

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

## **Вклад атмосферных аэрозолей в загрязнение вод моря Лаптевых**

*Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН,  
Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН,  
Гидрометцентр РФ, г. Москва*

Поступила в редакцию 14.01.2002 г.

Проведен анализ 10-летних (с 1986 по 1995 г.) массивов прямых и обратных траекторий переноса воздушных масс в район моря Лаптевых. На основе результатов модельных расчетов дальнего переноса антропогенных примесей в Арктику сделаны оценки средних уровней атмосферных концентраций ряда тяжелых металлов (As, Ni, Pb, V, Zn, Cd) и их средних потоков на поверхность в акватории моря Лаптевых в разные сезоны. Показано, что наибольшую роль в загрязнении атмосферы в этом регионе играют атмосферные выбросы в районах Норильска, Урала и Кузбасса, конкурирующие друг с другом по величине вклада в разные сезоны и в отношении разных микроэлементов. Средние потоки антропогенных составляющих атмосферы на поверхность м. Лаптевых максимальны в переходные сезоны (весной и осенью) и минимальны летом. Вклад атмосферных аэрозолей в содержание антропогенных примесей в водах центральной части м. Лаптевых в среднем за год может составлять около трети от суммарного вклада речного стока.

Как показали исследования последних лет [1], вклад аэрозольного вещества, выпадающего из атмосферы на поверхность Северного Ледовитого океана (СЛО), может составить до 10% в водной взвеси и в донных осадках океана, что существенно выше, чем предполагалось ранее. Арктическая атмосфера в силу ряда ее синоптических и метеорологических особенностей в холодную часть года (зимой и весной) содержит заметное количество антропогенных составляющих, принесенных в Арктику из среднеширотных промышленных регионов [2]. В результате при выпадении этих веществ на подстилающую поверхность происходит загрязнение снега, льда и воды СЛО. 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.

Целью данной работы является оценка среднего количества типично антропогенных компонентов атмосферы (например, некоторых тяжелых металлов), выпадающего на поверхность м. Лаптевых в течение года.

Экспериментальное изучение состава атмосферного аэрозоля в акватории м. Лаптевых проводилось только в летне-осенней экспедиции 1995 г. [1], в остальное время года оно существенно затруднено из-за суровых климатических условий в этом районе. Однако ввиду сильной межгодовой изменчивости атмосферных условий и, соответственно, состава аэрозоля в Арктике [3, 4] для получения достоверной информации о средних уровнях загрязненности воздуха необходимо накопление экспериментальных данных за большое число лет. Альтернативный подход к решению этой задачи, основанный на анализе многолетних рядов синоптической информации и моделировании переноса примесей в Арктику, был предложен в [5]. Именно такая методика использовалась в данной работе для оценок средних атмосферных концентраций антропогенных микроэлементов и их потоков на поверхность в акватории м. Лаптевых в разные сезоны.

В качестве пункта наблюдений была выбрана точка с координатами 77° с.ш., 125° в.д., расположенная приблизительно в середине м. Лаптевых (рис. 1). Для этого пункта 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 1995 г. Предполагая, что выбранные месяцы являются представительными для соответствующих сезонов, использование десятилетнего ряда исходных данных позволяет обнаружить долговременные средние сезонные закономерности в изучаемых процессах.

Арктические воздушные массы отделены от воздуха умеренных широт так называемым арктическим фронтом, являющимся зоной эффективного перемешивания аэрозоля и выведения атмосферных примесей на подстилающую поверхность. Среднее положение арктического фронта зимой и летом (по данным [6]) приведено на рис. 1, там же показан разброс самых южных точек рассматриваемых обратных траекторий для уровня 850 гПа соответственно за январь и июль. Воздух, заключенный внутри арктического фронта, может сравнительно легко перемещаться в северном направлении, перенося в Арктику загрязнения из средних широт. Это особенно важно зимой, когда арктические воздушные массы захватывают территории многих крупных промышленных областей северного полушария. Летом арктический фронт значительно смещается к северу, препятствуя проникновению в Арктику загрязнений от большинства промышленных регионов.

