

Глава 4

ЭОЛОВЫЙ ПЕРЕНОС

4.1. Рассеянное осадочное вещество атмосферы*

В.П. Шевченко, Д.П. Стародымова, В.И. Баранов, В.В. Гордеев

Введение

Атмосфера – один из каналов обмена и перераспределения вещества на Земле. Тот факт, что атмосфера содержит взвешенные в воздухе частицы аэрозоля, имеет важное значение, оказывая существенное влияние на формирование качества воздуха, дальность видимости, разнообразные гетерогенные химические реакции, происходящие на поверхности частиц аэрозоля, и на климат [Junge, 1963; Brimblecombe, 1996; Кондратьев и др., 2007а]. Аэрозолем называется совокупность мельчайших частиц или жидких капелек, взвешенных в газовой фазе [Brimblecombe, 1996]. Нерастворимые аэрозольные частицы являются рассеянным осадочным веществом атмосферы [Лисицын, 2011, 2014]. Существуют два главных источника аэрозольных частиц в атмосфере: первичное вещество частиц, возникающее при диспергировании материала с поверхности Земли, и вторичное, которое образуется в результате химических реакций в верхних слоях атмосферы [Brimblecombe, 1996]. В число первичных частиц входят частицы биологического происхождения (пыльца, споры, микроорганизмы), частицы, образующиеся при лесных пожарах, минеральная пыль, поступающая в атмосферу с суши, кристаллы морской соли, выдуваемые ветром из поверхностного микрослоя морей и океанов, а также антропогенный материал. Следствием быстрого промышленного развития и роста численности населения явилось сильное возрастание антропогенных загрязнений атмосферы за

*Аналитические исследования выполнены при финансовой поддержке гранта РФ (проект № 14-27-00114-П). Интерпретация результатов частично выполнена в рамках Госзадания ФАНО России (тема № 0149-2018-0016).

счет промышленных и сельскохозяйственных источников. Значительная часть этих загрязнений переносится с воздушными массами в акватории морей и океанов [Лищицын, 1955, 2011, 2014; Windom, 1975; Duce et al., 1991; Шевченко, 2016].

Состав рассеянного осадочного вещества над Средиземным морем и на его берегах и вклад эолового материала в процессы современного осадконакопления и загрязнение окружающей среды изучены довольно хорошо [Bergametti et al., 1989; Guerzoni et al., 1997; Heimbürger et al., 2010; Malaguti et al., 2015 и др.], но в Черноморском регионе таких исследований было проведено значительно меньше [Nacisalihoglu et al., 1992; Kubilay et al., 1995; Хрусталёв и др., 1997, 2002; Karakas et al., 2002, 2004; Kolesnikov et al., 2005; Лапшин и др., 2010, 2014; Theodosi et al., 2013; Balcilar et al., 2014, 2018; Рябинин и др., 2016 и др.].

Например, в 2002–2008 гг. исследования аэрозоль в районе Голубой бухты (рис. 4.1.1), на «стомильном» разрезе Геленджик – открытое море, на микрополигонах, а также на серии прибрежных станций от Адлера до Керченского пролива проводились сотрудниками Института прикладной геофизики имени академика Е.К. Федорова и Государственного океанографического института имени Н.Н. Зубова [Kolesnikov et al., 2005; Лапшин и др., 2010].



Рис. 4.1.1. Схема расположения аэрозольных станций на побережье Черного моря: 1 – Южное отделение ИО РАН, Голубая бухта; 2 – Torul [Balcilar et al., 2014]; 3 – Amasra [Karakas et al., 2002]; 4 – Севастополь [Калинская, Суслин, 2015]; 5 – Кара-Даг [Гончарук и др., 2015].

В июне–сентябре 2004 г. и марте–апреле 2010 г. проводились исследования элементного состава аэрозолей и измерения размерных спектров морского аэрозоля [Лапшин и др., 2014]. В 2012–2013 гг. исследования аэрозолей проводили в Карадагском природном заповеднике [Гончарук и др., 2015]. В Турции состав аэрозолей в западной части побережья Черного моря изучали вблизи г. Амасра (Amasra) в 1995–1997 гг. [Karakas et al., 2002] и восточной части побережья вблизи г. Торул (Togul) в 2011–2013 гг. [Balcilar et al., 2014].

