

точников в ионный состав аэрозоля. Средние суточные вертикальные потоки аэрозольного вещества над акваторией Баренцева моря свидетельствуют о значительном вкладе (75%) ионов морского происхождения в поступлении веществ на водную поверхность.

В целом, содержание большинства химических элементов (Na, Al, K, Ca, Sc, Fe, Co, Rb, Zr, Cs, Ba, PЗЭ, Hf, Ta, Th, U) в нерастворимой фракции аэрозолей ниже средних значений для верхней части континентальной земной коры. Наиболее вероятный источник этих элементов – почвы севера Евразии. Содержание Cr, Cu, Zn, As, Se, Br, Ag, Sb, Au, Pb значительно выше их среднего для земной коры, их основной источник – антропогенный. Наиболее существенные источники загрязнения аэрозолей Российской Аркти-

ки – горно-металлургические комбинаты Кольского п-ова и Урала, зимой ощущается влияние дальнего переноса из расположенных южнее регионов.

Поступление в Баренцево море рассеянного осадочного вещества из атмосферы превышает его поставку реками. Учитывая значительное обогащение золотого осадочного вещества Pb, Sb, Se, V, можно предположить, что для этих элементов золотой путь является основным путём их поступления в донные осадки Баренцева моря.

**Источники финансирования.** Обобщение результатов было выполнено в рамках госзаданий ИО РАН (№ 0128-2019-0011) и ИОА СО РАН (№ АААА-А17-117021310142-5) и поддержано Российским научным фондом фундаментальных исследований (грант № 18-05-60084\_Арктика).

### 3.2. Тяжелые металлы и черный углерод в атмосфере над акваторией Баренцева моря: концентрации и потоки на поверхность

А.А. Виноградова<sup>1</sup>, Е.И. Котова<sup>2</sup>, Ю.А. Иванова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва

<sup>2</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

Выполнены оценки потоков антропогенных тяжелых металлов (ТМ) – Pb, Cd, As, Zn, Ni, Cr, Cu – на поверхность Баренцева моря по рассчитанным ранее концентрациям этих элементов в приземной атмосфере в трех районах на побережье моря (Кольский полуостров, район Ненецкого заповедника, архипелаг Земля Франца-Иосифа). Для потоков свинца и кадмия учтены вклады их антропогенных эмиссий с территории зарубежной Европы, а также процессов ветрового поднятия пыли и почвенных частиц (по оценкам отчетов ЕМЕП). От этих источников на всю территорию моря поступает примерно 50% свинца и около 40% кадмия. В целом за год атмосфера поставляет лишь доли процентов ТМ, содержащихся в водах Баренцева моря. Весной в период таяния льдов атмосферный вклад в концентрации ТМ в водах моря может быть выше среднего в 2–10 раз. Рассмотрены пространственные вариации содержания черного углерода (BC) в атмосфере над Баренцевым морем (по данным реанализа спутниковой информации MERRA-2). Оценены средние потоки BC на снежную поверхность и масштаб возможных поправок к величинам альбедо и радиационного форсинга поверхности в разных районах побережья Баренцева моря.

**Ключевые слова:** тяжелые металлы, черный углерод, аэрозоли, потоки.

DOI: 10.29006/978-5-6045110-0-8/(12)

#### ВВЕДЕНИЕ

Состав вод морей формируется веществом, падающим в воду в результате абразии берегов, приносимым водами морских и океанических течений и системы наземного стока, а также поступающим на поверхность моря из атмосферы. Арктика – регион Северного полушария, влияющий на климатическое равновесие в пределах всего Земного шара, удаленный от основных мест проживания и активности человека и все же подверженный антропогенному воздействию [Persistent, 2004; Погребов,

Шилин, 2001; Шевченко, 2006]. Микроэлементы (в частности, тяжелые металлы – ТМ) и черный углерод (black carbon – BC) могут переноситься воздушными потоками на аэрозольных частицах субмикронного размера на расстояния в несколько тысяч километров. В результате, даже для арктических территорий (севернее Полярного круга) оказывается значимым вынос антропогенных ТМ атмосферными потоками из районов их максимальных эмиссий в атмосферу (крупные города и промышленные комплексы средних и северных широт) [Barrie, 1986;

Виноградова, 1993; АМАР, 1998]. Сравнительные оценки вклада атмосферных потоков и речного стока ТМ в воды морей Северного Ледовитого океана (СЛО) показывают, что в целом вклад атмосферы значительно меньше [Виноградова, Котова, 2019].

Изменения радиационных свойств атмосферы за счет присутствия в ней ВС также регистрируются в Арктике [Schmeisser et al., 2018; Tomasi et al., 2015; Журавлева и др., 2019] в условиях современных климатических изменений на планете [АМАР, 2015]. Для территорий, покрытых снегом и льдом в течение значительной части года, осаждение ВС на поверхность может менять ее альбедо и, следовательно, оказывать влияние на радиационные параметры системы атмосфера–поверхность.

В данном разделе анализируются годовые потоки ТМ из атмосферы в воды Баренцева моря, сравниваются вклады Российских антропогенных источников ТМ и источников зарубежной Европы, делаются первые оценки эффекта весеннего таяния льда на содержание ТМ в морской воде. Кроме того, по данным реанализа спутниковой информации MERRA-2 [Acker, Lertoukh, 2007] рассматриваются пространственные вариации содержания черного углерода в атмосфере над Баренцевым морем и оцениваются потоки этой примеси на снежную или ледяную поверхность в холодную часть года. Эти результаты могут быть полезны для расчетов радиационного баланса атмосферы в регионе Баренцева моря.

