

УДК 550.462; 551.550.42

ПЕРЕНОС ВОЗДУШНЫХ МАСС И ЗАГРЯЗНЕНИЙ К АРКТИЧЕСКИМ ОСТРОВАМ РОССИИ (1986–2016 гг.): ДОЛГОВРЕМЕННЫЕ, МЕЖГОДОВЫЕ И СЕЗОННЫЕ ВАРИАЦИИ

© 2017 г. А.А. Виноградова, Ю.А. Иванова

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

Арктика, по отношению к климатическим изменениям, – самый уязвимый, но и самый значимый регион Северного полушария. Естественно, что наблюдаемые в последние десятилетия изменения климата на нашей планете сказываются на состоянии окружающей среды в северных регионах и на процессах, его определяющих. Анализ временных вариаций этих процессов важен для понимания наблюдаемых явлений и оценки возможных последствий. В работе рассмотрены 30-летние ряды частот переноса воздушных масс из Европы, Азии и Америки в районы арктических архипелагов Земля Франца-Иосифа и Северная Земля и на о. Врангеля, а также статистические закономерности, наблюдаемые в процессах циркуляции атмосферы (по индексам атмосферной циркуляции) в разные сезоны. Анализируются величины концентраций антропогенных тяжелых металлов (ТМ) в воздухе и потоков ТМ на поверхность российских арктических островов. За последние 30 лет частоты поступления в Российскую Арктику воздушных масс с континентов уменьшились. Соответственно состав воздуха и осадков там становится все более морским, что может проявиться в изменении свойств находящихся на поверхности природных объектов – почв, вод, растений и т.д. Межгодовые вариации в процессах циркуляции атмосферы велики, что приводит к сильным различиям от года к году концентраций антропогенных ТМ в воздухе и их потоков на поверхность. Этим объясняются также межгодовые вариации содержания ТМ в снежном покрове, где ежегодно происходит их накопление в течение снежного сезона. Максимальные величины концентраций никеля и меди в воздухе и снежном покрове арктических островов могут в отдельные месяцы и годы достигать уровней концентраций этих ТМ, наблюдаемых в менее удаленных районах на материке. С другой стороны, отмечаются годы, когда в летние месяцы антропогенные загрязнители вообще не поступают на арктические острова России. Основная причина внутригодовых вариаций величины антропогенного загрязнения в арктических районах состоит в сезонных различиях скорости осаждения ТМ на поверхность при их дальнем переносе.

Ключевые слова: Российская Арктика, тяжелые металлы, индексы атмосферной циркуляции, дальний перенос в атмосфере, межгодовые вариации, сезонные вариации.

PACS 82.33.Tb

Введение

Арктика – чрезвычайно важная составляющая климатической системы Северного полушария – является крайне чувствительным регионом, в котором происходят быстрые и не всегда предсказуемые отклики на изменения температуры, осадков, режима ветра и других параметров атмосферы [Алексеев, 2014]. Загрязнение Арктики продуктами человеческой деятельности, выбрасываемыми в атмосферу в более южных широтах, происходит при дальнем переносе этих веществ воздушными потоками, а также водами рек, впадающих в Северный Ледовитый океан. Из-за возможных экономических и экологических последствий климатических изменений на планете [Persistent..., 2004; Travnikov *et al.*, 2012; IPCC, 2014; АМАР, 2015] в последние три-четыре десятилетия эти вопросы активно обсуждаются научным сообществом, политиками и населением в целом. Общественный резонанс дополнительно усиливают различные (иногда прямо противоположные) прогнозы климатологов.

Результаты длительных регулярных наблюдений за составом атмосферы в Канадской Арктике (ст. «Алерт») и на Аляске (ст. «Бэрроу») показывают снижение там с начала 1990-х годов концентраций характерных аэрозольных и газовых примесей антропогенного происхождения [IASOA; Sharma *et al.*, 2006; IPCC, 2014]. Основными причинами этого считают уменьшение антропогенных эмиссий в атмосферу с территории зарубежной Европы и Канады в результате внедрения современных технологий по минимизации вредных атмосферных выбросов. Возможно, сказалось также уменьшение эмиссии с территории севера Евразии из-за вызванного распадом СССР сокращения производственных мощностей находящихся там предприятий. Наши последние исследования 25-летнего ряда данных (1986–2010 гг.) о переносе воздуха и антропогенных тяжелых металлов в Российскую Арктику [Виноградова, Пономарева, 2012] показали тенденцию уменьшения загрязнения севера России через атмосферу не только из-за уменьшения выбросов источников, но и в связи с перестройкой процессов циркуляции атмосферы над севером Евразии. Циркуляционный и эмиссионный эффекты оказались вполне сравнимы по величине.

Российская часть Арктики очень велика, она охватывает примерно половину побережья Северного Ледовитого океана. Понятно, что реальный мониторинг загрязнения природных сред и объектов на такой площади имеет серьезные экономические и технические ограничения. Моделирование и оценка переноса в атмосфере антропогенных веществ является альтернативным подходом к этой задаче, одним из методов изучения состояния окружающей среды в удаленных районах [Hirdman *et al.*, 2010; Виноградова, 2014а; Cheng, 2014; Evangeliou *et al.*, 2016].

Целью данной работы является изучение переноса воздушных масс и антропогенных аэрозольных примесей в Российскую Арктику на основе продолженных до 2016 г. рядов данных о дальнем переносе воздуха к находящимся там трем пунктам, а также выявление закономерностей переноса антропогенных аэрозольных примесей в разные сезоны. В ходе исследований:

- проанализированы 30-летние ряды данных о переносе воздушных масс к трем пунктам, расположенным на островах Российской Арктики, в разные сезоны года;
- выявлены пространственные, сезонные и долговременные особенности процессов переноса воздушных масс в Российскую Арктику; наиболее детально исследованы межгодовые и многолетние вариации изучаемых процессов и величин;
- оценены концентрации ряда антропогенных тяжелых металлов в воздухе и в осадках на островах Российской Арктики, а также их временные вариации в 2010-х годах.

Методы и подходы

В основе наших расчетов дальнего переноса загрязнений в Арктику лежит метод статистики траекторий движения воздушных масс, который широко применяется для аналогичных исследований [Hirdman et al., 2010; Salvador et al., 2010; Виноградова, Пономарева, 2012; Виноградова, 2014a]. Пунктами условных наблюдений проведенных нами исследований были три точки в Российской Арктике, расположенные на архипелагах Земля Франца-Иосифа (ЗФИ; координаты точки: 81.1° с.ш., 56.3° в.д.), Северная Земля (СЗ; координаты точки: 79.5° с.ш., 95.4° в.д.) и на о. Врангеля (ВР; координаты точки: 71.0° с.ш., 178.5° з.д.). Для каждой из точек анализируются ежедневные 5-суточные обратные (воздух движется к пункту наблюдений) траектории движения воздушных масс (ВМ) для четырех месяцев (январь, апрель, июль и октябрь) на протяжении 30 лет (1986–2016 гг.). В предположении, что выбранные месяцы являются представительными для соответствующих сезонов, рассматривается сезонная изменчивость изучаемых процессов и параметров загрязнения окружающей среды в течение года.

