

ГЛАВА 3. РАССЕЯННОЕ ОСАДОЧНОЕ ВЕЩЕСТВО ПРИВОДНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ

3.1. Рассеянное осадочное вещество атмосферы над Баренцевым морем

В.П. Шевченко¹, Л.П. Голобокова², С.М. Сакерин³, А.П. Лисицын, Д.М. Кабанов³,
А.Н. Новигатский¹, М.В. Панченко³, Н.В. Политова¹, В.В. Польшкин³, О.Б. Поповичева⁴,
Т.В. Ходжер²

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

²Лимнологический институт СО РАН, Иркутск

³Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск

⁴Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына
МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

Изучены концентрация и состав аэрозоля в атмосфере над Баренцевым морем. Ранее вклад аэрозолей в формирование природной среды Арктики недооценивался. Наши данные свидетельствуют о заметном влиянии континентального аэрозоля на атмосферу Баренцева моря. Установлена зависимость концентрации черного углерода от типа воздушных масс. Она возрастает в сотни раз в атмосфере над морем при выносах континентального воздуха. Изучен ионный состав и содержание химических элементов в нерастворимой фракции аэрозолей приземной атмосферы Баренцева моря. Содержание большинства химических элементов (Na, Al, K, Ca, Sc, Fe, Co, Rb, Zr, Cs, Ba, РЗЭ, Hf, Ta, Th, U) в нерастворимой фракции аэрозолей ниже средних значений для земной коры. Содержание Cr, Cu, Zn, As, Se, Br, Ag, Sb, Au и Pb значительно превышает их среднюю величину для земной коры, что обусловлено влиянием антропоферы. Обсуждаются вероятные источники антропогенного загрязнения аэрозолей Арктики и Баренцева моря.

Ключевые слова: аэрозоли, нерастворимая фракция, черный углерод, ионный состав, потоки вещества, Арктика.

DOI: 10.29006/978-5-6045110-0-8/(11)

ВВЕДЕНИЕ

Исследования последних лет показали, что вклад аэрозолей в формирование природной среды Арктики значительнее и разнообразнее, чем это представлялось ранее [Шевченко и др., 2000, 2009; Шевченко, 2006; Лисицын, 2010]. Большой интерес представляет изучение разнообразных антропогенных загрязнений, поступающих в Баренцево море из региональных источников (<1 тыс. км) и из удаленных промышленных центров, дальних (>1 тыс. км) и сверхдальних (>10 тыс. км).

Изучение аэрозоля в арктической атмосфере началось в конце 1970-х годов с измерений счетных концентраций частиц и аэрозольной оптической толщи (АОТ) [Бартенева и др., 1991; Tomasi et al., 2015], которая представляет собой оптический эквивалент общего содержания аэрозоля в столбе атмосферы. Начиная с 1990-х годов исследования расширились в части определения химического (ионного, элементного) состава аэрозоля и содержания в нем компоненты, поглощающей солнечное излучение, – черного углерода [Виноградова и др., 1993; Sirois, Barrie,

1999; Шевченко и др., 2006; Eleftheriadis et al., 2009; Chang et al., 2011; Stohl et al., 2013; Dutkiewicz et al., 2014; Stone et al., 2014; Sakerin et al., 2015; Popovicheva et al., 2017, 2019]. Становится очевидным глобальное потепление и возрастающее антропогенное воздействие на окружающую среду, при этом области, подверженные наиболее быстрым изменениям, включают морские и прибрежные территории Арктики [AMAP, 2011, 2015]. Черный углерод в составе углеродосодержащих аэрозолей эмиссий источников горения природных топлив и биомасс хорошо поглощает солнечное излучение, вносит вклад в глобальное потепление в противовес охлаждению чисто рассеивающими органическими и сульфатными аэрозолями [Flanner, 2013]. Климат Арктики особенно подвержен сильному воздействию черного углерода в результате его осаждения и ускорения таяния льда, что приводит к изменению альbedo подстилающей поверхности [Doherty et al., 2010]. Изменения микрофизики облаков и косвенные эффекты влияния на климат наблюдаются вследствие высокой нуклеационной активности арктических аэрозолей [Yun et al., 2013].

Основной объем информации по характеристикам атмосферного аэрозоля получен на основе многолетних наблюдений на полярных станциях. В Европейском секторе Арктики мониторинг аэрозоля ведется на трех станциях архипелага Шпицберген, являющимся северо-западной границей Баренцева моря, и на севере Финляндии [Eleftheriadis et al., 2009; Hoffmann et al., 2010; Toledano et al., 2012; Dutkiewicz et al., 2014]. Анализ результатов наблюдений в Нью-Олесунне, Хорнсунде, Баренцбурге и на других станциях позволили определить основные факторы, которые влияют на физико-химический состав и изменчивость аэрозоля в арктической атмосфере. Установлено, что дефицит собственных источников аэрозоля в арктической зоне частично восполняется выносами загрязненного воздуха из Евразии и Северной Америки.

Наиболее сильное воздействие на арктическую атмосферу оказывают выносы дымового аэрозоля во время массовых лесных пожаров [Stohl et al., 2006; Stone et al., 2008; Eck et al., 2009; Vinogradova et al., 2015; Markowicz et al., 2016], а также весенних палов растительности и сельскохозяйственных пожаров [Myhre et al., 2007; Stohl et al., 2007]. Несмотря на кратковременность дымовых шлейфов (1–3 дня), они заметно искажают естественную сезонную динамику характеристик аэрозоля в арктических районах.

Кроме дымов в Арктику выносятся литогенный, биогенный и антропогенный аэрозоль. В отличие от лесных пожаров, источники этих аэрозолей действуют практически постоянно и распределены по всей территории жизнедеятельности человека. Для Баренцева моря наиболее близким и вероятным источником континентального аэрозоля являются страны Скандинавского полуострова и север Европейской части России.

Перенос веществ в Арктику (модель GEOS-Chem CTM, версия 8-02-03, [<http://geoschem.org>]) осуществляется от источников, располагающихся в различных регионах [Fisher et al., 2011]. Крупнейшим поставщиком сульфатов в арктические районы в зимний период является Западная Азия (юго-запад Сибири и Казахстан). Индия и Восточная Азия (Китай, Монголия, Япония) оказывают большее влияние на перенос сульфатов в весенний период по сравнению с зимним. Европа также поставляет большое количество сульфатов, но не является лидером их эмиссии. Аммоний в весенний период поступает, в основном, от источников Восточной Азии и Европы. Огромный выброс аммиака происходит в результате горения бореальных лесов. Повышенная эмиссия аммиака способствует тому, что аэрозоль, транспортируемый из Восточной Азии и Европы, в основном

имеет нейтральную среду [Fisher et al., 2011]. Рост выбросов серы из Западной Азии может быть ответственным за наблюдаемое увеличение аэрозольной кислотности в Барроу [Quinn et al., 2009].

Следует также упомянуть загрязнение атмосферы продуктами вулканической деятельности. Исследование ледяных кернов Гренландии позволило обнаружить следы извержений вулканов Лаки (1783, Исландия) и Тамбора (1815, Индонезия), а также радиоактивные отходы термоядерных испытаний (1952–1954 гг., 11° с. ш., США; 1961–1962 гг., 75° с. ш., Россия [Clausen, Hammer, 1988]. После извержения вулкана Пинатубо (июль 1991 г.) не происходило других экстремальных извержений, которые оказывают глобальное и длительное воздействие на атмосферу. Влияние менее мощных извержений является кратковременным (несколько дней) и сопоставимо с дымами лесных пожаров. Например, в Европейском секторе Арктики слои вулканического аэрозоля в тропосфере регистрировались после извержений вулканов Касаточи (август 2008 г.) и Сарычева (июль 2009 г.) [Hoffmann et al., 2010; Toledano et al., 2012].

Независимо от вида источников, влияние выносов загрязняющих веществ в арктическую атмосферу усиливается в конце зимы – начале весны. Температурные инверсии в этот период приводят к образованию и накоплению аэрозоля в отдельных слоях тропосферы, известному как Арктическая дымка [Shaw, 1995; Quinn et al., 2007; Tomasi et al., 2015]. Отметим также, что тропосферный перенос аэрозоля из средних широт не всегда сопровождается одновременным изменением характеристик аэрозоля в приземном слое. Но, в конечном счете, вслед за выносом следует оседание аэрозоля в нижние слои и на подстилающую поверхность.

В последнее время на территории Европы отмечается снижение промышленных эмиссий [Tørseth et al., 2012; Li et al., 2014], что может благоприятно сказаться и на арктической атмосфере. Вместе с тем, развитие нефтегазодобычи на севере Сибири, увеличение числа лесных пожаров и меридиональных переносов, связанных с изменением климата [Попова, 2018] оказывают противоположное воздействие.

Балансные подсчеты показывают, что вклад аэрозолей в формирование осадочного материала в Арктике близок к вкладу речного осадочного вещества за пределами маргинальных фильтров рек [Шевченко, 2000; Шевченко и др., 2000]. Это принципиально важно, поскольку ранее считали, что эоловый материал в Арктике играет незначительную роль в процессах осадконакопления. Для многих элементов (Pb, Sb, Se, V и др.) аэрозольный источник – главный [Шевченко, 2006].

