

УДК 550.510.42

ТЯЖЕЛЫЕ МЕТАЛЛЫ В АТМОСФЕРНОМ ВОЗДУХЕ В АКВАТОРИИ КАРСКОГО МОРЯ В СЕНТЯБРЕ–ОКТАБРЕ 2011 г.

© 2018 г. Н. И. Голубева^{1, *}, Л. В. Бурцева², С. А. Громов^{2, 3}

¹Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Москва, Россия

²ФГБУ Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН, Москва, Россия

³ФГБУН Институт географии РАН, Москва, Россия

*e-mail: nataliigol@mail.ru

Поступила в редакцию 28.03.2016 г.

После доработки 21.04.2017 г.

Представлены результаты измерений концентраций Pb, Cd, Cu, Zn, Ni, Co, Cr, As и Fe в атмосферных аэрозолях в приземном слое воздуха в акватории Карского моря. Данные получены в рейсе НИС “Академик Мстислав Келдыш” в сентябре–октябре 2011 г. на 12 маршрутах. Содержание микроэлементов в пробах атмосферных аэрозолей, осажденных на фильтр ФПА, определялось методом атомно-абсорбционной спектрометрии с электротермической атомизацией и автоматической коррекцией фона. Массив полученных концентраций проанализирован во взаимосвязи с направлением движения воздушных масс в район измерений, определявшимся путем построения обратных траекторий перемещения воздушных частиц. Показано, что при приходе воздушных масс с континента концентрации элементов растут, и снижаются при воздушных массах со стороны океана. Рассчитана степень обогащения арктических аэрозолей микроэлементами.

DOI: 10.1134/S0030157418060059

ВВЕДЕНИЕ

Современные темпы развития мирового производства требуют расширения географии поиска и освоения новых источников природных ресурсов. В результате происходит продвижение интенсивной хозяйственной деятельности в хрупкие природные зоны, к которым относятся, в частности, полярные районы России. Примером служит освоение месторождений углеводородного сырья на шельфе российских арктических морей, за которым последует создание новых инфраструктур за Полярным кругом, увеличение транспортной нагрузки на Северный морской путь. Несомненно, к уже существующим в Заполярье мощным источникам эмиссии тяжелых металлов таких, как центры цветной металлургии на Кольском п-ове и в г. Норильске, и менее мощным таким, как российские предприятия на архипелаге Шпицберген и объекты хозяйственной деятельности на архипелаге Новая Земля, прибавятся новые источники эмиссии.

Одновременно с появлением новых источников эмиссии загрязняющих веществ, начиная с 1990-х годов, происходят изменения в приоритетах источников и мировых объемах эмиссии [14, 15, 17] благодаря принятию в международном масштабе ряда обязательных природоохранных мероприятий. Однако, антропогенная эмиссия

продолжает превалировать над терригенной эмиссией, например для Cd [18], как следствие сохраняется вероятность поступления из атмосферы в другие природные среды, включающие экосистемы арктических морей, ряда тяжелых металлов, отнесенных к группе наиболее токсичных. Следовательно, для российского Заполярья остается актуальным мониторинг состояния загрязнения атмосферного воздуха широким спектром веществ, включающим высокотоксичные тяжелые металлы, и в первую очередь, такие как Pb, Cd, Cu, As. Из этой группы Pb и Cd включены в Международную Европейскую программу мониторинга и оценки переноса на большие расстояния загрязняющих воздух веществ – ЕМЕП [16].

Суровость климатических условий, удаленность от хозяйственно освоенных территорий затрудняет создание стационарных региональных станций мониторинга загрязнения атмосферного воздуха на российском арктическом побережье, по результатам наблюдений на которых можно было бы оценивать динамику процесса загрязнения арктической природной среды. Оценки современного (позднее 2000 г.) состояния загрязнения тяжелыми металлами (включая Pb и Cd) атмосферного воздуха продолжают базироваться на фрагментарных измерениях, выполненных в 2002–2010 гг. на архипелаге Шпицберген [7] и в

ходе морских экспедиций в 2001, 2009, 2010 гг. в открытых районах акваторий Баренцева, Белого и Норвежского морей в секторе от 32° до 50° в.д. [4, 5, 13].

В этих работах показано, что в указанном секторе Арктики:

– уровни концентраций Pb, Cd, Cu, Zn, Ni, Co, Cr, As и Fe в атмосферном воздухе в зависимости от элемента на два и более порядков ниже предельно допустимых среднесуточных концентраций для жилой зоны и существенно ниже значений, характерных для особо охраняемых (не подверженных антропогенному воздействию) российских континентальных территорий;

– во времени и пространстве значения концентраций изменяются в пределах одного порядка величины;

– воздушный бассейн над акваторией Белого моря испытывает большее влияние от источников эмиссии тяжелых металлов, расположенных на Кольском полуострове, чем Баренцево и Норвежское моря.

Цель настоящей работы состояла в оценке современного состояния загрязнения приводного слоя атмосферного воздуха тяжелыми металлами в районах восточнее Баренцева моря с применением аппаратуры и методов анализа, используемых в работах [4, 5, 13] для обеспечения сопоставимости результатов.

