

УДК 550.462;551.510.42(262.54)

СУХИЕ И МОКРЫЕ АТМОСФЕРНЫЕ ВЫПАДЕНИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА НА ПОБЕРЕЖЬЕ И АКВАТОРИЮ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ АЗОВСКОГО МОРЯ

© 2016 г. В. В. Сорокина, В. Г. Соьер

Институт аридных зон Южного научного центра РАН, Ростов-на-Дону

e-mail: sorokina@ssc-ras.ru, soier@ssc-ras.ru

Поступила в редакцию 13.05.2014 г.

После доработки 11.12.2014 г.

Приведены новые данные о содержании органического углерода в эоловом материале и атмосферных осадках, поступающих на побережье и акваторию северо-восточной части Азовского моря. Пробы для химического анализа атмосферных выпадений отбирали в период 2006–2014 гг. Содержание взвешенного органического углерода в пробах эоловой пыли варьировало в пределах от 4 до 27%. Диапазон концентраций растворенного органического углерода в дождевой воде составлял 1.6–4.3, в снеге – 0.9–16.6 мгС/л, содержание взвешенного органического углерода в пробах снега изменялось от 2 до 43%. Интенсивность осаждения эоловой пыли уменьшалась от 178 до 33 мг/м² в сутки по мере удаления от источников пыли, при этом в ее составе увеличивалось относительное содержание органического вещества. Поток эолового органического углерода в весенне-летний период в пределах г. Ростова-на-Дону составлял 12–18, на побережье Таганрогского залива – 28–48, в акватории залива – 20–80 мгС/м² в сутки.

DOI: 10.7868/S0030157416040110

ВВЕДЕНИЕ

Воздушные и водные потоки являются главными путями переноса осадочного вещества с суши. Если речь идет о морской седиментации, основное внимание традиционно уделяется речному стоку. Вместе с тем в ряде работ указывается на значимость эолового фактора в процессах осадконакопления, формирования уровня накопления различных веществ в воде и подчеркивается важность изучения пространственной изменчивости переноса аэрозолей и баланса примесей [6–10, 21, 33–38, 40, 41, 43, 44 и др.]. Актуальным является изучение аэрозолей в береговой зоне и, особенно, над поверхностью морей и океанов.

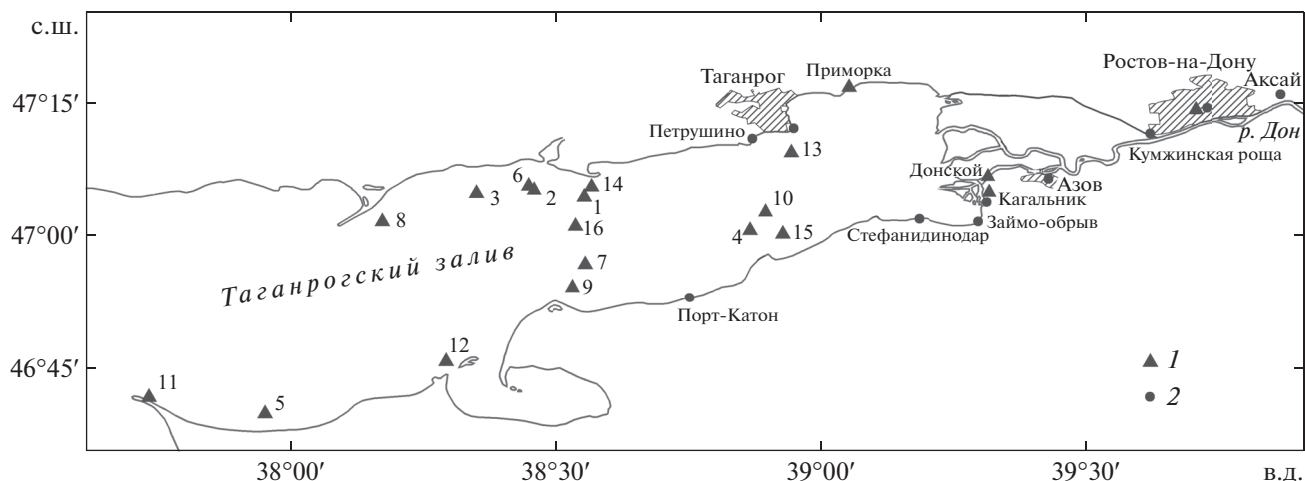
Эоловый перенос вещества имеет особое значение для континентальных морей семиаридной зоны, таких как Азовское и Северный Каспий, отличающихся небольшими глубинами и расположением на пути воздушных потоков из глубины континента. Источниками пылевого аэрозоля являются полупустынные и пустынные территории Калмыкии и Казахстана, откуда пыль переносится на большие расстояния. Ветровой эрозии также подвержены практически все сельскохозяйственные угодья Донецкой, Ростовской областей и Краснодарского края. Выдуванию верхнего слоя почвенного покрова способствуют частые сильные ветры восточной составляющей

преимущественно в зимне-весенний период. Несмотря на то, что пыльные бури в южном макро-регионе носят эпизодический характер, их выносы на морские акватории иногда намного превышают объемы твердого стока рек, продуктов разрушения пород берегов морей [30].

Значимость эолового фактора для процессов накопления донных осадков в Азовском море и их геохимии показана в работах [14, 31, 32, 34, 35]. Литературные источники содержат данные о химическом составе аэрозолей над акваторией Азовского моря, но при этом количественную оценку содержания органического углерода в эоловом материале удалось найти лишь в работе Александровой [2]. Вклад атмосферных выпадений до сих пор не учитывается в балансе углерода Азовского моря.

Между тем, многочисленные исследования, выполненные в последние годы, свидетельствуют о том, что органическое вещество является главным или одним из основных компонентов атмосферных аэрозолей в воздухе над морями и океанами [10, 17, 19, 37, 45 и др.], а эоловый транспорт углерода в системе суша–океан занимает по величине второе место после речного стока [18, 20].