Все обратные и прямые траектории делились на три группы, в зависимости от того, откуда приходят или куда уходят воздушные массы при движении по этим траекториям. Методика такого деления была подробно описана в [5, 7]. На рис. 2 приведены примеры обратных траекторий, по которым распространяется континентальный, арктический или морской воздух в пункт наблюдений. Термин «Арктика» в наших исследованиях – это пространство, ограниченное параллелью 70° с.ш., и прилегающая к ней остальная более южная часть Гренландии.

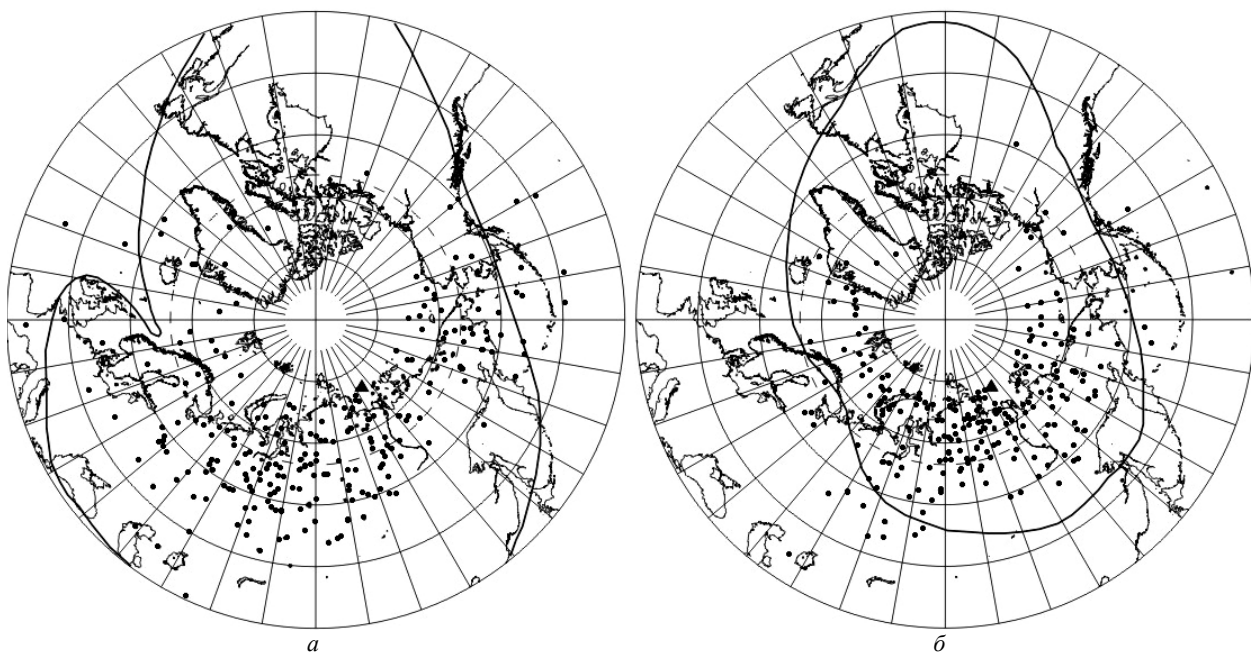


Рис. 1. Географическое положение пункта наблюдений (треугольник), а также арктического фронта (сплошные линии) из [6] и самых южных точек обратных траекторий, рассчитанных на уровне 850 гПа, зимой (а) и летом (б)