В статье представлены результаты измерения содержания тяжелых металлов в приводном слое атмосферного воздуха, выполненные в рейсе научно-исследовательского судна “Академик Мстислав Келдыш” в Карском море в сентябре–октябре 2011 г.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Постановка измерений содержания тяжелых металлов в воздухе над морской поверхностью была аналогичной постановке, примененной в работах [4, 5, 13]. Отбор проб осуществлялся путем фильтрации атмосферного воздуха через отечественные ацетицеллюлозные фильтры ФПА–15 [9] с площадью рабочей поверхности 320 см² электроаспиратором с расходом воздуха до 60 м³/ч. Этот метод отбора проб атмосферных аэрозолей для дальнейшего определения их химического состава применяется на станциях комплексного фоновый мониторинга Росгидромета, расположенных в биосферных заповедниках [10]. Электроаспиратор был установлен на верхней палубе судна (на метеоплощадке) на высоте 6 м от водной поверхности. Время отбора одной пробы составляло от 2-х до 3-х сут. Объем пробы варьировал от 2500 до 2900 м³, что обеспечивало превышение содержания элементов в рабочей пробе относительно холостой пробы более чем на поря-

док. Место расположения электроаспиратора исключало возможность влияния судовых источников загрязнения на состояние пробы. За весь период рейса в процессе движения судна были отобраны пробы воздуха на 12 участках маршрута судна. Участки пути, на которых производился отбор проб, представлены на рис. 1.

Разложение фильтров и измерение концентраций Pb, Cd, Cu, Ni, Zn, Co, Cr, As и Fe выполнялось по методике, разработанной применительно к низким природным концентрациям тяжелых металлов в атмосферном воздухе и используемой в системе комплексного фоновый мониторинга Росгидромета [11]. Измерения проведены беспламенным атомно-абсорбционным спектрометром “КВАНТ – Z.ЭТА” с эффектом Зеемана для коррекции фона.

На всем маршруте судна в приводном слое атмосферы автоматически непрерывно фиксировались метеорологические параметры: направление и скорость ветра, атмосферное давление, температура и влажность воздуха. Как показано в работе [6], для географических районов, удаленных от источников эмиссии на значительные расстояния, при интерпретации уровня загрязнения атмосферного воздуха крайне важны данные об атмосферных процессах. Поэтому на весь период движения судна в Карском море определены пути переноса воздушных масс в районы отбора проб воздуха, для чего построены обратные траектории перемещения воздушных частиц.

Построение переносов производилось при помощи гибридной лагранжевой модели расчета обратных траекторий в атмосфере HYSPLIT [12] на период до 5 сут, предшествующих пробоотбору, с учетом вертикальных движений по пути следования. В расчетах использовались поля метеорологических параметров из двух архивов: накапливаемые данные на сетке с шагом 1° × 1°, NCEP/NOAA Global Data Assimilation System (GDAS1, <http://ready.arl.noaa.gov/gdas1.php>) и восстановленные в результате ре-анализа на сетке 2.5° × 2.5°, NCEP/NCAR Global Reanalysis Data (NCEP, http://ready.arl.noaa.gov/gbl_reanalysis.php). Для каждого часового интервала на отрезке пути рассчитывалась индивидуальная обратная траектория, что обеспечило получение наборов траекторий переноса воздуха для периодов отбора проб 2–3-суточной длительности.

Результаты расчетов показали, что меньшая пространственная дисперсия более характерна для наборов траекторий, полученных с помощью данных ре-анализа NCEP, чем полученных с использованием архива GDAS1. Это связано с более низким разрешением исходной сетки полей метеопараметров (2.5° против 1°), однако, в целом результаты расчетов по данным разных архивов отличаются не более чем для 30% траекторий, для