Траектории до 2010 г. рассчитывались по данным Гидрометцентра России на 00 ч UTC (с интервалом 6 ч) на изобарических поверхностях 925 и 850 гПа, близких к наиболее вероятным высотам, где происходит дальний перенос ВМ. Результаты анализа этих данных описаны в [Виноградова, Пономарева, 2012], там же описан подход к расчету переноса аэрозольной примеси на субмикронных аэрозольных частицах.

Для дальнейшего продления этих рядов использована усовершенствованная методика, описанная в работе [Виноградова, 2014a]. Сведения о траекториях переноса воздушных масс к тем же пунктам для 2006–2016 гг. взяты с сайта Air Resource Laboratory NOAA [ARL], где они рассчитаны также для 00 ч UTC и высоты 100 м с интервалом счета 1 ч (по данным REANALYS, с учетом вертикальных движений). Эти траектории были распределены нами на географической сетке с размером ячеек 1°×1°. Число траекторий, попавших в ячейку сетки, отнесенное к полному числу анализируемых расчетных точек за месяц (120×30), есть повторяемость, или частота, поступления воздушных масс (ЧПВМ) из данной ячейки в рассматриваемый арктический пункт. Для выбранных пунктов наблюдений рассчитывались ЧПВМ с территорий Европы, Азии и Северной Америки.

При переходе к расчетам переноса примесей использовался тот же подход, что и раньше в работе [Виноградова, Пономарева, 2012], но методика расчетов была адаптирована к формату данных, получаемых с сайта Air Resource Laboratory NOAA [ARL] (подробнее см. [Виноградова, 2014a]). Сведение воедино результатов расчетов, полученных по разным методикам, проводилось усреднением соответствующих частот поступления воздуха с каждой рассматриваемой территории (Европа, Азия или Северная Америка) для каждого месяца на протяжении 5 лет – с 2006 по 2010 г.

Подчеркнем, что наш подход и все дальнейшие рассуждения и выводы относятся к так называемой консервативной примеси, пассивной по отношению к химическим преобразованиям в воздухе во время переноса, или к отдельным микроэлементам, идентификация которых возможна вне зависимости от конкретного химического состава аэрозольного вещества.

Рассмотрим кратко схему оценок концентраций ТМ в воздухе в пункте наблюдений (более подробно см. [Виноградова, Пономарева, 2012; Виноградова, 2014a]). Решение уравнения баланса массы примеси в воздушном потоке во время ее переноса от источ-

ника, расположенного в ячейке с координатами (i, j) , можно представить в виде выражения для концентрации C_{ij} примеси в пункте наблюдений:

$$C_{ij} = Q_i (1 - \alpha) Z_{ij}, \quad (1)$$

где Q_{ij} – мощность выбросов примеси в ячейке; $\alpha \approx 0.15$ – доля примеси, оседающая на землю вблизи источников. Функция Z_{ij} характеризует все атмосферные процессы, влияющие на примесь в процессе ее переноса от источника к пункту наблюдений. В рамках предложенного подхода величина Z_{ij} определяет чувствительность состава воздуха в рассматриваемом пункте к источникам примеси, расположенным в ячейке с координатами (i, j) . Она зависит от вероятности и скорости движения ВМ, которые определяются по траекториям, а также от скорости осаждения примеси из атмосферы во время переноса, которая, в свою очередь, зависит от свойств поверхности, температурных инверсий в нижнем слое тропосферы и режима осадков. Формула и подробное описание вычисления этой функции приведены в [Виноградова, 2014а]. Учитывались эмпирические данные о пространственно-временных изменениях температурных инверсий в приземном слое тропосферы, статистические характеристики облачности и осадков в разных районах Арктики. Для каждого конкретного месяца считалось, что скорость осаждения разных ТМ на поверхность одинакова. Величины скорости осаждения ТМ в процессе переноса в воздухе, принятые в расчетах, представлены для разных климатических зон в [Виноградова, 2014а]. Обобщая эти данные, заметим, что значения средней скорости осаждения ТМ на поверхность находятся в пределах: зимой – 0.05–0.07, весной – 0.1–0.2, летом – 0.9–1.2, осенью – 0.4–0.8 см·с⁻¹. Эти значения типичны для осаждения антропогенных ТМ, переносимых в воздухе на частицах субмикронных аэрозолей [Бызова и др., 1991; Гальперин и др., 1995].

Вычисляя для каждого пункта среднюю концентрацию примеси C в приземном слое перемешивания как сумму вкладов всех ячеек и зная скорость осаждения примеси на поверхность K вблизи пункта наблюдений, можно оценить средний поток этой примеси на единицу поверхности за время t по формуле

$$D = C \cdot K \cdot t. \quad (2)$$

Зная количество выпавших осадков P (обычно за месяц), можно рассчитать концентрацию примеси в осадках (суммарно в растворенной и взвешенной формах):

$$C_{\text{осад}} = D/P. \quad (3)$$

В данной работе оценки атмосферных концентраций и выпадений на поверхность проводились для ряда тяжелых металлов (ТМ) – Pb, Cd, As, Zn, Ni, Cr, Cu. Рассматривались только антропогенные составляющие концентраций и, соответственно, только созданные антропогенными источниками потоки на поверхность по данным [Ежегодник..., 2011]. Информация, содержащаяся в этом выпуске, наиболее надежна для территории России. Более поздние выпуски ежегодника не обладают достаточной полнотой учета источников, а после 2013 г. ежегодник перестал выпускаться.

Индексы атмосферной циркуляции и поступление воздуха к арктическим островам России

Система индексов атмосферной циркуляции (ИАЦ) призвана количественно характеризовать движения воздушных масс и их изменчивость. Чаще всего рассматриваются шесть индексов: NAO (североатлантический), PNA (тихоокеанский/североамериканский), WP (западно-тихоокеанский), EA/WR (восточно-атлантический/западно-российский), SCA (скандинавский), POL (полярно-евразийский, обозначаемый также PE). Их описание можно найти, например, на сайте NOAA (см. [ИАЦ]), с которо-

го нами взяты среднемесячные данные для каждого из четырех выбранных для исследования месяцев с 1986 по 2016 г., для которых рассчитывался атмосферный перенос к пунктам наблюдений. Все шесть ИАЦ могут в той или иной мере определять процессы циркуляции ВМ над севером Евразии. Напомним, что величина ИАЦ – это отклонение разницы атмосферного давления между соответствующими географическими точками (центрами) от климатического среднего значения («нормы») за 1981–2010 гг. Центры – наиболее вероятное положение относительно устойчивых локальных максимума и минимума атмосферного давления. Таким образом, положительный индекс означает усиление соответствующего диполя давления, а отрицательный, наоборот, его ослабление. При этом физической причиной увеличения/ослабления индекса может быть как реальное изменение разницы атмосферного давления между минимумом и максимумом, так и смещение самих максимума и/или минимума в пространстве относительно координат, принятых для расчета. Исходя из близости географического положения центров некоторых ИАЦ, можно предположить, что изменение их величин может коррелировать друг с другом в разной степени в разные годы и сезоны.