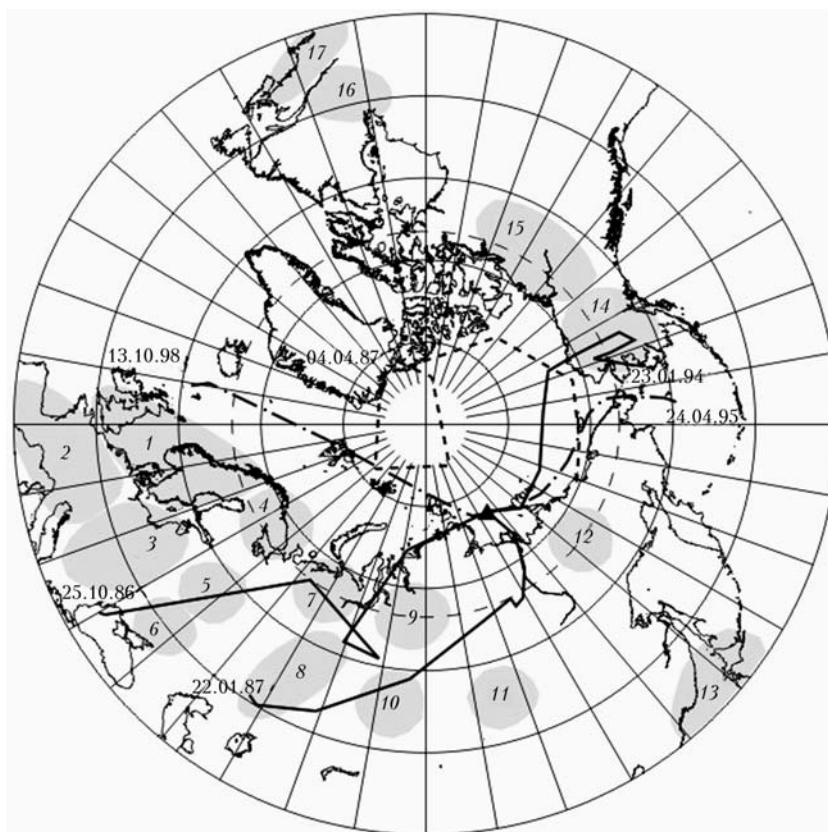


Рис. 2. Примеры траекторий для уровня 850 гПа, по которым в район м. Лаптевых поступал континентальный (сплошные линии), арктический (штриховые) и морской (штрихпунктирные) воздух. Схематическое изображение промышленных регионов – источников атмосферных выбросов: 1 – Северная Европа; 2 – Западная Европа; 3 – Центральная Европа; 4 – Кольский п-ов; 5 – Центр европейской территории бывшего СССР (ЦЕТС); 6 – Донецк; 7 – Печорский бассейн; 8 – Урал; 9 – Норильск; 10 – Кузбасс; 11 – Байкал; 12 – Якутия; 13 – Япония; 14 – Аляска; 15 – Канада; 16 – Сэдбери; 17 – Восточное побережье США

Как уже отмечалось, межгодовая изменчивость атмосферных условий в северной полярной области очень велика. Для демонстрации этого на рис. 3 показаны соотношения частот реализации обратных траекторий движения воздуха к пункту наблюдений из Европы, Азии, Арктики и Америки в январе в разные годы изучаемого десятилетия. Видно, например, что в 1988 г. частоты поступления европейского, азиатского и арктического воздуха были приблизительно равными, в 1990 г. почти все время воздух приходил из Арктики, а в 1994 г. частота поступления воздуха из Америки (в остальные годы она была ничтожна) почти сравнялась с частотой прихода арктических воздушных масс, а воздух из Европы не поступал вовсе.

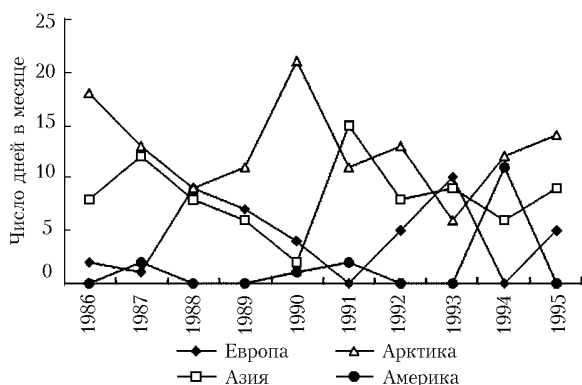


Рис. 3. Межгодовая изменчивость частот поступления воздушных масс в район м. Лаптевых с материков и из Арктики зимой (по траекториям на уровне 850 гПа)

Средние частоты поступления в пункт наблюдений континентальных, арктических и морских воздушных масс, а также распределения (через 5 сут) уходящего воздуха на материки, в Арктику и в Тихий и Атлантический океаны приведены в табл. 1. Наиболее важные для дальнейших оценок следствия из этой таблицы: 1) около 50% воздушных масс поступает в пункт наблюдений из самой Арктики; 2) частота поступления воздушных масс из Тихого и Атлантического океанов не превышает 5%; 3) воздушные массы, уходящие от пункта наблюдений, в 20–40% случаев успевают в течение 5 сут (в среднем через 3,3 сут) выйти за пределы Арктики.