Изучение аэрозолей в приводном слое атмосферы над Баренцевым морем началось в 1991 г. и проводится в морских экспедициях на судах ИО РАН и ряда других организаций [Шевченко и др., 1997, 1998а, 2000, 2003а, 2019; Шевченко, 2000; Голубева и др., 2002, 2018; Sakerin et al., 2015, 2018, 2019; Поповичева и др., 2017; Терпугова и др., 2018; Радионов и др., 2019; Poroova et al., 2019; Голобокова и др., 2020; Сакерин и др., 2020].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В экспедициях сотрудники ИО РАН для определения элементного состава аэрозолей фильтрацию воздуха проводили через фильтры АФА-ХА. Для изучения минерального и вещественного состава рассеянного осадочного вещества атмосферы материала, собранного на фильтрах, оказывается недостаточно, а собранный материал засорён кристаллами морской соли. Поэтому параллельно с фильтрацией использовали метод сбора большого количества нерастворимых в воде аэрозолей ней-

лоновыми сетями [Chester, Johnson, 1971; Живаго, Богданов, 1974]. При отборе аэрозольных проб этим методом 5–10 нейлоновых сетей площадью 1 м² каждая (ячейки 0.8 мм) вывешивались в носовой части судна в течение 8–24 часов. Участки маршрутов судов, на которых проводили отбор проб сетевым методом, показаны на рис. 3.1.1. После экспозиции сети промывались в дистиллированной воде, затем эта вода фильтровалась через лавсановые ядерные фильтры с диаметром пор 0.45 мкм. На фильтрах оседали несолёвые частицы крупнее 1 мкм, вещественный и минеральный состав которых изучали с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM-U3 (Япония).

Минеральный состав в 24 пробах аэрозолей в 1991–1994 годах был определён В.В. Серовой рентгено-дифрактометрическим методом на приборе ДРОН-2 [Шевченко и др., 1998а, 2000], а в трех пробах, отобранных в 2011–2015 годах, – на приборах ДРОН-2 и D8 ADVANCE (Bruker AXS) [Дара, Мамочкина, 2017].

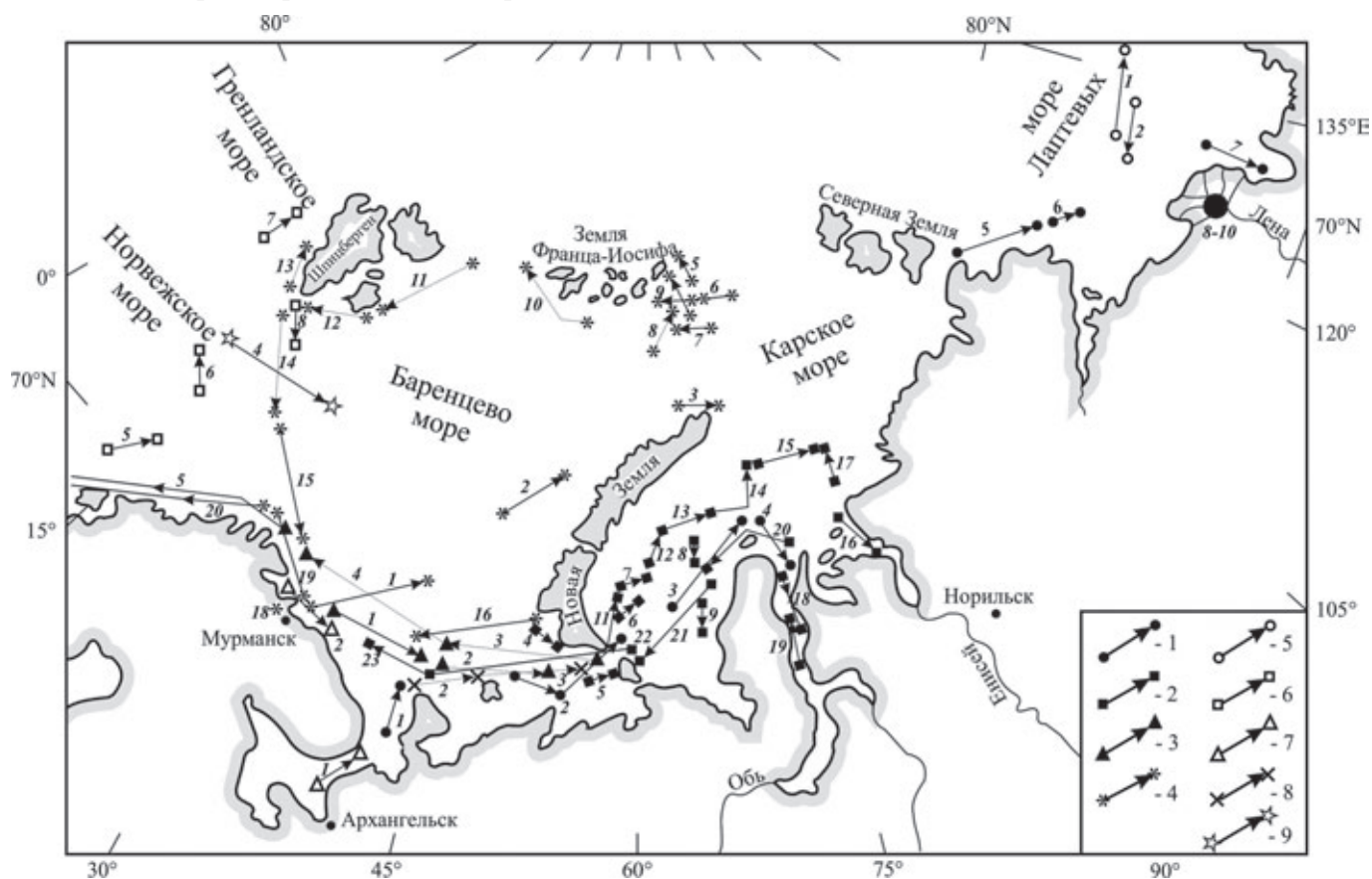


Рис. 3.1.1. Сетевые пробы аэрозолей:

1 – экспедиция SPASIBA (август–сентябрь 1991 г.); 2 – 49 рейс НИС «Дмитрий Менделеев» (август–октябрь 1993 г.); 3 – 31 рейс НИС «Академик Мстислав Келдыш» (сентябрь 1993 г.); 4 – 9 рейс НИС «Профессор Логачев» (август–октябрь 1994 г.); 5 – ARK-XI/1 рейс НИС «Polarstern» (июль–сентябрь 1995 г.); 6 – 15 рейс НИС «Профессор Логачев» (июль–август 1996 г.); 7 – 11 рейс НИС «Академик Сергей Вавилов» (август–октябрь 1997 г.); 8 – 59 рейс НИС «Академик Мстислав Келдыш» (сентябрь 2011 г.); 9 – 62 рейс НИС «Академик Мстислав Келдыш» (август 2015 г.). Цифры у стрелок обозначают номера проб в соответствующих рейсах

Начиная с 2007 года, Институтом оптики атмосферы совместно с Лимнологическим институтом СО РАН ведутся экспедиционные исследования физико-химических характеристик аэрозоля над Баренцевым и другими морями Северного Ледовитого океана

(СЛО). В таблице 3.1.1 перечислены экспедиции, результаты которых обобщены в данной главе. Маршруты экспедиций в Баренцевом и других арктических морях показаны на рис. 3.1.2, а объем полученных данных приведен в таблице 3.1.2.

Таблица 3.1.1. Список арктических экспедиций (ИОА СО РАН), в которых проводились измерения характеристик атмосферного аэрозоля 2007–2018 гг.

Экспедиции	Сроки	Районы
54-й рейс НИС «Академик Мстислав Келдыш»	Сентябрь–октябрь 2007	Баренцево и Карское моря
АВЛАП/NAVOS-2013 на НЭС «Академик Федоров»	Август–сентябрь 2013	Баренцево, Карское, Лаптевых, Восточно-Сибирское моря
1-й рейс УПС «Профессор Хлюстин»	Август 2013	Чукотское, Восточно-Сибирское, Берингово, Охотское, Японское моря
АВЛАП/NAVOS-2015 на НЭС «Академик Трешников»	Август–октябрь 2015	Баренцево, Карское, Лаптевых, Восточно-Сибирское моря
66-й рейс НИС «Академик Мстислав Келдыш»	Июль–август 2016	Баренцево и Карское моря
67-й рейс НИС «Академик Мстислав Келдыш»	Август–октябрь 2016	Баренцево, Карское и Норвежское моря
«Арктический плавучий университет» на НИС «Профессор Молчанов»	Июль 2017	Баренцево море
71-й рейс НИС «Академик Мстислав Келдыш»	Июнь–август 2018	Северная Атлантика, Норвежское и Баренцево моря

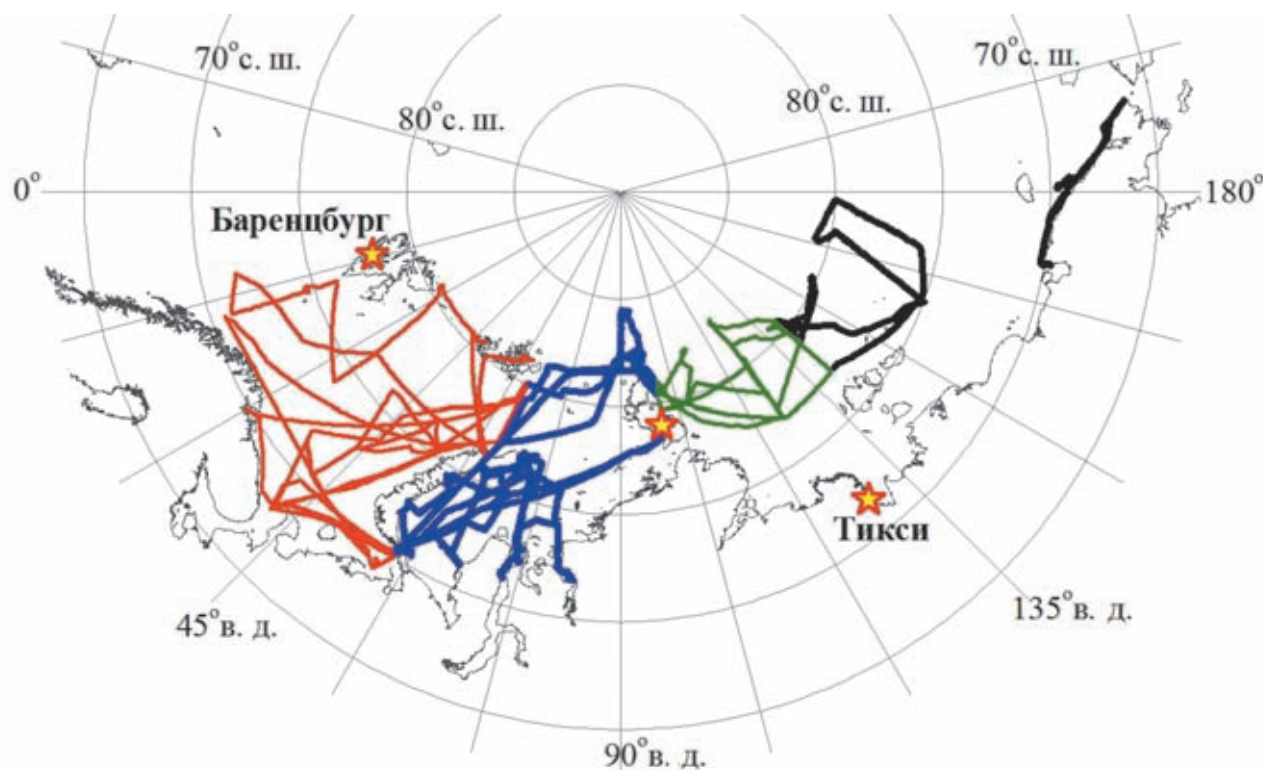


Рис. 3.1.2. Маршруты экспедиций в различных арктических морях (секторах Северного Ледовитого океана)