Аэрозоли поступают в воздух и удаляются из него в форме сухих осадений, а также вместе с атмосферными осадками. “Сухие” и “мокрые”



Карта-схема отбора проб эоловых выпадений и атмосферных осадков. 1 – точки отбора проб эоловых выпадений, 2 – точки отбора проб атмосферных осадков.

выпадения позволяют количественно оценить роль атмосферы в круговороте органического вещества, в балансе органической составляющей природных вод.

Комплексные работы, выполняемые Южным научным центром Российской академии наук (ЮНЦ РАН) и Институтом аридных зон ЮНЦ РАН (ИАЗ ЮНЦ РАН) в последние годы, связаны с изучением закономерностей продуцирования и трансформации органического вещества в экосистеме Азовского моря. Эта работа включает в себя рассмотрение внешних потоков вещества в морскую экосистему, в частности, атмосферных выпадений, а также оценку их вклада в современный баланс углерода Азовского моря.

Целью настоящего исследования является количественная оценка органического углерода в составе “сухих” и “мокрых” атмосферных выпадений, расчет его потоков на побережье и акваторию северо-восточной части Азовского моря.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Отбор проб эоловых выпадений выполняли в 2009–2013 гг. в акватории Таганрогского залива Азовского моря на научно-исследовательских судах “Профессор Панов” (тип судна – Ярославец) и “Денеб” (тип судна – ПТР), на побережье Таганрогского залива (научно-экспедиционная база ЮНЦ РАН в селе Кагальник; стационар “Донской” в хуторе Донском; село Приморка), а также на территории ЮНЦ РАН в городе Ростов-на-Дону (40 км от Таганрогского залива) (рисунок).

В современных исследованиях для отбора проб эоловых частиц используют в основном два метода: пассивный сбор аэрозольных выпадений (твердых и жидких) на планшеты и активное оса-

ждение пыли-аэрозольных частиц на фильтры путем прокачки сквозь них воздуха с помощью аспирационных установок. Считается, что планшетные сборы сухих выпадений воспроизводят их реальное поступление на поверхность, тогда как количественные характеристики аэрозольной нагрузки, полученные методом активного сбора, отражают потенциальные запасы дисперсного вещества в приземном слое воздуха, которое не всегда и не полностью выпадает на поверхность. Очевидно, что изучение динамики поступления органического углерода и других элементов на поверхность с помощью метода пассивного сбора сухих аэрозолей более информативно.

В настоящем исследовании для сбора “сухих” атмосферных выпадений использовали плоские емкости (своеобразные ловушки). Пылеуловитель представляет собой открытый прямоугольный пластиковый контейнер площадью 0.0297 м², выложенный в 2 слоя стеклянными шариками диаметром 14 мм (256 шт.), аналогично, например, [39, 42]. Использование наполнителя (стеклянные шарики), выложенного на дно ловушки, во-первых, препятствует случайному выдуванию осевшей в контейнер пыли, во-вторых, исключает возможность трансформации органического вещества при экспонировании (в отличие от использования ловушек с водой).

В морских рейсах пылеуловитель устанавливали в наиболее высоком месте на судне (на крыше рулевой рубки НИС “Профессор Панов”, в носовой части НИС “Денеб”), во время его стоянок в ночное время или на суточных станциях (табл. 1). На суше были организованы стационарные площадки, где устанавливали контейнер на высоте 2.5–3 м от земной поверхности. Время экспонирования на суше составляло от 1.90 до 30 суток, над водной поверхностью – от 1.46 до 3.26 суток.

Таблица 1. Условия отбора комплексных проб эоловых выпадений и пробы атмосферных осадков в Таганрогском заливе

№ станции	Координаты станции		Научно-исследовательское судно	Период экспозиции	
	широта (N)	долгота (E)		начало	конец
1	47°04'44"	38°33'14"	“Профессор Панов”	18.06.2010 (21:00)	19.06.2010 (7:30)
2	47°05'24"	38°28'15"	“Профессор Панов”	19.06.2010 (21:00)	20.06.2010 (7:40)
3	47°05'09"	38°21'04"	“Профессор Панов”	20.06.2010 (16:00)	21.06.2010 (6:30)
4	47°00'59"	38°52'02"	“Профессор Панов”	12.07.2010 (20:00)	13.07.2010 (7:15)
5	46°40'12"	37°57'11"	“Профессор Панов”	13.07.2010 (19:30)	14.07.2010 (1:35)
6	47°06'05"	38°26'58"	“Профессор Панов”	14.07.2010 (22:00)	15.07.2010 (9:20)
7	46°57'07"	38°33'20"	“Профессор Панов”	15.07.2010 (19:40)	16.07.2010 (9:30)
8	47°01'59"	38°10'26"	“Профессор Панов”	20.06.2011 (17:00)	21.06.2011 (1:45)
8*	47°01'59"	38°10'26"	“Профессор Панов”	21.06.2011 (2:00)	21.06.2011 (8:00)
9	46°54'35"	38°31'48"	“Профессор Панов”	22.06.2011 (14:00)	23.06.2011 (12:15)
10	47°02'26"	38°53'44"	“Профессор Панов”	23.06.2011 (15:00)	24.06.2011 (11:20)
11	46°42'04"	37°44'04"	“Профессор Панов”	22.05.12 (21:50)	23.05.2012 (10:40)
12	46°46'05"	38°17'35"	“Профессор Панов”	23.05.2012 (21:55)	24.05.2012 (10:35)
13	47°09'46"	38°56'42"	“Профессор Панов”	24.05.2012 (20:15)	25.05.2012 (10:10)
14	47°05'53"	38°34'03"	“Профессор Панов”	20.06.2012 (21:00)	21.06.2012 (8:00)
15	47°00'34"	38°45'55"	“Денеб”	03.07.2013 (16:45)	04.07.2013 (10:40)
16	47°01'14"	38°31'26"	“Денеб”	04.07.2013 (18:35)	05.07.2013 (11:45)

Примечание. 8* – проба атмосферных осадков.

