

УДК 550.42

## ВКЛАД ИОНООБМЕННОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ПОГЛОЩЕННОГО КОМПЛЕКСА АТМОСФЕРНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ В ФОРМИРОВАНИЕ СОЛЕВОГО СОСТАВА МОРСКОЙ ВОДЫ

© 2019 г. В. С. Савенко<sup>1</sup>, А. В. Савенко<sup>2</sup>, \*<sup>1</sup> Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, географический факультет, Москва, Россия<sup>2</sup> Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, геологический факультет, Москва, Россия

\* e-mail: Alla\_Savenko@rambler.ru

Поступила в редакцию 01.06.2018 г.

После доработки 01.06.2018 г.

Принята к публикации 05.02.2019 г.

Обобщены данные по общей обменной емкости и составу поглощенного комплекса терригенных аэрозолей, генерируемых в аридных и семиаридных областях суши. Рассчитано, что в результате изменения состава поглощенного комплекса аэрозолей, происходящего при их взаимодействии с морской водой, в океан дополнительно поступает 2.64–4.86 млн т/год растворенного  $\text{Ca}^{2+}$  и удаляется соответственно 2.45–4.51, 0.73–1.34 и 0.08–0.14 млн т/год растворенных  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  и  $\text{Mg}^{2+}$ .

**Ключевые слова:** терригенные аэрозоли, почвы засушливых областей, поглощенный комплекс, ионный обмен, взаимодействие с морской водой

**DOI:** 10.31857/S0030-1574594553-557

Процессы ионообменной трансформации поглощенного комплекса взвешенных и влекаемых наносов в зоне смешения речных и морских вод приводят к ощутимым изменениям количеств растворенных веществ, поступающих в океан в составе материкового стока [2, 16, 20, 21, 24, 25]. Согласно последним оценкам [14], в результате ионного обмена сток растворенного  $\text{Ca}^{2+}$  увеличивается на 45.5 млн т/год, а растворенных  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  и  $\text{Mg}^{2+}$  — снижается на 37.3, 12.8 и 3.9 млн т/год, что в относительных величинах соответствует изменению стока этих элементов на +7.5, -12.3, -22.4 и -2.6%. То же самое должно происходить при поступлении в океан терригенных аэрозолей, представленных преимущественно почвенными частицами. Количественная оценка результатов этого процесса никогда не делалась и стала целью настоящей работы.

Самым простым и наиболее надежным способом оценки ионообменного баланса служит сравнение составов поглощенного комплекса терригенных аэрозолей и морских донных отложений, однако практическое использование этого приема ограничено небольшим числом определений состава поглощенного комплекса

аэрозолей. Нам удалось найти только две работы [22, 23], содержащие результаты подобных определений, где также были приведены сведения о составе поглощенного комплекса верхних горизонтов почв, с которыми изучавшиеся аэрозоли были генетически связаны. Сравнение составов поглощенного комплекса аэрозолей и верхних горизонтов почв указывает на их схожесть (табл. 1). По содержанию в поглощенном комплексе аэрозолей и почв адсорбированные катионы располагаются в ряд:  $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+$ , причем в обоих случаях  $\text{Ca}^{2+}$  резко преобладает и на его долю приходится около 70% общей обменной емкости. Если допустить соответствие составов поглощенного комплекса терригенных аэрозолей и верхних горизонтов почв засушливых областей, для которых данных значительно больше, то, зная состав поглощенного комплекса морских осадков [14], можно приближенно оценить баланс ионообменных реакций, протекающих при поступлении терригенного аэрозольного материала в морскую среду.