## ТЯЖЕЛЫЕ МЕТАЛЛЫ

### Постановка задачи, исходные данные и их обсуждение

Рассматриваются семь микроэлементов (Pb, Cd, As, Zn, Ni, Cr, Cu), которые обычно условно называют тяжелыми металлами. Это вещества первого или второго класса опасности, для которых установлены уровни предельно допустимых концентраций (ПДК) в воздухе и в водоемах – с точки зрения их воздействия на окружающую среду и человека.

Исходные данные для оценок по работам [Виноградова, Иванова, 2016; 2017] – средние (за 2010–2015 гг.) значения концентраций ТМ в приземном воздухе трех пунктов на побережье Баренцева моря: КП (67° с. ш., 38° в. д.) – на Кольском п-ове; НЗ (68.5° с. ш., 53.5° в. д.) – на территории Ненецкого заповедника, ЗФИ (79.5° с. ш., 95.4° в. д.) – на архипелаге Земля Франца-Иосифа (рис. 3.2.1, табл. 3.2.1).

Анализ дальнего переноса воздушных масс проводился по массивам траекторий их переноса (модель HYSPLIT4 на сайте Лаборатории воздушных ресурсов ARLNOAA – <https://www.arl.noaa.gov/ready/HYSPLIT.php>). Пространственные распределения траекторий, по которым воздух и примеси поступают к трем рассматриваемым пунктам в январе и в июле, представлены на рис. 3.2.2. Хорошо видно, что летом траектории в целом расположены севернее, чем зимой, что является следствием сезонного смещения атмосферного арктического фронта, который в значительной степени



Рис. 3.2.1. Опорные пункты для расчетов: КП – Кольский п-ов; НЗ – Ненецкий заповедник, ЗФИ – Земля Франца-Иосифа

**Таблица 3.2.1.** Исходные данные для оценок по Баренцеву морю: концентрации ТМ в воздухе ( $\text{нг}/\text{м}^3$ ) зимой и летом, потоки ТМ из атмосферы на поверхность за год ( $\text{кг}/\text{км}^2\text{год}$ ) вблизи трех пунктов на побережье

Место	Параметр	Время	Pb	Cd	As	Zn	Ni	Cr	Cu	Скорость осаднения на поверхность, $K, \text{см}/\text{с}$
Кольский п-ов (КП)	Концентрация в воздухе	Январь	5.5	0.025	3.0	1.3	45	1.3	56	0.16
		Июль	0.40	0.00075	0.20	0.0014	1.5	0.011	4.7	1.55
Ненецкий запо-ведник (НЗ)	Поток на по-верхность	Год	0.34	0.0033	0.12	0.033	1.5	0.036	2.5	
		Январь	0.92	0.0971	1.3	7.6	4.8	1.2	9.5	0.09
	Концентрация	Июль	0.0011	0.00004	0.0017	0.0012	0.37	0.00091	0.19	0.87
		Поток на по-верхность	Год	0.020	0.0034	0.019	0.11	0.12	0.016	0.16
Земля Франца-Иосифа (ЗФИ)	Концентрация	Январь	0.058	0.00017	0.0057	0.014	1.5	0.0053	1.8	0.09
		Июль	0.00011	0.000000003	0.000000003	0.0000016	0.0026	0.0000012	0.0025	0.2
	Поток на по-верхность	Год	0.0014	0.0000040	0.00013	0.00032	0.035	0.00012	0.042	

**Примечание.** Выделены шрифтом оценки потоков ТМ на поверхность, выполненные в данной работе.

ограничивает проникновение в Арктику воздушных масс с юга [Barrie, 1986; Виноградова, 1993].

Расчеты концентраций ТМ в приземном слое атмосферы опирались на данные об антропогенных эмиссиях ТМ на территории России за 2010 год [Ежегодник..., 2011]. Более свежие данные о выбросах ТМ в атмосферу в достаточном объеме в литературе отсутствуют. Методика оценок дальнего переноса воздушных масс и примесей на субмикронных аэрозолях подробно описана в [Виноградова, 2014]. Для одного и того же элемента зимняя и летняя концентрации в воздухе могут различаться на несколько порядков. Это связано с различиями условий циркуляции атмосферы зимой и летом (рис. 3.2.2), с разницей скорости осаждения ТМ из атмосферы на поверхность (табл. 3.2.1), а также с удаленностью

многих значимых источников загрязнений от побережья СЛО.

Идея данной работы состоит в том, чтобы по разнесенным в пространстве данным о концентрациях ТМ на побережье Баренцева моря (табл. 3.2.1) оценить годовые потоки ТМ из атмосферы на всю поверхность Баренцева моря и сравнить полученные на их основе оценки с литературными данными.

#### Методика оценок и результаты

Зная концентрацию примеси  $C$  в приземном воздухе и скорость ее осаждения  $K$  из атмосферы на поверхность (для зимы и лета – табл. 3.2.1), получим величины плотности потоков  $F$  рассматриваемых ТМ из атмосферы на единицу площади поверхности за вре-