Отбор проб осуществляли весной и летом, исключая периоды дождевых выпадений. В случае, когда количества собранной пыли было недостаточно для проведения аналитических работ или в случае выпадения атмосферных осадков, контейнер снимали, консервировали и через некоторое время выставляли повторно. В морских рейсах продолжали отбор проб в этот же контейнер.

После экспонирования контейнер с пылью анализировали в Междисциплинарной аналитической лаборатории ЮНЦ РАН. Процедура обработки проб: в контейнер с собранной пылью добавляли определенный объем бидистиллированной воды и обрабатывали ультразвуком в течение 5–10 мин. Ультразвуковая обработка позволяла более полно извлечь вещество, попавшее в ловушку (ориентировочно на 5–10%) [29]. В случае же снятия пыли с шариков без использования воды (сухой щеткой) не учитывается 10–15% пыли [42].

Полученную пробу воды фильтровали через стекловолнистый фильтр MGF (Sartorius) с порами диаметром 0.7 мкм. Фильтр высушивали при температуре 60°C до постоянного веса и рассчитывали привес пыли на фильтре. Органическое вещество, выделенное на стекловолнистых фильтрах, определяли способом мокрого сжигания с бихроматом калия при нагревании в присутствии серноокислого серебра. Концентрацию взвешенного органического углерода (ВОУ)

определяли путем умножения полученного значения бихроматной окисляемости на коэффициент 0.375 в соответствии с [1].

В оставшейся после фильтрования воде определяли содержание растворенного органического углерода (РОУ) с использованием анализатора multi N/C 3100 фирмы Analytik Jena. Использовали метод высокотемпературного сжигания (850°C, катализатор – оксид церия), детекторы – бездисперсионный инфракрасный в соответствии с “Руководством по определению общего органического углерода (ООУ)” (Международный стандарт ИСО 8245-87).

Пробы дождя отбирали в городской черте (г. Ростов-на-Дону, г. Таганрог) в 2006–2011 гг. Одну пробу удалось получить в период рейса НИС “Профессор Панов” в Таганрогском заливе в 2011 г. (точка отбора пробы № 8 в соответствии с рисунком). Атмосферные осадки собирали в чистые пластиковые емкости в течение всего времени их выпадения. В предварительно профильтрованных пробах дождевой воды определяли РОУ с использованием анализатора multi N/C 3100. Взвешенное органическое вещество не определяли.

Пробы снега отбирали в период 2007–2014 гг. с поверхности льда на берегу Таганрогского залива в селах: Стефанидинодар, Порт-Катон, Займо-Обрыв, Петрушино; а также с поверхности льда рукавов и протоков дельты Дона в с. Кагальник

(протоки Свиной, Кривой), хут. Донской (рукав Старый Дон), в Кумжинской роше (юго-западная часть г. Ростов-на-Дону, на стрелке мыса, образованного ответвлением р. Мертвый Донец от р. Дон) (рисунок); в г. Ростов-на-Дону, г. Азов, г. Аксай. Воду после растопления снега фильтровали через стекловолоконные фильтры MGF (Sartorius). Последующая процедура определения общей взвеси, ВОУ и РОУ аналогична описанной выше.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Проведенные исследования позволяют количественно оценить потоки взвешенного вещества и органического углерода из атмосферы на земную и водную поверхность в регионе с недостаточным увлажнением, проследить изменчивость этих потоков в пространстве на фоне преобладающего над исследуемой территорией в течение года восточного переноса воздушных масс.

“Сухие” атмосферные выпадения. В центральной части г. Ростов-на-Дону (территория ЮНЦ РАН) поток эолового вещества составил в среднем 164 мг/м^2 в сутки (табл. 2). Интенсивность осаждения эоловой пыли на побережье Таганрогского залива (с. Кагальник, с. Приморка, хут. Донской) варьировала в пределах $82\text{--}177 \text{ мг/м}^2$ в сутки, непосредственно в Таганрогском заливе — $33\text{--}138 \text{ мг/м}^2$ в сутки. Следует отметить, что минимальное значение (33 мг/м^2 в сутки) в приведенном диапазоне величин связано со сбором аэрозолей после прохождения ливневых осадков, а максимальное (138 мг/м^2 в сутки) — со сбором аэрозолей во время стоянки НИС “Профессор Панов” вблизи г. Таганрог, крупного промышленного центра и морского порта.

Для представления средних значений потока эолового материала использовали медиану распределения величин, которая составила для побережья Таганрогского залива 106 , а для его акватории — 98 мг/м^2 в сутки.

В распределении эоловых потоков органического углерода наблюдалась прямо противоположная картина. Наибольшими величинами потока ВОУ характеризовалась акватория Таганрогского залива, в среднем — 22 , при колебаниях от 8 до 30 мгС/м^2 в сутки. На побережье поток ВОУ изменялся в пределах $13\text{--}22$, а среднее медианное значение составило 18 мгС/м^2 в сутки. В г. Ростов-на-Дону величина потока взвешенного органического углерода из атмосферы на земную поверхность уменьшилась до $6\text{--}9 \text{ мгС/м}^2$ в сутки (табл. 2).

Несоответствие в рассчитанных потоках атмосферной пыли и взвешенного органического углерода связаны с неодинаковым содержанием ВОУ

в пробах, собранных в городских районах и относительно менее запыленных районах побережья и акватории Таганрогского залива. Наименьшее содержание органического углерода в пыли отмечено в городской черте, в процентном отношении порядка $4\text{--}5\%$ сухой массы пробы. По мере приближения к морю содержание ВОУ в пробах увеличилось до $9\text{--}27\%$. На побережье содержание ВОУ в среднем составило 14 , а над акваторией залива — 25% (табл. 2).

Таким образом, полученное пространственное распределение потоков вещества из атмосферы на земную поверхность подтверждает, что по мере удаления от источников пыли ее содержание в воздухе уменьшается и, вместе с тем, в ее составе увеличивается доля органического вещества.