Основные статистические закономерности 30-летних рядов значений ИАЦ и ЧПВМ с территорий материков приведены в табл. 1–4. ЧПВМ с территорий океанов не представлены, поскольку являются дополнительными: сумма ЧПВМ от всех территорий равна единице. Эти данные не противоречат результатам, полученным в [Виноградова, 2014б] для 25 лет, но удлинение анализируемых рядов ослабляет корреляции и достоверность линейных трендов, приведенных ранее. Тем более интересны полученные достоверные 30-летние закономерности изменений в изучаемых процессах.

На рис. 1 показано, как изменялась система ИАЦ в разные сезоны за рассматриваемые 30 лет; для наглядности приведены средние величины ИАЦ для трех 11-летних интервалов. Линейные тренды приведены в табл. 1–4. Наиболее достоверные результаты

Таблица 1. Статистика величин ИАЦ и ЧПВМ к арктическим островам России с территориями Европы (Е), Азии (А), Северной Америки (Ам) и суммарно (Σ) в январе за последние 30 лет

Показатель		Тренды за 10 лет		Корреляции межгодовых вариаций (тренды удалены)	
		Величина	R^2	Пара	$R (>0.3)$
ИАЦ					
POL		-0.50	0.16	NAO-PNA	-0.50
PNA		+0.30	0.10		
ЧПВМ					
ЧПВМ – ИАЦ					
На ЗФИ	Е	-0.073	0.13	Е-NAO	+0.30
				Е-PNA	-0.33
				Е-POL	-0.33
	Σ	-0.080	0.18	-	-
На СЗ	Е	-0.092	0.19	Е-NAO	+0.30
				Е-PNA	-0.34
	А	+0.025	0.03	А-WP	-0.44
				А-NAO	-0.35
	Σ	-0.078	0.15	Σ -WP	+0.37
На ВР	Ам	-0.11	0.35	Ам-PNA	+0.35
	Σ	-0.13	0.33	Σ -POL	+0.35

Примечание. Здесь и в табл. 2–4 выделены максимально достоверные 30-летние тренды. Приведены пары показателей, изменения которых коррелируют друг с другом с коэффициентами выше 0.3 (по модулю).

Таблица 2. Статистика величин ИАЦ и ЧПВМ к арктическим островам России с территориями Европы (Е), Азии (А), Северной Америки (Ам) и суммарно (Σ) в апреле за последние 30 лет

Показатель		Тренды за 10 лет		Корреляции межгодовых вариаций (тренды удалены)	
		Величина	R^2	Пара	$R (>0.3)$
ИАЦ					
SCA		-0.30	0.09	PNA-EA/WR	+0.31
POL		-0.28	0.05		
ЧПВМ				ЧПВМ – ИАЦ	
На ЗФИ	Е	-0.094	0.38	E-NAO	+0.32
	А			E-POL	-0.39
			A-NAO	+0.35	
	Σ	-0.10	0.34	A-POL	-0.53
Σ -NAO				+0.42	
На СЗ	Е	-0.071	0.31	E-SCA	-0.36
	А	+0.024		–	–
	Σ	-0.049	0.10	Σ -WP	-0.38
				Σ -EA/WR	+0.33
На ВР	А	-0.052	0.12	A-NAO	+0.43
				A-PNA	-0.49
				A-POL	+0.35
	Ам	-0.094	0.23	Ам-NAO	-0.43
				Ам-PNA	+0.45
	Σ	-0.15	0.53	Σ -WP	-0.43
Σ -SCA				-0.33	

Таблица 3. Статистика величин ИАЦ и ЧПВМ к арктическим островам России с территориями Европы (Е), Азии (А), Северной Америки (Ам) и суммарно (Σ) в июле за последние 30 лет

Показатель		Тренды за 10 лет		Корреляции межгодовых вариаций (тренды удалены)	
		Величина	R^2	Пара	$R (>0.3)$
ИАЦ					
NAO		-0.47	0.14	–	–
WP		-0.33	0.08	PNA-WP	-0.43
SCA		+0.29	0.05	–	–
ЧПВМ				ЧПВМ – ИАЦ	
На ЗФИ	Е	-0.087	0.29	E-NAO	+0.31
	А			A-SCA	-0.33
	Σ	-0.11	0.39	Σ -SCA	-0.31
На СЗ	Е	-0.074	0.27	A-NAO	-0.31
	А	-0.063		A-PNA	+0.32
	Σ	-0.14	0.54	A-SCA	-0.30
На ВР	А	-0.093	0.34	–	–
	Ам	-0.045		0.18	–
	Σ	-0.14	0.55	Σ -NAO	-0.40

Таблица 4. Статистика величин ИАЦ и ЧПВМ к арктическим островам России с территорий Европы (Е), Азии (А), Северной Америки (Ам) и суммарно (Σ) в октябре за последние 30 лет

Показатель		Тренды за 10 лет		Корреляции межгодовых вариаций (тренды удалены)	
		Величина	R^2	Пара	$R (>0.3)$
ИАЦ					
PNA		+0.41	0.13	NAO-PNA	+0.39
POL		-0.72	0.38	NAO-WP	+0.34
ЧПВМ				ЧПВМ – ИАЦ	
На ЗФИ	Е	-0.051	0.11	Е-PNA	+0.37
	А			Е-SCA	-0.46
	Σ	-0.048	0.06	А-NAO	-0.40
На СЗ	Е	-0.084	0.28	Σ -SCA	-0.36
	А			Е-SCA	-0.40
	Σ	-0.074	0.11	А-POL	-0.36
На ВР	А	-0.065	0.13	Σ -WP	-0.38
	Ам	-0.079	0.33	А-POL	+0.44
	Σ	-0.14	0.37	-	-
				Σ -POL	+0.31