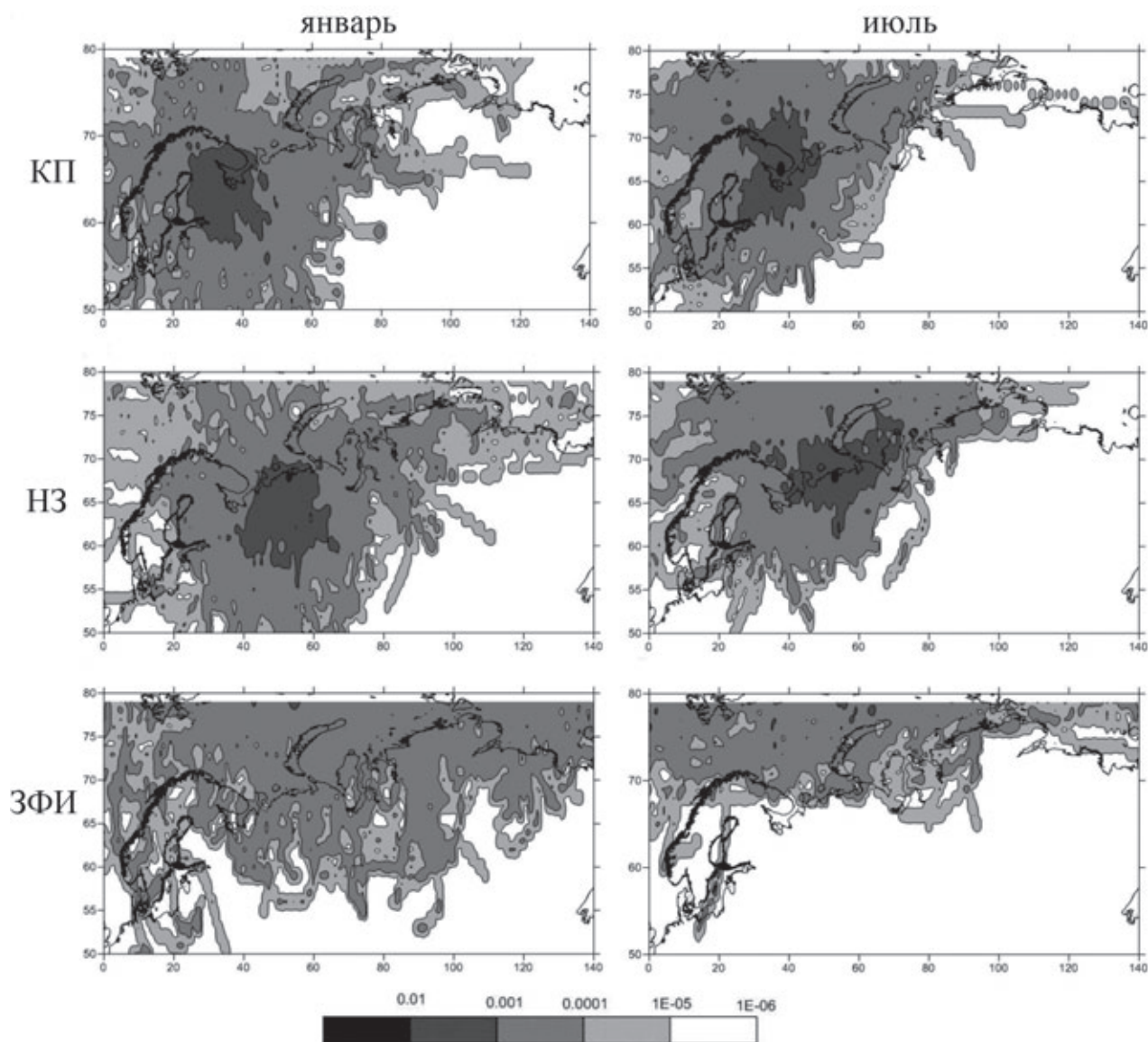


Рис. 3.2.2. Частота переноса воздушных масс к трем рассматриваемым пунктам (КП, НЗ, ЗФИ) за 2010–2018 годы на сетке  $1 \times 1^\circ$ , отн. ед.

мая Т (в данном случае за один месяц – для зимы или лета) по формуле:

$$F = C \times K \times T. \quad (3.2.1)$$

В наших вычислениях скорость осаждения не различалась по микроэлементам. Плотность потока примеси из атмосферы за год для пунктов КП и НЗ рассчитывалась в предположении равенства длительности летнего и зимнего сезонов, а для ЗФИ предполагалось восемь зимних месяцев и два летних. Полученные значения  $F$  приведены в табл. 3.2.1. Сезонные различия количества примеси, осаждающейся из атмосферы на поверхность в рассматриваемых пунктах, отражают различия условий циркуляции атмосферы, а также изменение количества и качества осадков в течение года, влияющее на величину  $K$  и сглаживающее амплитуду сезонных колебаний плотности потока примеси на поверхность по сравнению с амплитудой внутригодовых вариаций концентрации примеси в воздухе.

Сравнивая рассматриваемые пункты, можно утверждать, что окружающая среда Кольского п-ова наиболее загрязнена свинцом, никелем и медью, т. е. элементами, которые в этом же регионе выбрасываются в атмосферу в огромных масштабах. Загрязнение этими ТМ убывает последовательно в пунктах НЗ и ЗФИ. В свою очередь, район НЗ больше, чем КП, загрязнен цинком (основные источники – промышленные районы Среднего Урала) [Виноградова, Иванова, 2016; Виноградова и др., 2017]. В целом, наименее загрязнен антропогенными ТМ удаленный пункт ЗФИ, расположенный более чем на 10° севернее двух других.

В данной работе при расчетах потоков ТМ из атмосферы на поверхность моря (ПМ) применялась методика, предложенная в [Виноградова, Котова, 2019]. При удалении от источника поток примеси на поверхность обычно можно описать экспоненциальной зависимостью от расстояния. Качественно понятно, что при удалении на север от материка (с его источниками выбросов ТМ в атмосферу) загряз-

нение воздуха и потоки ТМ на поверхность должны уменьшаться.