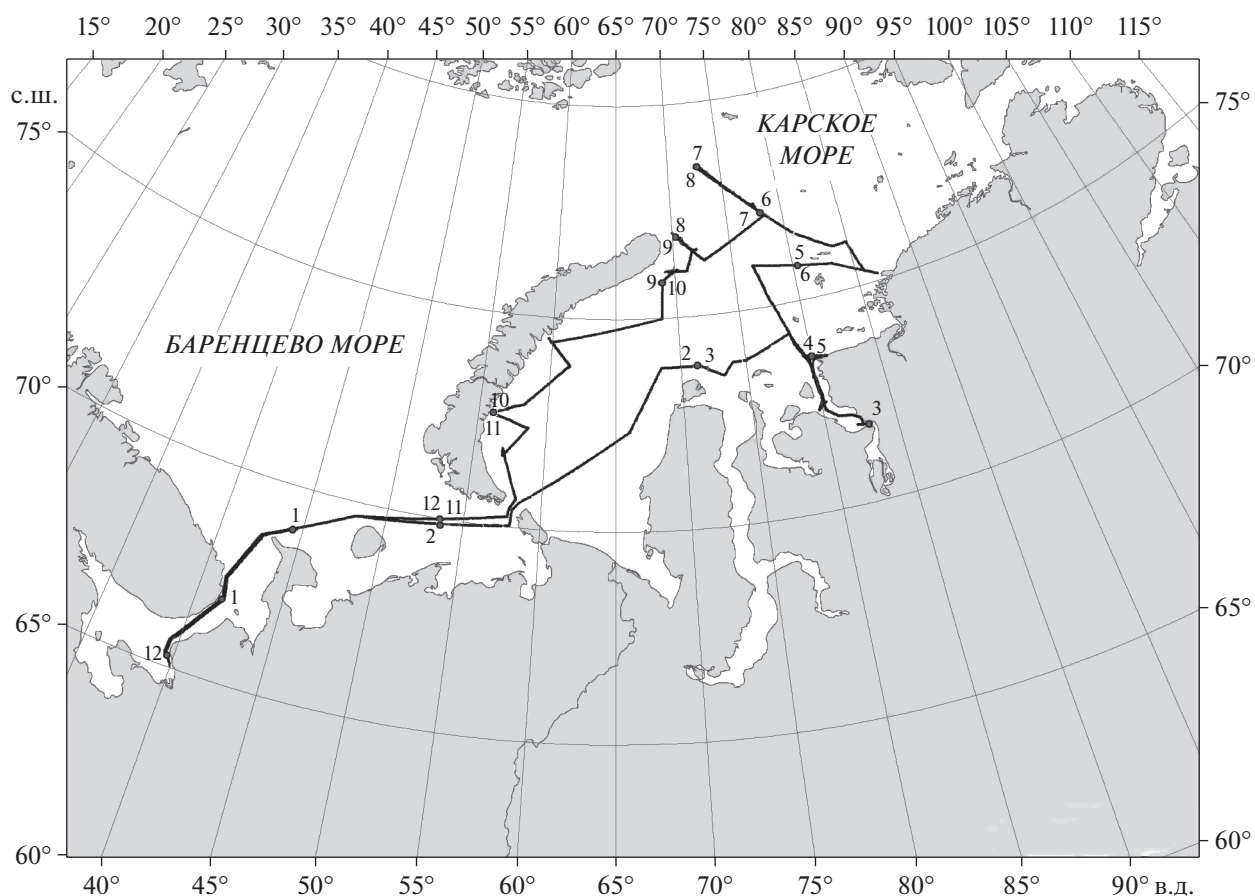


Рис. 1. Участки отбора проб на маршруте НИС «Академик Мстислав Келдыш» в сентябре–октябре 2011 г. (цифры в начале и конце участка соответствуют его номеру).

остального набора траекторий разница расчетных положений проекций переноса воздушных частиц незначительна. В работе использованы результаты анализа траекторий по массиву GDAS1. Примеры рассчитанных обратных траекторий переноса воздушных масс в районы отбора проб воздуха представлены на рис. 2.

Как показано на рис. 1, маршрут движения судна прошел частично в Баренцевом море вблизи восточного побережья Кольского п-ова, далее по его южным районам (участки 1 и 12) до Карского моря. В Карском море исследовался обширный район, ограниченный на западе островом Новая Земля, на юге – арктическим побережьем Евразии от 58° до 85° в.д. Северная часть маршрута прошла на уровне 78° с.ш.

Участки маршрута, на которых отбирались пробы воздуха, имели значительную протяженность. Участки 1 и 12, 3 и 4 были близки к континентальным районам, 10 и 11 – к Новой Земле, а участки 5, 6, 7 и 8 наиболее удалены от континента.

Пробы атмосферных аэрозолей отбирались в процессе движения судна, поэтому результаты измерений их состава представляли собой осред-

ненные по времени и пространству характеристики для каждого участка маршрута, соответствующего времени отбора пробы.

Таким образом, постановка измерений в акватории Карского моря позволила получить информацию о содержании группы тяжелых металлов в атмосферном воздухе в малодоступном морском районе российской Арктики во взаимосвязи с генезисом поступающих в этот район воздушных масс.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Представленные в таблицах 1 и 2 данные о концентрациях тяжелых металлов в приводном слое атмосферного воздуха, полученные в Карском море, и аналогичные данные в Норвежском и Баренцевом морях [3, 4, 13], показывают следующее.

Концентрации тяжелых металлов в воздухе в акватории Карского моря, как и в акватории Норвежского и Баренцева морей, существенно ниже значений, характерных для особо охраняемых континентальных территорий [1] и на два и более