Таблица 1

**Пространственные распределения приходящих и уходящих воздушных масс, %**

Сезон	Приходящие с территорий			Уходящие на территории		
	материков	Арктики	океанов	материков	арктики	океанов
Зима	56	42	2	30	60	10
Весна	45	51	4	29	67	4
Лето	46	49	5	38	62	0
Осень	49	50	1	20	80	0

В тех случаях, когда траектория, по которой воздух движется к пункту наблюдений с материка, расположена над развитым промышленным регионом, выбрасывающим в атмосферу различные антропогенные вещества, эти загрязнения могут захватываться воздушными массами и переноситься в Арктику. Такие траектории для каждого региона-источника, изображенного на рис. 2, рассматрива-

лись отдельно, и выявлялись статистические характеристики соответствующих ансамблей траекторий.

В [8] была подробно описана методика оценок вкладов отдельных промышленных регионов в содержание антропогенных примесей в атмосфере пункта наблюдений в Арктике. Вклад региона-источника пропорционален мощности его выбросов и функции, названной нами функцией эффективности переноса (ФЭП). Она характеризует потенциальные возможности источника внести загрязнения в атмосферу пункта наблюдений и определяется только атмосферными процессами на пути воздушной массы. ФЭП зависит от вероятности и скорости движения воздуха между источником и пунктом наблюдений, которые оцениваются по ансамблю траекторий, а также от условий вертикального перемешивания и скорости выведения примеси из атмосферы во время переноса.

Параметры, необходимые для оценок величин ФЭП аналогично работе [8], выбирались (исходя из многолетних метеорологических данных для центральной части Российской Арктики) такими же, как для арх. Северная Земля в [8]. При этом учитывалось, что скорость сухого осаждения примеси в Арктике зимой и весной (над ледяной и/или заснеженной поверхностью) должна быть минимальной [9], а скорость осаждения примеси осадками рассчитывалась по многолетним данным об интенсивности и агрегатном состоянии осадков. Кроме того, принимались во внимание особенности температурных инверсий и облачности в Арктике в разные сезоны.

На рис. 4 приведены ненулевые значения ФЭП для рассматриваемого пункта наблюдений, тем самым выделены 10 промышленных регионов-источников, загрязняющих атмосферу в районе м. Лаптевых. Видно, что летом, по сравнению с зимой и весной, значительно уменьшается эффективность переноса примесей в Арктику, особенно от удаленных промышленных областей. Это происходит, с одной стороны, из-за смещения к северу арктического фронта, ограничивающего распространение арктического воздуха, а с другой стороны, из-за того, что скорость осаждения примесей на подстилающую поверхность в теплые сезоны больше, чем в холодные.

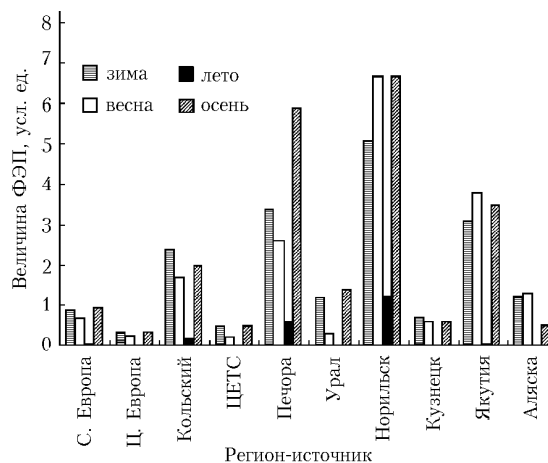


Рис. 4. Значения функции эффективности переноса примеси от регионов-источников (см. рис. 2) к пункту наблюдений в разные сезоны, усл. ед.