В данном разделе представлены новые данные, полученные авторами летом 2015 г. на берегу Голубой бухты в Южном отделении ИО РАН.

Элементный состав аэрозолей на берегу Голубой бухты в сравнении с другими районами

Детальные исследования аэрозолей проводились летом 2015 г. на побережье Голубой (Рыбацкой) бухты. Голубая бухта примерно на 1 км вдаётся в сушу между Цемесской и Геленджикской бухтами (см. рис. 4.1.1). На расстоянии 6–8 км от берега почти параллельно береговой линии тянется Маркотхский хребт Большого Кавказа. Его максимальные высоты достигают 717 м.

22 аэрозольные пробы были отобраны с 15 июня по 11 августа 2015 г. Отбор проб производился в 50 м от береговой линии в кутовой части Голубой бухты на высоте 6 м над уровнем моря с помощью аспиратора АВА 3-240/180-01, который обеспечивал скорость прокачки воздуха 240 л/мин. Отбор проб аэрозолей велся на фильтры АФА-ХА. Длительность отбора одной пробы составляла около 2 суток. Объем прокачанного воздуха за один период пробоотбора составил около 80–100 м³.

Отобранные аэрозольные фильтры были разложены смесью концентрированных кислот (HNO₃, HF) и H₂O₂ и проанализированы методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС) на приборе Agilent 7500. Были определены концентрации следующих элементов: Al, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Co, Ni, Ga, Ge, Rb, Sr, Y, Zr, Mo, Cd, Cs, Tl, Pb, Bi, Th, U. Полученные концентрации были пересчитаны в нг/м³.

Для выявления регионов-источников аэрозольного материала с помощью программы HYSPLIT [Draxler, Rolf, 2003] были построены трехсуточные обратные траектории движения воздушных масс, приходящих к месту пробоотбора на высоте 20 м. Расчет следующей траектории начинался каждые 24 часа, таким образом, на каждый период пробоотбора приходилось 2 траектории. Подобный метод был применен в работе [Шевченко и др., 2015].

Для выявления влияния метеорологических параметров на состав аэрозолей были привлечены архивы метеорологических наблюдений. Учитывались такие параметры как суммарное количество осадков в период пробоотбора и средняя

скорость ветра за этот период, записанные на пункте наблюдений в г. Геленджик. Также принималась во внимание максимальная скорость порывов ветра. Метеорологическая информация была получена на портале www.rp5.ru (44°33,486' с.ш., 38°4,932' в.д.; 14 м – координаты точки наблюдения за погодой)

Концентрации элементов распределены по выборке неравномерно (табл. 4.1.1). Корреляционный анализ (табл. 4.1.2) показал, что большинство элементов характеризуется значимыми корреляционными связями друг с другом. Поскольку эта группа элементов также имеет высокую корреляцию с алюминием, можно сделать вывод о литогенном происхождении этих элементов: Al, Sc, Ti, Mn, Co, Ga, Ge, Rb, Sr, Y, Zr, Cs, Th, U. Концентрации этих элементов в аэрозолях изменяются синхронно, выявляя периоды увеличения пылевой нагрузки в районе исследований. Другая группа элементов, характеризующаяся высокой корреляцией друг с другом, – Ni, Cr, Mo. Значения коэффициентов корреляции между этими элементами составляют 0,8–0,9. Эта группа элементов характеризуется также до-

Таблица 4.1.1

Минимальные, максимальные, средние арифметические и средние геометрические концентрации химических элементов в аэрозолях Голубой бухты в период с 15 июня по 11 августа 2015 г. (нг/м³)