В табл. 2 приведены сведения об обменной емкости и составе поглощенного комплекса верхних горизонтов почвенного покрова аридных

**Таблица 1.** Общая обменная емкость ( $E$ ) и состав поглощенного комплекса аэрозолей и верхних горизонтов почв засушливых областей

Тип почв, место отбора	$E$ , мг-экв/100 г	Состав поглощенного комплекса, %-экв					Ссылка
		Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Сумма	
Воздушная пыль, северная Нигерия	35.25	67.5	12.5	10.6	9.4	100.0	[22]
Верхний горизонт почвы, там же	6.21	71.0	24.2	4.5	0.3	100.0	То же
Воздушная пыль, саванна Аргентины	22.8	77.8	11.0	8.2	2.9	99.9	[23]
Верхний горизонт почвы, там же	14.7	70.0	18.4	11.3	0.3	100.0	То же
Средние значения							
Воздушная пыль	29.0	72.7	11.8	9.4	6.2	100.0	Данная работа
Верхние горизонты почв	10.5	70.5	21.3	7.9	0.3	100.0	То же

**Таблица 2.** Общая обменная емкость ( $E$ ) и состав поглощенного комплекса верхних горизонтов почв аридных и семиаридных областей

Тип почв, место отбора	$E$ , мг-экв/100 г	Состав поглощенного комплекса, %-экв					Ссылка
		Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Сумма	
1	2	3	4	5	6	7	8
Незасоленные почвы							
Бурые, Северный Казахстан	27.1	90.7	9.0	0.3	100.0	100.0	[1]
То же, Казахстан	15.66	72.3	24.2	3.0	0.5	100.0	[9]
Каштановые, Казахстан	13.43	72.2	20.6	4.1	3.1	100.0	То же
То же, Казахстан	26.3	85.9	12.8	1.3	(0)	100.0	[10]
Серо-бурые, Туркмения	6.46	54.0	34.1	8.8	3.0	99.9	[18]
То же, Узбекистан	11.77	47.3	35.0	9.9	7.8	100.0	[6]
Сероземы, Узбекистан	8.55	91.2	5.3	1.2	2.5	100.2	[3]
То же, Средняя Азия	10.46	74.1	16.6	7.1	2.3	100.1	[13]
То же, Афганистан	5.6	77.0	11.5	8.3	3.3	100.1	[11]
Пустынные песчаные, Узбекистан	5.90	82.0	8.3	8.1	1.6	100.0	[6]
То же, Кызылкумы	5.13	60.7	9.6	17.0	12.7	100.0	[7]
То же, Центральные Каракумы	2.93	58.7	25.0	14.4	1.9	100.0	[18]
То же, Туркмения	3.16	68.0	11.3	20.8	(0)	100.1	То же
То же, Заунгузские Каракумы	3.53	66.1	22.1	11.7	(0)	99.9	«
Пустынные среднесуглинистые, Казахстан	8.7	72	23	5		100.0	[19]
То же, легкосуглинистые, Казахстан	8.4	75	22	3		100.0	То же
То же, суглинистые, Казахстан	7.2	75	21	5		101.0	«
Такырные, Узбекистан	9.40	73.7	20.1	6.2	(0)	100.0	[6]
То же, Туркмения	7.27	61.3	27.2	9.9	1.6	100.0	[18]
То же, Юго-Западная Туркмения	18.36	36.7	52.7	7.2	3.4	100.0	То же
То же, Мургабский оазис	8.03	50.3	39.7	7.0	2.9	99.9	«
Такыры, Узбекистан	12.88	51.1	23.1	6.4	19.4	100.0	[6]