Уровень загрязненности атмосферы над акваторией м. Лаптевых оценивался нами по средним концентрациям шести микроэлементов (As, Ni, Pb, V, Zn, Cd), происхож-

Средние значения концентраций шести антропогенных микроэлементов в атмосфере м. Лаптевых в разные сезоны, нг·м<sup>-3</sup>

Сезон, район	As	Ni	Pb	V	Zn	Cd
Зима <sup>1)</sup>	0,12	0,39	1,1	0,27	0,68	0,029
Шпицберген <sup>2)</sup>	0,52	0,29	3,0	0,54	3,9	0,080
ст. Алерт, Канада <sup>3)</sup>	–	–	2	0,35	4	–
Весна <sup>1)</sup>	0,13	0,43	0,82	0,17	0,57	0,026
Арх. Северная Земля <sup>4)</sup>	0,26–1,8	1,1–11	3,5	0,73–0,8	0,6–13	0,09
ст. Алерт, Канада <sup>3)</sup>	–	–	3	0,3	5	–
Лето <sup>1)</sup>	0,009	0,039	0,034	0,0084	0,016	0,0012
Шпицберген <sup>5)</sup>	0,0168	<0,14	<1,0	0,041	0,59	<0,06
ст. Алерт, Канада <sup>3)</sup>	–	–	0,25	0,01	1	–
Осень <sup>1)</sup>	0,080	0,27	0,70	0,18	0,35	0,019
м. Лаптевых <sup>6)</sup>	0,38	–	–	–	15,4	–
ст. Алерт, Канада <sup>3)</sup>	–	–	0,25	0,015	2	–

<sup>1)</sup> Данная работа, расчет, средние за 1986–1990 гг.

<sup>2)</sup> Эксперимент, средние за 1983, 1984 и 1986 гг. [11].

<sup>3)</sup> Эксперимент, средние за 1981–1995 гг. [4].

<sup>4)</sup> Эксперимент, средние за 1985, 1986, 1988 гг. [12].

<sup>5)</sup> Эксперимент, средние за 1984, 1986 и 1987 гг. [13].

<sup>6)</sup> Эксперимент, средние за 1995 г. [1].

дение которых в атмосфере в значительной степени определяется деятельностью человека. При дальнем переносе примеси в атмосфере эффекты сухого осаждения и осаждения осадками приводят к сужению спектра размеров аэрозольных частиц [9], уменьшая и выравнивая тем самым скорости осаждения различных составляющих (неактивных в химическом отношении). Поэтому мы предполагали, что эффекты осаждения одинаково действуют на рассматриваемые химические элементы, и скорости их осаждения на подстилающую поверхность нами не различались. При расчете зимних и весенних концентраций учитывалось, что воздух, приходящий в пункты наблюдений из Арктики, в холодное время года приблизительно так же загрязнен, как и воздух в пункте наблюдений. Поэтому вклад арктического воздуха можно считать пропорциональным частоте его поступления в пункт наблюдений (см. подробнее [7, 8]). Вкладом морского воздуха в концентрации антропогенных составляющих можно пренебречь.

Соотношение средних вкладов различных регионов-источников в загрязнение атмосферы в районе м. Лаптевых различно для разных элементов, а также в разные сезоны. Для оценок вкладов источников, имеющих отличные от нуля значения ФЭП (см. рис. 4), использовались данные о величинах их мощностей выбросов в атмосферу с учетом изменений за последние 20 лет [10]. Промышленные области, вносящие максимальные вклады в содержание рассматриваемых шести элементов в атмосфере акватории м. Лаптевых, перечислены в табл. 2. Таким образом, наиболее значимые регионы-источники загрязнения атмосферы в районе м. Лаптевых – это район Норильска летом, а в остальное время года – Норильск, Урал и Кузбасс.

