

## О ФРАКЦИОНИРОВАНИИ СОЛЕЙ В ПРОЦЕССЕ ГЕНЕРАЦИИ ТЕРРИГЕННОГО АЭРОЗОЛЯ

© 2019 г. А. В. Савенко<sup>а,\*</sup>, В. С. Савенко<sup>б</sup>

<sup>а</sup> *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова  
Геологический факультет*

*Россия, 119991, Москва, Ленинские горы*

<sup>б</sup> *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова  
Географический факультет*

*Россия, 119991, Москва, Ленинские горы*

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

Поступила в редакцию 17.04.2018 г.

После доработки 18.04.2018 г.

Принята к публикации 20.04.2018 г.

Проанализировано содержание водорастворимых солей в образцах поверхностного слоя почв территорий с засушливым климатом и выделенной из них фракции <0.1 мм и показано существование фракционирования солей в мелкоземе. Коэффициенты фракционирования, определяемые как отношение концентраций ионов в водных вытяжках из фракции <0.1 мм и почвы в целом, располагаются в ряды: Na > K > Mg > Ca и SO<sub>4</sub> > HCO<sub>3</sub> > Cl. Установлено, что фракционирование солей зависит от их растворимости: чем ниже растворимость, тем больше обогащение тонкой фракции почв.

**Ключевые слова:** фракционирование, водорастворимые соли, главные ионы, почвы аридных территорий, терригенный аэрозоль

**DOI:** 10.31857/S0016-752564196-100

Эоловый перенос играет важную роль в геохимической миграции вещества, особенно в аридных и семиаридных областях суши, где водная миграция резко снижается (Кондратьев, Поздняков, 1981). Интенсивность седиментации эоловой пыли для засушливых территорий, по данным разных авторов, составляет 1–10 см/тыс. лет, но в некоторых районах (побережье Каспийского моря; Айдахо, США) может повышаться до 50–86 см/тыс. лет и даже достигать 2000 см/тыс. лет в Ираке (Кукал, 1987). Эоловый материал также вносит существенный вклад в осадкообразование в морях и океанах (Лисицын, 1978).

Ветровая эрозия почвенного покрова аридных и семиаридных территорий служит основным источником терригенных аэрозолей в атмосфере (Gibson, 1962; Кондратьев, Поздняков, 1981; Руе, 1987; Бримблдумб, 1988; Перельман, Касимов, 1999). Широкое развитие в областях с засушливым климатом процессов засоления дает основания считать, что в континентальном аэрозоле могут присутствовать значительные количества водорастворимых солей, участвующих в формировании химического состава атмосферных осадков не только на суше, но и над океаном (Савенко, 1976,

1994). Несмотря на большой объем информации по химическому составу атмосферных осадков и растворимых солей верхних горизонтов почв, непосредственное сопоставление имеющихся данных затрудняется возможностью химического фракционирования солей в процессе ветровой эрозии, которая подтверждена пока только в единственной экспериментальной работе М.А. Орловой (1983). Отсутствие сведений по фракционированию растворимых солей при ветровой эрозии почвенного покрова побудило нас провести настоящее исследование, цель которого заключалась в выяснении самой возможности фракционирования и предварительной оценке масштабов этого явления.

### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В экспериментах использовали 15 образцов верхних горизонтов почв (0–5 см) с различным содержанием растворимых солей, в том числе засоленных почв, которые были любезно предоставлены сотрудниками Института почвоведения РАН Е.И. Панковой и Н.Б. Хитровым (табл. 1).

Гомогенизированные образцы разделяли на 2 части, одну из которых оставляли неизменной