В измерениях использовался одинаковый комплект приборов в составе солнечного фотометра SPM [Сакерин и др., 2012], аэталометра МДА-02 [Козлов и др., 2008] и счетчика частиц АЗ-10. С помощью этих приборов измерялись: спектральные АОТ атмосферы в диапазоне спектра 0.34–2.14 мкм (τ_λ^a), счетная концентрация частиц диаметром 0.4–10 мкм (N_a) и массовая концентрация в аэрозоле поглощающего вещества – черного углерода (black carbon, BC) (M_{bc}). Заметим, что ранее в русскоязычных публикациях термин «черный углерод» не употреблялся, а использовался «сажа», при этом из-

мерения поглощения осаждаемых частиц проводились аэталометрической методикой, определяющей именно массовую концентрацию хорошо поглощающего солнечное излучение вещества. Поэтому далее при цитировании опубликованных работ мы используем термин «сажа».

В описанных выше экспедициях концентрации аэрозоля и черного углерода измеряли в автоматическом режиме – ежечасно и круглосуточно. Фотометрические наблюдения (измерения АОТ) выполняли сериями из нескольких дублирующих замеров каждый час, если Солнце не закрыто облачностью.

Таблица 3.1.2. Количество часов (дней) измерений характеристик аэрозоля в различных арктических морях (секторах Северного Ледовитого океана)

Характеристики	Баренцево	Карское	Лаптевых	ДВ моря*
Концентрации N_a , M_{bc}	1552 (58)	3037 (85)	967 (43)	623 (28)
АОТ	66 (21)	39 (20)	51 (10)	10 (2)

Примечание. *Дальневосточные моря.

На основе результатов измерений дополнительно рассчитывались: грубо- и мелкодисперсная компоненты АОТ (τ^c и $\tau_{0.5}^f$ – на длине волны 0.5 мкм); счетные концентрации частиц мелкодисперсной N_f ($d=0.4-1$ мкм) и грубодисперсной N_c ($d>1$ мкм) фракций; массовая концентрация аэрозоля:

$$M_a = 4/3 \cdot \sum_{i=1}^n N_i \cdot \rho \cdot \pi \cdot r_i^3,$$

где i – номер диапазона размеров, N_i – счетная концентрация частиц в этом диапазоне, r_i – средний радиус частиц, $\rho = 1.5$ г/см³ – плотность вещества аэрозоля. Более подробно методики определения характеристик аэрозоля рассматривались в работах [Полькин и др., 2011; Sakerin et al., 2015; Терпугова и др., 2018].

Раздельный анализ N_c , N_f и τ^c , $\tau_{0.5}^f$ обусловлен тем, что частицы мелко- и грубодисперсных фракций аэрозоля различаются природой происхождения и трансформации в атмосфере [Аэрозоль..., 1991]. Мелкодисперсный аэрозоль (сульфатный, органический и др.) образуется в атмосфере в результате многообразных фотохимических и микрофизических процессов. Время жизни мелкодисперсного аэрозоля составляет несколько суток, благодаря чему он может переноситься на большие расстояния (сотни и тысячи километров). Основным источником грубодисперсного аэрозоля является подстилающая поверхность. Из-за короткого времени жизни и малой дистанции переноса грубодисперсный аэрозоль имеет более локальный характер и относится к конкретной местности.

Результаты экспедиционных измерений характеристик аэрозоля отягощены погодными условиями в короткие периоды измерений в том или ином районе океана. Следовательно, для получения достоверных оценок средних характеристик необходимо усреднение данных многих экспедиций. Но даже в этом случае относительно редкие ситуации экстремальных замутнений атмосферы (в первую очередь дымовых выносов) могут существенно исказить статистические данные. Поэтому обобщение характеристик аэрозоля, измеренных над Баренцевым морем в семи экспедициях, выполнено в двух вариантах [Сакерин и др., 2018]: для общего массива данных и с исключенными ситуациями высоких замутнений атмосферы (сокращенно – «без дымов»).

Экспедиция «Север-2015» проводилась на борту научно-экспедиционного судна (НЭС) «Академик Трешников» в период с 9 по 25 октября 2015 года по маршруту г. Архангельск – научно-исследовательская станция «Ледовая База Мыс Баранова», о. Большевик (рис. 3.1.3). Для определения концентраций черного углерода был использован портативный аэталометр с высоким временным разрешением, измеряющий поглощение света, вызванное осаждением частиц при прокачке атмосферного воздуха на кварцевом фильтре на длине волны 650 нм. Концентрация эквивалента черного углерода (ЕВС) определялась путем преобразования ослабления света с массовым коэффициентом ослабления как описано в [Porovichcheva et al., 2017]. Для обеспечения мониторинга аэрозоля в невозмущенном приводном слое

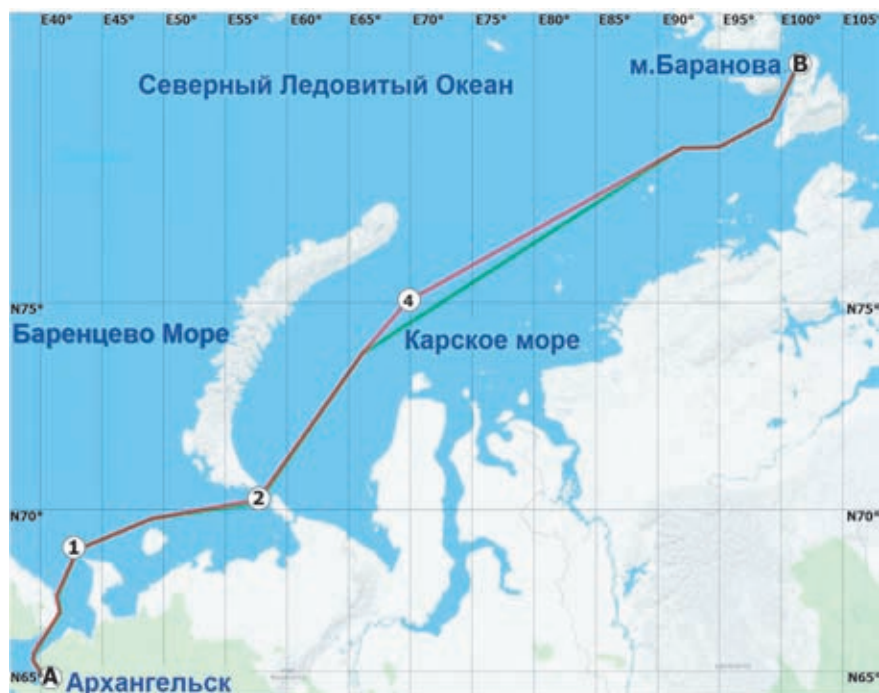


Рис. 3.1.3. Маршрут экспедиции «Север-2015», сопровождавшейся измерениями черного углерода с высоким разрешением [Поповичева и др., 2017]

атмосферы и анализа потенциального влияния выхлопов двигателей корабля измерения проводились двумя аэталометрами. Для расчетов переноса воздушных масс на основе метеорологического анализа ECMWF была использована дисперсионная Лагранжева модель частиц FLEXPART, проведено сравнение с измеренными концентрациями ЕВС на основе базы данных глобальных эмиссий ECLIPSE, включающей распределенные источники сжигания природного топлива в жилом секторе, промышленных и транспортных целях, а также горения биомасс в природных пожарах.

Кроме измерений оптических и микрофизических характеристик проводился отбор проб на фильтры для последующего определения ионного состава растворимой фракции аэрозоля и содержания в воздухе газообразных примесей (HCl , HNO_3 , SO_2 , NH_3). Аэрозоль для определения химического состава в приводной атмосфере Баренцева моря собирался в 54, 66 и 67 рейсах НИС «Академик Мстислав Келдыш», на НЭС «Академик Федоров» в экспедиции NAVOS-2013 и на НЭС «Академик Трешников» – NAVOS-2015 (табл. 3.1.1). Было собрано и проанализировано 32 пробы атмосферного аэрозоля и газообразных примесей. Пробы, в которых прослеживалось явное попадание брызг и тумана, отбракованы и данные исключены из анализа. Аэрозольное вещество собиралось на внешнем (первом) тефлоновом фильтре PTFE с диаметром пор 0.8 мкм.