Таблица 2

**Наиболее значимые источники шести антропогенных микроэлементов в атмосфере над м. Лаптевых**

Сезон	Элемент	Источник	Вклад, %
Зима	As, Ni, Pb, V, Zn, Cd	Арктика	42
	As, Ni	Норильск	23
	Pb, V	Урал	25
	Zn, Cd	Урал, Норильск, Кузбасс	по 10–15
Весна	As, Ni, Pb, V, Zn, Cd	Арктика	50
	As, Ni, Pb	Норильск	30
	V	Урал, Норильск	по 12
	Zn	Кузбасс	24
	Cd	Норильск, Кузбасс	по 15
Лето	As, Ni, Pb, V, Zn, Cd	Норильск	60–80
Осень	As, Ni	Норильск	50
	Pb, V	Урал	40–55
	Zn	Урал, Кузбасс	30–35
	Cd	Урал, Норильск	по 25

В табл. 3 приведены средние (для каждого сезона) концентрации рассматриваемых шести химических элементов, оцененные как сумма вкладов отдельных источников и вклада арктического воздуха. Видно, что полученные оценки разумно соответствуют имеющимся экспериментальным данным о составе атмосферного аэрозоля в арктической атмосфере. Как показывают натурные измерения, летом атмосферные концентрации рассматриваемых элементов в Арктике примерно в 10–50 раз ниже, чем зимой и весной [4, 11, 13]. В связи с этим можно сделать вывод, что наш подход позволяет обнаружить реальные изменения уровня загрязненности арктической атмосферы в разные сезоны.

Зная средние распределения воздушных масс через 5 сут после их прохождения через пункт наблюдений (см. табл. 1) и значения скоростей осаждения примесей на подстилающую поверхность, можно рассчитать, как это предложено в [7], средние (для каждого из рассматриваемых месяцев) пространственные распределения примеси после ее ухода из пункта наблюдений (табл. 4). Видно, что зимой после прохождения воздуха над акваторией м. Лаптевых доля примеси, унесенная за 5 сут воздушными массами из Арктики, почти втрое превосходит ту долю, которая оседает за это время на поверхность в арктическом регионе. Весной эти доли приблизительно равны. Кроме того, зимой и весной около 50% примесей, принесенных в район м. Лаптевых, остается дольше 5 сут в арктической атмосфере, перемешиваясь там и загрязняя в дальнейшем акваторию СЛО, его острова и прибрежную часть материков. Наоборот, летом почти все примеси оседают за 5 сут на поверхность СЛО.

Таблица 4

**Распределение примеси в Арктике через 5 сут после ее ухода из пункта наблюдений (%) при соответствующих скоростях осаждения на поверхность K в разные сезоны**

Сезон	K, см·с <sup>-1</sup>	Уходит из Арктики	Оседает в Арктике	Остается в атмосфере
Зима	0,05	37	11	52
Весна	0,10	27	24	49
Лето	0,98	3	96	1
Осень	0,42	4	89	7

Зная среднюю концентрацию примеси в атмосфере (см. табл. 3) и ее долю, выпадающую за 5 сут на поверхность в Арктике (см. табл. 4), можно оценить (аналогично [8]) средние потоки рассматриваемых химических элементов на подстилающую поверхность вблизи пункта наблю-

дений. Полученные значения представлены в табл. 5. Годовые оценки выполнены в предположении, что зимние значения справедливы в течение 5 мес, летние – 3 мес, а весенние и осенние – по 2 мес в году [4]. Площадь моря Лаптевых считалась равной 662 тыс. км<sup>2</sup>. Видно, что максимальные выпадения из атмосферы на поверхность м. Лаптевых происходят весной (когда при высоких атмосферных концентрациях примесей увеличивается количество осадков) и осенью (когда при еще значительном количестве осадков начинается рост атмосферных концентраций примесей).

Традиционно считалось, что количество взвешенного вещества (в том числе и антропогенного), вносимое в СЛО реками, значительно превосходит вклад, поступающий из атмосферы. Как показывают нижние две строчки табл. 5, для вод бассейна м. Лаптевых это не так. Количество микроэлементов в водной взвеси, выносимой наиболее крупными реками (Лена, Яна и Хатанга) в м. Лаптевых, определено по оценкам [14] средних годовых потоков и по экспериментальным данным [15] о составе взвеси этих рек. Кроме того, было учтено, что лишь около 5% взвеси, содержащейся в речной воде, проникает в морские воды за пределы зоны действия так называемых маргинальных фильтров [16]. Роль такого фильтра играет целый комплекс

физических и химических процессов, происходящих при смешивании пресной и соленой воды вблизи впадения реки в море и приводящих к эффективному осаждению водной взвеси в пространстве до первых десятков тысяч квадратных километров вблизи устья. Для м. Лаптевых суммарная площадь маргинальных фильтров впадающих в него рек не превосходит 5% от его площади.