Таблица 2. Продолжение

Тип почв, место отбора	E, мг-экв/100 г	Состав поглощенного комплекса, %-экв					Ссылка
		Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Сумма	
1	2	3	4	5	6	7	8
То же, Центральные Каракумы	10.54	36.9	49.6	7.9	5.7	100.0	[18]
То же, Юго-Восточное Заунгузье	11.54	63.3	26.6	5.0	5.1	100.0	То же
То же, Туркмения	5.49	71.7	10.4	12.9	4.9	99.9	«
То же, Мургабский оазис	9.10	67.9	21.5	6.2	4.5	100.1	«
То же, Юго-Западная Туркмения	14.15	40.1	48.7	7.2	4.0	100.0	«
Черноземы, Курская обл.	53.75	81.7	17.9	0.3	0.2	100.1	[3]
Почвы саванн, Индия	6.30	51.4	40.8	4.4	3.3	99.9	[12]
Почвы сухих саванн, Африка	29.5	72.4	6.9	20.0	0.7	100.0	[5]
Карбонатные черные почвы, Африка	56.5	36.2	58.7	4.3	0.8	100.0	То же
Засоленные почвы							
Пустынные солонцеватые, Казахстан	9.1	66	24	10		100.0	[19]
Солонцы, Казахстан	8.8	57.4	25.9	3.7	13.0	100.0	[10]
То же, Херсонская обл.	17.4	59.2	29.4	8.6	2.9	100.1	[3]
Солонец осолоделый, Херсонская обл.	16.0	71.9	15.6	10.0	2.5	100.0	То же
Средние значения							
Незасоленные почвы	13.65	65.1	24.4	8.2	3.5	101.1	Данная работа
Засоленные почвы	12.83	63.6	23.7	7.4	6.1	100.9	То же
Общее среднее	13.55	64.9	24.3	8.1	3.8	101.1	«

и семиаридных областей и вычислены средние значения для незасоленных и засоленных почв. Включение в выборку засоленных почв почти не отражается на средних концентрациях Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> и K<sup>+</sup> и немного (менее чем на 10%) увеличивает вклад Na<sup>+</sup>. Для среднего состава поглощенного комплекса верхних горизонтов почв засушливых территорий и, соответственно, терригенных аэрозолей можно, по-видимому, принять следующие значения (%-экв): Ca<sup>2+</sup> — 65, Mg<sup>2+</sup> — 24, K<sup>+</sup> — 8, Na<sup>+</sup> — 3.

Эти соотношения в совокупности с данными о составе поглощенного комплекса морских осадков позволяют получить хотя и приближенную, но все же количественную оценку химической трансформации поглощенного комплекса терригенных аэрозолей при их поступлении в морскую среду. В результате этой трансформации происходит снижение доли поглощенного Ca<sup>2+</sup> на 50.5%-экв и увеличение долей Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup> и Mg<sup>2+</sup> на 40.8, 7.2 и 2.5%-экв (табл. 3). Эти цифры, взятые с обратным знаком, соответствуют поступлению в океан или удалению

указанных ионов из морской воды. Следует отметить, что расчеты трансформации состава поглощенного комплекса терригенных аэрозолей в результате их взаимодействия с морской водой хорошо согласуются с аналогичными данными для терригенного материала речного стока твердых веществ.

Чтобы перейти к количественной оценке влияния на состав морской воды ионообменной трансформации поглощенного комплекса терригенных аэрозолей, необходимо также знать их общую обменную емкость. Средняя емкость поглощенного комплекса терригенных аэрозолей составляет 29.8 мг-экв/100 г (по пяти образцам [22, 23]). Поскольку обменная емкость почвенной фракции ≤1 мкм находится в пределах 30–50 мг-экв/100 г [4], а основная масса терригенного аэрозоля приходится на размерный диапазон 1–5 мкм, величину 30 мг-экв/100 г, по-видимому, можно принять в качестве среднего значения. Тогда, исходя из этого значения емкости поглощенного комплекса и изменения состава последнего при взаимодействии с морской

**Таблица 3.** Баланс ионов поглощенного комплекса при взаимодействии терригенных аэрозолей с морской водой, %-экв

Материал	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>
Терригенные аэрозоли (данная работа)	3	8	24	65
Донные отложения Мирового океана [14]	43.8	15.2	26.5	14.5
Баланс ионов при взаимодействии терригенных аэрозолей с морской водой	-40.8	-7.2	-2.5	50.5
Баланс ионов при взаимодействии терригенного материала речного стока твердых веществ с морской водой [14]	-40.2	-11.2	-8.9	60.3

водой (табл. 3), 1 тонна терригенных аэрозолей выделяет в морскую воду 3.04 кг Ca<sup>2+</sup> и удаляет из нее 2.82, 0.84 и 0.09 кг Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup> и Mg<sup>2+</sup>.