Последующие фильтры ULTIPOR (второй фильтр, полиамидный, диаметр пор 0.45 мкм) и два импрегнированных фильтра «Whatman» с щелочной (третьей) и кислой (четвертый) основой улавливали газообразные примеси. Первый, второй и четвертый фильтры экстрагировали деионизированной водой, третий – 0.05% раствором перекиси водорода в ультразвуковой бане в течение 30 мин. Растворы фильтровали через ацетат-целлюлозные фильтры с диаметром пор 0.2 мкм. В фильтрате первого фильтра проводили измерение концентраций катионов Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , NH_4^+ и анионов Cl^- , NO_3^- , Br^- , SO_4^{2-} . Газообразные примеси рассчитывали из соответствующих ионов (Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , NH_4^+), определенных в экстрактах проб на втором, третьем и четвертом фильтрах. Химический анализ выполнялся методом ионной хроматографии на ионной системе ICS-3000 (Dionex, США) с точностью до 2–8% в ЦКП «Ультрамикрoанализ» ЛИН СО РАН [Голобокова и др., 2020].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Средние значения характеристик аэрозоля над Баренцевым морем, измеренных в 2007–2017 гг., приведены в таблице 3.1.3. Общий диапазон изменчивости основных характеристик составил: $N_a = 0.02\text{--}16.2 \text{ см}^{-3}$, $N_f = 0.02\text{--}16 \text{ см}^{-3}$, $N_c = 0.01\text{--}1.56 \text{ см}^{-3}$, $M_{bc} = 1\text{--}890 \text{ нг/м}^3$, $\tau_{0.5}^a = 0.021\text{--}0.228$, $\tau_{0.5}^f = 0.015\text{--}0.191$, $\tau^c = 0.005\text{--}0.1$.

Таблица 3.1.3. Статистика оптических и микрофизических характеристик аэрозоля над Баренцевым морем для общего массива данных и без экстремальных замутнений («без дымов»)

Характеристики	Общий массив	«Без дымов»
N_a , см^{-3}	3.28±2.89	3.21±2.79
N_f , см^{-3}	3.18±2.85	3.10±2.75
N_c , см^{-3}	0.12±0.20	0.12±0.20
M_a , мкг/м^3	3.03±7.75	3.07±7.86
M_{bc} , нг/м^3	42±55	35±28
$\tau_{0.5}^a$	0.063±0.042	0.054±0.024
$\tau_{0.5}^f$	0.040±0.037	0.031±0.016
τ^c	0.023±0.019	0.023±0.020
α	1.09±0.42	1.04±0.39
β	0.032±0.024	0.029±0.022

Основные характеристики аэрозоля

Во время всех экспедиций наблюдались эпизодические всплески повышенных значений характеристик аэрозоля продолжительностью от нескольких часов до двух дней. В одиннадцати эпизодах концентрации черного углерода превышали 120 нг/м^3 при высоких значениях концентраций аэрозоля ($N_a > 5 \text{ см}^{-3}$). В большинстве случаев указанные всплески M_{bc} и N_a регистрировались в южной и юго-восточной частях Баренцева моря, где влияние континентальных выносов наиболее существенно.

Из таблицы 3.1.3 видно, что ситуации повышенных замутнений атмосферы увеличивают АОТ и общую концентрацию аэрозоля (N_a) за счет мелкодисперсных составляющих, а значения τ^c и N_c не меняются. Самый большой рост при учете «дымов» наблюдается у $\tau_{0.5}^f$ и M_{bc} – на 29% и 20% соответственно. Средние значения характеристик, рассчитанных без учета высоких замутнений атмосферы, можно рассматривать в качестве оценки регионального уровня аэрозоля над Баренцевым морем.

Показатель селективности Ангстрема α , характеризующий спектральную зависимость АОТ, находится вблизи нижней границы диапазона значений, которые характерны для континентальной атмосферы ($\alpha=1-1.5$) [Исследование..., 2012]. Этот факт свидетельствует об относительно большом вкладе в АОТ мелкодисперсного аэрозоля: соотношение ($\tau_{0.5}^f/\tau^c$) составляет 1.74 для общего массива и 1.35 для данных «без дымов».

Более детальное представление о дисперсном составе аэрозоля над арктическими морями дают функции распределения частиц по объемам (dV/dr). Из рис. 3.1.4, а видно, что Баренцево море отличается

самыми высокими средними значениями dV/dr в диапазоне мелких частиц ($d < 1 \text{ мкм}$) и вторыми по значимости (после Карского моря) значениями в диапазоне крупных частиц.

О повышенном содержании аэрозоля над Баренцевым морем, в сравнении с другими морями, свидетельствуют также средние спектральные зависимости АОТ (рис. 3.1.4, б). Исключением являются более высокие значения АОТ в море Лаптевых, но они обусловлены не природными факторами. Из-за малочисленности судовых измерений АОТ в море Лаптевых к расчетам были привлечены данные наших измерений в береговой зоне (Тикси), которые и привели к завышению средних значений.

В результатах измерений отдельных экспедиций эпизодически проявлялось увеличение характеристик аэрозоля в южной части Баренцева моря (при сближении с континентом). Объединение данных всех экспедиций позволило получить первые оценки широтно-долготного распределения характеристик аэрозоля над Баренцевым и Карским морями [Sakerin et al., 2018]. Из рис. 3.1.5 видно, что концентрация черного углерода уменьшается в северо-восточном направлении от 70 нг/м^3 вблизи Скандинавского полуострова до 10 нг/м^3 с приближением к Земле Франца-Иосифа. В изменении концентрации N_a и АОТ (рис. 3.1.6) хорошо проявились две составляющие – спад средних значений в северном и восточном направлениях.

Таким образом, результаты, приведенные на рис. 3.1.4–3.1.6, свидетельствуют о заметном влиянии континентального аэрозоля на атмосферу Баренцева моря. Но это влияние значительно меньше, чем во внутреннем субарктическом Белом море. Результаты

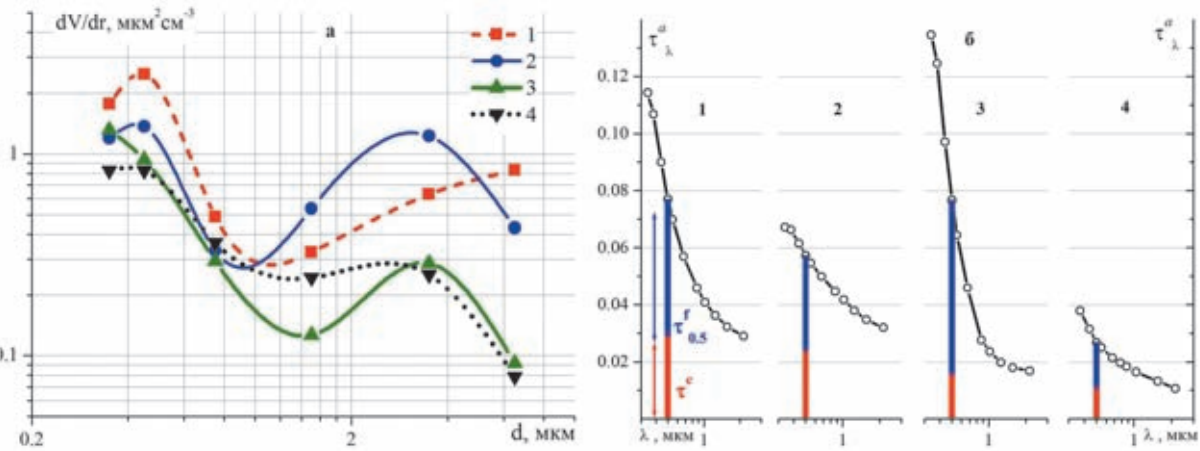


Рис. 3.1.4. Средние функции распределения частиц по объемам dV/dr (а) и спектральные зависимости АОТ с компонентами $\tau_{0.5}^a$, τ^c (б) над Баренцевым морем (1) в сравнении с другими арктическими морями: 2 – Карское, 3 – Лаптевых, 4 – Восточно-Сибирское и Чукотское

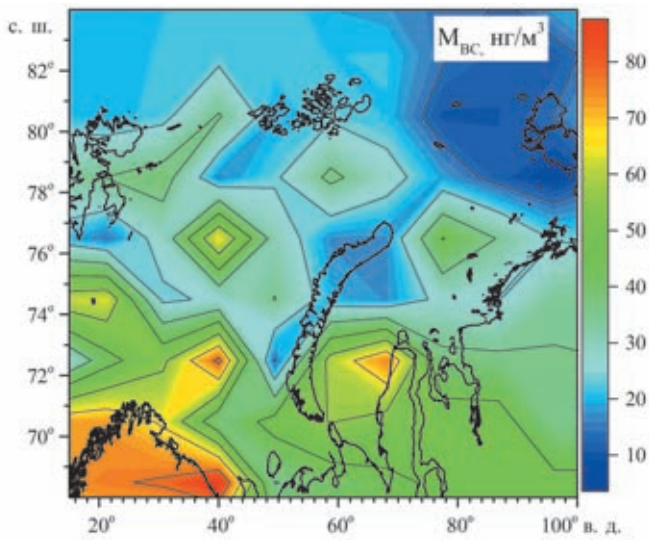


Рис. 3.1.5. Карта пространственного распределения M_{bc} над Баренцевым и Карским морями