Элемент	Минимум	Максимум	Среднее арифметическое	Стандартное отклонение	Среднее геометрическое
Al	48	1145	312	329	192
Ti	2,5	92	29	25	20
V	1,1	7,5	3,2	1,6	2,9
Cr	0,53	7,1	3,7	2,6	2,6
Mn	1,4	15,4	5,1	4,2	3,9
Co	0,027	0,36	0,12	0,09	0,10
Ni	0,40	8,6	4,8	3,2	3,3
Ga	0,025	0,62	0,18	0,17	0,12
Rb	0,07	1,74	0,59	0,48	0,44
Sr	0,74	14,2	3,4	3,7	2,3
Y	0,03	0,6	0,18	0,17	0,12
Zr	0,21	3,4	0,92	0,93	0,64
Mo	0,08	0,17	0,10	0,06	0,12
Cd	0,06	0,36	0,18	0,09	0,16
Pb	2,5	8,2	4,5	1,4	4,3
Bi	0,004	0,90	0,057	0,19	0,017
Th	0,004	0,127	0,036	0,036	0,022
U	0,005	0,036	0,013	0,009	0,011

Таблица 4.1.2

Корреляционная матрица элементного состава аэрозолей Голубой бухты

	Al	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Co	Ni	Ga	Rb	Sr	Mo	Cd	Cs	Pb	Bi	Th	U	
Al	1																		
Sc	0,99	1																	
Ti	0,90	0,91	1																
V	0,31	0,27	0,24	1															
Cr	-0,48	-0,42	-0,32	-0,45	1														
Mn	0,98	0,97	0,90	0,30	-0,37	1													
Co	0,92	0,92	0,89	0,20	-0,14	0,96	1												
Ni	-0,44	-0,39	-0,29	-0,35	0,98	-0,31	-0,08	1											
Ga	0,98	0,98	0,91	0,30	-0,42	0,98	0,93	-0,37	1										
Rb	0,99	0,96	0,90	0,33	-0,50	0,97	0,90	-0,46	0,97	1									
Sr	0,95	0,95	0,89	0,19	-0,35	0,97	0,96	-0,29	0,97	0,94	1								
Mo	-0,45	-0,41	-0,28	-0,15	0,84	-0,36	-0,19	0,81	-0,41	-0,44	-0,40	1							
Cd	-0,11	-0,11	-0,02	0,18	-0,10	-0,05	-0,15	-0,11	-0,05	-0,03	-0,12	0,17	1						
Cs	0,88	0,84	0,83	0,33	-0,46	0,87	0,79	-0,43	0,87	0,94	0,80	-0,36	0,06	1					
Pb	0,18	0,17	0,20	0,00	-0,03	0,16	0,10	-0,07	0,19	0,19	0,07	-0,02	0,13	0,32	1				
Bi	0,49	0,48	0,58	0,14	-0,08	0,56	0,61	-0,02	0,53	0,51	0,66	-0,01	-0,10	0,44	0,02	1			
Th	0,99	0,98	0,89	0,24	-0,43	0,96	0,92	-0,41	0,98	0,97	0,94	-0,43	-0,14	0,87	0,23	0,49	1		
U	0,98	0,98	0,92	0,24	-0,37	0,97	0,95	-0,34	0,98	0,97	0,96	-0,35	-0,09	0,86	0,15	0,55	0,98	1	

Критическое значение коэффициента корреляции при $r=0,01$ (количество проб 21) **0,55**.

статочны высокими отрицательными коэффициентами корреляции с литогенными элементами. Такая ассоциация химических элементов характерна для промышленных эмиссий, связанных с металлургией. Свинец – элемент преимущественно антропогенного происхождения – не образует значимых корреляционных связей с другими элементами, однако с элементами литогенного происхождения имеет отрицательные корреляции.

Весь период пробоотбора разделяется на два промежутка: 15 июня – 22 июля и 22 июля – 11 августа (рис. 4.1.2). Первый период характеризуется более низкими концентрациями литогенных элементов (концентрации алюминия в этот период варьируют от 46 до 209 $\text{нг}/\text{м}^3$) и более высокими концентрациями никеля, хрома и молибдена (рис. 4.1.3). Во второй период наблюдается обратная ситуация. Концентрации кадмия и свинца довольно равномерны во времени. Анализ синоптических наблюдений в эти два периода времени показал, что средняя скорость ветра в течение этих двух периодов варьировала незначительно (от 2,6 до 4,1 м/с в первый период и от 2,3 до 5,9 м/с – во второй период), однако во второй период более частыми были порывы ветра (до 17 м/с). Концентрации алюминия находятся в прямой зависимости от порывов ветра в районе наблюдения. Таким образом, концентрации элементов в аэрозолях во второй период определяются во многом локальной синоптической ситуацией и подвержены влиянию местной литогенной пыли, в то время как концентрации свинца, кадмия, хрома, никеля и молибдена не зависят от локальной синоптической обстановки и поступают, скорее всего, от мощных региональных или глобальных источников.