Таблица 1. Основной солевой состав водных вытяжек почв и их тонкой фракции

Место отбора, тип засоления почв	Фракция	Минерализация вытяжки M, мг/л	Концентрации растворенных компонентов													
			мг-экв/л					% - экв								
			Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
<i>Черноземы</i>																
<i>Незасоленные почвы других типов</i>																
Каменная степь, Воронежская обл.	Валовая <0.1 мм	47.5	0.052	0.030	0.14	0.40	0.059	0.12	0.45	4.2	2.4	11.4	31.7	4.7	9.7	35.9
То же	Валовая <0.1 мм	104	0.054	0.022	0.34	1.02	0.069	0.30	0.99	1.9	0.8	12.2	36.5	2.5	10.7	35.4
«	Валовая <0.1 мм	156	0.040	0.056	0.37	1.52	0.076	0.22	1.73	1.0	1.4	9.1	38.0	1.9	5.5	43.1
Периановская степь, Ростовская обл.	Валовая <0.1 мм	177	0.035	0.24	0.40	1.57	0.13	0.23	1.88	0.8	5.3	8.9	35.1	2.9	5.1	41.9
	Валовая <0.1 мм	177	0.036	0.26	0.41	1.55	0.14	0.23	1.86	0.8	5.8	9.0	34.6	3.1	5.1	41.6
<i>Засоленные почвы</i>																
Хакасия, Ширинский район сульфатный тип	Валовая <0.1 мм	228	0.28	0.21	0.77	1.62	0.069	0.24	2.60	4.9	3.6	13.2	28.0	1.2	4.1	45.0
То же, Усть-Абаканский район, содово-сульфатный тип	Валовая <0.1 мм	263	0.44	0.27	0.44	1.92	0.27	0.19	2.44	7.3	4.6	7.4	32.1	4.5	3.2	40.9
Тува, Тандинский район	Валовая <0.1 мм	232	0.44	0.27	0.44	1.92	0.27	0.19	2.44	7.3	4.6	7.4	32.1	4.5	3.2	40.9
То же, Тандинский район, содово-хлоридный тип	Валовая <0.1 мм	255	0.63	0.31	0.47	1.84	0.34	0.24	2.65	9.8	4.7	7.3	28.4	5.2	3.7	40.9
Бурятия, Кяхтинский район	Валовая <0.1 мм	196	0.041	0.15	0.38	2.06	0.13	0.15	2.16	0.8	3.0	7.5	40.6	2.5	3.0	42.6
То же, Кяхтинский район, содово-хлоридный тип	Валовая <0.1 мм	185	0.048	0.15	0.35	1.89	0.13	0.19	2.01	1.0	3.2	7.2	39.8	2.8	3.9	42.1
Якутия, Якутский район	Валовая <0.1 мм	240	0.078	0.28	0.89	2.25	0.046	2.82	0.56	1.1	4.0	12.9	32.5	0.7	40.8	8.0
	Валовая <0.1 мм	477	0.14	0.44	1.73	4.67	0.068	6.05	0.80	1.0	3.1	12.5	33.6	0.5	43.5	5.8
Хакасия, Ширинский район, сульфатный тип	Валовая <0.1 мм	1264	5.00	0.11	5.00	7.90	1.60	14.9	2.49	13.5	0.3	13.5	21.4	4.3	40.3	6.7
То же, Усть-Абаканский район, содово-сульфатный тип	Валовая <0.1 мм	1395	5.20	0.14	5.64	9.70	1.67	16.5	2.51	12.6	0.3	13.6	23.5	4.0	39.9	6.1
Тува, Тес-Хемский район, содово-хлоридный тип	Валовая <0.1 мм	5610	76.4	0.033	0.23	0.39	1.42	65.1	10.9	49.5	0.02	0.1	0.3	0.9	42.1	7.1
То же, Тес-Хемский район, содово-хлоридный тип	Валовая <0.1 мм	9265	129	0.064	0.28	0.46	1.58	112	14.1	50.1	0.02	0.1	0.2	0.6	43.5	5.5
То же, Тандинский район, хлоридно-сульфатно-содовый тип	Валовая <0.1 мм	872	10.7	0.27	0.18	0.75	4.68	1.97	5.52	44.5	1.1	0.7	3.1	19.5	8.2	22.9
Бурятия, Кяхтинский район, содовый тип	Валовая <0.1 мм	1179	14.6	0.36	0.20	0.79	5.44	3.12	7.67	45.4	1.1	0.6	2.5	16.9	9.7	23.8
То же, Кяхтинский район, содовый тип	Валовая <0.1 мм	3483	45.2	0.59	1.67	0.28	15.4	20.4	14.3	46.2	0.6	1.7	0.3	15.7	20.9	14.6
То же, Мухоршибирский район, хлоридно-сульфатный тип	Валовая <0.1 мм	5529	74.1	0.73	2.08	0.34	17.1	38.4	21.5	48.0	0.5	1.3	0.2	11.1	24.9	14.0
Якутия, Якутский район, хлоридный тип	Валовая <0.1 мм	554	6.26	0.081	0.24	0.27	0.64	0.54	5.74	45.4	0.6	1.8	1.9	4.7	3.9	41.7
То же, Якутский район, хлоридный тип	Валовая <0.1 мм	504	5.63	0.091	0.28	0.31	0.60	0.52	5.18	44.7	0.7	2.2	2.4	4.8	4.1	41.1
Якутия, Якутский район, хлоридный тип	Валовая <0.1 мм	2014	22.1	0.065	5.66	3.16	9.47	17.9	2.86	36.1	0.1	9.2	5.2	15.5	29.2	4.7
Якутия, Якутский район, хлоридный тип	Валовая <0.1 мм	2196	20.9	0.069	6.66	4.27	9.08	22.1	2.67	31.8	0.1	10.1	6.5	13.8	33.6	4.1
Якутия, Якутский район, хлоридный тип	Валовая <0.1 мм	8239	59.2	0.069	47.4	32.6	87.0	51.1	1.72	21.2	0.02	17.0	11.7	31.2	18.3	0.6
Якутия, Якутский район, хлоридный тип	Валовая <0.1 мм	8554	54.5	0.070	55.4	35.4	78.9	62.4	1.93	18.9	0.02	19.2	12.3	27.3	21.6	0.7