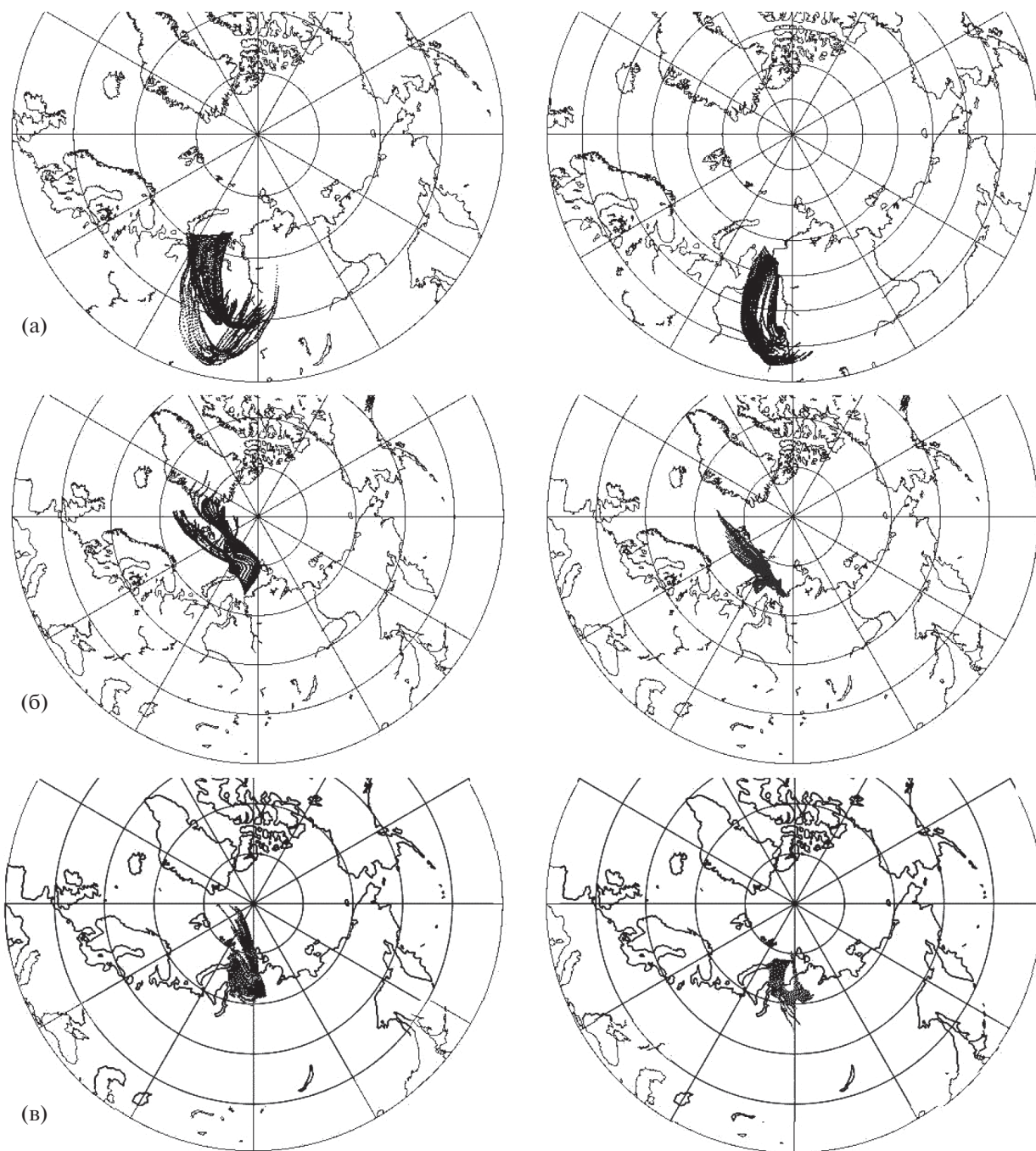


Рис. 2. Примеры рассчитанных обратных траекторий в случае переноса с континента (а), с акватории Северной Атлантики и Северного-Ледовитого океана (б) и смешанного характера (в).

порядка ниже величины предельно допустимых российских гигиенических норм для населенных мест [2].

Характеристики концентраций Pb, Cd, Zn и Fe в районе 69–70-ой параллелей в Баренцевом море (табл. 1) и характеристики концентраций этих элементов в атмосфере Карского моря (табл. 2) оказались величинами одного порядка. То же

можно сказать и о концентрациях Cu, Ni и Co, (источники антропогенной эмиссии находятся за полярным кругом) в акваториях Карского и Норвежского морей (табл. 1).

При равнозначной области изменения величин концентраций тяжелых металлов в воздухе для рассматриваемых арктических морей в Карском море величины концентраций элементов

Таблица 1. Характеристики массивов концентраций тяжелых металлов в приводном слое атмосферного воздуха, измеренных в акваториях арктических морей в период 2001–2011 гг., нг/м³

Статистические параметры	Pb	Cd	Cu	Zn	Ni	Co	Cr	As	Fe
Карское море, сентябрь 2011 г.									
Среднее	0.54	0.012	23	7.7	3.2	0.05	1.1	0.07	41
Макс.	3.0	0.1	70	43.0	4.6	0.2	2.5	0.18	121
Мин.	0.18	0.003	7.3	2.2	1.6	0.01	0.41	0.03	19
Норвежское море, февраль–апрель 2010 г. [5]									
Среднее	3.8	0.2	32	8.4	4.7	0.05	5.9		
Макс.	8.8	0.75	147	39	8.3	0.14	14		
Мин.	2.2	0.1	8.3	2.0	1.6	0.02	3.5		
Баренцево море, июль 2001 г. 69° северной широты [4]									
Среднее	0.13	0.023	3.8	24	0.3	0.19	0.31		40
Макс.	0.27	0.032	5.2	47	0.85	0.36	0.45		82
Мин.	0.06	0.01	0.34	12	0.12	0.064	0.14		15

так же неустойчивы во времени и пространстве, как и для морей, лежащих к западу от него. Об этом свидетельствует ширина интервала их изменения, ограниченная минимальными и максимальными значениями (табл. 1) и для некоторых элементов достигающая нескольких порядков величины (например, для Cd), и данные табл. 2.

Детальное рассмотрение результатов, полученных в Баренцевом (1, 12 участки на рис. 1) и Карском морях в 2011 г., показало, что в массиве данных (в целом низких величин концентраций) выделяется группа повышенных и группа пониженных относительно друг друга значений концентраций элементов в приводном слое атмосферного воздуха. Для выяснения условий формирования величин концентраций различного уровня, концентрации тяжелых металлов были проанализированы во взаимосвязи с типом погодного состояния, обусловленного характером воздушной массы в районе измерений.

Анализ траекторий поступления воздуха в район движения судна, примеры типов которых приведены на рис. 2, и метеорологических параметров показал, что в исследуемом морском районе наблюдались три явно выраженных различных типа погодных условий, формирующихся под влиянием поступающих воздушных масс, каждый из которых сохранялся в течение 5–11 дней.

Первый тип – направление движения воздушных масс с континента в сторону океана (рис. 2а): в приводном слое атмосферы ветер имел такое же направление и скорость до 10 м/с, температура медленно снижалась от 15 до 10°C, давление также медленно падало, влажность менялась слабо (характерно для 1, 2, 3 участков маршрута).

Второй тип – направление движения воздушных масс со стороны открытых районов океана

(рис. 2б): направление ветра менялось на северное, его скорость снижалась до 4–5 м/с, температура падала до 0°C, давление росло до максимума и начинало постепенно падать, влажность изменялась в более широком диапазоне (характерно для участков 5, 6, 10, 11).