При обработке собранных сухих проб пыли бидистиллированной водой было обнаружено, что в литре растворяется порядка $3\text{--}4 \text{ мг}$ органического углерода (табл. 2). Если выполнить пересчет концентрации РОУ (мгС/л) в единицы массы (мг в пробе), получаем, что растворяется в среднем столько же органического углерода, сколько его остается во взвешенном состоянии. В таком случае, при расчетах содержания и интенсивности поступления органического вещества на поверхность суши и водоема необходимо учесть растворившийся в период обработки проб углерод. Общее (валовое) содержание органического углерода получили путем сложения масс ВОУ и РОУ в отдельно взятой пробе. Затем вычислили поток валового органического углерода. Этот поток составил в среднем для города Ростов-на-Дону — 15 , для побережья Таганрогского залива — 41 , а для его акватории — 64 мгС/м^2 в сутки в весенне-летний период. Данные величины больше потока взвешенного органического углерода в среднем в два раза для города и побережья Таганрогского залива и в три раза для акватории залива.

Исследование содержания ВОУ в пыли и РОУ, образовавшегося в результате обработки проб бидистиллированной водой, подтверждает следующие факты. На большее расстояние переносятся частицы, обладающие меньшей массой и меньшей плотностью, к которым относятся органические частицы. Кроме того, на большее расстояние переносятся более мелкие частицы, которые обладают большей удельной поверхностью, что способствует переносу органики в составе аэрозолей.

При проведении балансовых оценок и рассмотрении гидрохимических вопросов нужно учитывать, что при попадании эолового материала в морскую воду в естественных условиях так же, как и в проведенных лабораторных исследованиях с использованием бидистиллированной воды, происходит растворение определенной ча-

Таблица 2. Количественная характеристика эоловых выпадений на исследуемой территории

Место отбора проб	Экспозиция (сутки)	Привес пыли на фильтре (нерастворимое вещество), мг	Поток пыли, мг/м ² /сут	ВОУ		Поток ВОУ (нерастворимый органический углерод), мг/м ² /сут	РОУ		Поток органического углерода (ВОУ + РОУ), мг/м ² /сут	
				мг	% сухой массы		мгС/л	мг в пробе		
г. Ростов-на-Дону, территория ЮНЦ РАН с. Кагальник, научно-экспедиционная база ЮНЦ РАН с. Приморка хут. Донской, стационар "Донской" Комплексная проба (станции 1–7) ¹ Комплексная проба (станции 8–10) ¹ Комплексная проба (станции 11–14) ¹ Комплексные пробы, параллельные определения (станции 15–16) ¹	30.00	158.3	178	8.00	5	9	8.1	8.10	18	
	22.90	102.9	151	4.10	4	6	4.4	3.95	12	
	3.87	20.4	177	2.31	11	20	2.1	2.94	46	
	4.65	14.6	106	2.10	14	15	3.5	2.97	37	
	7.97	31.3	132	2.97	9	13	3.4	3.68	28	
	1.90	4.6	82	1.23	27	22	2.4	1.50	48	
	14.00	35.1	84	7.60	22	18	—	—	—	
	3.26	8.3	86	1.15	14	12	4.6	6.64	80	
	2.14	2.1	33	0.53	25	8	1.9	0.77	20	
	2.10	8.6	138	1.35	16	22	2.7	2.19	57	
	1.46	4.9	113	1.30	27	30	3.4	1.52	65	
	1.46	4.8	111	1.20	25	28	3.5	1.58	64	
	Среднее медианное значение									
	г. Ростов-на-Дону			164		5	8	6.2		15
Побережье Таганрогского залива			106		14	18	2.9		41	
Акватория Таганрогского залива			98*		25	22	3.4		64	
Среднее арифметическое значение										
г. Ростов-на-Дону			164		5	8	6.2		15	
Побережье Таганрогского залива			116		17	18	2.8		40	
Акватория Таганрогского залива			96		21	20	3.2		57	
Стандартное отклонение										
г. Ростов-на-Дону			18.6		0.8	2			4	
Побережье Таганрогского залива			39.8		7.3	4			9	
Акватория Таганрогского залива			39.8		6.0	10			22	

Примечание. ¹Условия отбора комплексных проб эоловых выпадений в Таганрогском заливе представлены в табл. 1.* Вычислено без учета значения 138 мг/м²/сут.

сти органических веществ. Это утверждение требует постановки специальных экспериментов с использованием морской воды.

“Мокрые” атмосферные выпадения. В теплое время года анализировали жидкие атмосферные осадки (дождевую воду), в зимний период – снежный покров (снег лежалый и свежесвыпавший).

По результатам определений, выполненных в Междисциплинарной аналитической лаборатории ЮНЦ РАН в 2006–2013 гг., диапазон концентраций растворенного органического углерода в дождевой воде составляет 1.6–4.3 мгС/л. Пробы, отобранные в городской черте, иногда имеют повышенные концентрации, например, дождь промышленной зоны г. Таганрог – 35.0, центральной части г. Ростов-на-Дону – 16.3–19.4 мгС/л. На акватории Таганрогского залива содержание РОУ в дождевой воде – 1.8 мгС/л (табл. 3).

Минимальные концентрации РОУ обнаружены в снеге с. Кагальник – 0.9–1.3, в свежесвыпавшем снеге – 2.6 мгС/л (табл. 4). Для континентальных условий это невысокие концентрации. В среднем концентрация РОУ в зимних атмосферных осадках в селах и хуторах побережья Таганрогского залива составила 3.1 мгС/л. Только одна проба лежалого, значительно запыленного снега (содержание взвешенного вещества – 157.3 мг/л) имела высокую концентрацию РОУ – 11.1 мгС/л.

В пределах г. Ростов-на-Дону величина РОУ снега изменялась от 1.8 до 16.6, причем свежесвыпавший снег содержал 9.0 мгС/л (табл. 4).