В случае большой площади моря (ПМ), когда на побережье есть хотя бы две точки  $x_1$  и  $x_2$ , расположенные на границе моря на разных широтах, с известными величинами плотности потока ТМ на поверхность  $F_1$  и  $F_2$ , предполагается, что вдоль оси  $x$ , соединяющей эти точки, плотность потока ТМ из атмосферы на поверхность убывает экспоненциально

$$F = A \exp(-Bx), \quad (3.2.2)$$

а в перпендикулярном направлении (в первом приближении) этот профиль не меняется. Тогда система уравнений

$$\begin{aligned} F_1 &= A \exp(-Bx_1), \\ F_2 &= A \exp(-Bx_2) \end{aligned} \quad (3.2.3)$$

при введении  $x_1=0$  и  $x_2=L$ , где  $L$  – расстояние между точками  $x_1$  и  $x_2$ , позволяет найти выражение для расчета потока ТМ на ПМ площади  $S_{\text{ПМ}}$ :

$$D = (F_1 - F_2) / \ln(F_1/F_2) \times S_{\text{ПМ}}. \quad (3.2.4)$$

При расчетах для Баренцева моря, мысленно разбиваем его поверхность линиями, идущими с юга на север, на три равные по площади части (западную, центральную и восточную). На южных сторонах западной и восточной частей плотности годовых потоков ТМ принимаем равными величинам для КП и НЗ соответственно из таблицы 3.2.1, на южной стороне центральной части – средним арифметическим значениям для этих пунктов. На северных границах везде плотность потоков ТМ соответствует данным таблицы 3.2.1 для ЗФИ. Результаты расчетов потоков ТМ из атмосферы на поверхность Баренцева моря по формулам (3.2.1–3.2.4) приведены в таблице 3.2.2. Видно, что больше всего ТМ (кроме цинка) из атмосферы поступает в воды западной части Баренцева моря, цинком больше загрязнена восточная часть.

**Таблица 3.2.2.** Годовые потоки ТМ из атмосферы на поверхность Баренцева моря по частям и суммарно, т/год

Часть	Pb	Cd	As	Zn	Ni	Cr	Cu
Запад	29	0,23	8.6	3.4	184	3.0	287
Восток	3.3	0.24	1.8	8.7	32	1.6	42
Середина	17	0.23	5.4	6.1	117	2.3	178
Сумма	50	0,70	16	18	333	6.9	507

По данным таблицы 3.2.3 можно сравнить уровни загрязнения тяжелыми металлами через атмосферу Баренцева моря и ещё четырех северных морей России (по оценкам из [Виноградова, Котова, 2019]). Самым

загрязненным оказывается Белое море, расположенное в окружении мощных производственных комплексов северо-запада России. Баренцево море в среднем, за счет своей большой площади, по этому показателю

на втором месте. Хотя его юго-восточная часть, выделенная как Печорское море, сильнее всех рассмотренных здесь морей загрязняется мышьяком, цинком и

хромом – при дальнем переносе этих микроэлементов в атмосфере от промышленных источников Урала [Виноградова, Иванова, 2016; Виноградова и др., 2017].

**Таблица 3.2.3.** Средняя плотность потоков ТМ на единицу поверхности для морей Российской Арктики, кг/км<sup>2</sup> в год [Виноградова, Котова, 2019]

Море	Pb	Cd	As	Zn	Ni	Cr	Cu
Баренцево	0.035	0.00049	0.011	0.013	0.23	0.0048	0.36
Белое	0.22	0.0040	0.083	0.18	0.80	0.13	1.4
Печорское	0.020	0.0034	0.019	0.11	0.12	0.016	0.16
Карское	0.0085	0.00016	0.0013	0.0069	0.17	0.0012	0.17
Лаптевых	0.0028	0.00004	0.00003	0.0001	0.06	0.00006	0.06

Отметим, что из рассмотренных морей наименее загрязнены антропогенными ТМ удаленные Карское море и особенно море Лаптевых. Практически равные потоки никеля и меди из атмосферы в воды Карского и Печорского морей обусловлены балансом вкладов промышленного района Норильска и предприятий Кольского п-ова, что отмечалось также в работе [Виноградова и др., 2008]. Как известно, эти два арктических региона являются основными поставщиками Ni и Cu на севере Евразии.

### ЧЕРНЫЙ УГЛЕРОД

#### Постановка задачи, исходные данные и их обсуждение

Черный углерод (black carbon – BC) появляется в атмосфере в результате неполного сгорания углеродсодержащих топлив и биомассы при бытовом и промышленном отоплении, в результате работы транспортных и иных двигателей и установок, при обслуживании предприятий по добыче, распространению и переработке нефти и газа, при горении древесины, болот и травы. Многообразии источников BC обуславливает их сложную и изменчивую в пространстве и во времени сеть.

Черный углерод является так называемым короткоживущим климатически значимым загрязнителем (Short Lived Climate Pollution – SLCP) атмосферы, поскольку оказывает как прямое (поглощение солнечного излучения прямо в воздухе), так и косвенное (через процессы облако- и осадкообразования, альbedo поверхности и т. д.) воздействие на атмосферный радиационный баланс. В современных условиях заметных и сложных климатических сдвигов на Земле знания о черном углероде в атмосфере имеют особое значение.

Исходные данные для оценок – это величины концентрации BC в приповерхностном слое атмосферы, полученные с сайта (<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>)

реанализа спутниковой информации MERRA-2 (v.5.12.4), с временным разрешением 1 месяц. Ранее нами было показано, что эти оценки хорошо соответствуют результатам натурных измерений концентрации BC в приземном воздухе в Арктике (ст. Тикси) и южнее – на территории Печоро-Ильчского природного биосферного заповедника (вблизи пос. Якша, республика Коми) [Виноградова и др., 2019a; 2019b].

Оценивать годовой поток BC в воды моря в целом смысла не имеет, поскольку эта характеристика особенно интересна для случая высокого альbedo поверхности (снег, лёд) с точки зрения изменения отражающей способности поверхности при осаждении поглощающего BC и влияния на радиационные характеристики в приповерхностном слое атмосферы. Поэтому в данной работе делаются оценки по формуле (3.2.1) потоков BC из атмосферы на подстилающую поверхность для сравнительно холодных января и апреля, используя значения величины скорости осаждения BC на поверхность для этих месяцев из [Виноградова, 2014]. Предполагается, что BC, так же как и ТМ, переносится в атмосфере на дальние расстояния на аэрозольных частицах субмикронного размера, не претерпевая никаких превращений во время переноса. Однако следует иметь в виду, что реальные процессы для атмосферного BC гораздо сложнее, например, из-за его агрегационных, конденсационных и других преобразований во влажной атмосфере, а также при фазовых переходах атмосферной влаги в Арктике [Bond et al., 2013; Goto et al., 2012].