По данным разных авторов, количество поступающих в океан терригенных аэрозолей варьирует от 870 [15] до 1600 [8] млн т/год. Из приведенных выше оценок следует, что поступление в океан терригенных аэрозолей приводит к увеличению материкового стока растворенного Ca<sup>2+</sup> на 2.64–4.86 млн т/год и снижению стока растворенных Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup> и Mg<sup>2+</sup> соответственно на 2.45–4.51, 0.73–1.34 и 0.08–0.14 млн т/год.

Материковый сток Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup> и Ca<sup>2+</sup> составляет 300, 58, 152 и 613 млн т/год [17]. В процентном отношении трансформация поглощенного комплекса поступающих в океан терригенных аэрозолей приводит к изменению материкового стока этих ионов соответственно на -0.8–1.5, -1.3–2.3, -0.05–0.09 и 0.4–0.8%. Это небольшие величины, которыми допустимо пренебречь при рассмотрении геохимического баланса современного океана в целом. Вместе с тем для морей со значительно более высоким отношением интенсивности выпадений терригенных аэрозолей к речному стоку, таких как, например, Средиземное море, роль трансформации поглощенного комплекса терригенных аэрозолей в геохимическом балансе может быть весьма ощутимой.

### ВЫВОДЫ

1. В поглощенном комплексе терригенных аэрозолей преобладает Ca<sup>2+</sup>, на долю которого приходится в среднем около 65% общей обменной емкости. Вклад Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup> и Na<sup>+</sup> составляет соответственно 24, 8 и 3%.
2. В результате изменения состава поглощенного комплекса аэрозолей, происходящего при их взаимодействии с морской водой, в океан дополнительно поступает 2.64–4.86 млн т/год

растворенного Ca<sup>2+</sup> и удаляется 2.45–4.51, 0.73–1.34 и 0.08–0.14 млн т/год растворенных Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup> и Mg<sup>2+</sup>.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Боровский В. М., Аханов Ж. А.* Об эффективности орошения в степных засушливых районах Северного Казахстана // Аридные почвы, их генезис, геохимия, использование. М.: Наука, 1977. С. 56-71.
2. *Бунеев А. Н.* Основы гидрогеохимии минеральных вод осадочных отложений. М.: Медгиз, 1956. 228 с.
3. *Горбунов Н. И.* Почвенные коллоиды и их значение для плодородия. М.: Наука, 1967. 160 с.
4. *Горбунов Н. И.* Минералогия и коллоидная химия почв. М.: Наука, 1974. 314 с.
5. *Добровольский В. В.* Почвы Кении, Танзании и Уганды и их геохимические особенности // Геохимия тропических и субтропических почв и ландшафтов. М.: Изд-во МГПИ, 1973. С. 5-116.
6. *Кимберг Н. В.* Почвы пустынной зоны Узбекской ССР. Ташкент: Фан, 1974. 298 с.
7. *Кожевников К. Я.* О факторах образования соды в почвах // Почвоведение. 1974. № 4. С. 68-78.
8. *Лисицын А. П.* Осадкообразование в океанах. М.: Наука, 1974. 438 с.
9. *Полузеров И. А., Ассинг И. А., Андреева Н. П. и др.* Геохимия и минералогия пустынно-степных почв Казахстана. Алма-Ата: Наука КазССР, 1975. 158 с.
10. *Полузеров И. А., Султанбаев Е. А., Ассинг И. А., Андреева Н. П.* Геохимия и минералогия почв сухих степей Казахстана. Алма-Ата: Наука КазССР, 1978. 168 с.
11. *Попов В. Г.* Аридные почвы Джелалабадской долины Афганистана и их освоение // Аридные почвы, их генезис, геохимия, использование. М.: Наука, 1977. С. 226-238.
12. *Родин Л. Е., Базилевич Н. И., Градусов Б. П., Ярилова Е. А.* Засушливая саванна Раджпутана (пустыня Тар). Почвы, продуктивность, биогеохимия // Аридные почвы, их генезис, геохимия, использование. М.: Наука, 1977. С. 196-225.
13. *Розанов А. И.* Почвы глинистых пустынь и орошаемых районов Средней Азии. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1939. 100 с.
14. *Савенко А. В., Савенко В. С.* Поглощенный комплекс твердых веществ речного стока и его роль в геохимии