Снежный покров является хорошим аккумулятором осадочного вещества, поступающего из атмосферы на земную поверхность. Анализ проб талой воды позволил определить концентрацию общей взвеси и взвешенного органического углерода.

Концентрация общей взвеси в снеге зависит от места отбора проб и времени, в течение которого накапливался снежный покров. Малая концентрация общей взвеси обнаружена в свежесвыпавшем снеге: для города ее величина составила 9.3, для сельской местности – 3.1–4.2 мг/л (табл. 4). При этом содержание ВОУ в этих пробах высокое, 19–34% общей взвеси. Большая концентрация взвешенного вещества характерна для проб снега, отобранных в городе или вблизи автомобильных дорог, диапазон ее изменений – 16.8–174.4, а средняя величина – порядка 25 мг/л. Содержание ВОУ в этих пробах варьировало от 2 до 19%, уменьшаясь в пробах, содержащих больше общей взвеси.

В сельской местности и вдали от источников пыли концентрация взвешенного вещества в снеге меньше. Она изменялась в пределах 0.8–30.9 (табл. 4) и в среднем составила 12 мг/л. Содержание ВОУ в пробах снега варьировало в широких

Таблица 3. Концентрация растворенного органического углерода в дождевой воде на исследуемой территории

Место отбора пробы	Дата отбора пробы	РОУ, мгС/л
г. Ростов-на-Дону	14.11.2006	4.1
»	14.11.2006	2.2
»	30.01.2007	4.3
»	27.11.2009	16.3
»	17.08.2011	19.4
»	09.09.2011	1.6
г. Таганрог, промышленная зона	26.01.2007	35.0
Таганрогский залив, (станция № 8) ¹	21.06.2011	1.8

Примечание. ¹Условия отбора пробы атмосферных осадков в Таганрогском заливе представлены в табл. 1.

пределах от 2 до 43%, а медиана распределений его значений оказалась равной 14%.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные в настоящей работе результаты согласуются с данными независимых исследований.

Так, в работе [16] при проведении зимних геоэкологических исследований в 1995–2000 гг. в г. Ростов-на-Дону, была определена пылевая нагрузка, которая составила в среднем 180 мг/м² в сутки (масса нерастворимой части пыли) при колебаниях от 40 (в наименее запыленных районах) до 620 мг/м² в сутки (на пересечении крупных автомобильных дорог). Содержание органического вещества (удвоенное содержание $C_{орг}$) в пыли г. Ростов-на-Дону изменялось от 6 до 39% и в среднем составило 14% [16]. Эти данные сопоставимы с нашими оценками потока золы пыли (151–178 мг/м² в сутки) и величинами ВОУ (4–5% сухой массы).

В акватории Азовского моря, по данным работы [34], интенсивность осаждения аэрозолей может колебаться от 50 до 2520 мг/м² в сутки. Она в среднем составляет 100 мг/м² в сутки в центральной части Таганрогского залива при низкой влажности и скорости ветра не более 5 м/с [34]. По нашим оценкам интенсивность осаждения золы материала составляет в Таганрогском заливе в среднем – 98, в районе дельты р. Дон – 82–177 мг/м² в сутки. Принимая во внимание все данные можно в среднем оценить диапазон потоков золы материала на большей части Таганрогского залива как 50–200 мг/м² в сутки, при этом взвешенный органический углерод составляет 14–27% от общей величины потока в весенне-летний период.

Таблица 4. Концентрация взвешенного вещества, взвешенного и растворенного органического углерода в снеге на исследуемой территории

Место отбора пробы	Дата отбора пробы	Взвесь общая, мг/л	ВОУ, мгС/л	ВОУ, % общей взвеси	РОУ, мгС/л
г. Ростов-на-Дону	05.02.2007	—	—	—	16.6
»	24.12.2009	—	—	—	9.0
»	24.12.2009	—	—	—	9.2
»	02.02.2014	28.6	5.6	19	—
»	22.01.2010	—	—	—	15.0
»	25.01.2011	9.3	2.8	30	9.0
»	02.02.2011	40.3	4.2	11	1.8
г. Азов	01.02.2014	20.2	3.5	17	—
»	03.02.2014	0.8	0.3	43	—
г. Аксай, пляж	02.02.2014	16.8	2.3	13	—
Кумжинская роща	02.02.2014	45.0	8.5	19	—
с. Кагальник	07.02.2007	—	—	—	1.6
»	07.02.2007	—	—	—	1.3
»	27.01.2011	4.1	0.8	19	0.9
»	05.02.2013	3.1	1.1	34	2.6
»	19.02.2013	157.3	10.2	6	11.1
»	28.01.2014	4.2	0.8	19	—
с. Кагальник (проток Кривой)	30.01.2014	23.8	3.3	14	—
с. Кагальник	31.01.2014	11.8	1.7	15	—
»	31.01.2014	19.0	2.4	13	—
хут. Донской	15.02.2012	24.4	3.7	15	2.6
»	15.02.2012	—	—	—	2.3
с. Стефанинодар	28.01.2010	174.4	3.2	2	5.1
»	28.01.2010	—	—	—	4.7
с. Порт-Катон	28.01.2010	16.3	0.6	4	2.0
с. Петрушино	29.01.2010	30.9	2.1	7	5.4
»	29.01.2010	—	—	—	5.4
с. Займо-Обрыв	03.02.2014	6.3	0.4	6	—

Для сравнения, интенсивность выпадения эоловой пыли на суше в семиаридных районах Аргентины (районы, окружающие Пампу) составила 85, Северной Америки — 30–80, Австралии — 50–280 мг/м² в сутки, а среднее содержание органического вещества в пробах сухих атмосферных выпадений Австралии — 14% [39].