Третий тип – вторгалась воздушная масса смешанного характера (континентально-морская рис. 2в): ветер переменных направлений с северной и южной составляющими и скоростью до 15 м/с, давление продолжало падать до 980 Па, температура поднималась до 3–5°C, влажность менялась в диапазоне 50–90% (характерно для участков 4, 7, 8, 12).

Исходя из этого анализа, в районе измерений трижды проходили различные по своему генезису воздушные массы – с континента (первый тип), из открытых районов океана (второй тип) и смешанного характера (третий тип), которые формировали соответствующую метеорологическую обстановку.

Повышение уровня концентраций всей рассматриваемой группы металлов происходит при вторжении в район измерений воздушных масс с континента (табл. 3). Концентрации возрастают в зависимости от элемента в 2–3 раза, а Cd более чем на порядок относительно тех уровней, которые наблюдаются при воздушных массах со сто-

Таблица 2. Средние значения концентраций тяжелых металлов в приводном слое атмосферного воздуха на различных широтах Карского моря, нг/м³

Северная широта	Pb	Cd	Cu	Zn	Ni	Co	Cr	As	Fe
70°–75°	0.62	0.014	15.3	10.6	3.7	0.09	1.4	0.09	89
75°–80°	0.26	0.057	38	2.6	2.8	0.02	0.7	0.05	29

Таблица 3. Средние концентрации тяжелых металлов в воздухе различных районов Карского моря при различных направлениях переноса воздушной массы, нг/м³

Направление переноса ВМ*	№ участка	Pb	Cd	Cu	Zn	Ni	Co	Cr	As	Fe
С континента (рис. 2а)	1, 2, 3	3.1	0.18	82	23.5	6.7	0.13	1.6	0.37	95.0
Из открытых р-нов океана (рис. 2б)	5, 6, 10, 11	0.3	0.006	21.5	4.2	2.6	0.04	0.86	0.07	40.0
Смешанного характера, (рис. 2в)	4, 7, 8, 12	0.37	0.007	16.6	8.1	3.2	0.04	1.2	0.06	44.0

* ВМ – воздушная масса.

Таблица 4. Концентрации тяжелых металлов в воздухе Карского моря на участках 1, 3, 4 и 12, нг/м³

Направление переноса ВМ	№ участка	Pb	Cd	Cu	Zn	Ni	Co	Cr	As	Fe
С континента	1	4.0	0.39	175	15.0	12.0	0.097	1.8	0.78	97.4
	3	3.0	0.1	22.0	43.0	3.6	0.096	1.0	0.18	68.0
Смешанного характера	4	0.62	0.024	33.0	32.0	2.9	0.069	1.4	0.08	42.0
	12	1.8	0.0021	29.0	1.0	3.6	0.047	0.49	0.15	38.0

роны океана и смешанных воздушных массах. Повышенные концентрации сохраняются в течение времени существования континентальной воздушной массы в районе измерений (до пяти и более суток).

Протяженность области повышенных концентраций вдоль российского арктического побережья порядка 1800 км, от южных районов Баренцева моря до юго-восточной границы Карского моря (участки 1, 2 и 3). При этом пространственное распределение концентраций неоднородно. Концентрации всей группы металлов, исключая Zn и Co, ниже на участке 3 относительно участка 1 (табл. 4). Градиент снижения концентраций в восточном направлении, в зависимости от элемента, лежит в пределах от 0.007 нг/м³ на градус долготы для Cd и до 3.8 нг/м³ на градус долготы для Cu.

Это говорит о том, что воздушные массы с Евразийского континента оказывают большее влияние на состояние загрязнения приземного слоя атмосферы южных районов Баренцева моря (западный сектор российских арктических морей), чем на южные районы Карского моря.

Повышенный уровень концентраций тяжелых металлов в континентальной воздушной массе, в отличие от пришедших со стороны океана, по-видимому, обусловлен тем, что он формируется за счет аэрозолей металлов как терригенного происхождения, о чем свидетельствует повышенная концентрация железа (терригенная метка), так и за счет антропогенных аэрозолей, источники которых располагаются на континенте. Наиболее близкими антропогенными источниками выбросов Cu, Ni, Co являются предприятия цветной металлургии, находящиеся в российском Заполярье и упомянутые выше.

Подтверждением антропогенной составляющей тяжелых металлов в аэрозолях, существую-

щих в континентальных воздушных массах, служат данные, полученные на участке 10 вблизи арх. Новая Земля (рис. 1) при воздушных массах, пришедших со стороны океана. На этом участке концентрация Fe соответствовала значениям, характерным для континентальных воздушных масс, а концентрации остальной группы элементов продолжали оставаться низкими.

Как быстро, при каких условиях и концентрации каких элементов снижаются, демонстрируют данные, полученные на совпадающих участках 3 и 4 (табл. 4). Интервал между измерениями на этих участках составил двое суток. За это время континентальная воздушная масса сменилась смешанной, и в приземном слое атмосферы произошло снижение концентраций терригенного Fe и таких элементов, как Pb, Cd и As, практически мало изменились концентрации Cu, Zn, Ni, Co и Cr.

На участках 1 и 12, близких к Кольскому п-ову, измерения выполнены с интервалом в 20 суток и при различном характере воздушных масс в период измерений. Полученные результаты показывают, что даже в смешанных воздушных массах концентрации всей группы рассматриваемых металлов ниже, чем в континентальных воздушных массах, а концентрации Cu и Ni сохраняют уровень, характерный для приземного слоя атмосферного воздуха в присутствии воздушных масс, пришедших со стороны океана (табл. 3).