Рисунок 3.2.3 иллюстрирует временные вариации концентрации BC в окрестностях рассматриваемых пунктов на побережье Баренцева моря – по данным MERRA-2. Показаны диапазоны колебаний концентрации BC в течение месяца. Хорошо видно, что в годы с сильными лесными пожарами на территории севера

Евразии (2010, 2013, 2014, 2016, 2018) содержание ВС в атмосфере и разброс этой величины в течение летнего месяца (в данном случае – июля) значительно превышали остальные данные. Эффект заметен даже на удаленном архипелаге Земля Франца-Иосифа и отражает сравнительно редкие и кратковременные заносы дымового аэрозоля, содержащего продукты горения биомассы, к рассматриваемым пунктам. Подробно такие ситуации рассмотрены в [Виноградова и др., 2018; Журавлева и др., 2019] для ст. Тикси.

### Поток черного углерода из атмосферы на поверхность

В таблице 3.2.4 приведены результаты расчетов по черному углероду для КП, НЗ и ЗФИ на основе данных спутниковой информации MERRA-2. Пересчитывая концентрации ВС в приземном воздухе в потоки на поверхность по формуле (3.2.1), получены средние потоки ВС за месяц (январь или апрель) в окрестности изучаемых районов на побережье.

Естественно, что удаленный район ЗФИ меньше загрязнен черным углеродом, как и тяжелыми металлами (см. выше). Наоборот, потоки ВС на поверхность в окрестности КП высоки, причем в апреле выше, чем в январе. Последний эффект связан с параметризацией скорости осаждения, которая учитывает увеличение уже в апреле в этом районе количества осадков в виде дождей, более эффективно (чем снег) выводящих аэрозольные примеси на поверхность.

Рис. 3.2.4 иллюстрирует, как в среднем (почти за 20 лет) соотносятся уровни загрязнения черным углеродом атмосферы над Баренцевым морем и в других районах российского побережья СЛО в январе и апреле. В холодную часть года в европейской части ВС в атмосфере больше, чем в азиатской, что связано с его антропогенными источниками в Европе, достаточно близко расположенными к берегам Баренцева моря.

Заметим, что к лету пространственные различия концентрации ВС над северными районами России становятся слабее, а в период природных лесных пожаров (июль–август) возрастает загрязнение в арктических районах Сибири (на рисунке не показано). Распределение ВС в пространстве в период пожаров очень изменчиво год от года, поскольку определяется межгодовыми вариациями расположения очагов пожаров и циркуляции атмосферы.

### КОММЕНТАРИИ И ПОПРАВКИ

#### Трансграничный перенос загрязнений из зарубежной Европы

ТМ в приземной атмосфере имеют не только антропогенное происхождение, но входят в состав терригенного вещества и появляются в аэрозолях за

счет ветрового поднятия и перевевания частиц почвы и пыли. В воздухе над европейской территорией России концентрации ТМ ещё увеличиваются из-за трансграничного атмосферного переноса от источников стран зарубежной Европы (см., например, сайт <http://www.msceast.org>). В рамках программы ЕМЕР (European Monitoring and Evaluation Programme – <http://www.emep.int/>) набраны многолетние данные по оценке доли почвенно-пылевой составляющей свинца и кадмия в воздухе и в потоках на подстилающую поверхность в Европе и ближайших странах Азии [Travnikov et al., 2012; Ilyin et al., 2014]. Исполь-