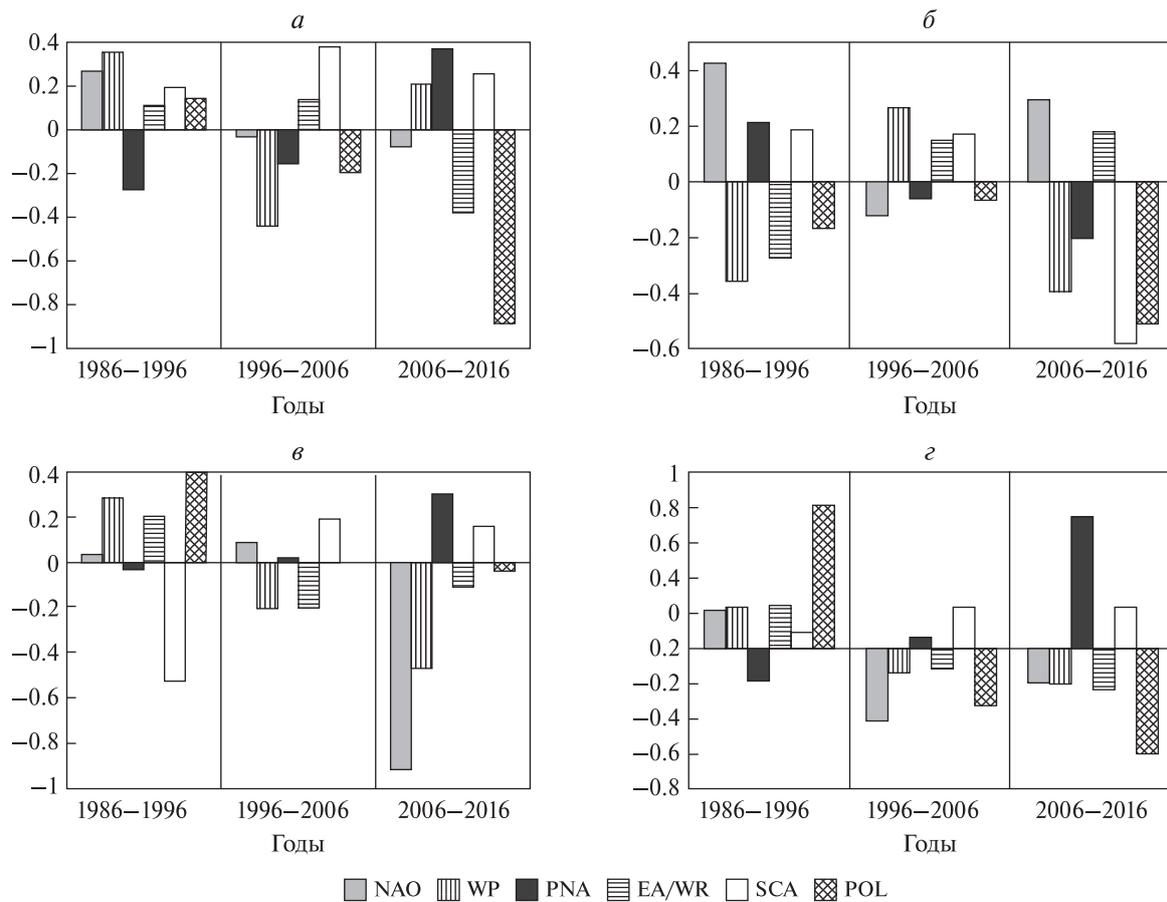


Рис. 1. Сезонное изменение значений разных ИАЦ (средние за 11-летние интервалы) на арктических островах России: *а* – январь; *б* – апрель; *в* – июль; *з* – октябрь

следующие. В *январе* и *октябре* индекс POL уменьшался, а PNA – увеличивался, и в результате оба они за это время поменяли знаки (см. рис. 1), т.е. разница давления между фиксированными центрами каждого индекса POL/PNA стала меньше/больше «нормы». В межгодовых вариациях (при вычитании линейных трендов) в *январе* меняются в противофазе индексы PNA и NAO, а в *октябре* они же изменяются синфазно. Кроме того, в *октябре* проявляется положительная корреляция в изменениях NAO и WP, хотя в *июле* они меняются от года к году в противофазе. В *июле* за 30 лет заметно уменьшились индексы NAO и WP, а величина SCA слабо возросла, что привело к смене знаков этих ИАЦ. В результате, и это хорошо видно на рис. 1, системы ИАЦ 2006–2016 гг. существенно отличаются от систем предшествующих десятилетий.

Дополнительные расчеты, включающие процедуру вычитания линейных трендов, показали, что в этом случае 30-летние изменения остающихся значений ИАЦ в большинстве хорошо описываются квадратичными зависимостями. Это свидетельствует о нелинейном характере долговременных изменений системы ИАЦ разных сезонов. Обсуждение физических причин этих изменений выходит за рамки данной работы.

Перенос воздушных масс к трем пунктам в Российской Арктике также можно характеризовать многолетними трендами и сезонными вариациями (см. табл. 1–4, рис. 2). На рис. 2 показаны величины ЧПВМ с материков. Не приведены и не обсуждаются ЧПВМ из Северной Америки к пунктам ЗФИ и СЗ, а также из Европы к пункту ВР, которые очень малы. Наиболее достоверно и заметно выражено общее уменьшение за 30 лет ЧПВМ в арктические районы Евразии с материков (на ВР отрицательные тренды статистически достоверны для всех четырех месяцев). Это особенно важно для теплого времени года, когда поверхности океана и суши не покрыты снегом или льдом, в результате чего составы переносимого воздуха сильно отличаются друг от друга.

Таким образом, в течение исследуемого периода воздух на островах становился все более морским по своему происхождению и составу, что должно было сказаться на составе и свойствах наземных сред и объектов. При этом в рассматриваемых районах Арктики также должны были снизиться концентрации антропогенных составляющих в атмосферном воздухе и осадках. Для всех сезонов, кроме летнего, во всех трех пунктах обнаружены достоверные корреляции межгодовых вариаций ЧПВМ с материков (суммарно) и индекса POL. Остальные долговременные корреляции межгодовых изменений ИАЦ и ЧПВМ к рассматриваемым пунктам в большинстве случаев статистически недостоверны. Однако результаты, приведенные в табл. 1–4, указывают на возможное участие разных ИАЦ в формировании режима переноса ВМ в различные районы Арктики и могут быть полезны для исследований в смежных областях. Похожие явления обсуждались в [Виноградова, Иванова, 2016] для материковых пунктов наблюдений в Арктике.

Содержание антропогенных тяжелых металлов в объектах арктических островов России

Концентрации антропогенных ТМ в воздухе и другие показатели загрязнения окружающей среды оценивались только для пунктов ЗФИ и СЗ, поскольку на ВР значительна ЧПВМ из Северной Америки (см. рис. 2, в), для территории которой нам не удалось найти информацию об антропогенных эмиссиях ТМ. Далее обсуждаются результаты расчетов для четырех месяцев 2010–2016 гг., характеризующие современное состояние загрязненности исследуемых районов. Оценки средних (за 10-летия) показателей загрязнения окружающей среды в тех же пунктах за предыдущие годы приведены в [Виноградова, Пономарева, 2012]. Сравнивать эти результаты надо с осторожностью,