Сравнение концентраций элементов в аэрозолях с опубликованными данными, приведенными в табл. 4.1.3, показало, что полученные концентрации очень

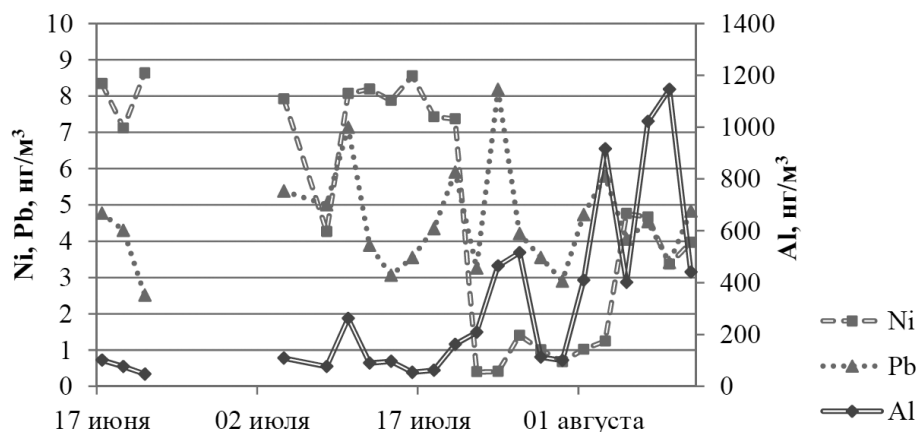


Рис. 4.1.2. Временной ход концентраций алюминия, никеля и свинца в аэрозолях на берегу Голубой бухты в период с 15 июня по 11 августа 2015 г.

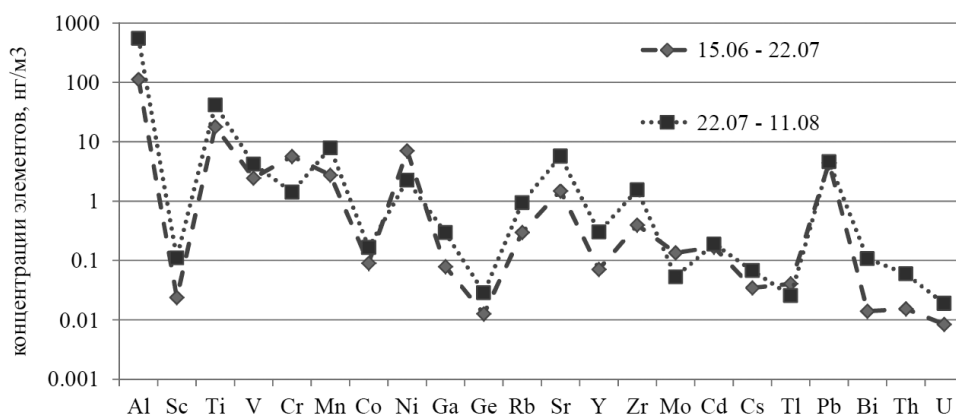


Рис. 4.1.3. Средние концентрации элементов в аэрозолях на берегу Голубой бухты в периоды 15 июня – 22 июля и 22 июля – 11 августа 2015 г.