Из табл. 5 видно, что потоки рассматриваемых металлов, поступающие в воды центральной части м. Лаптевых из атмосферы и с водами впадающих рек, сравнимы между собой. Отметим, что рассчитанный средний аэрозольный вклад свинца и кадмия значительно выше, чем полученные значения для остальных элементов. Это может быть связано с тем, что в арктической атмосфере именно Pb и Cd имеют в большей степени антропогенное происхождение, чем остальные четыре элемента. Поскольку подход, использованный в данной работе, предназначен для оценок атмосферных концентраций именно антропогенных составляющих аэрозоля или антропогенных долей концентраций примесей смешанного происхождения (см. подробнее [8]), реальные уровни концентраций и потоков на поверхность As, Ni, V, и Zn могут быть выше (за счет составляющих естественного происхождения).

Таблица 5

Средние потоки шести антропогенных микроэлементов из атмосферы на поверхность моря Лаптевых в разные сезоны и за год

Сезон	As	Ni	Pb	V	Zn	Cd	Параметр
Зима	0,10	0,34	0,95	0,23	0,59	0,025	Поток на ед. площади, г·км <sup>-2</sup> ·мес <sup>-1</sup>
Весна	0,21	0,68	1,3	0,27	0,91	0,041	
Лето	0,04	0,18	0,16	0,04	0,07	0,006	
Осень	0,27	0,90	2,3	0,60	1,3	0,063	
За год	1,6	5,4	12,4	3,0	8,9	0,35	г·км <sup>-2</sup> ·год <sup>-1</sup>
Зима	70	220	630	150	400	16	Поток на все м. Лаптевых, кг·мес <sup>-1</sup>
Весна	140	450	860	180	600	27	
Лето	30	120	100	25	50	4	
Осень	180	600	1500	400	860	42	
За год	1,1	3,5	8,2	2,0	5,1	0,23	т·год <sup>-1</sup>
	13,5	60	26	135	160	0,65	Вынос рек*, т·год <sup>-1</sup>
	7,5	5,5	24	1,5	3,5	26	Вклад аэрозоля, %

\* Оценки по данным о потоках и составе взвеси рек из [14, 15].

Таким образом, нами оценены средние (за 10 лет) уровни атмосферных концентраций ряда тяжелых металлов и их средние потоки на поверхность в акватории моря Лаптевых в разные сезоны. Показано, что наибольшую роль в загрязнении атмосферы в этом регионе играют такие крупные промышленные области, как район Норильска, Урал и Кузбасс. Средние концентрации шести антропогенных микроэлементов в атмосфере над м. Лаптевых в разные сезоны разумно соответствуют аналогичным характеристикам, обнаруженным в других районах Арктики. Средние за месяц потоки антропогенных составляющих атмосферы на поверхность м. Лаптевых максимальны весной и осенью, а минимальны – летом. Вклад атмосферных аэрозолей в содержание антропогенных примесей в водах центральной части м. Лаптевых (а значит, и в донных осадках) в среднем за год может составлять около трети вклада впадающих рек.

Авторы благодарят академика А.П. Лисицына за внимание к исследованию.

Работа была выполнена в лаборатории им. О.Ю. Шмидта при финансовой поддержке Министер-

ства науки и технической политики России и Федерального министерства науки, технологий и высшего образования Германии. Частично работа была поддержана Российско-Американском грантом ONR «Strata formation on Russian Arctic continental margin» (проект 1257).