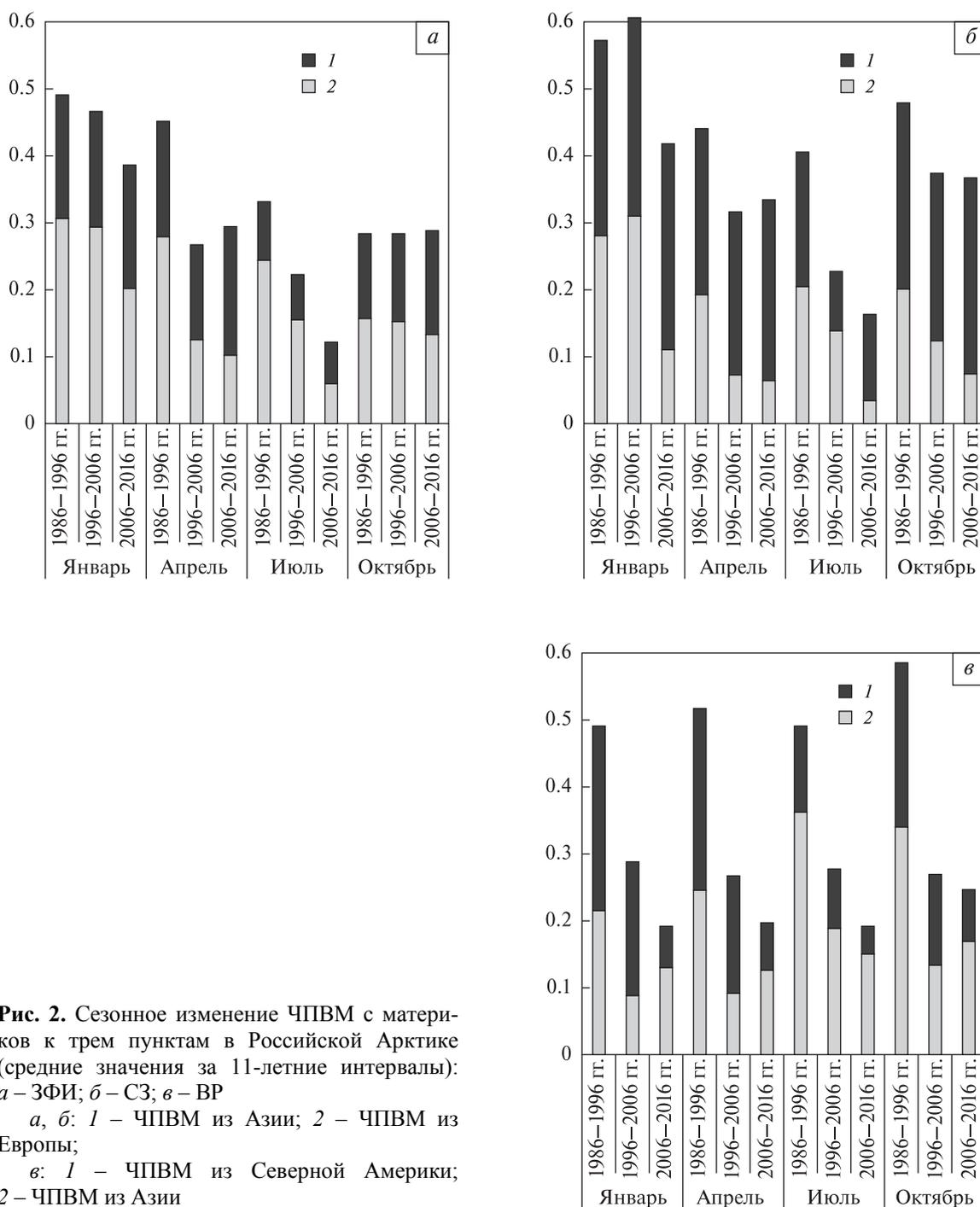


Рис. 2. Сезонное изменение ЧПВМ с материков к трем пунктам в Российской Арктике (средние значения за 11-летние интервалы): а – ЗФИ; б – СЗ; в – ВР
 а, б: 1 – ЧПВМ из Азии; 2 – ЧПВМ из Европы;
 в: 1 – ЧПВМ из Северной Америки; 2 – ЧПВМ из Азии

поскольку появление новых данных о выбросах различных загрязнителей в атмосферу не сопровождалось соотнесением их с данными других исследователей и какими-либо комментариями к имеющимся различиям. Поэтому 30-летние изменения загрязненности воздуха и поверхности в рассматриваемых пунктах обсуждаться не будут. Усовершенствование нашей методики позволило учесть дополнительные источники ТМ, для которых есть данные об эмиссиях в [Ежегодник..., 2011], что дало возможность наиболее корректно использовать полученные результаты для сопоставления временных и пространственных различий изучаемых параметров.

На рис. 3 показаны сезонные и межгодовые вариации концентраций рассматриваемых антропогенных ТМ в воздухе ЗФИ и СЗ. Качественно внутригодовые вариации

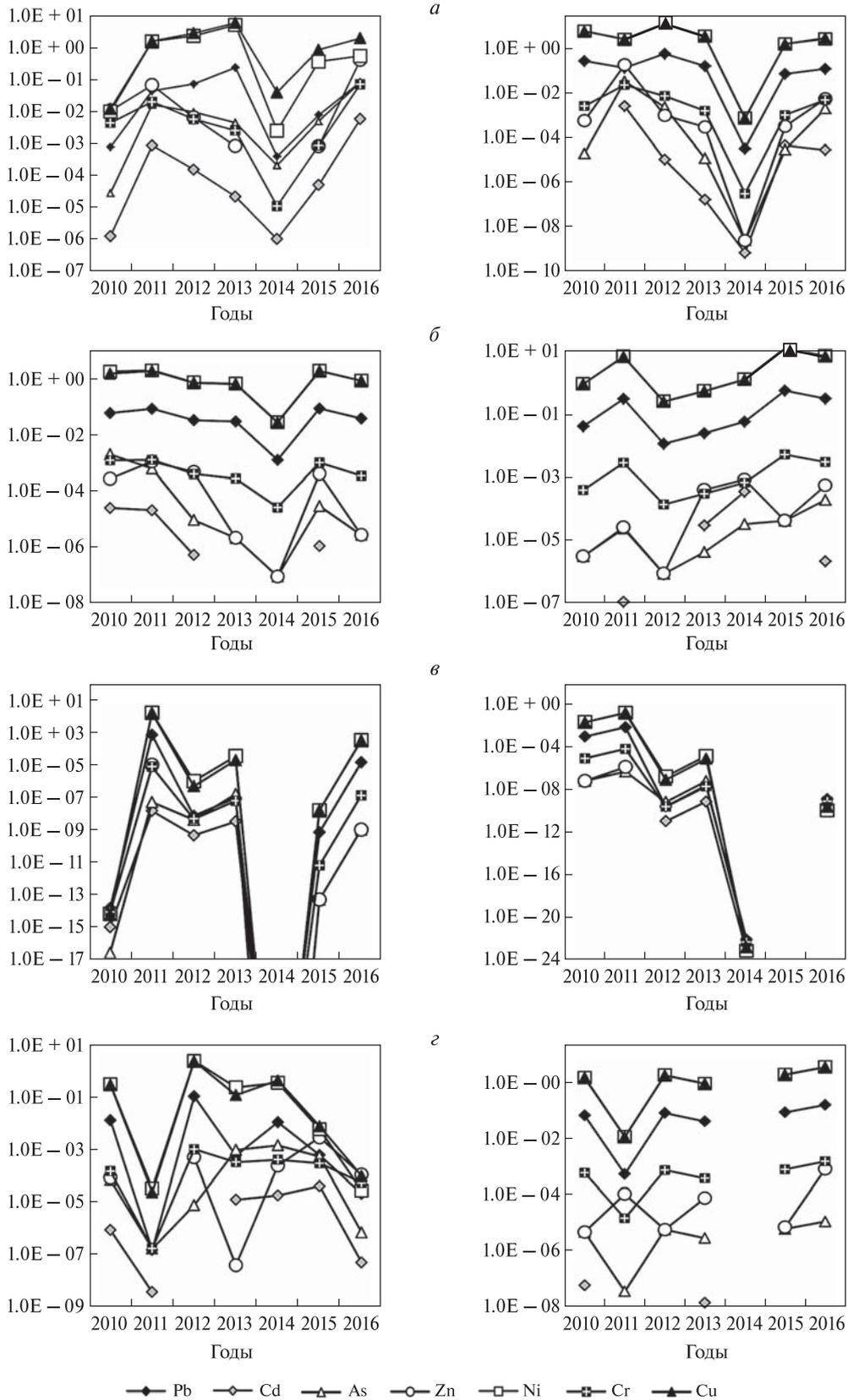


Рис. 3. Сезонное изменение концентраций антропогенных ТМ в воздухе на ЗФИ (левая колонка) и СЗ (правая колонка) в 2010–2016 гг., $\text{нг}/\text{м}^3$: а – январь; б – апрель; в – июль; г – октябрь