Таблица 4.1.3

Концентрации химических элементов в воздухе (нг/м³) в разных районах побережья Черного моря и других районах

Место	Геленджик, берег Голубой бухты	Torul	Amasra	Западная часть Черного моря	Восточная часть Черного моря	Карское море
год	2015	2011	1995-1997	1988	1988	1993
Источник	Данная работа	Balcilar et al., 2014	Karakas et al., 2002	Hacisalihoglu et al., 1992	Hacisalihoglu et al., 1992	Shevchenko et al., 1995
Al	312	1032	320	540	330	
Sc	0,07			0,08	0,06	0,00022
Ti	29	1011	32	0,06		
V	3,2	48	2,7	2,8	1,8	
Cr	3,7	97,1	1,3	9	8,3	0,044
Mn	5,1	63	11	17	17	
Co	0,12		0,23	0,25	0,16	0,0041
Ni	4,8	17	1,6	4,9	3	
Sr	3,4					
Mo	0,10		0,44			
Cd	0,18		0,28			
Pb	4,5	131,9	17	60	37	
Th	0,036		0,074	0,11	0,055	

близки к концентрациям, зафиксированным в восточной части акватории Черного моря [Nacisalihoglu et al., 1992] и на станции Амасра [Karakas et al., 2002]. Существенное различие установлено только для концентраций свинца: максимальные концентрации получены на станции Амасра [Karakass et al., 2002], концентрации свинца, приведенные в работе [Nacisalihoglu et al., 1992], также превышают концентрации, полученные нами. Эти различия связаны с временным трендом, поскольку максимальные концентрации были измерены в конце 1980-х годов, в середине 1990-х они снизились в два раза. Концентрации свинца, полученные нами, на порядок ниже, чем в 1980-х годах.

Для выявления вклада различных источников в формирование элементного состава аэрозолей были рассчитаны коэффициенты обогащения элементами относительно среднего состава земной коры по формуле:

$$КО = (\text{Эл.} / \text{Al})_{\text{проба}} / (\text{Эл.} / \text{Al})_{\text{з.к.}}$$

где (Эл. / Al) – отношение концентрации элемента к концентрации алюминия в пробе и в верхней части континентальной земной коры [Rudnick, Gao, 2003] соответственно. Алюминий был использован в качестве индикатора литогенного источника.

По значениям коэффициентов обогащения все элементы делятся на несколько групп (рис. 4.1.4):

- 1) Элементы литогенной группы с КО 1–5: Th, Sc, Zr, U, Mn, Rb, Y, Ti, Ga, Co, Sr, Cs.
- 2) Элементы с повышенными КО (10–100): V, Cr, Tl, Bi, Ni.
- 3) Элементы с максимальными КО (>100): Mo, Cd, Pb.

Только 5 проб из 22 характеризуются наличием осадков в период пробоотбора, поэтому оказалось невозможным оценить связь между суммой осадков и

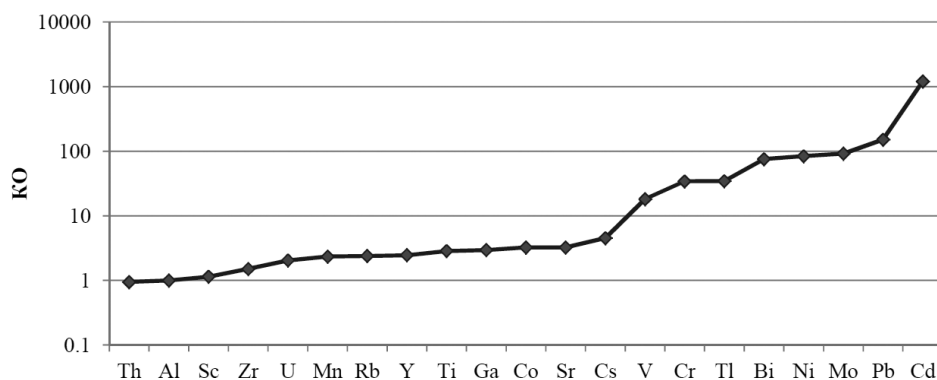


Рис. 4.1.4. Коэффициенты обогащения аэрозолей на берегу Голубой бухты химическими элементами относительно среднего состава верхней части континентальной земной коры [Rudnick, Gao, 2003] в период с 15 июня по 11 августа 2015 г.

концентрацией элементов. Пробы, которые были отобраны в те периоды, когда наблюдались осадки, характеризуются более низкими, чем в среднем по выборке, концентрациями всех элементов, кроме свинца, молибдена, висмута, что говорит о том, что эти элементы слабо вымываются из атмосферы.