в качестве эталона валового состава, а из другой выделяли тонкую фракцию  $<0.1$  мм. Навески валовой и тонкой фракций почв смешивали с дистиллированной водой в соотношении 1 : 10 и выдерживали 7 дней. После этого водные вытяжки отфильтровывали через мембранный фильтр 0.22 мкм, и в фильтрате определяли концентрации натрия, калия, магния, кальция, хлоридов и сульфатов методом капиллярного электрофореза (Комарова, Каменцев, 2006), а также величину общей щелочности, подавляющую часть которой составляют гидрокарбонаты, объемным ацидиметрическим методом. Погрешность измерений с учетом разбавления высокоминерализованных проб не превышала  $\pm 5$  %.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

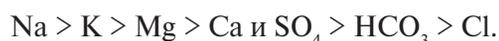
Основными предпосылками химического фракционирования терригенного материала, поступающего в атмосферу в результате ветровой эрозии, служат механическая дифференциация и различный химический состав разных гранулометрических фракций. Теоретически интенсивность выдувания частиц должна быть обратно пропорциональна их массе (размеру), однако в природных условиях максимальная интенсивность выноса приходится на частицы размером около 0.1 мм (Кондратьев, Поздняков, 1981). Снижение выноса более мелких частиц объясняется тем, что они слипаются в крупные агломераты, для подъема которых необходимо приложение значительно большей силы, чем для отдельной частицы. Накопление кинетической энергии, достаточной для подъема частиц почвы в воздух, происходит в результате серий последовательных подъемов и падений (сальтации), сопровождающихся не только увеличением кинетической энергии частиц, но и разрушением непрочных агломератов, которые становятся источником поступления мелких частиц в атмосферу. Поэтому, исходя из отмеченных особенностей ветровой эрозии, для выяснения возможности фракционирования растворимых солей при эоловом выносе мелкоземы из почвенного покрова аридных и семиаридных областей были использованы водные вытяжки из образцов верхних горизонтов почв и выделенных из них фракций  $<0.1$  мм.

Результаты экспериментов, представленные в табл. 1, свидетельствуют о наличии тесной корреляции между содержанием всех главных ионов

в водных вытяжках из валовых образцов почв и из фракции  $<0.1$  мм (рисунок). Количественно фракционирование растворимых солей, которые присутствуют в водных растворах в ионной форме, характеризуют коэффициенты фракционирования ионов  $k_i$ :

$$k_i = \frac{[i]_{<0.1\text{мм}}}{[i]_{\text{вал}}}, \quad (1)$$

где  $[i]_{<0.1\text{мм}}$  – концентрация элемента  $i$  в водной вытяжке из почвенной фракции  $<0.1$  мм;  $[i]_{\text{вал}}$  – концентрация элемента  $i$  в водной вытяжке из почвы в целом. По величине коэффициентов фракционирования катионы и анионы располагаются в ряды



Как следует из табл. 2, максимальное значение  $k_i$  среди катионов отмечается для натрия (1.42), среди анионов – для сульфатов (1.52).

Можно предположить наличие связи между фракционированием растворимых солей и их растворимостью. Для реакции растворения соли  $A_m B_n$