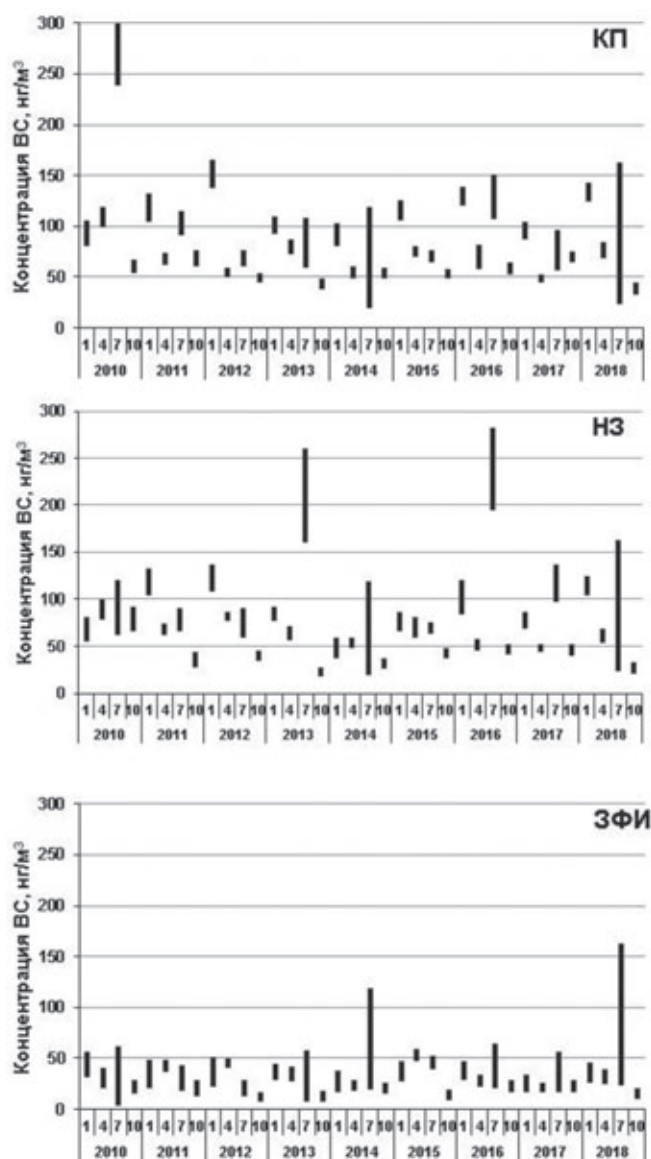
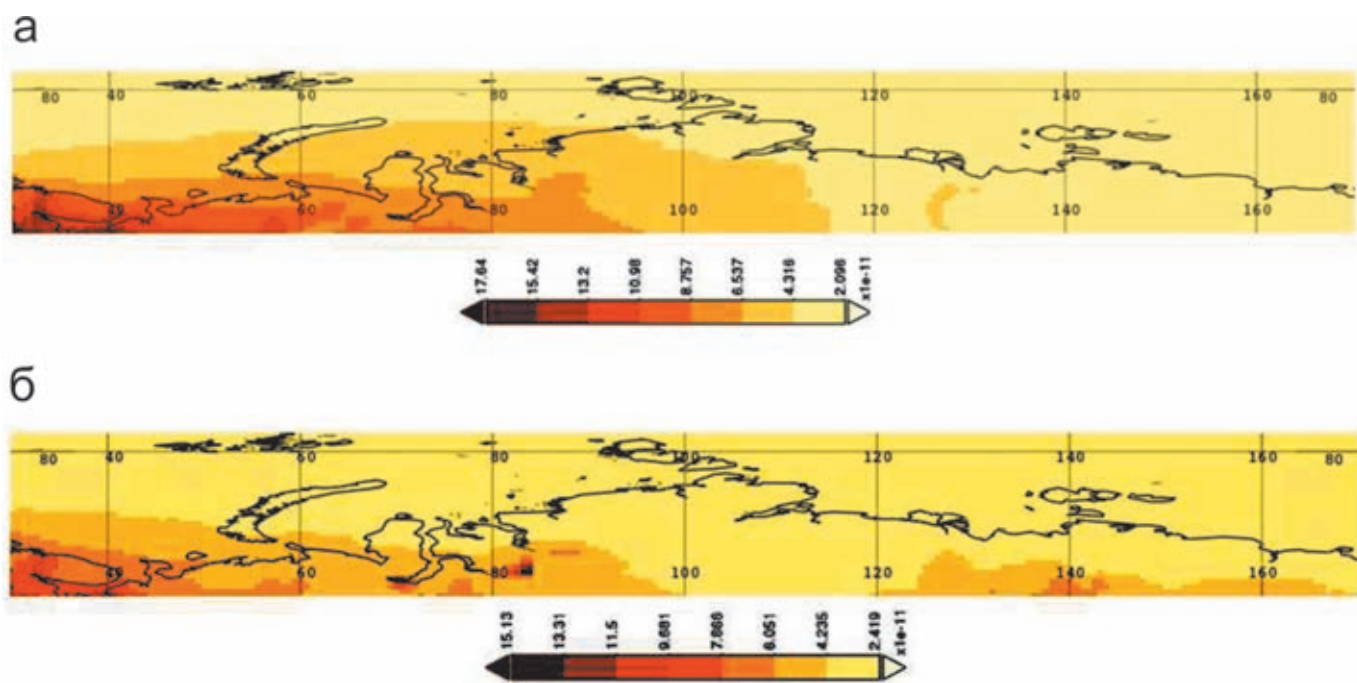


Рис. 3.2.3. Сезонные вариации концентрации ВС в приземном воздухе в окрестностях рассматриваемых пунктов на побережье Баренцева моря – по данным реанализа спутниковой информации, диапазон вариаций. Данные для января, апреля, июля и октября – цифры внутри годов на горизонтальной оси

зую данные этих сайтов, нами были оценены добавки к величинам плотности потоков Pb и Cd из атмосферы на поверхность на территории европейской России при учете ветрового и трансграничного вкладов [Виноградова, 2015; Виноградова, Котова, 2018]. Для Баренцева моря такие поправки составляют около 50% свинца по всей поверхности моря, заметно убывая с запада на восток, и в среднем около 40% кадмия, увеличиваясь с запада на восток примерно от

35 до 45% (рис. 3.2.5). В исходных значениях годовых потоков Pb и Cd (табл. 3.2.1), на которых основывались оценки данной работы, были учтены поправки за счет этих процессов. Остальные рассматриваемые ТМ не изучаются в рамках программы ЕМЕР, поэтому нет данных, чтобы выполнить аналогичные оценки. Для них исходные и полученные в данной работе оценки заведомо занижены, т.к. учитывают лишь антропогенные источники России.



**Рис. 3.2.4.** Среднее распределение концентрации BC ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ) в приземном воздухе на российском побережье СЛО в 2000–2018 годах: а – январь; б – апрель

**Таблица 3.2.4.** Средняя концентрация BC в приземном воздухе ( $\pm$  стандартное отклонение), скорость осаждения на поверхность ( $K$ ), плотность потока BC на единицу поверхности ( $F$ ) и поправка к альбедо поверхности ( $\Delta A$ ) для рассматриваемых районов побережья Баренцева моря

Место, время Параметр	КП		НЗ		ЗФИ	
	Январь	Апрель	Январь	Апрель	Январь	Апрель
BC, $\text{нг}/\text{м}^3$	$115 \pm 20$	$71 \pm 20$	$90 \pm 25$	$66 \pm 14$	$35 \pm 6$	$34 \pm 11$
$K$ , см/с	0.16	0.87	0.09	0.11	0.09	0.11
$F$ , $\text{мг}/\text{м}^2\text{мес}$	0.47	1.6	0.21	0.19	0.08	0.10
$\Delta A$ , %	4.2	7.2	1.2	1.3	<1	<1

#### Сравнение с составом вод моря

Считается, что воды сравнительно неглубокого (в среднем 200 м) Баренцева моря за зиму полностью перемешиваются за счет конвекции, а течениями обновляются за один–два года [Ожигин и др., 2016].