Исходя из анализа обратных траекторий, все пробы были разделены на несколько групп на основе преимущественного направления поступления воздушных масс в этот период. Таким образом, были выделены три группы:

- 1) восток–северо-восток (6 проб);
- 2) запад–северо-запад (8 проб);
- 3) юг–юго-запад–юго-восток (2 пробы).

6 проб были отобраны в период достаточно резкой смены направления движения воздушных масс и характеризуются смешанными источниками поступления.

Те пробы, которые отличаются поступлением воздушных масс с восточных румбов, резко выделяются среди остальных проб повышенными концентрациями элементов литогенной группы (рис. 4.1.5). Эти пробы характеризуются более низкими, чем в среднем по выборке, КО свинца, висмута, молибдена, кадмия, ванадия, хрома. Однако поступление воздушных масс с восточных румбов совпало по времени с увеличением силы ветра, что обсуждалось выше. Повышенные концентрации элементов, сопутствующих грубозернистой фракции (Ti, Zr), и пониженные КО для элементов, характерных для тонкозернистой фракции (свинец, кадмий, цинк), и связь с порывами ветра позволяет предположить, что материал в этих пробах представлен грубыми частицами, которые выдуваются из близлежащих почв порывами ветра. Эта более грубозернистая литогенная фракция разбавляет аэрозольный материал и вызывает понижение КО элементов, связанных с более тонкозернистой фракцией.

Пробы, отобранные в те периоды, когда воздушные массы приходили с запада–северо-запада (группа 2) и с южных румбов (группа 3), не различаются так

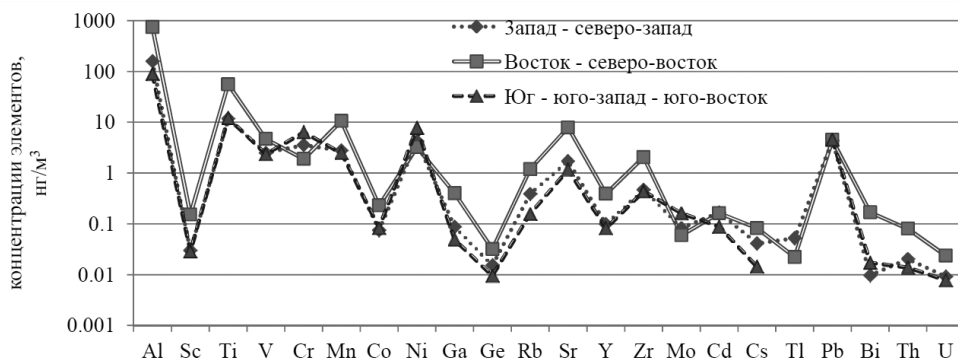


Рис. 4.1.5. Средние концентрации элементов в аэрозолях на берегу Голубой бухты в периоды поступления воздушных масс с разных направлений.

резко между собой. В целом, группа 3 характеризуется минимальными концентрациями большинства элементов, в группе 2 концентрации этих же элементов несколько выше, и в обеих группах концентрации гораздо ниже, чем в группе 1. Группа 2 выделяется более высокой, по сравнению с другими группами, концентрацией кадмия, а для группы 3 характерны максимальные концентрации молибдена, никеля и хрома. Концентрации свинца и цинка близки во всех трех группах. KO Cr, Mo, Cd, Zn, Bi и Pb значительно выше в группах проб 2 и 3 по сравнению с группой 1. Обратные траектории воздушных масс, рассчитанные для этих периодов пробоотбора, либо проходят над акваторией Черного моря, либо приходят из Европы, что позволяет предположить, что эти элементы поставляются за счет трансграничного атмосферного переноса.

Метеорологические исследования, проведенные на берегу Голубой бухты и на соседних участках северо-восточного побережья Черного моря, показали, что в летнее время здесь значительный вклад в формирование изменчивости метеорологических величин вносят бриз и горно-долинная циркуляция [Суркова и др., 2006; Суркова, 2011; Ткаченко, Денисов, 2015]. Феновый эффект при ночном горном ветре – характерное явление в данном районе. При феновом эффекте на фоне роста температуры уменьшается относительная влажность, часто возрастает порывистость ветра, который может выдувать частицы из поверхностного слоя почвы.

