химический элемент – свинец. Как показано в [8], именно для этого элемента наши оценки многолетней средней концентрации и ее сезонного хода в Российской Арктике наилучшим образом совпадают с экспериментальными многолетними средними значениями этих характеристик в атмосфере Канадской Арктики. Это оправдывает предположение о постоянстве концентрации примеси на всей территории Арктического региона. Примем значение $2 \text{ нг} \cdot \text{м}^{-3}$ в качестве зимней концентрации свинца на всей территории Арктики [8], а среднее значение $H = 1 \text{ км}$, что хорошо соответствует экспериментальным наблюдениям [10]. Тогда из (1) получим, что в среднем за один зимний месяц в Арктике оседает на подстилающую поверхность около 40 т свинца. С учетом среднего соотношения между f и g из табл. 2 вынос воздушными массами должен составить за месяц $G = 88 \text{ т}$ свинца. С другой стороны, по формуле (3) получим, что за январь в среднем из Арктики уносится воздушными потоками около 78 т свинца (в Канаду приблизительно вдвое больше, чем в Евразию). Для поддержания такого баланса необходимо поступление из средних широт в Арктику за один зимний месяц не менее 120–150 т свинца. Эти цифры вполне реальны. Например, по оценкам [11], в январе 1980 г. в Арктику могло поступить около 200 т свинца.

Выводы

Зимой арктические воздушные массы и переносимые ими примеси могут проникать далеко в средние широты (до 50-х и 40-х широт), распространяясь над территориями материков внутри арктического фронта (сохраняя за счет этого свои свойства) и пересекая арктический фронт над Тихим и Атлантическим океанами, где должны происходить вымывание примесей осадками на водную поверхность и изменение физических свойств воздушной массы.

Впервые рассмотрен вынос антропогенных примесей воздушными потоками за пределы Арктического региона как один из механизмов очищения атмосферы Арктики, оценена его эффективность по сравнению с осаждением примесей на подстилающую поверхность. Показано, что в рассматриваемых пунктах эквивалентный процесс осаждения на поверхность обладал бы большей скоростью, чем зимние скорости сухого и влажного осаждения на поверхность для примесей, переносимых на субмикронных аэро-

зольных частицах. В результате зимой в процессах очищения атмосферы Арктики в целом вклад горизонтального выноса примесей за пределы региона должен приблизительно вдвое превосходить вклад вертикального осаждения на поверхность.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 98-05-64279).

1. *Shaw G.E.* Chemical air mass systems in Alaska // *Atmos. Environ.* 1988. V. 22. № 10. P. 2239–2248.
2. *Rahn K.A., Lowenthal D. H., Harris J.M.* Long-range transport of pollution aerosol from Asia and the Arctic to Okushiri Island, Japan // *Atmos. Environ.* 1989. V. 23. N 11. P. 2597–2607.
3. *Адикс Т.Г.* Сезонные вариации концентрации субмикронного сульфатного аэрозоля в атмосфере г. Москвы. Влияние дальнего переноса // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана.* 1998. Т. 34. № 3. С. 337–344.
4. *Виноградова А.А., Пономарева Т.Я.* Источники и стоки антропогенных пассивных примесей в атмосфере Российской Арктики весной и летом // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана.* 2000. Т. 36. № 3. С. 357–365.
5. *Stohl A.* Computation, accuracy and applications of trajectories: A review and bibliography // *Atmos. Environ.* 1998. V. 32. № 6. P. 947–966.
6. *Vinogradova A.A.* Anthropogenic pollutants in the Russian Arctic atmosphere: sources and sinks in spring and summer // *Atmos. Environ.* 2000. V. 34. № 29–30. P. 5151–5160.
7. *Виноградова А.А., Пономарева Т.Я.* Баланс антропогенных примесей в атмосфере Российской Арктики зимой и осенью // *Докл. РАН.* 2001. Т. 376. № 5. С. 671–674.
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. (В печати).
9. *Бурова Л.П., Лукьянчикова Н.И.* Роль меридионального воздухообмена в загрязнении и самоочищении атмосферы Арктики // *Тр. ААНИИ. СПб.: Гидрометеоздат,* 1998. Т. 439. С. 111–123.
10. *Нагурный А.П., Тимерев А.А.* Пространственно-временная изменчивость инверсий в нижней тропосфере Арктики // *Докл. РАН.* 1991. Т. 319. № 5. С. 1110–1113.
11. *Akeredolu F.A., Barrie L.A., Olson M.P., et al.* The flux of anthropogenic trace metals into the Arctic from the mid-latitudes in 1979/80 // *Atmos. Environ.* 1994. V. 28. № 8. P. 1557–1572.

A.A. Vinogradova and T.Ya. Ponomareva. Cleaning the Arctic atmosphere by the air transport of pollutants to the mid-latitudes.

The spatial distribution of the Arctic air in the mid-latitudes was statistically analyzed. The air transport effect on cleaning the Arctic atmosphere was estimated in comparison with traditionally regarded cleaning of the atmosphere by deposition of pollutants onto the surface. The 10-year sets of 8-day forward trajectories of air mass transport from three Arctic sites – Franz Josef Land, Severnaya Zemlya, and Wrangel Island – have been studied. Trajectories have been calculated in Hydrometcenter of Russia at 850 hPa isobaric surface for each day of one winter month of 1986–1995.

It was shown that in winter the Arctic air can reach the 50-th and also 40-th latitudes. The Arctic air masses transport over the continents inside the Polar front and, thus, save their physical properties and composition. In contrast, over the oceans, the Arctic air masses cross the Polar front where the pollutants must be effectively washed down onto the surface, and the properties of the air must be changed.

In winter, the air transport of pollutants out of the Arctic is the most efficient way of cleaning the Arctic atmosphere. Its equivalent «deposition rate» is higher than the dry and wet deposition rate for conservative impurity transported by submicron aerosol particles. The mass of such impurity transported during one winter month out of the Arctic as whole is about two times greater than the at deposited onto the surface one.