В работе [22] определена фоновая пылевая нагрузка для континентальных территорий (10–20 мг/м² в сутки). Для Ростовской области за фоновую величину принята пылевая нагрузка в Шолоховском районе, вдали от крупных промышленных центров, зимой она составляла 13–18, в теплый сухой период — 26–40 мг/м² в сутки, при содержании взвешенного органического вещества в пробах порядка 50% [16]. В настоящем исследовании минимальная величина потока эоло-

вой пыли на акваторию Таганрогского залива после выпадения атмосферных осадков составила 33 мг/м² в сутки, что позволяет принять эту оценку в качестве наименьшей для акватории в весенне-летнее время. При этом содержание ВОУ в эоловом материале составило 25% сухой массы.

По имеющимся в литературе оценкам, содержание органического углерода в эоловых выпадениях может варьировать в диапазоне 2.39–50% [10, 15, 17, 18, 25, 36–38, 45]. В наиболее близко расположенном от Азовского моря Среднем Каспии содержание органического вещества (удвоенное содержание $C_{орг}$) в аэрозолях в приводном слое в осенне-зимнее время изменялось от 2.14 до 30.86% [9].

Специальных работ по оценке органического углерода в эоловом материале над акваторией

Азовского моря ранее не проводилось. По данным [2], содержание $C_{\text{орг}}$ аллохтонного происхождения в эоловой взвеси, собранной с поверхности льда в разных районах моря после пыльной бури 1969 г., составило 2.6%. Данная оценка близка по величине к содержанию органического углерода в верхнем слое почв на территории, окружающей Азовское море. Непосредственно в районе исследования распространены черноземы обыкновенные. Верхний пахотный горизонт таких почв содержит обычно 1.8–2.4% органического углерода [3, 5]. На севере Ростовской области распространены черноземы южные, на востоке – каштановые солонцеватые почвы (1.3–1.5% органического углерода в поверхностном слое) [3].

В спокойных метеорологических условиях, по нашим оценкам, в приводном слое в весенне-летний период в составе взвешенных в воздухе частиц доля органического углерода может составлять 25% и более, так как содержание органического вещества увеличивается с понижением общей концентрации аэрозолей. Концентрация же аэрозолей в большой степени зависит от содержания терригенного минерального вещества в воздухе, что отмечается в наиболее запыленных районах.

С точки зрения гидрохимии наряду с определением поступления из атмосферы пыли на поверхность континента важным является определение поступления количества и состава растворимой части эоловых выпадений и осадков отдельно на поверхность морей и прочих водоемов [12]. По нашим оценкам, учет растворимой части органических соединений, присутствующих в пробах эолового материала, увеличивает поток органического углерода из атмосферы на водную поверхность Азовского моря как минимум в 2 раза.

Данных о концентрации растворенного органического углерода в атмосферных осадках на водосборе Азовского моря очень мало. Береговые станции Гидрометслужбы контролируют объем выпавших осадков и состав главных ионов и не имеют сведений об органических соединениях. Поэтому полученные в настоящем исследовании оценки содержания растворенной и взвешенной органики (органического углерода) в атмосферных осадках имеют большое значение для определения эколого-геохимического состояния бассейна Нижнего Дона и Азовского моря.

По нашим данным концентрация РОУ на исследуемой территории в большинстве случаев может изменяться в дождевой воде от 1.6 до 4.3, в снеге – от 0.9 до 5.4 мгС/л. Варьирование концентрации РОУ может происходить в соответствии с количеством находящегося во взвешенном состоянии в подоблачном слое частиц почвенной пыли, примесей промышленного происхождения,

частиц удобрений, ядер конденсации. Как показали исследования, в промышленных зонах городов она может увеличиться до 25–35 мгС/л. Повышенными концентрациями РОУ отличаются пробы свежеснежавшего снега (на побережье Таганрогского залива – 2.6, в городе Ростове-на-Дону – 9.0 мгС/л), где содержание ВОУ также значительное (19–34% общей взвеси). С увеличением запыленности проб снега в них уменьшается доля ВОУ (2–19% общей взвеси).

По литературным данным, атмосферные воды содержат в среднем 1–6 мгС/л [26]. В работах Гидрохимического института, например [13, 23, 24, 27 и др.], приведены значения содержания органического вещества в единичных пробах атмосферных осадков, отобранных в 1965–1975 гг. на территории степной зоны исследуемого региона (города Новочеркасск, Сальск). Диапазон изменений содержания органического углерода в дождевых водах составил 1–24 мгС/л, в снежном покрове – 1.5–7.5 мгС/л. Содержание валового органического углерода определяли методами сухого сжигания в расплавленной селитре, перманганатной и бихроматной окисляемости [26], а также фотохимическим методом [28].

Таким образом, можно отметить, что средние уровни концентрации органического углерода терригенного, морского и антропогенного происхождения не выходят за рамки имеющихся литературных данных о его содержании в атмосфере исследуемого региона и других территорий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали значительное содержание органического углерода в эоловом материале и атмосферных осадках, выпадающих на побережье и акваторию Азовского моря. Содержание взвешенного органического углерода в пробах эоловой пыли в весенне-летнее время изменялось от 4 до 27%, в пробах снега – от 2 до 43%.

Пробы, отобранные на суше в пределах городов, отличались большим количеством выпавшей пыли (151–178 мг/м² в сутки) и содержали меньше органического углерода (4–5% сухой массы) по сравнению с пробами, отобранными на побережье и в акватории Таганрогского залива. По мере продвижения от источников пыли на суше в открытую часть залива происходило уменьшение пылевых выпадений (до 33 мг/м² в сутки) и накопление ВОУ в эоловом материале (до 27% сухой массы), что полностью согласуется с общей закономерностью (циркумконтинентальная зональность).

Полученные величины содержания ВОУ в эоловой пыли (в среднем над акваторией Таганрогского залива – 25%) почти в 10 раз больше ранее

определенной величины (2.6%) [2] и во столько же раз больше содержания органического углерода в почвах прилегающих территорий (1.3–2.4%), что говорит о преобладании в составе эоловой взвеси материала биогенного происхождения.