Отсутствие точек – результат невозможности отобразить на логарифмической шкале нулевые значения показателей

концентраций всех ТМ похожи: минимум наблюдается летом, когда скорость осаднения примесей при дальнем переносе велика, а максимум – зимой или весной. Однако надо иметь в виду, что в теплое время года, когда на суше, над которой происходит перенос ВМ, частично или полностью нет снега, концентрации ТМ в воздухе выше за счет их поступления с пылью и из почвы. Поэтому реальные колебания концентраций ТМ в воздухе в течение года не столь велики, как это показано на рис. 3, а и 3, в для антропогенных составляющих.

На представленных на рис. 3 зависимостях хорошо видны сильные межгодовые вариации атмосферных концентраций антропогенных ТМ на ЗФИ и СЗ, связанные с особенностями циркуляции атмосферы в разные годы и месяцы. Наиболее очевидной закономерностью в этих распределениях можно считать явные минимумы концентраций всех ТМ в 2014 г., кроме октября на ЗФИ и апреля на СЗ.

Если рассматривать содержание отдельных ТМ, можно утверждать, что в среднем концентрации Ni, Cu и Pb всегда выше на СЗ, чем на ЗФИ, и их содержания в воздухе коррелируют между собой в межгодовых вариациях. Учитывая, что на ЗФИ (и вообще на северо-западе России) основными источниками Ni и Cu являются предприятия Кольского полуострова [Boyd et al., 2009; Виноградова и др., 2017], можно предположить, что и происхождение антропогенного Pb в рассматриваемых пунктах преимущественно такое же. На СЗ эти элементы также связаны между собой и с эмиссиями не только на Кольском полуострове, но и в районе г. Норильск. Поскольку источники остальных четырех ТМ (As, Zn, Cd, Cr) больше разнесены в пространстве и находятся на большем удалении от рассматриваемых нами пунктов, это при заметных межгодовых вариациях направлений переноса ВМ приводит к более сложным внутригодовым, а также и межгодовым (см. рис. 3) вариациям и межэлементным связям их концентраций в воздухе. Более подробно соотношение концентраций As, Zn, Cd, Cr в воздухе СЗ и ЗФИ показано на рис. 4. Видно, что в разные годы в воздухе рассматриваемых пунктов доминируют различные ТМ в зависимости от условий переноса ВМ. Природные объекты на СЗ больше загрязнены Cr и Zn, источники которых расположены на Урале и в средней полосе Европейской части России, тогда как на ЗФИ преобладает загрязнение As. Загрязнение Cd в рассматриваемых пунктах совсем мало.

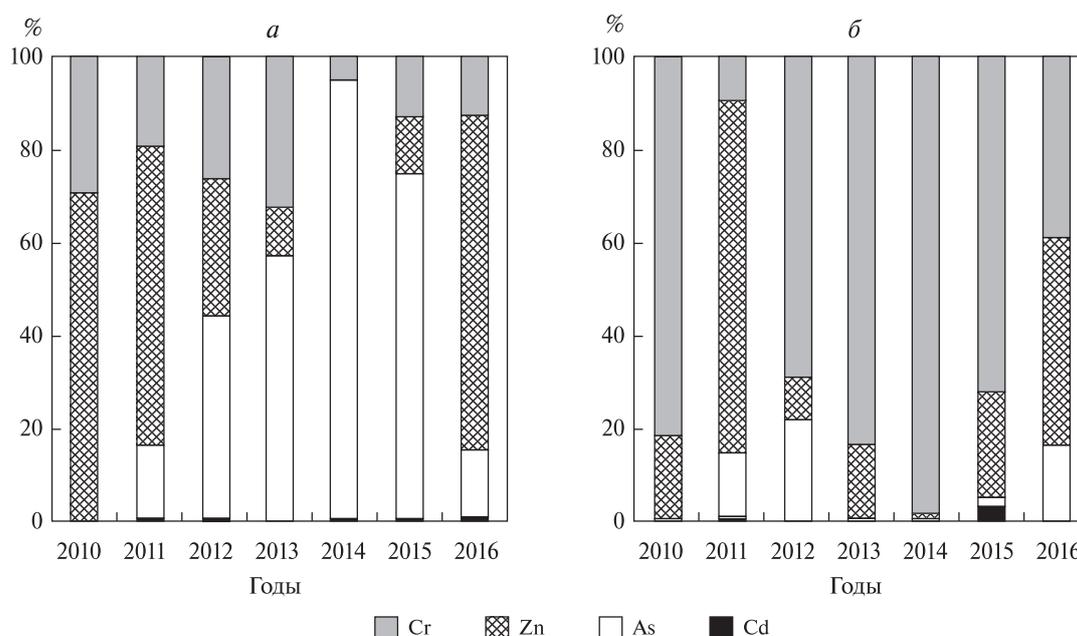


Рис. 4. Изменение концентраций в воздухе антропогенных Cr, Zn, As и Cd в январе с 2010 по 2016 г. в пунктах ЗФИ (а) и СЗ (б)

Количество атмосферных осадков, выпадающее за месяц на архипелагах, было рассчитано по архивным метеоданным сайта Air Resource Laboratory NOAA [ARL] для тех же четырех месяцев 2010–2016 гг., которые обсуждаются нами подробно, и приведено на рис. 5. Разница в количестве выпадающих осадков по месяцам не слишком велика как в течение года, так и год от года: относительное стандартное отклонение (ОСО) около 40 % для ЗФИ и около 50 % для СЗ. На СЗ летом выпадает осадков несколько больше, чем на ЗФИ.

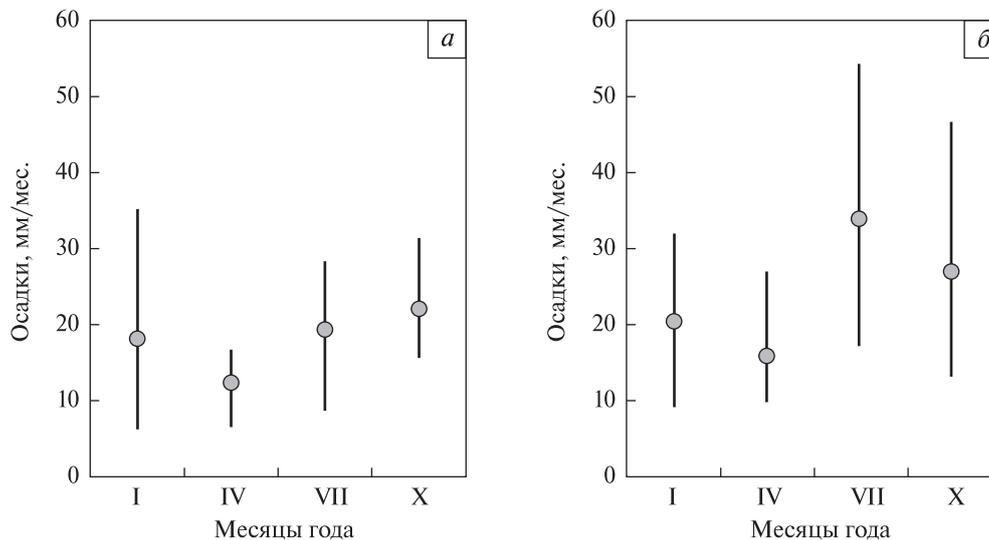


Рис. 5. Среднее (за 2010–2016 гг.) количество атмосферных осадков, выпавшее на поверхность в разные месяцы в пунктах на ЗФИ (а) и на СЗ (б)