Анализ обратных траекторий движения воздушных масс показал, что в период измерений в Карском море господствовали преимущественно океанические и смешанные воздушные массы. В аналогичных условиях проводились измерения концентраций тяжелых металлов в морской атмосфере Норвежского моря [3]. Это позволило рассмотреть пространственную картину распределе-

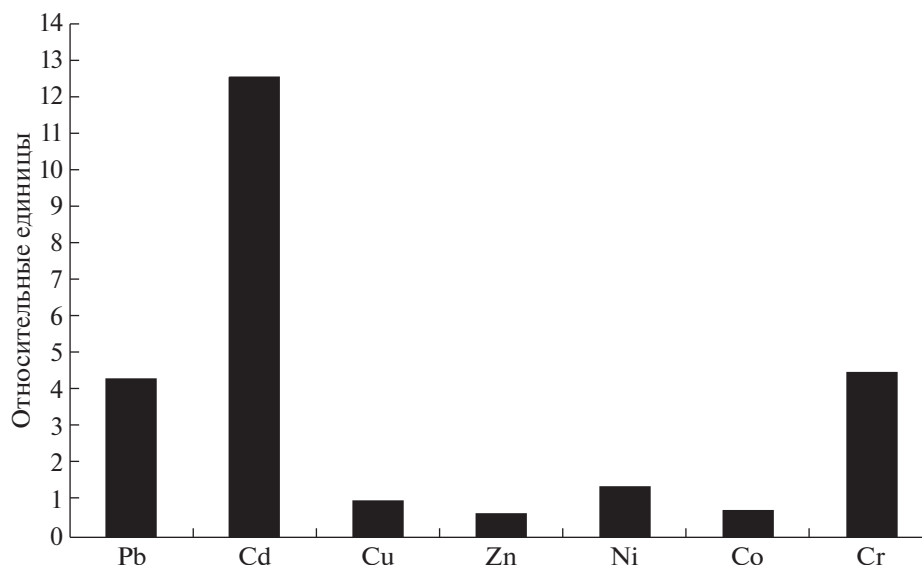


Рис. 3. Нормированные концентрации тяжелых металлов в воздухе в акватории Норвежского моря в 2010 г. [5] относительно концентраций в акватории Карского моря в 2011 г.

ния концентраций в более широком секторе Арктики (в отличие от рассмотренного выше в данной статье сектора Баренцево – Карское море). Для этого были рассчитаны средние значения концентраций элементов в воздухе в Норвежском и Карском морях, полученные при вторжении воздушных масс со стороны океана, после чего средние значения для Норвежского моря нормированы по средним значениям для Карского моря. Результаты нормирования, представленные на рис. 3, характеризуют пространственное распределение концентраций элементов в условиях отсутствия влияния континентальных (более грязных) воздушных масс. О характере поля концентраций каждого элемента можно судить по отклонению нормированного показателя от 1.

Из рис. 3 можно видеть, что даже при господстве океанических воздушных масс в обширных морских арктических районах сохраняется неоднородность поля концентраций Pb, Cd и Cr, антропогенные источники которых размещаются, главным образом, в густонаселенных континентальных районах. Для этих элементов ярко выражена тенденция снижения концентраций в восточном направлении. Можно считать практически однородным пространственное распределение в арктической атмосфере концентраций Cu, Zn, Ni, Co. Возможно, это результат эмиссии Cu, Ni и Co от предприятий по выплавке меди и никеля, расположенных в российском Заполярье на Кольском п-ове и в г. Норильск, а Zn – с морской поверхности.

Для выявления степени влияния антропогенных источников эмиссии рассматриваемой группы металлов на состав арктических аэрозолей

был проведен совместный анализ коэффициентов обогащения (K) арктических аэрозолей и коэффициентов корреляции всех рассматриваемых элементов с Fe для проб воздуха, отобранных в акватории Карского моря. При этом принимался во внимание характер господствующих воздушных масс.

Коэффициенты обогащения рассчитаны по общепринятому соотношению, представляющему собой дробь, в числителе которой – отношение масс элементов к массе железа в пробе, в знаменателе – отношение масс рассматриваемых элементов в земной коре (по Виноградову А.П.) [2]. Результаты расчетов представлены в табл. 5. Рассчитанные коэффициенты корреляции составили убывающий ряд: Co – 0.85; Pb – 0.6; Ni – 0.55; Cd – 0.53; As – 0.49; Cr – 0.45; Cu – 0.30; Zn – 0.30. Критический уровень значимости коэффициента корреляции на 5% уровне 0.58.

Исходя из полученных значений K (< 10) и значимого положительного коэффициента корреляции равно 0.85 для Co и приближающегося к уровню значимости для Cr, роль антропогенных источников эмиссии Co и в меньшей степени Cr в формировании состава арктического аэрозоля крайне мала. Измеренный в настоящей работе уровень концентраций этих элементов, по-видимому, характерен для всего арктического бассейна.

При сравнительно устойчивом уровне значений K для Pb, Cd и Zn (до 50 для Pb и до 100 для Cd и Zn) вне зависимости от характера господствующей воздушной массы, степень обогащения атмосферных аэрозолей этими элементами возрастает в прибрежных районах Карского моря (рис. 1, табл. 5). Коэффициенты корреляции Pb и Cd с Fe

Таблица 5. Коэффициенты обогащения атмосферных аэрозолей тяжелыми металлами относительно среднего состава земной коры в воздухе Карского моря, 2011 г.