Использованная методика позволила определить часть органического углерода, растворившегося в бидистиллированной воде при обработке проб эоловой пыли. Получено, что растворяется в среднем столько же органического углерода, сколько его остается во взвешенном состоянии. С учетом этого поток органического углерода (в составе потока сухих атмосферных выпадений) в пределах г. Ростов-на-Дону составил 12–18, на побережье Таганрогского залива – 28–48, в акватории Таганрогского залива – 20–80 мгС/м² в сутки.

Дополнительным источником органического вещества в Азовском море являются атмосферные осадки. Диапазон концентраций растворенного органического углерода в дождевых водах составил 1.6–4.3, в снеге – 0.9–16.6 мгС/л.

Расчеты баланса углерода в Азовском море [4, 11] не учитывают вклад атмосферных выпадений. Роль атмосферы в поставке органических веществ в Азовское море не оценена. По предварительным расчетам она сопоставима со стоком рек Дон и Кубань. На основании полученных результатов следует пересмотреть баланс углерода в Азовском море с учетом выпадений из атмосферы.

Результаты работы следует учитывать при рассмотрении многих вопросов геохимии седиментогенеза и функционирования экосистемы моря, так как аэрозоли участвуют в переносе большого числа химических веществ (радионуклидов, загрязняющих примесей); многие микроэлементы мигрируют в виде органоминеральных комплексов, в том числе в составе аэрозолей.

Авторы благодарят за помощь в сборе и обработке проб Е.П. Пономаренко, С.В. Кумпан, В.В. Поважного.

Работа выполнена в рамках Государственного задания по теме “Современное состояние и многолетняя изменчивость прибрежных экосистем южных морей России” (№ гос. регистрации 01201363187), при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 14-05-31322, 15-05-08547).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алекин О.А., Семенов А.Д., Скопинцев Б.А.* Руководство по химическому анализу вод суши. Л.: Гидрометеиздат, 1973. 268 с.
2. *Александрова З.В.* Органическое вещество в донных осадках Азовского моря // Изв. СКНЦ ВШ. Естественные науки. 1975. № 1. С. 77–81.
3. *Безуглова О.С.* Гумусное состояние почв юга России. Ростов-на-Дону: Изд. СКНЦ ВШ, 2001. 228 с.
4. *Дацко В.Г.* Органическое вещество в водах южных морей СССР. М.: Изд. АН СССР, 1959. 271 с.
5. *Ильина Л.П.* Качественный состав гумуса локально переувлажненных почв склонов Нижнего Дона // Вестник ЮНЦ РАН. 2006. Т. 2. № 2. С. 68–74.
6. *Кловиткин А.А., Лукашин В.Н., Новигатский А.Н. и др.* Минеральные аэрозоли, их концентрации, состав и потоки на океанскую поверхность // Океанология. 2004. Т. 44. № 5. С. 756–767.
7. *Лисицын А.П.* Процессы океанской седиментации: литология и геохимия. М.: Наука, 1978. 392 с.
8. *Лисицын А.П.* Аридная седиментация в Мировом океане. Рассеянное осадочное вещество атмосферы // Геология и геофизика. 2011. Т. 52. № 10. С. 1398–1439.
9. *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.
10. *Лукашин В.Н., Шевченко В.П., Лисицын А.П. и др.* Распределение, вещественный и химический состав аэрозолей над западной частью Тихого океана // Океанология. 1996. Т. 36. № 2. С. 288–298.
11. *Максимова М.П.* Сравнительная гидрохимия морей // Новые идеи в океанологии. Т. 1: Физика. Химия. Биология. / Отв. ред. Виноградов М.Е., Лаппо С.С. М.: Наука, 2004. С. 168–189.
12. *Матвеев А.А., Башмакова О.И.* Вынос из атмосферы растворенных веществ на поверхность малых водоемов // Гидрохим. материалы. Л.: Гидрометеиздат, 1968. Т. 44. С. 5–15.
13. *Матвеев А.А., Ткачева В.И.* Содержание органического вещества в атмосферных осадках некоторых пунктов Северного Кавказа и Крыма и поступление его на поверхность Земли // Гидрохим. материалы. Л.: Гидрометеиздат, 1978. Т. 71. С. 3–7.
14. *Панов Д.Г., Малик С.А., Спичак М.К.* О некоторых последствиях пыльной бури 1960 года в Азовском море // Автофер. научно-исслед. работ Ростовского гос. ун-та за 1960. Ростов-на-Дону, 1961. С. 139–140.
15. *Пересыпкин В.И., Лукашин В.Н.* Лигнин в аэрозолях и донных осадках тропической части Атлантического океана // Океанология. 2001. Т. 41. № 1. С. 121–128.
16. *Приваленко В.В., Безуглова О.С.* Экологические проблемы антропогенных ландшафтов Ростовской области. Т. 1. Экология Ростова-на-Дону. Ростов-на-Дону: Изд-во СКНЦ ВШ, 2003. 290 с.
17. *Романкевич Е.А.* Геохимия органического вещества в океане. М.: Наука, 1977. 256 с.
18. *Романкевич Е.А., Ветров А.А.* Цикл углерода в арктических морях России. М.: Наука, 2001. 302 с.
19. *Романкевич Е.А., Ветров А.А., Виноградов М.Е. и др.* Компоненты цикла углерода в арктических морях России: Потоки углерода с суши, углерод в донных осадках, элементы баланса // Океанология. 2000. Т. 40. № 3. С. 363–372.
20. *Романкевич Е.А., Ветров А.А., Пересыпкин В.И.* Цикл углерода в современном океане и актуальные проблемы биогеохимии // Океанология на старте 21-го века / Ред. Верещака А.Л. М.: Наука, 2008. С. 78–107.
21. *Савенко В.С.* Роль эолового терригенного материала в осадконакоплении // Литология и полезные ископаемые. 1988. № 1. С. 29–40.