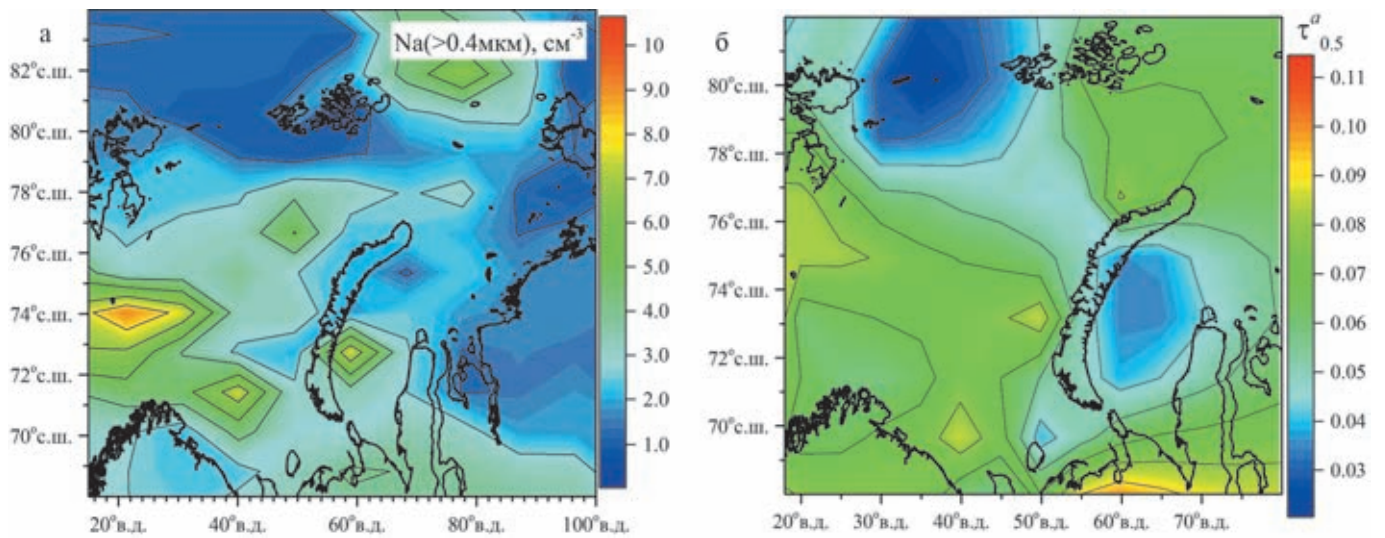


Рис. 3.1.6. Карта пространственного распределения N_a и $\tau_{0.5}^a$ над Баренцевым и Карским морями

измерений в пяти экспедициях [Козлов и др., 2009; Полькин и др., 2008a] показали, что средние концентрации аэрозоля и черного углерода над Белым морем в августе 2003–2007 гг. менялись в диапазоне: $N_a = 4.9\text{--}13.2 \text{ см}^{-3}$, $M_{bc} = 43\text{--}640 \text{ нг/м}^3$.

Рассмотрим, как соотносятся средние характеристики аэрозоля над Баренцевым морем с другими арктическими морями России. Первые оценки пространственного изменения характеристик аэрозоля на маршруте Северного морского пути были сделаны по данным измерений в рейсах НЭС «Академик Федоров» и «Профессор Хлюстин» летом 2013 г. [Sakerin et al., 2015]. Несмотря на относительно высокую короткопериодную изменчивость характеристик аэрозоля, в среднем пространственном распределении отмечено уменьшение концентраций аэрозоля и черного углерода сначала в северо-восточном (при удалении от Скандинавии), а затем в восточном направлениях (рис. 3.1.7). В акватории Тихого океана проявился более значительный широтный рост концентраций от Берингова моря до Японского.

Обобщение результатов семи арктических экспедиций [Sakerin et al., 2018; Радионов и др., 2019] позволило минимизировать влияние короткопериодных вариаций и получить более достоверные оценки пространственной составляющей характеристик аэрозоля над Северным Ледовитым океаном (рис. 3.1.8). В среднем пространственном распределении хорошо проявилась тенденция примерно двукратного уменьшения концентраций аэрозоля и черного углерода в восточном направлении: от $N_a = 3.2 \text{ см}^{-1}$ и $M_{bc} = 40 \text{ нг/м}^3$ над Баренцевым морем до $N_a = 1.4 \text{ см}^{-1}$ и $M_{bc} = 20 \text{ нг/м}^3$ над Восточно-Сибирским и Чукотским морями.

В пространственном изменении функций распределения частиц по объемам (dV/dr) и спектральных

АОТ атмосферы тоже прослеживается снижение средних значений с запада на восток (рис. 3.1.4).

Объем данных, полученных нами в Норвежском и Гренландском морях [Терпугова и др., 2018; Sakerin et al., 2019; Сакерин и др., 2020], пока недостаточен для статистических обобщений: по 4 дня измерений в 71 и 67 рейсах НИС «Академик Мстислав Келдыш». На маршруте 71 рейса (2018 г.), проходившего на периферии Норвежского моря, получены концентрации, сопоставимые с Баренцевым морем: $N_a = 2.24 \text{ см}^{-1}$, $M_{bc} = 38 \text{ нг/м}^3$. В 67 рейсе маршрут проходил вблизи берегов Норвегии и концентрации оказались примерно в 2 раза выше: $N_a = 5.56 \text{ см}^{-1}$, $M_{bc} = 77 \text{ нг/м}^3$. Средние концентрации N_a и M_{bc} над Норвежским морем, рассчитанные по данным двух рейсов (рис. 3.1.8), оказались выше, чем над Баренцевым морем.

Для наиболее актуальной характеристики – концентраций черного углерода – приведём данные других экспедиций в Баренцевом, Норвежском и Карском морях. Результаты измерений в 2015 г. в 62–64 рейсах НИС «Академик Мстислав Келдыш» [Shevchenko et al., 2016] показали, что концентрации M_{bc} над Баренцевым и Норвежским морями менялись в диапазоне от <10 до 50 нг/м^3 , то есть близки к данным, представленным на рис. 3.1.8.

Согласие наблюдается и с данными измерений концентрации черного углерода в рейсе «Charles Darwin» в Норвежском море [O'Dowd et al., 1993]. Авторы отмечают сильную зависимость концентраций от типа воздушных масс. В чистых морских и арктических воздушных массах содержание черного углерода составляет $13\text{--}34 \text{ нг/м}^3$, а при выносах континентального воздуха возрастает до 400 нг/м^3 и более.

Проведенный комплекс измерений массовой концентрации эквивалента черного углерода (ЕВС) с высоким временным разрешением в ходе высоко-

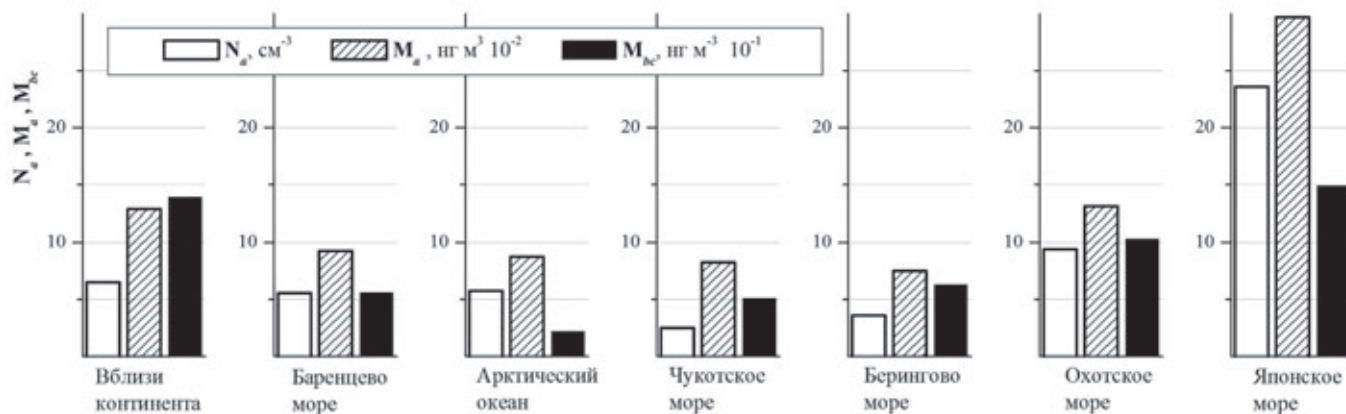


Рис. 3.1.7. Средние концентрации аэрозоля и черного углерода (N_a , M_a , M_{bc}) в рейсах НЭС «Академик Федоров» и «Профессор Хлюстин» летом 2013 г.

широтной экспедиции «Север-2015» в октябре 2015 г. (рис. 3.1.9) показал, что после выхода из промышленных районов дельты р. Северной Двины значение ЕВС понизилось до 100 нг/м^3 [Поповичева и др., 2017].

По результатам измерений, выполненных в этой экспедиции, можно проследить сильную межсуточную изменчивость концентраций ЕВС, связанную с выносом аэрозоля с континента. В открытой акватории Белого моря ЕВС составляло в среднем 40 нг/м^3 , однако небольшой пик ($\sim 163 \text{ нг/м}^3$) наблюдался вблизи Кольского полуострова утром 11 октября. В бассейне Баренцева моря поглощение было ниже предела чувствительности аэталометра, только в Печорском море 12 октября концентрация ЕВС достигла 153 нг/м^3 . В районе пролива Карские Ворота значение ЕВС сильно возросло до 220 нг/м^3 и продолжало увеличиваться в Карском море до максимума 360 нг/м^3 . В это время был зафиксирован перенос воздушных масс из Ямало-Ненецкого и

Ханты-Мансийского округов, промышленных районов сжигания попутного газа на предприятиях нефте- и газодобычи на севере Западной Сибири. На обратном пути, 23 октября, при прохождении через Карские Ворота был зарегистрирован перенос воздушных масс с юго-запада, районов Ненецкого АО и Республики Коми, концентрация ЕВС достигла максимума 250 нг/м^3 , подобно отмеченной ранее, 12 октября. Но далее в Баренцевом море на пути до Кольского полуострова она заметно снизилась. Однако 24 и 25 октября в Белом море и в дельте р. Северной Двины ЕВС сильно возросло до $\sim 1100 \text{ нг/м}^3$ и, когда корабль прибыл в порт Архангельска, концентрация ЕВС составила 1500 нг/м^3 . В это время потоки воздуха поступали с юго-запада и приносили массу загрязненных аэрозолей, в основном из Восточной Европы и Украины: около 10% от пожаров и 90% от антропогенных источников, включая наземный транспорт, резидентные источники горения и промышленные эмиссии [Popovicheva et al., 2017]. Анализ направлений прихода воздушных масс показал, что эпизоды низких концентраций ЕВС во время экспедиции наблюдались в случаях переноса с Северного Ледовитого океана, возрастание ЕВС сопровождалось сменой направления и преобладанием выноса с континента.