Предполагая, что выделенные три части моря равны не только по площади, но и по объему воды, было получено, что концентрации Cd, Ni и Cu, создаваемые в воде лишь атмосферными выпадениями, на несколько порядков ниже измеренных значений



(табл. 3.2.5) [Новиков, Драганов, 2017]. Даже в местах наибольшего загрязнения из атмосферы (вблизи Кольского п-ова) роль атмосферного канала в загрязнении вод моря мала. Таким образом, микроэлементный состав основной массы вод Баренцева моря формируется водами Нордкапского течения, идущего с запада из Норвежского моря.

Сезонные вариации поступления ТМ из атмосферы в воды Баренцева моря пока, видимо, не изучались. Весной, в период таяния льдов, в воды моря попадает все вещество, накопленное за зимний период во льду и в снеге на его поверхности. В это время вклад атмосферы в загрязнение поверхностной воды должен быть максимальным. Предположим, что поверхностный слой воды равен 20 м, а время таяния льда – 1 мес. Используя январские оценки концентраций ТМ в воздухе рассматриваемых пунктов (табл. 3.2.1), получим, что в весенний месяц после таяния льда концентрации рассматриваемых ТМ в воде вблизи этих пунктов должны быть в 2–10 (среднее 8) раз выше, чем расчетные среднегодовые значения (табл. 3.2.5). Предполагалось, что время зимнего накопления примеси составляет полгода в районах КП и НЗ, а для ЗФИ – 10 месяцев. Движение льда в течение холодной части года не учитывалось. Таким образом, весной вблизи побережья Кольского п-ова возможно повышение вклада атмосферы в концентрации ТМ в морской воде до 4.5% и 3.5% для Ni и Cu соответственно по сравнению со средними (по всему морю) измеренными величинами. Однако

вблизи Кольского побережья и измеренные концентрации этих элементов тоже заметно выше средних, что можно считать следствием влияния поверхностного водного стока [Новиков, Драганов, 2017] и абразии берегов Кольского п-ова. Таким образом, относительный вклад атмосферного канала все равно будет невелик.

### Изменение альbedo поверхности и радиационного форсинга

Оценим максимальную (по данным табл. 3.2.4) поправку к альbedo снега для района КП в апреле. Количество осадков в виде снега в это время здесь составляет 20–21 мм/мес. [Виноградова, Титкова, 2019]. Весь снег, выпавший на поверхность за месяц, будет содержать весь ВС, осевший из атмосферы за месяц. Тогда в районе КП в апреле содержание ВС в снеге будет около 76 нг/г. По оценкам работы [Reay et al., 2012], альbedo чистого снега (на длине волны 550 нм) при этом должно уменьшиться примерно на 0.07, что составляет 7.2%. Результаты аналогичных оценок для КП в январе и для двух других рассматриваемых районов приведены в таблице 3.2.4. Необходимо подчеркнуть, что эти значения максимальные, поскольку использованная нами зависимость из работы [Reay et al., 2012] рассчитана только для видимого излучения и для чистого снега с альbedo около 0.97. Однако по данным работы [Виноградова, Титкова, 2019], более актуальные значения альbedo поверхности в районах КП и НЗ в апреле значительно ниже (старый снег).

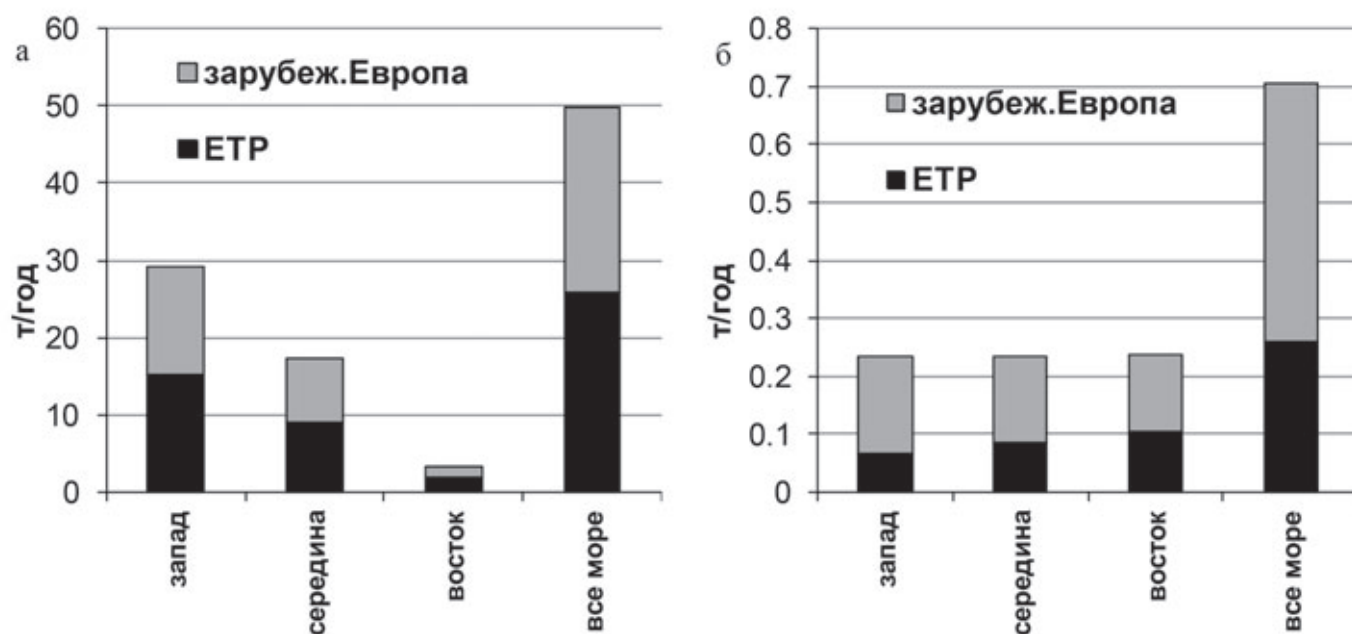


Рис. 3.2.5. Вклады европейской территории России (ЕТР) и зарубежной Европы в потоки из атмосферы в воды Баренцева моря: а – свинец; б – кадмий