1. Шевченко В.П., Лисицын А.П., Виноградова А.А., Смирнов В.В., Серова В.В. Аэрозоли Арктики – результаты десятилетних исследований // Оптика атмосф. и океана. 2000. Т. 13. № 6–7. С. 551–576.
2. Виноградова А.А. Микроэлементы в составе арктического аэрозоля (обзор) // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 1993. Т. 29. № 4. С. 437–456.
3. Виноградова А.А., Пономарева Т.Я. Воздухообмен в Российской Арктике весной и летом 1986–1995 гг. // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 1999. Т. 35. № 5. С. 588–595.
4. Sirois A., Barrie L.A. Arctic lower tropospheric aerosol trends and composition at Alert, Canada: 1980–1995 // J. Geophys. Res. D. 1999. V. 104. N 9. P. 11,599–11,618.
5. Виноградова А.А., Егоров В.А. О возможностях дальнего атмосферного переноса загрязнений в Российскую Арктику // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 1996. Т. 32. № 6. С. 796–802.

6. *Shaw G.E.* Chemical air mass systems in Alaska // *Atmos. Environ.* 1988. V. 22. N 10. P. 2239–2248.
7. *Vinogradova A. A.* Anthropogenic pollutants in the Russian Arctic atmosphere: sources and sinks in spring and summer // *Atmos. Environ.* 2000. V. 34. Nos. 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. *Гальперин М.В., Софиев М., Гусев А., Афиногенова О.* Подходы к моделированию трансграничного загрязнения атмосферы Европы тяжелыми металлами. М., 1995. 85 с. (Отчет ЕМЕП/МЦЦ-В, 7/95).
10. *Расуна J.M.* Source inventories for atmospheric trace metals // *Atmospheric Particles* / Ed. by R.M. Harrison and R. Van Grieken. Wiley, 1998. P. 385–423.
11. *Maenhaut W., Cornille P., Расуна J.M., Vitols V.* Trace element composition and origin of the atmospheric aerosol in the Norwegian Arctic // *Atmos. Environ.* 1989. V. 23. N 11. P. 2551–2569.
12. *Виноградова А.А., Полиссар А.В.* Элементный состав аэрозоля в атмосфере центральной части Российской Арктики // *Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана.* 1995. Т. 31. № 2. С. 264–274.
13. *Maenhaut W., Ducastel G., Leck C., Nilsson E.D., Heintzenberg J.* Multi-elemental composition and sources of the high Arctic atmospheric aerosol during summer and autumn // *Tellus. B.* 1996. V. 48. N 2. P. 300–321.
14. *Gordeev V.V., Martin J.M., Sidorov I.S., Sidorova M.V.* A reassessment of the Eurasian river input of water, sediment, major elements, and nutrients to the Arctic Ocean // *Amer. J. Sci.* 1996. V. 296. N 6. P. 664–691.
15. *Rachold V.* Major, trace and rare earth element geochemistry of suspended particulate material of East Siberian rivers draining to the Arctic Ocean // *Land-Ocean Systems in the Siberian Arctic: Dynamics and History* / Ed. by L. Timokhov. Berlin: Springer-Verlag, 1999. P. 199–222.
16. *Лисицын А.П.* Маргинальный фильтр океанов // *Океанология.* 1994. Т. 34. № 5. С. 735–747.

*A.A. Vinogradova, V.P. Shevchenko, T.Ya. Ponomareva, A.A. Klyuvitkin.* **The contribution of atmospheric aerosols to water pollution of the Laptev sea.**

The 10-year (1986–1995) sets of backward and forward trajectories of air mass transport to the region of the Laptev Sea were analyzed. Seasonal variations in average atmospheric concentrations and fluxes onto the surface for six anthropogenic chemical elements (As, Ni, Pb, V, Zn, Cd) were estimated by modeling the air transport of pollutants to the Arctic. The main atmospheric pollution sources for the Laptev Sea basin are the Norilsk region, the Urals, and the Kuzbass, whose contributions vary in different seasons and for different kinds of pollutants. The average fluxes of atmospheric anthropogenic constituents onto the surface of the Laptev Sea are maximal in spring and autumn, and minimal in summer. The yearly averaged atmospheric aerosol contribution of anthropogenic pollutants to the water content of the central part of the Laptev Sea may be about one third of those draining by the rivers.