В работе [Popovicheva et al., 2017] отмечается, что концентрации черного углерода над Баренцевым морем в период экспедиции «Север-2015» (НЭС «Академик Трешников») находились на уровне фоновых значений (около 10 нг/м^3), а над Карским морем достигали 360 нг/м^3 . Такие высокие концентрации M_{bc} были обусловлены выносами от факелов сжигания попутного газа на предприятиях газодобычи на севере Западной Сибири.

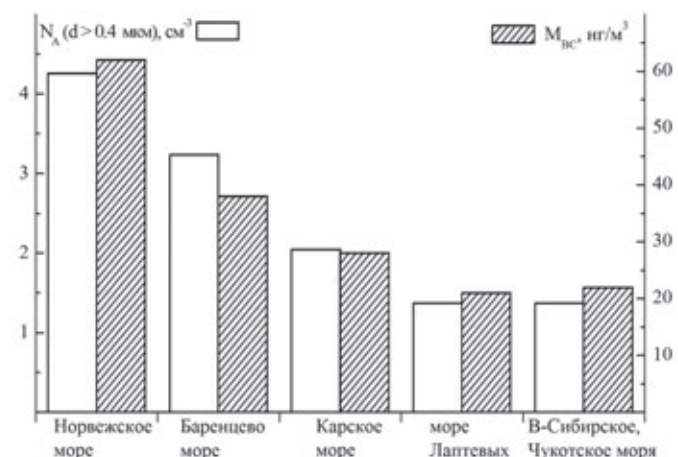


Рис. 3.1.8. Средние концентрации аэрозоля и черного углерода над арктическими морями

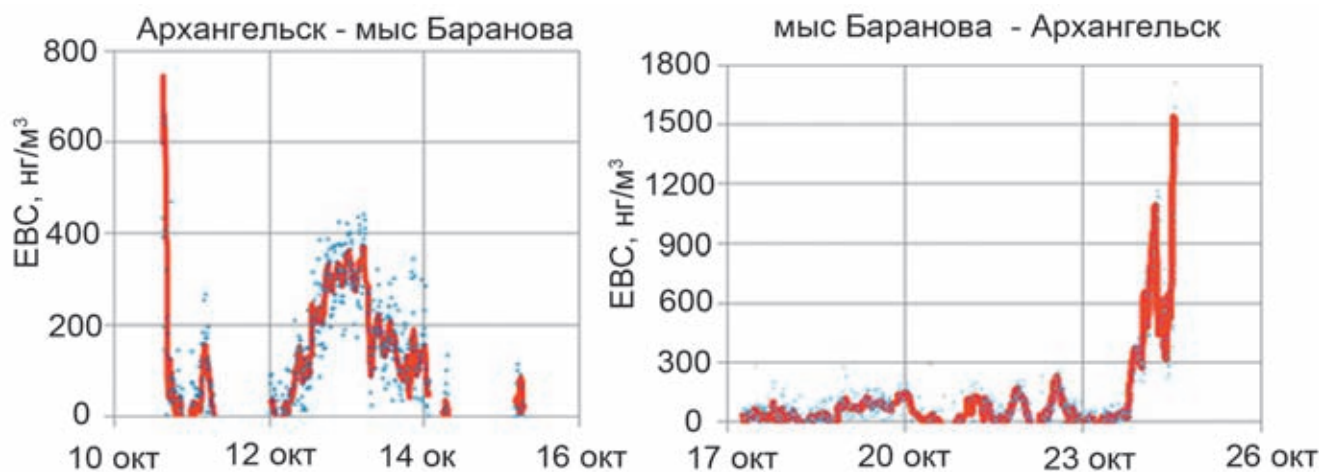


Рис. 3.1.9. Массовая концентрация черного углерода в экспедиции «Север-2015»

Ионный состав аэрозоля

Обобщение результатов позволило получить средние характеристики ионного состава аэрозоля в атмосфере Баренцева моря, приведенные в табл. 3.1.4. Данные по химическому составу аэрозоля в Баренцевом море были сравнены с данными, полученными в этих же экспедициях в Карском море.

Средняя сумма ионов в составе аэрозоля Баренцева моря составляла 2.78 мкг/м³, в составе аэрозоля Карского моря – 3.89 мкг/м³. Главными ионами в аэрозоле обоих морей были Na⁺ и Cl⁻ – ионы морского происхождения. Доля Na⁺ в ионном составе составила 21–25%, Cl⁻ – 39.1–39.6%. Среди континентальных ионов преобладали NH₄⁺ (8–10.4%), Ca²⁺ (9.7–9.9%) и SO₄²⁻ (10–10.5%). Характерно, что доля ионов морского происхождения выше в аэрозоле Баренцева моря,

континентального, за исключением ионов Ca²⁺, – в аэрозоле Карского моря. Средние концентрации ионов в двух морях различаются незначительно: над Карским морем они в 1.1–2 раза больше, чем над Баренцевым. Статистически незначимое различие концентраций ионов позволяет говорить о близости среднего ионного состава аэрозоля над этими морями. Отметим, что для Баренцева моря характерны более высокие коэффициенты корреляций для пар ионов морского ($r = 0.9$; Na⁺–Cl⁻) и континентального ($r > 0.7$; NH₄⁺–SO₄²⁻ и Ca²⁺–SO₄²⁻) происхождения. Меньшие парные корреляции ионов над Карским морем можно объяснить его географическим положением (большим влиянием континента) и высокой пространственной неоднородностью солености вод – 10–31% в сравнении с Баренцевым морем – 31–34%.

Таблица 3.1.4. Средние концентрации ионов, их среднеквадратичные отклонения (СКО), минимальные (min) и максимальные (max) значения в пробах аэрозоля, отобранных в акваториях Карского и Баренцева морей

Компонент	Баренцево море, мкг/м ³				Карское море, мкг/м ³			
	Среднее	СКО	min	max	Среднее	СКО	min	max
H ⁺	0.01	0	0	0.02	0.01	0.01	0	0.05
Na ⁺	0.53	0.46	0.02	1.6	0.57	0.51	0.04	1.92
NH ₄ ⁺	0.13	0.15	0	0.4	0.22	0.32	0	1.82
K ⁺	0.11	0.11	0	0.36	0.22	0.44	0	2.91
Mg ²⁺	0.04	0.05	0	0.18	0.06	0.14	0	1.07
Ca ²⁺	0.18	0.18	0.01	0.62	0.23	0.32	0	1.98
Cl ⁻	1.31	1.02	0.11	3.74	1.87	1.62	0.18	6.27
NO ₃ ⁻	0.02	0.04	0	0.16	0.03	0.06	0	0.37
SO ₄ ²⁻	0.45	0.44	0.04	1.48	0.68	0.78	0.02	5.2
HCl	9.25	11.55	0.07	0.02	1.79	3.32	0.05	16.09
HNO ₃	0.18	0.15	0	0.61	0.09	0.16	0	0.73
SO ₂	2.03	3.86	0.11	17.21	1.6	3.59	0	23.72
NH ₃	2.12	3.24	0.13	13.96	6.65	5.88	0.06	22.46

Для оценки вклада различных источников в формирование химического состава приводного аэрозоля была использована методика, основанная на анализе массовой концентрации ионов континентального (Ca²⁺, SO₄²⁻, NO₃⁻, NH₄⁺) и морского (Cl⁻, Na⁺, Mg²⁺) происхождения с использованием долевого факторов F_{cont} и F_{ocean} [Полькин и др., 2008б]. Для расчетов использовалось отношение массовых концентраций ионов к массовой концентрации реперно-

го иона в морской воде. В качестве реперного иона был взят Na⁺. Величины F_{cont} и F_{ocean} представляют собой долю массовой концентрации ионов соответствующего происхождения и связаны соотношением $F_{\text{cont}} + F_{\text{ocean}} = 1$. Рассмотрены долевого факторы F_{cont} и F_{ocean} для проб аэрозоля, отобранного в 66 и 67 рейсах на НИС «Академик Мстислав Келдыш» (рис. 3.1.10) [Терпугова и др., 2018]. Состав аэрозоля отличался высокой изменчивостью, обусловленной сменой воз-

душных масс и гидрометеорологических условий, тем не менее, долевые факторы свидетельствуют о равнозначности вклада этих источников в ионный состав аэрозоля. В Баренцевом море преобладание морского фактора наблюдалось в центральной котловине (фильтры № 3–4) и по разрезу 17.5° в. д. (фильтры № 15–18) вдали от побережья Норвегии и Шпицбергена (рис. 3.1.2). Ионы континентального происхождения преобладали в пробах, отобранных в заливе Русская Гавань и у северной оконечности Новой Земли (фильтры № 12–13), и в проливах арх. Земля Франца-Иосифа в непосредственной близости от островов (фильтры № 21–24).

Влияние направления переноса воздушных масс хорошо прослеживалось при отборе проб аэрозоля в Карском море. В районе Печорского моря, несмотря на близость континента, превалировало преобладание морского фактора (пробы № 21 из рейса 66 НИС «Академик Мстислав Келдыш» и № 2–7 из рейса 67 этого судна). В данном районе при отборе проб наблюдались ветры преимущественно северо-западного направления, приносящие воздушные массы из открытых районов Баренцева моря. Преобладание континентального фактора отмечалось в районе Обской губы, Енисейского залива (фильтры 2–7) и северной части Новой Земли (9–11) (рис. 3.1.2, 3.1.10).