Направление переноса ВМ	№ участка	Pb	Cd	Cu	Zn	Ni	Co	Cr	As
С континента	2	50	180	361	52	27	3.8	8.8	29
	3	116	490	288	319	38	3.2	7.4	66
	5	35	101	2562	33	85	2.7	12	78
Из открытых р-нов океана	6	34	105	2208	61	61	1.9	19	70
	10	21	65	118	77	46	2.9	9.8	25
	11	58	12	79	53	21	1.2	6.1	21
Смешанного характера	4	39	190	701	385	50	3.8	17	48
	7	14	42	1330	64	60	3.0	16	41
	8	19	38	252	32	80	1.0	5.9	22
	12	124	17	681	13	69	2.9	6.5	99

близки к уровню значимости. Это позволяет полагать, что антропогенная составляющая в формировании уровня концентраций Pb и Cd (в целом крайне низких) в атмосферном воздухе Арктики незначительно превышает терригенную составляющую. В этой группе элементов Zn отличается низким коэффициентом корреляции с Fe, что говорит в пользу обогащения арктического аэрозоля этим элементом не только за счет антропогенных и терригенных источников, но и за счет поступления его в приводный слой атмосферного воздуха с брызгами морской воды.

В отличие от Pb, Cd и Zn, не выявлено повышение коэффициентов обогащения с приближением участков маршрута судна к береговой линии для Ni и As. Максимальные значения *K*, достигающие значения равного 85, получены при господстве океанических воздушных масс. Значения *K* для Ni и As для всего бассейна Карского моря выше, чем *K* для Pb, но ниже, чем для Cd. Однако, положительные коэффициенты корреляции с Fe близки к уровню значимости. Такое сочетание рассмотренных факторов позволяет заключить, что степень влияния антропогенной составляющей Ni и As на процесс формирования состава арктического аэрозоля выше, чем Pb и Cd.

Особое место среди всей группы элементов занимает Cu, крупнейший антропогенный источник эмиссии которой находится в российском Заполярье. Величина *K* для этого элемента, полученная на участках 5, 6 и 7, при переносе воздушных масс со стороны океана и при смешанных воздушных массах, достигала значений 1330–2562. Корреляционная связь с Fe низкая (0.30).

Детальный анализ показал, что отличительной особенностью проб, отобранных на указанных участках, является высокое содержание Cu (в 2–4 раза выше относительно других проб) и крайне низкое содержание Fe (удаленность от материка). Такое сочетание масс элементов в атмосферных

аэрозолях арктических морских районов, находящихся в одном секторе (по долготе) с г. Норильском, может свидетельствовать о том, что даже при переносе воздушных масс со стороны океана сохраняется присутствие Cu антропогенного происхождения в таких количествах, которые характерны для континентальных фоновых районов. По результатам проведенных авторами в 2016 г. измерений концентрации Cu в атмосферном воздухе, например, в Воронежском биосферном заповеднике в годовом цикле изменялись в том же интервале, что и в приводном слое атмосферного воздуха в Карском море.

Коэффициенты обогащения, рассчитанные для аэрозолей, отобранных в приводном слое воздуха в Баренцевом море в 2001 г. при господстве воздушных масс смешанного характера [13], лежат в пределах: Pb 11 – 32; Cd 117 – 365; Cu 28 – 62; Zn 153 – 607; Ni 3 – 11; Co 0.4 – 52; Cr 1 – 8. Оценки коэффициентов обогащения атмосферных аэрозолей Pb, Cd, Cu, Zn, Ni, отобранных в приводном слое среднего Каспия [8], изменяются в пределах 10–40.

Сравнение приведенных данных с данными табл. 5 свидетельствуют о том, что порядок значений коэффициентов обогащения арктических аэрозолей всей группой рассматриваемых микроэлементов за 10-летний период практически не изменился, исключением является Cu. Атмосферные аэрозоли обогащены медью, цинком и никелем в арктических морских районах в большей степени, чем во внутриконтинентальном морском районе. Для кадмия наблюдается обратная картина, для свинца оценки практически совпадают.

ВЫВОДЫ

Полученные в обширных районах Карского моря результаты дали представление о современ-

ных уровнях концентраций группы приоритетных тяжелых металлов в приводном слое атмосферного воздуха в морских районах Арктики.

Концентрации тяжелых металлов в приводном слое атмосферного воздуха в секторе российских арктических морей остаются много ниже предельно допустимой нормы для населенных мест и ниже (кроме Cu), чем на особо охраняемых континентальных территориях.

Приносимые с материка в северные широты аэрозоли, содержащие тяжелые металлы, временно повышают их концентрацию в прилегающих к континенту морских районах, затем в результате смены метеорологических условий концентрация снижается до самых низких глобальных уровней, сохраняясь над всей акваторией исследуемого района арктических морей.

Уровень концентраций, измеренный при вторжении воздушных масс с евразийского континента, можно обозначить как повышенный относительно уровня концентраций, устанавливаемых над морской акваторией при поступлении океанических и смешанных воздушных масс, и принять его в качестве представительного, характеризующего интенсивность переноса тяжелых металлов с континента в российскую Арктику. Смена воздушных масс способствует быстрому снижению концентраций. Оценки средних значений концентраций металлов в приводном слое атмосферы при океанических и смешанных воздушных массах близки между собой.

В целом низкие концентрации таких микроэлементов, как Pb, Cd и Cr в обширном арктическом секторе от 12° в.д. в Норвежском море до 85° в.д. в Карском снижаются в восточном направлении в 2 и более раз в зависимости от элемента. Средние концентрации Cu, Zn, Ni, Co остаются в арктическом пространстве практически на одном уровне.

Исходя из величин коэффициентов обогащения и коэффициентов корреляции, у присутствующих в арктических аэрозолях Co и Cr превалирует терригенная составляющая, у Pb и Cd влияние антропогенной и терригенной составляющих равнозначно, у Ni и As влияние антропогенной составляющей выше, чем для Pb и Cd, у Cu превалирует антропогенная составляющая.