22. Сагт Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П. и др. Геохимия окружающей среды. М.: Недра, 1990. 335 с.
23. Семенов А.Д., Немцева Л.И., Кишкинова Т.С. и др. О содержании отдельных групп органических веществ в атмосферных осадках // Гидрохим. материалы. Л.: Гидрометеиздат, 1966. Т. 42. С. 17–21.
24. Семенов А.Д., Немцева Л.И., Кишкинова Т.С. и др. Об органических веществах атмосферных осадков // Докл. АН СССР. 1967. Т. 173. № 5. С. 1185–1187.
25. Серова В.В., Горбунова З.Н. Минеральный состав почв, аэрозолей, взвешенного вещества и донных осадков устьевого части реки Лены и моря Лаптевых // Океанология. 1997. Т. 37. № 1. С. 131–135.
26. Скопинцев Б.А. Некоторые аспекты современного изучения органического вещества природных вод // Гидрохим. материалы. Л.: Гидрометеиздат, 1971. Т. 56. С. 74–83.
27. Скопинцев Б.А., Бакулина А.Г., Мельникова Н.И. Валовой органический углерод в атмосферных осадках // Гидрохим. материалы. Л.: Гидрометеиздат, 1971. Т. 56. С. 3–10.
28. Соьер В.Г., Семенов А.Д. Фотохимический метод определения органического углерода // Гидрохим. материалы. Л.: Гидрометеиздат, 1971. Т. 56. С. 111–120.
29. Сорокина В.В., Пономаренко Е.П., Соьер В.Г. Методика определения органического вещества сухих эоловых выпадений на территориях с семиаридным климатом // Вестник южного научного центра РАН. 2010. Т. 6. № 4. С. 57–60.
30. Хрусталеv Ю.П. Закономерности осадконакопления во внутриконтинентальных морях аридной зоны. Л.: Наука, 1989. 261 с.
31. Хрусталеv Ю.П. Основные проблемы геохимии седиментогенеза в Азовском море. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 1999. 247 с.
32. Хрусталеv Ю.П., Грудинова Л.Я., Серова В.В. и др. Роль эолового материала в морском седиментогенезе аридной зоны (на примере Азовского моря) // Литология и полезные ископаемые. 1988. № 2. С. 55–64.
33. Хрусталеv Ю.П., Денисов В.И., Шевченко В.П. Поставка аэрозольного материала на шельф Черного моря // Океанология. 2002. Т. 42. № 1. С. 139–142.
34. Хрусталеv Ю.П., Ивлиева О.В. Проблемы антропогенной морской седиментологии (на примере Азовского моря). Ростов-на-Дону: Гефест, 1999. 196 с.
35. Хрусталеv Ю.П., Федюнина В.И. Роль эолового фактора в современном осадконакоплении Азовского моря // Докл. АН СССР. Т. 224. 1975. № 2. С. 434–436.
36. Шевченко В.П. Влияние аэрозолей на среду и морское осадконакопление в Арктике. М.: Наука, 2006. 226 с.
37. Шевченко В.П., Лисицын А.П., Купцов В.М. и др. Состав аэрозолей в приземном слое атмосферы над морями западного сектора Российской Арктики // Океанология. 1999. Т. 39. № 1. С. 142–151.
38. Шевченко В.П., Штайн Р., Виноградова А.А. и др. Элементный состав аэрозолей в приземном слое атмосферы над морем Лаптевых в июле–сентябре 1995 г. // Океанология. 2004. Т. 44. № 4. С. 616–624.
39. Cattle S.R., McTainsh G.H., Elias S. Aeolian dust deposition rates, particle-sizes and contributions to soils along a transect in semi-arid New South Wales, Australia // Sedimentology. 2009. V. 56. № 3. P. 765–783.
40. Duce R.A., Liss P.S., Merrill J.T. et al. The atmospheric input of trace species to the World ocean // Global Biogeochem. Cycles. 1991. V. 5. № 3. P. 193–259.
41. Guieu C., Martin J.-M., Tomas A.J., Elbaz-Poulichet F. Atmospheric versus river inputs of metals to the Gulf of Lions. Total concentrations, partitioning and fluxes // Marine Pollution Bulletin. 1991. V. 22. P. 176–183.
42. Offer Z.Y., Sarig S., Steinberger Y. Dynamics of nitrogen and carbon content of aeolian dry deposition in an arid region // Arid Soil Research and Rehabilitation. 1996. V. 10. Is. 2. P. 193–199.
43. Prospero J.P. Eolian transport to the World Ocean // The Sea / Ed. Emiliani C. New York: Wiley, 1981. V. 7. P. 801–874.
44. Pye K. Aeolian Dust and Dust Deposition. London: Academic Press, 1987. 334 p.
45. Shevchenko V.P. Aerosols over the Russian Arctic seas // Seabed Morphology of the Russian Arctic Shelf / Ed. Nikiforov S. New York: Nova Science Publishers, 2010. P. 87–92.

Dry and Wet Atmospheric Deposition of Organic Carbon on the Coast and the Waters of the North-Eastern Part of the Sea of Azov

V. V. Sorokina, V. G. Soier

The new data on the content of organic matter in aeolian material and precipitation falling on the coast and the waters of the eastern part of the Sea of Azov are presented. Samples of atmospheric depositions selected in the period 2006–2014. Particulate organic carbon content in the samples of aeolian dust varied from 4 to 27%. The range of concentrations of dissolved organic carbon in rainwater was 1.6–4.3, in snow – 0.9–16.6 mg C L⁻¹, the content of particulate organic carbon in snow samples ranged from 2 to 43%. Intensity of aeolian dust deposition was decreased from 178 to 33 mg m⁻² per day with distance from the sources of dust, at the same the relative content of the organic matter in dust increased. The fluxes of aeolian organic carbon within the city of Rostov-on-Don was 12–18, on the Gulf of Taganrog coast – 28–48, in the bay area – 20–80 mg m⁻² per day in spring-summer period.