Проведено сравнение средней концентрации суммы ионов в приводном аэрозоле Баренцева моря с нашими данными в других арктических районах. Концентрация суммы ионов в аэрозоле над акваторией Баренцева моря больше почти в 2 раза, чем в аэрозоле азиатского сектора Северного Ледовитого океана (1.38 мкг/м³), отобранного в августе–сентябре 2013 г. [Sakerin et al., 2015]. Над более южными морями, прилегающими к континенту, сумма ионов выше, чем

в аэрозоле над Баренцевым морем: над субарктическим Белым морем – более чем в 6.2 раза (17.1 мкг/м³), над Карским морем – более чем в 3.2 раза (8.9 мкг/м³) [Полькин и др., 2011]. Атмосфера над этими морями испытывала большее влияние континентальных источников аэрозоля. Их вклад для Белого моря составлял около 38%, в центральных районах Карского моря – 30%, а в его прибрежных акваториях – 60–80% [Полькин и др., 2011]. Сравнение суммы ионов в аэрозоле Карского моря в настоящий период, по сравнению с 2007 г., указывает на ее снижение в 2.3 раза. Концентрация суммы ионов в аэрозоле Баренцева моря неплохо согласуется со средней суммой ионов в аэрозоле в 200-километровой зоне вблизи антарктического континента (2006–2015 гг., 52–53, 55, 58–60 РАЭ) [Голобокова и др., 2016]. Характерно, что вклад ионов NH₄⁺ в ионном составе аэрозоля антарктического побережья был более чем в 2 раза выше (23.2%), по сравнению с Баренцевым морем, а вклад ионов морского происхождения – ниже: Na⁺ – 18.1%, Cl⁻ – 38.5%.

Рассчитан поток веществ с аэрозолем на морскую поверхность. Для сравнения вертикальных потоков веществ, поступающих с аэрозольным веществом, использовали, как это принято в ряде работ [Duce et al., 1991; Шевченко, 2006], скорость осаждения для аэрозольных частиц, равную 2·10⁻² м/с. Потоки веществ, поступающие из атмосферы с различными ионами (табл. 3.1.4), находились для суммы Na⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺, Cl⁻, N, S. Азот был пересчитан в сумме из нитратов и ионов аммония, сера из сульфатов. Для сравнения в таблице 3.1.5 приведены потоки веществ из атмосферы, рассчитанные по результатам ранее проведенных исследований в акватории Белого и Карского морей [Полькин и др., 2011] и азиатского сектора Северного Ледовитого океана [Sakerin et al., 2015].

Среднесуточные потоки веществ за долгосрочный период на акваторию Баренцева моря оказались ниже, чем на акваторию Белого и Карского морей, но почти в 2 раза выше, чем в среднем на акваторию Северного Ледовитого океана. Предварительно рассчитанные вертикальные потоки с учетом морской составляющей (Na⁺, Cl⁻) показали, что вклад хлоридов и натрия в общий поток веществ составляет около 75%, на долю серы приходится 6.2%, азота – 4.3%.

Сравнение газообразных примесей (табл. 3.1.4) показало, что в Баренцевом море наблюдаются более высокие концентрации HCl (в 5.2 раза). Однозначных данных об источниках повышенного содержания HCl нет, хотя известно, что один из механизмов его образования – фракционирование соли из морской воды, снега и льда [Keene et al., 1999; Domine et al., 2004]. Баренцево море отличается высокой

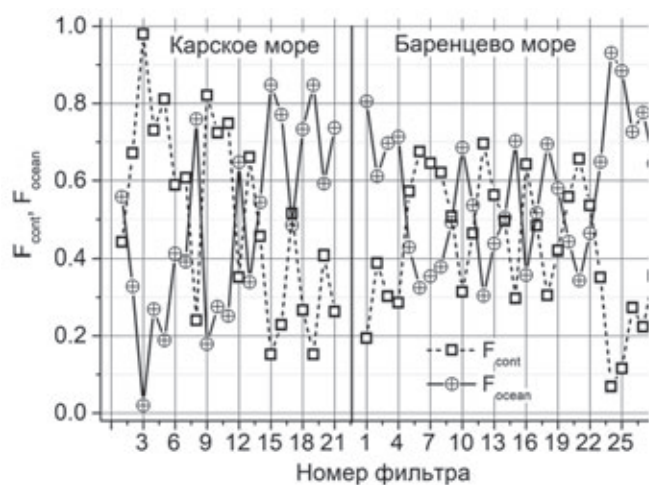


Рис. 3.1.10. Долевые факторы ионов континентального и морского происхождения [Терпугова и др., 2018]

продуктивностью биологических ресурсов. Биохимические процессы продуцирования и деструкции органического вещества в водах моря способствуют образованию многих газов, в том числе SO_2 и HNO_3 , концентрации которых в 1.2 и 2 раза выше, чем в

приземной атмосфере Карского моря. В Карском море преобладают концентрации NH_3 (превышение в 3.1 раза). Дополнительным источником этого газа, кроме морской поверхности, могут быть продукты горения бореальных лесов.

Таблица 3.1.5. Средние суточные вертикальные потоки водорастворимых веществ с аэрозольным веществом над акваториями Баренцева, Карского, Белого морей и азиатского сектора Северного Ледовитого океана, мг/(м²сут)

Район исследований	Сумма ионов	S _{aer}	N _{aer}
Баренцево море (2007–2016 гг.)	4.19	0.26	0.18
Карское море (2007–2016 гг.)	5.80	0.39	0.31
Северный Ледовитый океан (район А) [Sakerin et al., 2015]	2.17	0.06	0.19
Белое море (2007 г.) [Полькин и др., 2011]	19.8	1.63	1.88
Карское море (2007 г.) [Полькин и др., 2011]	13.6	0.76	0.39

Количественное распределение, состав и потоки нерастворимой фракции аэрозолей

Количественное распределение. Концентрация нерастворимых аэрозольных частиц (бессолевых аэрозолей) в приводном слое атмосферы над Баренцевым морем варьирует от 0.02 до 0.97 мкг/м³, составляя в среднем 0.25 мкг/м³ при стандартном отклонении 0.2 мкг/м³ ($n=39$ проб), что очень близко к среднему для Российской Арктики значению 0.23 мкг/м³ при стандартном отклонении 0.19 мкг/м³ ($n = 55$) [Шевченко, 2006]. Эти значения выше опубликованных данных по концентрациям в открытых частях океанов, особенно в гумидных зонах, но значительно ниже содержания взвеси в воздухе аридных зон [Chester, Johnson, 1971; Aston et al., 1973; Живаго, Богданов, 1974; Лисицын, 1978, 2011; Лукашин и др., 1996а, б, 2018; Ключиткин и др., 2004].

Вещественный состав по данным электронной микроскопии. Как показали электронно-микроскопические исследования, крупные (>1 мкм) несолевые частицы аэрозолей, отобранные сетевым методом, состоят, в основном, из минеральных частиц размером 5–20 мкм и органического вещества (растительные волокна, пыльца, диатомовые водоросли). Основным источником минеральных частиц, по видимому, являются почвы окружающей район работ суши.

Растительные волокна длиной до нескольких сотен микрон и пыльца сухопутных растений переносятся ветром в Арктике на сотни километров, а клетки диатомовых водорослей размером 5–50 мкм срываются ветром из поверхностного микрослоя морской воды и поступают в приводный слой атмосферы. В результате, содержание органического углерода в сетевых

пробах очень велико и достигает 20–30% от сухого веса пробы. Отметим, что близкое значение (39%) было получено при аналогичных исследованиях в августе–сентябре 1991 г. в западной части Российской Арктики [Shevchenko et al., 1995], тогда как в Северной Атлантике содержание органического углерода в аэрозольных пробах, отобранных тем же методом, было намного ниже (8%) [Aston et al., 1973].

В большинстве сетевых проб аэрозолей были обнаружены пористые частицы пепла размером 5–50 мкм, основными источниками которых являются промышленные выбросы и, в меньшей степени, лесные пожары. Обнаружены также гладкие сферы сгорания диаметром 0.5–10 мкм, источник которых – высокотемпературные процессы [Van Malderen et al., 1996]. Количество этих типично антропогенных частиц возрастало вблизи Мурманска, а также в случаях, когда в пунктах пробоотбора ветер дул со стороны Кольского полуострова.

Минеральный состав аэрозолей. Главный минерал нерастворимой фракции аэрозолей приводного слоя атмосферы над Баренцевым морем – кварц. Его среднее содержание в кристаллической фазе изученных проб ($n = 27$) изменяется от 7 до 66%, среднее содержание равно 30.9% при стандартном отклонении 13%. Это значение близко к среднему содержанию в кристаллической фазе аэрозолей над морями Российской Арктики (37.9% при стандартном отклонении 16.1%, $n = 47$) [Шевченко, 2006].

Содержание полевых шпатов в среднем составляет 9.7% при стандартном отклонении 9.4%, это близко к данным по Российской Арктике (9.7% при стандартном отклонении 5.2%, $n = 47$). Величина отношения кварц/полевые шпаты (одна из важных ха-

рактистических минерального состава горных пород и осадочного вещества) равна 5.1. Величина этого отношения зависит от интенсивности процессов выветривания, протекающих с разрушением полевых шпатов и сохранением кварца [Лисицын, 1978]. В глинистых сланцах – главных осадочных породах континентов – величина кварц-полевошпатового отношения близка к 2 [Wedepohl, 1969]. Повышение этого отношения свидетельствует о более интенсивном разрушении (выветривании) полевых шпатов, особенно значительном в тропиках. Например, на западе экваториальной зоны Тихого океана в апреле–июне 1990 г. это отношение в среднем было равно 3.7 [Лукашин и др., 1996б], а на востоке экваториальной Атлантики вблизи берегов Африки в августе–сентябре 1990 г. оно составляло 6.8 [Шевченко и др., 1994].