- ческом балансе океана // Литология и полезн. ископаемые. 2016. № 1. С. 16-41.
15. Савенко В. С. Роль эолового терригенного материала в осадкообразовании // Литология и полезн. ископаемые. 1988. № 1. С. 29-40.
  16. Савенко В. С. Геохимические проблемы глобального гидрологического цикла // Проблемы гидрологии и гидроэкологии. Вып. 1. М.: Геогр. ф-т МГУ, 1999. С. 48-72.
  17. Савенко В. С. Геохимия континентального звена глобального гидрологического цикла // Глобальные изменения природной среды-2001. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. С. 274-287.
  18. Санин С. А. Химические и агрохимические особенности пустынных почв Туркменистана. Ашхабад: Ылым, 1977. 247 с.
  19. Фаизов К. Ш. Почвы пустынной зоны Казахстана. Алма-Ата: Наука КазССР, 1983. 239 с.
  20. Kelly W. P., Liebig G. F. Base exchange in relation to composition of clay with special reference to effect of sea water // Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol. 1934. V. 18. P. 358-367.
  21. Kennedy V. C. Mineralogy and cation-exchange capacity of sediments from selected streams // U. S. Geol. Surv. Prof. Pap. 1965. № 433-D. P. D1-D28.
  22. Moberg J. P., Esu I. E., Malgwi W. B. Characteristics and constituent composition of Hartmattan dust falling in Northern Nigeria // Geoderma. 1991. V. 48. № 1-2. P. 73-81.
  23. Ramsperger B., Peinemann N., Stahr K. Deposition rates and characteristics of Aeolian dust in the semi-arid and sub-humid regions of the Argentinean Pampa // J. Arid Environments. 1998. V. 39. № 3. P. 467-476.
  24. Sayles F. L., Mangelsdorf P. C. The equilibration of clay minerals with seawater: Exchange reactions // Geochim. et Cosmochim. Acta. 1977. V. 41. № 7. P. 951-960.
  25. Sayles F. L., Mangelsdorf P. C. Cation-exchange characteristics of Amazon River suspended sediment and its reaction with seawater // Geochim. et Cosmochim. Acta. 1979. V. 43. № 5. P. 767-779.

## CONTRIBUTION OF ION-EXCHANGE TRANSFORMATION OF THE ADSORBED COMPLEX OF ATMOSPHERIC AEROSOLS TO THE FORMATION OF SEAWATER SALT COMPOSITION

© 2019 V. S. Savenko<sup>1</sup>, A. V. Savenko<sup>2, \*</sup>

<sup>1</sup> M.V. Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia

<sup>2</sup> M.V. Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geology, Moscow, Russia

\* e-mail: Alla\_Savenko@rambler.ru

Received June 01, 2018

Revised version received June 01, 2018

After revision February 05, 2019

Data on the total exchange capacity and composition of the adsorbed complex of terrigenous aerosols generated in arid and semiarid regions of the earth were summarized. It was calculated that as a result of change in composition of the adsorbed complex of aerosols occurring during their interaction with seawater, 2.64–4.86 million tons/year of dissolved Ca<sup>2+</sup> are additionally enters into the ocean and 2.45–4.51, 0.73–1.34, and 0.08–0.14 million tons/year of dissolved Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, and Mg<sup>2+</sup>, respectively, are removed.

**Keywords:** terrigenous aerosols, soils of arid and semiarid regions, adsorbed complex, ion exchange, interaction with seawater