Таблица 3.2.5. Средняя за год концентрация ТМ, создаваемая потоками из атмосферы в водах Баренцева моря, и измеренная\*, мкг/л

Место	Концентрация	Pb	Cd	As	Zn	Ni	Cr	Cu
КП	Средняя	0.00170000	0.00001650	0.00062374	0.00016693	0,00742587	0.00018034	0.01253807
	Измеренная*	-	0.179	-	-	1.255	-	2.016
	Весна**/средняя	4.0	1.9	6.0	9.9	7.6	9.2	5.5
НЗ	Средняя	0.00010000	0.00001680	0.00009552	0.00053462	0.00058545	0.00008149	0.00079447
	Измеренная*	-	0.085	-	-	0.682	-	1.463
	Весна**/средняя	6.5	4.0	9.9	10.0	5.7	9.9	8.4
ЗФИ	Средняя	0.00000679	0.00000002	0.00000066	0.00000159	0.00017729	0.00000062	0.00021228
	Измеренная*	-	0.053	-	-	0.483	-	0.985
	Весна**/средняя	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0

**Примечание.** \*Измеренные значения в водах вблизи пунктов – из [Новиков, Драганов, 2017]. \*\*Весна – рассчитанные концентрации ТМ в поверхностном 20-метровом слое воды сразу после весеннего таяния льда.

В этих условиях необходимо больше ВС в снеге для изменения его альbedo примерно в таком же масштабе.

Что касается радиационных свойств (и их изменений) системы атмосфера–поверхность, то формальное изменение радиационного форсинга поверхности (в процентах) как раз равно изменению ее альbedo (также в процентах). Поэтому, исходя из приведенных оценок таблицы 3.2.4, можно утверждать, что вблизи южного побережья Баренцева моря черный углерод, выпадая из атмосферы на снег, может менять радиационный форсинг поверхности на единицы процентов в апреле. Для января аналогичный перенос данных этой таблицы на радиационные потоки с помощью оценок [Reay et al., 2012] невозможен, поскольку за полярным кругом в это время полярная ночь и надо анализировать радиационный форсинг для длинноволнового излучения.

### ВЫВОДЫ

Дальний перенос примесей в атмосфере и осаждение их на поверхность – один из каналов формирования состава морских вод и донных отложений. Анализ переноса воздуха к трем пунктам на побережье Баренцева моря зимой и летом показывает, что летом траектории переноса воздушных масс в целом расположены севернее, чем зимой, что является следствием сезонного смещения атмосферного арктического фронта, который в значительной степени ограничивает проникновение в Арктику воздушных масс (и загрязнений) с юга.

Оценки потоков антропогенных тяжелых металлов (ТМ) на поверхность Баренцева моря по рассчитанным ранее концентрациям этих элементов в приземной атмосфере в трех районах на побережье моря показали, что средние потоки ТМ из атмосферы на единицу площади Баренцева моря ниже, чем для Белого моря, но выше, чем для морей Карского и Лаптевых. Окружающая среда Кольского п-ова и прилегающие к нему воды моря наиболее загрязнены свинцом, никелем и медью, т. е. элементами, мощные источники которых расположены на самом полуострове. Загрязнение этими ТМ убывает последовательно в пунктах НЗ и ЗФИ, а также соответственно в

водах юго-восточной и северной частей моря. Однако районы НЗ и Печорское море больше загрязнены цинком. В целом, наименее загрязнен антропогенными ТМ удаленный пункт ЗФИ, расположенный более чем на 10° севернее двух других, и северная часть Баренцева моря.

Антропогенные эмиссии свинца и кадмия с территории зарубежной Европы, а также процесс ветрового поднятия вместе с пылью и почвой обеспечивают примерно 50% свинца и около 40% кадмия, поступающих в воды моря из атмосферы. Для остальных рассматриваемых ТМ нет данных, чтобы выполнить аналогичные оценки. Для них исходные и полученные в разделе оценки заведомо занижены, т. к. учитывают лишь вклады от антропогенных источников России.

В целом за год атмосфера поставляет лишь доли процентов ТМ, содержащихся в среднем в водах Баренцева моря. Однако весной в период таяния льдов атмосферный вклад в концентрации ТМ в водах моря может быть выше среднего в 2–10 раз и достигать первых процентов в концентрациях никеля и меди вблизи Кольского полуострова.

Рассмотрены пространственные вариации содержания черного углерода (ВС) в атмосфере над Баренцевым морем (по данным реанализа спутниковой информации MERRA-2). Средние потоки ВС на снежную или ледяную поверхность в холодную часть года в разных районах моря различны. Максимальное количество ВС выпадает на поверхность в районе Кольского полуострова. Здесь процесс осаждения ВС на снег весной может понизить альbedo чистого снега (в видимой области спектра) на единицы процентов, внося такого же масштаба поправки в радиационный форсинг поверхности. Детальная проработка этих вопросов, однако, требует дополнительной информации об оптических и микрофизических свойствах атмосферы и выходит далеко за рамки данного исследования.

**Источники финансирования.** Работа выполнена в рамках госзадания (тема «Мировой океан») и при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 17-05-00245).