Ветровой режим – один из важнейших факторов формирования условий накопления примесей в приземном слое атмосферы [Суркова, 2011]. Активная рециркуляция воздуха в бризовой ячейке может приводить к накоплению выбрасываемых веществ в дневное время над побережьем, увеличивая концентрацию микро- и наночастиц (включая загрязнения) в воздухе [Берлянд, 1985].

Таким образом, летом 2015 г. основным источником поступления многих элементов являлась литогенная пыль. Усиление порывов ветра вызывает резкое увеличение концентрации литогенных элементов в аэрозолях за счет выдувания частиц местной почвы. Аэрозоли обеднены по сравнению с земной корой Ti, Zr, Y, Th, U, что связано с тем, что эти элементы переносятся с более грубозернистой фракцией.

Широкий спектр загрязнителей атмосферы изучали в районе г. Геленджика в июле 2009 г. ученые из Новосибирской области и г. Томска [Сафатов и др., 2018]. Исследования проводили одновременно в нескольких наземных точках, в акватории Геленджикской бухты и на высотах до 2000 м. Для аэрозольных частиц определяли: гранулометрический состав в диапазоне от 3 нм до 32 мкм, элементный состав (23 химических элемента), концентрации полиароматических углеводородов, ненасыщенных углеводородов, суммарного белка, некоторых биотоксинов и жизнеспособных микроорганизмов. Среднесуточные значения измеренных концентраций загрязнителей сравнивали с соответствующими предельно допустимыми концентрациями (ПДК). Практически все они оказались меньше ПДК. Следовательно, атмосфера города в период проведения экспериментов не содержала загрязнителей в существенных количествах.

Поступление рассеянного осадочного вещества из атмосферы на поверхность моря

Изучение особенностей эолового переноса производилось на песчаных косах и пляжах в районе Анапы [Айбулатов, 1990; Айбулатов, Новикова, 1984] и в северо-западной части моря [Шуйский, 1981, 1986; Шуйский, Выхованец, 1989], что позволило определить количество вещества, выносимого ветрами с суши непосредственно в береговую зону. Прямые измерения поступающего в составе атмосферных осадков на поверхность моря в шельфовой зоне эолового материала были выполнены А.А. Матвеевым с соавторами [1979]. В октябре 1987 г. были измерены концентрации аэрозолей и вертикальные потоки эолового вещества в приводном слое атмосферы над Кавказским шельфом [Хрусталёв и др., 2002]. В это время концентрация эолового материала над шельфом изменялась от 15 до 264 мкг/м³ при среднем значении 97,2 мкг/м³ (n=10 проб). Максимальная концентрация была зарегистрирована вблизи мыса Утриш, минимальная – на участке Адлер–Сухуми. В этом направлении уменьшались и потоки эолового материала на поверхность вод шельфа (от 0,83 г·м⁻²·сут⁻¹ в районе м. Утриш до 0,03 г·м⁻²·сут⁻¹ на юго-востоке Кавказского шельфа).

По оценке Ю.П. Хрусталёва с соавторами [1997], суммарная годовая поставка аэрозолей бризовой циркуляцией на шельф Крыма и Кавказа (от п-ова Тарханкут в Крыму до устья р. Ингури) составляет около 313 тыс. т. Значительную роль в поступлении эолового материала на шельф Черного моря играют сильные (10–15 м/с) ветры (более 3 млн. т в год) [Хрусталёв и др., 2002]. Песчаные и песчано-ракушечные побережья в исследуемом регионе составляют около 1000 км, из которых около 800 км находятся в зоне воздействия ветров северных, северо-восточных и восточных румбов, дующих с суши на море [Шуйский, 1986; Айбулатов, 1990]. При этом максимальный вынос обусловлен развитием устойчивой циркуляции при установлении малоподвижных антициклонов над южными районами европейской территории России. Чаще всего данный тип циркуляции возникает в осенне-зимний период, когда интенсивность ветра в регионе достигает максимума. Существенный вклад в поступление осадочного материала на северный шельф Черного моря (около 2 млн. т в год) вносят кратковременные ветры со скоростью более 15 м/с, сопровождающиеся пыльными бурями.