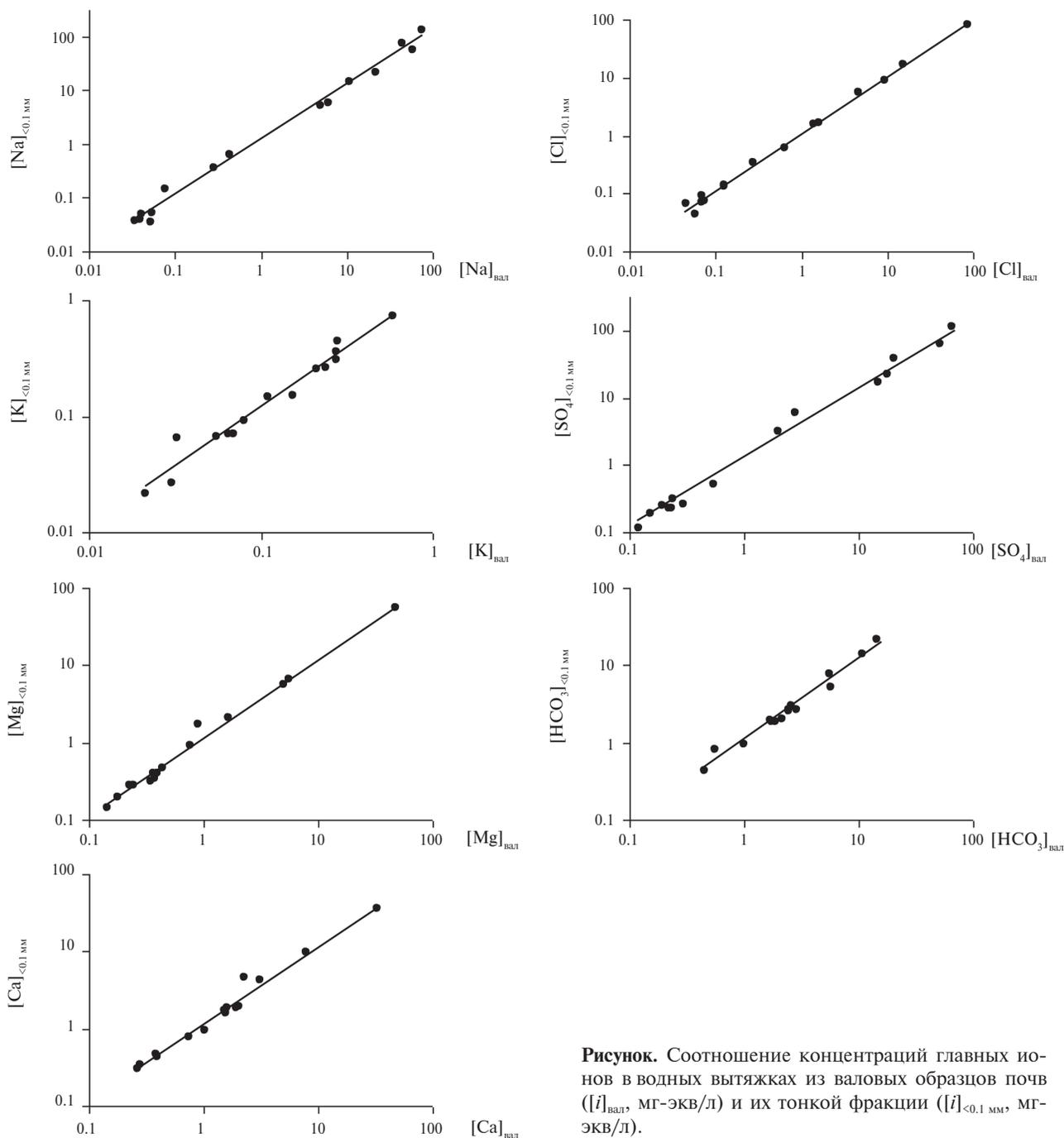
константа равновесия, называемая произведением растворимости ( $L_{A_mB_n}$ ), зависит от стехиометрии соли, т.е. от величин  $m$  и  $n$ :

$$L_{A_mB_n} = [A]^m [B]^n, \quad (3)$$

где [...] – концентрации. Поэтому для сравнительной характеристики растворимости солей удобно использовать так называемую “удельную растворимость”  $S_{A_mB_n}$  – произведение растворимости, отнесенное к одному атому (иону) соли:

$$S_{A_mB_n} = \sqrt[m+n]{L_{A_mB_n}}. \quad (4)$$

Вычисленные по данным В.Н. Кумока с соавторами (1983) величины  $S_{A_mB_n}$  для растворимых солей главных катионов природных вод (табл. 3) показывают, что для всех катионов наименьшую удельную растворимость имеют сульфаты. Несколько большей удельной растворимостью обладает карбонат натрия. Максимальная удельная растворимость наблюдается для хлоридов всех катионов, исключая калий, для которого большей удельной растворимостью обладает карбонат. Это согласуется с максимальным коэффициентом фракционирования  $\text{SO}_4^{2-}$  и минимальным  $\text{Cl}^-$ . Можно предположить, что наименее растворимые соли в большей степени ассоциированы с мелки-



**Рисунок.** Соотношение концентраций главных ионов в водных вытяжках из валовых образцов почв ( $[i]_{\text{вал}}$ , мг-экв/л) и их тонкой фракции ( $[i]_{<0.1 \text{ мм}}$ , мг-экв/л).