Вертикальные отрезки – размах от минимального до максимального значения; кружок – среднее значение показателя

Средние (за месяц) потоки ТМ на поверхность вычислялись по формуле (2), а **концентрации ТМ в осадках** по формуле (3). Понятно, что качественно внутригодовые вариации этих показателей для каждого ТМ повторяют вариации его концентраций в воздухе. Учитывая неопределенность летнего вклада пыли и почвы в содержание ТМ в воздухе, мы не рассматриваем количественно сезонные вариации состава осаждающегося вещества.

Для окружающей среды северных районов очень важен состав снега – как среды, накапливающей загрязнения в течение всех холодных месяцев (на островах Северного Ледовитого океана этот период составляет 8–9 мес.) и «сбрасывающей» их при весеннем таянии в почву или водные объекты. В табл. 5 приведены средние значения концентрации ТМ в снеге (по январским оценкам), а также их максимальные и минимальные значения, полученные в отдельные годы для ЗФИ и СЗ. Видно, что межгодовые вариации величин очень высоки благодаря заметным изменениям условий переноса воздушных масс.

Сопоставление абсолютных значений рассчитанных концентраций ТМ с аналогичными результатами для прибрежных пунктов Российской Арктики [Виноградова, Иванова, 2016] показывает, что зимой в воздухе и объектах островов антропогенных ТМ меньше (на порядок и более), чем на побережье, а летом еще меньше – из-за удаленности от основных источников загрязнений. Однако полученное содержание ТМ (кроме Ni и Cu) в снежном покрове на островах вполне сравнимо с результатами наблюдений

Таблица 5. Концентрации ТМ в снеге (по январским оценкам) на ЗФИ и СЗ для разных лет, нг/л

Пункт	Значение показателя	Pb	Cd	As	Zn	Ni	Cr	Cu
ЗФИ	Среднее	6.7	0.17	2.8	12	148	2.4	226
	Максимум	15	1	15	73	329	13	380
	Минимум	0.06	0.00014	0.0030	0	0.36	0.0016	1.3
СЗ	Среднее	22	0.048	0.66	3.4	485	0.71	493
	Максимум	57	0.32	4.08	23	1277	2.8	1302
	Минимум	0.0042	0	0.0000003	0.0000003	0.095	0.00004	0.093

за составом снега на сети станций Росгидромета в Мурманской обл. [Виноградова, Котова, 2017]. Это можно объяснить длинным периодом снегозалегания и малым количеством осадков в более северных арктических районах, где в зимнее время преобладают антициклональные условия. Также возможно, что в измеренных на станциях Росгидромета значениях проявляется недостаток применяемой ими устаревшей методики [Временные..., 1985], которая предполагает анализ состава только взвешенной фракции снеговой воды. При таком подходе часть вещества, содержащаяся на самых мелких частицах, может быть потеряна при фильтрации. При этом в отчетах Росгидромета поправки на такие потери и на растворенную часть вещества (различные доли для разных ТМ) не учитываются. Таким образом, данные измерений Росгидромета должны быть заведомо ниже реальных концентраций ТМ, содержащихся в снеге ко времени весеннего таяния.

Выводы

Выявлены межгодовые и многолетние (за 30 лет) вариации величин ИАЦ и ЧПВМ к трем пунктам, расположенным на арктических архипелагах Земля Франца-Иосифа и Северная Земля и о. Врангеля. В январе и октябре индекс POL уменьшался, а PNA увеличивался. При этом достоверно уменьшение прихода на острова континентальных воздушных масс, что должно сопровождаться изменением состава природных сред на островах. В последнее десятилетие величины трендов уменьшились.

Анализ межгодовых и сезонных вариаций ЧПВМ и концентраций в воздухе рассматриваемого региона семи антропогенных ТМ (Pb, Cd, As, Zn, Ni, Cr, Cu) выявил минимальное загрязнение окружающей среды в 2014 г., что связано с аномальными условиями циркуляции атмосферы. Следует заметить, что в общих чертах межгодовые вариации этих процессов очень велики.

Что касается пространственного распределения, то природная среда арх. Северная Земля загрязнена антропогенными Ni, Cu и Pb больше, чем арх. Земля Франца-Иосифа, поскольку на СЗ указанные загрязнители поступают от двух мощных источников, расположенных не так далеко – на Кольском полуострове и в районе г. Норильск, тогда как до ЗФИ загрязнения от г. Норильск практически не доходят. Что касается Cd, As, Zn и Cr, то в разные годы в объектах каждого пункта доминируют разные из них – в зависимости от условий переноса ВМ от соответствующих источников.

Разброс концентраций ТМ в снеге от года к году очень велик, хотя количество осадков в зимний период меняется не так сильно. В отдельные годы значения концентраций некоторых ТМ в снеговой воде на северных островах России сравнимы с регистрируемыми величинами на континентальных станциях наблюдений.

Таким образом, основным механизмом, регулирующим межгодовые изменения характеристик загрязнения природных сред на арктических островах России в определенный сезон, являются вариации от года к году процессов циркуляции атмосферы, определяющих направления переноса воздушных масс в Арктику. На внутригодовых вариациях сказываются также сезонные различия величины скорости осаждения ТМ на поверхность по пути переноса загрязнителя в Арктику.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 17-05-00245). Авторы благодарны Лаборатории воздушных ресурсов (Air Resource Laboratory) NOAA за предоставленную возможность свободного использования модели HYSPLIT для расчета траекторий движения воздушных масс и других материалов сайта.