Ранее было показано, что своеобразии седиментогенеза в соседнем Азовском море, как и в других внутриконтинентальных морях аридной зоны, проявляется в процессах седиментации за счёт постоянного эолового привноса терригенного материала с окружающей суши [Хрусталёв и др., 1988]. Особенно значительное влияние на характер осадконакопления оказывают пыльные бури. Специфичность природных условий питающих провинций нашла свое отражение и в минеральном составе эолового материала и донных отложений, а именно – в постоянном присутствии в эоловом материале доломита и палыгорскита (минералов-индика-

торов аридного климата). Геохимический процесс в Азовском море также своеобразен благодаря непосредственному участию золотого материала в формировании химического состава донных осадков.

В Черноморском регионе эпизодически отмечается вынос пылевого аэрозоля со стороны Ближнего Востока и Северной Африки [Суетин и др., 2008; Калининская, Суслин, 2016]. Такие выносы регулярно наблюдают в Южной Европе [De Angelis, Gaudichet, 1991; Israelevich et al., 2012]. Намного реже большое количество пылевого аэрозоля поступает на север европейской территории России [Шевченко и др., 2010].

Анализ спутниковых изображений говорит о том, что выносимая из Северной Африки пыль часто покрывает большие площади над Средиземным морем и в форме протяженных облаков распространяется до акватории Черного моря. Например, такие эпизоды были зарегистрированы 31 августа 2003 г., 21 августа 2006 г., 6 сентября 2015 г. [Суетин и др., 2008; Калининская, Суслин, 2016].

Анализ обратных семидневных траекторий переноса воздушных масс по данным модели NOAA Air Resources Laboratory (<http://www.arl.noaa.gov> [Draxler, Rolf, 2003]) показал, что 6 сентября 2015 г. в западную часть Черного моря поступал пылевой аэрозоль со стороны пустыни Сахара [Калинская, Суслин, 2016]. В этот день на станциях Galata Platform (Болгария) и Eforia (Румыния) сети AER-ONET (измерение основных оптических характеристик атмосферы) был выявлен незначительный рост содержания крупной взвеси в атмосфере.

В работе [Theodosi et al., 2013] показано, что атмосферная поставка многих химических элементов является основным источником их в южной части Черного моря. В седиментационной ловушке, стоявшей мористее Варны, в точке с координатами 43°01,812' с.ш., 29°28,498' в.д. на глубине 1930 м с октября 2007 г. по апрель 2009 г. более 50% литогенных частиц (минеральная пыль), Al, V, Cr, Fe, Mn, Cu, Pb и более 40% Cd и Ni поступило из атмосферы. Основная часть взвешенного стока реки Дунай – главного источника речного терригенного рассеянного осадочного вещества – оседает в её маргинальном фильтре [Лисицын, 1994; Guieu et al., 1998]. Значения потоков многих химических элементов, входящих в состав рассеянного осадочного вещества атмосферы, на поверхность Черного моря находятся в диапазонах значений, полученных в Средиземном море [Guerzoni et al., 1997; Heimbürger et al., 2010; Theodosi et al., 2013; Malaguti et al., 2015].

Выводы

Для распределения и состава рассеянного осадочного вещества в атмосфере над Черным морем и его побережьем характерна ярко выраженная сезонность.

Основными источниками рассеянного осадочного вещества, осаждающегося из атмосферы на поверхность Черного моря, является литогенный и биогенный

материал, поступающий со сравнительно близко расположенных участков его водосбора. Эпизодически происходит поступление в Черноморский регион сахарской пыли.

Рассеянное осадочное вещество атмосферы над Черным морем значительно обогащено Cd, Pb, Mo, Ni, V в результате антропогенного загрязнения.

За пределами маргинальных фильтров Дуная и других рек, впадающих в Черное море, эоловая поставка является основным механизмом поставки литогенных частиц и многих химических элементов, в первую очередь Al, V, Cr, Fe, Mn, Cu, Pb, Cd и Ni.