В заключение авторы выражают искреннюю признательность начальнику экспедиции 59-го рейса НИС “Академик Мстислав Келдыш” М.В. Флинту и сотруднику Института океанологии им. П.П. Ширшова С.А. Мошарову, обеспечившим отбор проб атмосферного воздуха, использованных для анализа в настоящей работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бурцева Л.В., Конькова Е.С. Свинец и кадмий в атмосферном воздухе и осадках в фоновых районах Восточно-Европейского региона // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 2016. Т. XXVII. № 2. С. 59–70.
2. Виноградов А.П. Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры // Геохимия. 1962. № 7. С. 555–571.
3. ГН 2.1.6.1338–03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест с дополнением.
4. Голубева Н.И., Матишов Г.Г., Бурцева Л.В. Результаты исследования загрязнения тяжелых металлов атмосферного воздуха в открытых районах Баренцева и Белого морей. Москва // Докл. РАН. 2002. Т. 387. № 4. С. 537–540.
5. Голубева Н.И., Бурцева Л.В., Матишов Г.Г., Ильин Г.В. Результаты измерений тяжелых металлов в атмосферных аэрозолях в открытых районах Арктических морей в 2009–2010 гг. // Докл. РАН. 2013. Т. 453. № 1. С. 72–75.
6. Громов С.А. Метеорологические аспекты в задачах фоновых мониторинга загрязнения атмосферы // Мониторинг фоновых загрязнений природных сред. 1989. Вып. 5. С. 126–135.
7. Демин Б.Н., Граевский А.П., Демешкин А.С. и др. Состояние и тенденции изменения загрязнения окружающей среды в местах хозяйственной деятельности российских предприятий на архипелаге Шпицберген (поселок Баренцбург и сопредельные территории) за период 2002–2010 гг. Санкт-Петербург: изд. ААНИИ. 2011. 315 с.
8. Лукашин В.Н., Новигатский А.Н. О химическом составе аэрозолей в приводном слое атмосферы среднего Каспия зимой и осенью 2005 г. // Океанология. 2013. Т. 53. № 6. С. 813–824.
9. Кириченко Л.В., Козлов В.И. Использование тонковолокнистых фильтров ФП для определения массовых концентраций пыли и отдельных химических элементов в воздухе // Труды. Институт прикладной геофизики. 1976. Вып. 21. С. 32–37.
10. Руководящий документ РД 52.04.186-89. Руководство по контролю загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 693 с.
11. Руководящий документ РД 52.44.593-97. Методические указания. Определение массовой концентрации тяжелых металлов в аэрозолях воздуха. Методика выполнения измерений методом атомно-абсорбционной спектроскопии с беспламенной атомизацией. // Федеральный перечень методик, допущенных к применению при выполнении работ в области мониторинга загрязнения окружающей природной среды (по состоянию на 01.10.2009). Обнинск: ГУ “ВНИИГМИ-МЦД”, 2009 г.
12. Draxler R.R., Rolph G.D. HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) Model. NOAA Air Resources Laboratory // Silver Spring, Md, USA. 2003. <http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>.
13. Golubeva N., Burtseva L., Gromov S., Felitsin M. The Results of Investigation of Contamination of Atmo-

- spheric Air of the Open Areas of the Barents and White Seas with heavy metals // The Second AMAP International Symposium on Environmental Pollution of the Arctic: Extended abstracts (Rovaniemi, Finland, October 1–4, 2002). AMAP Report 2002:2. P-M11. 3 p.
14. *Pacyna J.M., Pacyna E.G., Aas W.* Changes of emissions and atmospheric deposition of mercury, lead, and cadmium // Atmospheric Environment. 2009. V. 43. P. 117–127.
 15. *Pacyna J.M., Pacyna E.G.* Sources of heavy metals, inventories, and future scenarios // Second AMAP International Symposium on Environmental Pollution of the Arctic. Rovaniemi, 1–4 October 2002. P. 0-006.
 16. *Torseth K., Aas W., Breivik K.* Introduction to the European Monitoring and Evaluation Programme (EMEP) and observed atmospheric composition change during 1972–2009. // Atmos. Chem. Phys. 2012. P. 5447–5481.
 17. *Travnikov O., Ilyin I., Rozovskaya O. et al.* EMEP Status Report 2/2012 Long-term Changes of Heavy Metal Transboundary Pollution of the Environment (1990–2010).
 18. World Health Organization, Health risks of heavy metals from long-range transboundary air pollution, 2007, Joint WHO/Convention Task Force on the Health Aspects of Air Pollution, Germany.

Heavy Metals in Atmospheric Air in Kara Sea Water Area in September–October 2011

N. I. Golubeva, L. V. Burtseva, S. A. Gromov

The article presents results of measurements of Pb, Cd, Cu, Zn, Ni, Co Cr, As and Fe concentrations in atmospheric aerosols in the surface layer over the Kara Sea. The data was collected at 12 segments of the R/V “Akademik Mstislav Keldysh” cruise route in September–October 2011. The content of trace elements in the samples of atmospheric aerosols was determined by atomic absorption spectrometry with electrical and thermal atomization and automatic background correction. The dataset was analyzed in relation to the direction of air masses movement to the area under study. The direction was determined by the method of air particles reverse movement trajectories. It is demonstrated that concentrations of pollutants increase in the air masses coming from the continent and decrease in the air masses moving from the ocean side. The estimates of the level of saturation of Arctic aerosols by trace elements were also calculated.