Литература

- Алексеев Г.В.* Арктическое измерение глобального потепления // *Лёд и Снег*. 2014. Т. 54, № 2. С. 53–68. DOI 10.15356/2076-6734-2014-2-53-68.
- Бызова Н.Л., Гаргер Е.К., Иванов В.Н.* Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчеты рассеяния примеси. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 278 с.
- Виноградова А.А.* Дистанционная оценка влияния загрязнения атмосферы на удаленные территории // *Геофизические процессы и биосфера*. 2014а. Т. 13, № 4. С. 5–20.
- Виноградова А.А.* Сезонные и долговременные вариации индексов атмосферной циркуляции и перенос воздуха в Российскую Арктику // *Оптика атмосферы и океана*. 2014б. Т. 27, № 6. С. 463–472.
- Виноградова А.А., Иванова Ю.А.* Тяжелые металлы в атмосфере над северным побережьем Евразии: Межгодовые вариации зимой и летом // *Геофизические процессы и биосфера*. 2016. Т. 15, № 4. С. 5–17.
- Виноградова А.А., Котова Е.И.* Металлы в снежном покрове на территории Мурманской области // *Экологическая химия*. 2017. Т. 26, № 1. С. 34–40.
- Виноградова А.А., Пономарева Т.Я.* Атмосферный перенос антропогенных примесей в арктические районы России (1986–2010 гг.) // *Оптика атмосферы и океана*. 2012. Т. 25, № 6. С. 475–483.
- Виноградова А.А., Котова Е.И., Топчая В.Ю.* Атмосферный перенос антропогенных тяжелых металлов в районы севера Европейской России // *География и природные ресурсы*. 2017. № 1. С. 108–116.
- Временные методические указания по работе на сети контроля загрязнения природной среды на основе снегомерной съемки. М.: Госкомгидромет, 1985. 15 с.
- Гальперин М., Софиев М., Гусев А., Афиногенова О.* Подходы к моделированию трансграничного загрязнения атмосферы Европы тяжелыми металлами. М.: ЕМЕП/МСЦ-В, 1995. Отчет 7/95. 85 с.
- Ежегодник выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух городов и регионов Российской Федерации за 2010 год / под ред. А.Ю. Недре. СПб.: ОАО «НИИ Атмосфера», 2011. 560 с.
- [AMAP] Assessment 2015: Black carbon and ozone as Arctic climate forcers. Arctic Monitoring and Assessment Programme. Oslo, Norway: AMAP, 2015. 116 p.

- Boyd R., Barnes S.-J., De Caritat P., Chekushin V.A., Melezhik V.A., Reimann C., Zientek M.L. Emissions from the copper–nickel industry on the Kola Peninsula and at Noril'sk, Russia // *Atmosph. Environ.* 2009. V. 43. P. 1474–1480.
- Cheng M.-D. Geolocating Russian sources for Arctic black carbon // *Atmosph. Environ.* 2014. V. 92, N 4. P. 398–410. DOI org/10.1016/j.atmosenv.2014.04.031
- Evangelidou N., Balkanski Y., Hao W.M., Petkov A., Silverstein R.P., Corley R., Nordgren B.L., Urbanski S.P., Eckhardt S., Stohl A., Tunved P., Crepinsek S., Jefferson A., Sharma S., Nørgaard J.K., Skov H. Wildfires in Northern Eurasia affect the budget of black carbon in the Arctic: A 12-year retrospective synopsis (2002–2013) // *Atmosph. Chem. Phys.* 2016. V. 16, N 12. P. 7587–7604.
- Hirdman D., Sodemann H., Eckhardt S., Burkhart J.F., Jefferson A., Mefford T., Quinn P.K., Sharma S., Strom J., Stohl A. Source identification of short-lived air pollutants in the Arctic using statistical analysis of measurement data and particle dispersion model output // *Atmosph. Chem. Phys.* 2010. V. 10. P. 669–693.
- [IPCC] Climate Change 2014: Synthesis rep. contribution of working groups I, II and III to the Fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change / Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds). Geneva, Switzerland: IPCC, 2014. 151 p.
- Persistent toxic substances, food security and indigenous peoples of the Russian North: Final Rep. Oslo, Norway: AMAP, 2004. 192 p.
- Salvador P., Art'ınano B., Pio C., Afonso J., Legrand M., Puxbaum H., Hammer S. Evaluation of aerosol sources at European high altitude background sites with trajectory statistical methods // *Atmosph. Environ.* 2010. V. 44. P. 2316–2329.
- Sharma S., Andrews E., Barrie L.A., Jdren J.A., Lavoué D. Variations and sources of the equivalent black carbon in the high Arctic revealed by long-term observations at Alert and Barrow: 1989–2003 // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. D14208. DOI 10.1029/2005JD006581.
- Travnikov O., Ilyin I., Rozovskaya O., Varygina M., Aas W., Uggerud H.T., Mareckova K., Wankmüller R. Long-term changes of heavy metal transboundary pollution of the environment (1990–2010) // *EMEP Status Rep.* 2012. N 2. 63 p.

Сайты в Интернете:

[ИАЦ] Индексы атмосферной циркуляции. URL: http://ftp.cpc.ncep.noaa.gov/wd52dg/data/indices/tele_index.nh

[ARL] Air Resource Laboratory NOAA. URL: <http://www.ready.arl.noaa.gov/>

[IASOA] International Arctic Systems for Observing the Atmosphere. URL: <http://www.iasoa.org/>

Сведения об авторах

ВИНОГРАДОВА Анна Александровна – доктор географических наук, ведущий научный сотрудник, Институт физики атмосферы им А.М. Обухова РАН. 119017, г. Москва, Пыжевский пер., д. 3. Тел.: +7 (495) 959-50-76. E-mail: anvinograd@yandex.ru

VINOGRADOVA Anna A. – doctor in geography, leading researcher, Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences. Moscow, Russia. Tel.: +7 (495) 959-50-76. E-mail: anvinograd@yandex.ru

ИВАНОВА Юлия Алексеевна – младший научный сотрудник, Институт физики атмосферы им А.М. Обухова РАН. 119017, г. Москва, Пыжевский пер., д. 3. Тел.: +7 (495) 959-50-76. E-mail: ulia_sml@mail.ru

IVANOVA Yulia A. – junior researcher, Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences. Moscow, Russia. Tel.: +7 (495) 959-50-76. E-mail: ulia_sml@mail.ru

**AIR MASS AND POLLUTION TRANSPORT
TO THE ARCTIC RUSSIAN ISLANDS (1986-2016):
LONG-TERM, YEAR TO YEAR, AND SEASONAL VARIATIONS**

A.A. Vinogradova, Yu.A. Ivanova

Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. The Arctic is the most important as well the most vulnerable region in the Northern hemisphere in relation to climate changes. Analysis of temporal variations in the processes determining these effects allow to understand them and to forecast their consequences. Air mass transport from Europe, Asia, North America to arctic Archipelagos Franz-Josef Land and Severnaya Zemlya, as well to Wrangel Island was investigated with atmospheric circulation indexes through 30-years for four year seasons. Anthropogenic heavy metals (HM) air concentrations and fluxes onto the surface were analyzed in the Russian Arctic. For all three points, frequencies of air mass transport from continents decreased through the last 30 years. So, contents of the arctic air and surface fluxes became more and more marine ones. Indexes of atmospheric circulations show sizable variations from year to year, causing high variations in HM air concentrations and surface fluxes. Also, this is a reason of high variations in snow constituents falling down onto surface environment during spring melting period every year. Maximal nickel and copper air concentrations at the Arctic islands can be (in some months and years) as high as they are at some points of not so far distant territories of the land. On the contrary, there are the years when in summer anthropogenic HM did not reach the Arctic islands by air transport. Seasonal variations in HM's deposition velocity are the main reason of annual variations in their concentrations in the Arctic atmosphere.

Keywords: Russian Arctic, heavy metals, atmospheric circulation indexes, long-range atmospheric transport, year to year variations, seasonal variations.