Иллит, хлорит и каолинит являются наиболее распространёнными глинистыми минералами в эоловой взвеси над Баренцевым морем. Если принять сумму глинистых минералов за 100%, то в сетевых пробах аэрозолей над Баренцевым морем в летне-осеннее время среднее содержание иллита составляет 47.9% при стандартном отклонении 11.6%. Среднее содержание иллита в эоловом материале над морями Российской Арктики составляет 45.8% от суммы глинистых минералов (стандартное отклонение равно 10.1%, $n=47$ проб) [Шевченко, 2006]. Намного более низкое содержание иллита характерно для аэрозолей экваториальной гумидной зоны. Например, в тропиках западной части Тихого океана в апреле–июне 1990 г. содержание иллита в аэрозолях составляло 20.2% от суммы глинистых минералов [Лукашин и др., 1996б]. В восточной части экваториальной Атлантики в марте и июне 2001 г. содержание иллита в аэрозолях варьировало от 23 до 36.2% от суммы глинистых минералов, в среднем составляя 30.3% при стандартном отклонении 5.8% ($n=4$ пробы) [Клювиткин и др., 2004].

Содержание в эоловой взвеси над Баренцевым морем суммы хлорита и каолинита (которые не удалось разделить при анализе) варьирует от 21 до 59% и в среднем составляет 47% при стандартном отклонении 10.2% ($n=27$). Из этих двух минералов содержание хлорита в эоловой взвеси над Баренцевым морем, вероятно, выше, чем каолинита. Ранее было показано, что наиболее характерными глинистыми минералами донных осадков холодных и умеренных зон являются иллит и хлорит [Лисицын, 1978; Лисицын и Горбунова, 1981; Chester, 1986]. В то же время и каолинит может играть существенную роль в формировании минерального состава некоторых сетевых проб аэрозолей над Баренцевым морем, так как на прилегающей к арктическим морям суше отмечено

его сравнительно высокое содержание в почвах тундры, что является результатом выветривания полевых шпатов [Зверева, Игнатенко, 1983].

Содержание монтмориллонита (смектита) в эоловой взвеси над Баренцевым морем низкое. В 13 из 27 изученных проб его содержание было ниже предела обнаружения. Только в четырех пробах, отобранных в северной части моря в 9-м рейсе НИС «Профессор Логачев» (1994 г.), содержание монтмориллонита превышало 15% от суммы глинистых минералов (максимум был 20%) [Шевченко и др., 1997]. Качественные оценки минерального состава поверхностного слоя почв арктической тундры Евразии показали, что содержание монтмориллонита в нём низкое [Зверева, Игнатенко, 1983]. Высокие значения его содержания были в пробах, отобранных вблизи архипелага Земля Франца-Иосифа. Большая часть островов этого архипелага представляет собой типичные плато высотой от 50 до 600 м, бронированные основными пластовыми интрузиями (долеритами) и базальтами [Дибнер, 1970].

Химический состав. В августе–октябре 1994 г. нерастворимые аэрозоли были изучены над Баренцевым морем и над жёлобом Святой Анны в 9-м рейсе НИС «Профессор Логачев» [Шевченко и др., 1997, 1998а]. Содержание большинства химических элементов в сетевых пробах аэрозолей, собранных в этом рейсе, ниже среднего содержания этих элементов в земной коре [Rudnick, Gao, 2003], что может быть объяснено, по-видимому, «разбавлением» нерастворимых аэрозолей органическим веществом. Более высокое, чем кларковое, содержание отмечено только для Cr, Cu, Zn, As, Se, Br, Ag, Sb, Au, основным источником которых может быть антропогенный. Сравнение среднего состава проб, собранных вблизи Земли Франца-Иосифа (рис. 3.1.1, пробы № 3–10) и вблизи Кольского п-ова при ветрах, дующих с него (рис. 3.1.1, № 15–19), показало, что содержание хрома примерно в полтора раза выше вблизи Земли Франца-Иосифа, в то время как содержание никеля примерно в пять раз выше около Кольского п-ова. Повышенное содержание Cr в аэрозолях около Земли Франца-Иосифа, вероятно, связано с широкой распространённостью на этом архипелаге основных магматических пород – долеритов и базальтов [Дибнер, 1957, 1970], обогащённых хромом [Перельман, 1989]. Повышение содержания никеля вблизи Кольского п-ова можно объяснить поступлением в район исследований аэрозолей, загрязнённых выбросами горно-обогачительных комбинатов Кольского п-ова.

Более высокие коэффициенты обогащения сетевых проб такими элементами как Co, Ni, Cu, Zn от-

мечены в пробе № 17 (рис. 3.1.1), отобранной вблизи Мурманска. Коэффициенты обогащения пробы № 17 редкоземельными элементами (РЗЭ) относительно среднего состава земной коры выше, чем в среднем в пробах данного рейса, и нормализованный на Северо-Американский сланец (NASC) [Gromet et al., 1984] и глины Русской платформы [Мигдисов и др., 1994] состав РЗЭ пробы № 17 значительно отличается от среднего состава проб, собранных в Баренцевом море и в желобе Святой Анны в августе–октябре 1994 г., состава поверхностного слоя почв Кольского п-ова [Reimann et al., 1998] и среднего состава эоловой взвеси [Колесов и др., 1976]. Расчет обратной траектории переноса воздушных масс в район отбора пробы показал, что наиболее вероятным источником аэрозолей пробы № 17 является Мончегорский медно-никелевый комбинат.

Обобщение результатов исследований авторов и литературных данных показало, что содержание большинства химических элементов (Na, Al, K, Ca, Sc, Fe, Co, Rb, Zr, Cs, Ba, РЗЭ, Hf, Ta, Th, U) в нерастворимой фракции аэрозолей ниже средних значений для верхней части континентальной земной коры [Rudnick, Gao, 2003]. Наиболее вероятный источник этих элементов – почвы севера Евразии [Reimann et al., 1997, 1998; Горячкин, 2010]. Содержание Cr, Cu, Zn, As, Se, Br, Ag, Sb, Au, Pb значительно выше их среднего для земной коры, их основной источник – антропогенный [Шевченко и др., 2000; Шевченко, 2006]. Наиболее существенные источники загрязнения аэрозолей Российской Арктики – горно-металлургические комбинаты Кольского п-ова и Урала, зимой ощущается влияние дальнего переноса из расположенных южнее регионов.

Потоки эолового материала. На основании данных по количественному содержанию и гранулометрическому составу могут быть определены значения вертикальных потоков аэрозолей, оседающих на поверхность моря или суши. Как было показано в ряде работ [Smirnov et al., 1996; Смирнов и др., 1999], при удалении от берегов в Арктике гранулометрический состав аэрозолей изменяется незначительно, что упрощает оценку значений вертикальных потоков.

Потоки эолового материала, поступающего на поверхность морей Российской Арктики при сухом осаднении, были рассчитаны нами с допущением того, что скорость осаднения нерастворимых крупных (>1 мкм) частиц, составляющих главную по массе часть аэрозолей [Duce et al., 1991; Шевченко, 2000; Шевченко и др., 2000], равна 2 см/с. Величины потоков эолового материала в Арктике по этим расчетам составляют от 0.03 до 1.68 мг/(м²-сут) (в среднем 0.39 мг/(м²-сут) или 142 мг/(м²-год)).

По оценке [Rahn, 1981] сухое осаднение в Арктике составляет 1/4 суммарного. Летние данные по концентрации нерастворимых аэрозолей в приводном слое атмосферы мы распространяем на год, учитывая, что летом концентрации их в несколько раз ниже, чем в зимние и весенние месяцы [Barrie, Barrie, 1990; Polissar et al., 1998a, b; Sirois, Barrie, 1999; Quinn et al., 2009], но количество атмосферных осадков летом в 3–4 раза выше, чем весной [Воскресенский, Петров, 1985; Raats, 1991]. Рассчитанный с этими допущениями поток эоловой взвеси равен 597 мг/(м²-год) [Rachold et al., 2004]. Принимая площадь Баренцева моря равной 1.512 млн км² и среднее значения эолового потока рассеянного осадочного вещества 597 мг/(м²-год), мы оцениваем поток эолового материала равным 0.903 млн т/год [Rachold et al., 2004]. Речной сток рассеянного осадочного вещества р. Печоры – наиболее крупной реки, впадающее в юго-восточную часть Баренцево моря (Печорское море) составляет 9.4 млн т/год [Rachold et al., 2004]. С учётом того, что в маргинальном фильтре оседает около 95% речной взвеси [Лисицын, 1994], в Баренцево море поступает около 0.47 млн т взвеси (рассеянного осадочного вещества). Сток других рек в Баренцево море значительно ниже, чем сток Печоры. Таким образом, поступление рассеянного осадочного вещества из атмосферы превышает поставку рассеянного вещества реками. Учитывая, что коэффициенты обогащения эолового осадочного вещества Pb, Sb, Se, V более 10, можно предположить, что для этих элементов эоловый путь является основным путём их поступления в донные осадки Баренцева моря.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные данные свидетельствуют о заметном влиянии континентального аэрозоля на атмосферу Баренцева моря. Но это влияние значительно меньше, чем во внутреннем субарктическом Белом море.

Авторы отмечают сильную зависимость концентраций черного углерода от типа воздушных масс. В чистых морских и арктических воздушных массах они составляют 13–34 нг/м³, а при выносах континентального воздуха возрастают до 400 нг/м³ и более.

Ионный состав аэрозоля приземной атмосферы Баренцева моря является типичным для морских акваторий с преобладанием ионов морского происхождения – Na⁺ и Cl⁻, совместная доля которых составляет около 65%. Преобладающими ионами континентального происхождения были NH₄⁺, Ca²⁺ и SO₄²⁻. Их вклад в формирование ионного состава аэрозоля примерно одинаков и изменяется от 8 до 10.5%. Долевые факторы свидетельствуют о равнозначности вклада континентальных и морских ис-

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. Виноградова¹, Е.И. Котова², Ю.А. Иванова¹

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва

²Институт 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;