ми частицами, которые служат для них центрами кристаллизации. Однако растворимость является, по-видимому, только одним из многих факторов, контролирующих распределение солей по разным гранулометрическим фракциям и селективность их выноса при ветровой эрозии почв. На вынос солей должны также влиять удельный вес и механическая прочность кристаллов и их агрегатов. Роль этих и других факторов во фракционировании растворимых солей при образовании почвенного терригенного аэрозоля до сих пор количественно

не оценена, и результаты нашей работы лишь констатируют наличие явления фракционирования.

## ВЫВОДЫ

Существует фракционирование растворимых солей по гранулометрическим фракциям почв, распространенных в областях с засушливым климатом.

Коэффициенты фракционирования ионов, определяемые как отношение их концентраций

**Таблица 2.** Отношения концентраций главных ионов в водорастворимых солях почв засушливых районов в целом и фракции <0.1 мм (коэффициенты фракционирования  $k_i$ )

Ион	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
$k_i$	1.419	1.246	1.169	1.100	0.915	1.524	1.343

**Таблица 3.** Величины  $S_{A_m B_n}$  водорастворимых солей\*

Ион	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>
Cl <sup>-</sup>	6.3	2.8	170	94
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.24	0.13	0.10	0.005
HCO <sup>-</sup>	0.64	1.3	—	—
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	0.40	32	—	—

\* — Карбонаты и бикарбонаты кальция и магния не входят в число растворимых солей.

в водных вытяжках из фракции <0.1 мм и почвы в целом, располагаются в ряды: Na > K > Mg > Ca и SO<sub>4</sub> > HCO<sub>3</sub> > Cl для катионов и анионов соответственно.

Одним из факторов фракционирования является растворимость солей: чем ниже их растворимость, тем в большей мере выражено обогащение тонкой фракции почв.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бримблкунб П. (1988) Состав и химия атмосферы. М.: Мир, 352 с.

Комарова Н.В., Каменцев Я.С. (2006) Практическое руководство по использованию систем капиллярного электрофореза “КАПЕЛЬ”. СПб.: Изд-во “Веда”, 212 с.

Кондратьев К.Я., Поздняков Д.В. (1981) Аэрозольные модели атмосферы. М.: Наука, 104 с.

Кукал З. (1987) Скорость геологических процессов. М.: Мир, 246 с.

Кумок В.Н., Кулешова О.М., Карабин Л.А. (1983) Производство растворимости. Новосибирск: Наука СО, 326 с.

Лисицын А.П. (1978) Процессы океанской седиментации. М.: Наука, 392 с.

Орлова М.А. (1983) Роль эолового фактора в солевом режиме территорий. Алма-Ата: Наука, 232 с.

Перельман А.И., Касимов Н.С. (1999) Геохимия ландшафта. М.: Астрель, 768 с.

Савенко В.С. (1976) О роли атмосферного переноса океанских солей в формировании химического состава вод континентов. Труды XXIII Международн. географич. конгресса. Секция 2. Климатология, гидрология, гляциология. М., 178–184.

Савенко В.С. (1994) Факторы, определяющие распространённость химических элементов в океанском аэрозоле. ДАН 339(5), 670–674.

Gibson G.W. (1962) Geological investigations in Southern Victoria Land, Antarctica. Part 8 – Evaporite salts in the Victoria Valley region. *New Zealand J. of Geology and Geophysics*. 5(3), 361–374.

Pye K. (1987) Aeolian dust and dust deposits. L.: Acad. Press, 334 p.

## ABOUT SALT FRACTIONATION IN THE PROCESS OF TERRIGENOUS AEROSOL GENERATION

A.V. Savenko<sup>a,\*</sup>, V.S. Savenko<sup>b</sup>

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

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

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

The content of water-soluble salts in samples of surface soils from arid regions and separated from them fraction <0.1 mm was analyzed. Existence of salt fractionation in the aleurite was shown. The fractionation coefficients, defined as the ratio of ions concentrations in the water extracts from fraction <0.1 mm and soil as a whole, are arranged in the successions: Na > K > Mg > Ca and SO<sub>4</sub> > HCO<sub>3</sub> > Cl. It was found that the fractionation of salts depends on their solubility: than solubility below, that enrichment of soils fine fraction is more.

**Key words:** fractionation, water-soluble salts, major ions, soils of arid regions, terrigenous aerosol  
(For citation: Savenko A.V., Savenko V.S. About Salt Fractionation in the Process of Terrigenous Aerosol Generation. *Geokhimiya*. 2019;64(1):96–100. doi: 10.31857/S0016-752564196-100)