

УДК 502.057, 504.3.054

ВАРИАЦИИ МАССОВОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ И СОСТАВА ПРИЗЕМНОГО АЭРОЗОЛЯ СТЕПНОЙ ЗОНЫ ЮГА РОССИИ В ЛЕТНИЙ ПЕРИОД

© 2016 г. М.С. Артамонова¹, Д.П. Губанова², М.А. Иорданский², В.А. Лебедев²,
Л.О. Максименков¹, В.М. Минашкин², Ю.И. Обвинцев², О.Г. Чхетиани^{1,3}

¹ Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, г. Москва, Россия

² Акционерное общество «Ордена Трудового Красного Знамени Научно-исследовательский физико-химический институт им. Л.Я. Карпова», Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом», г. Москва, Россия

³ Институт космических исследований РАН, г. Москва, Россия

Представлены результаты исследования вариаций приземного аэрозоля в степной зоне засушливого типа юга России. Натурные наблюдения параметров атмосферного аэрозоля (массовой концентрации, дисперсного и элементного состава) и метеорологических параметров проводились в Цимлянском р-не Ростовской обл. Определен химический состав аэрозольных частиц в приземном слое атмосферы, рассчитаны коэффициенты обогащения элементов относительно кларков земной коры. Показано, что в летний период происходил перенос аридных аэрозолей с солончаков и песчаных почв Калмыкии в воздушный бассейн зоны наблюдений. Обнаружено, что аэрозольные частицы в приземном слое этого района содержат продукты сжигания нефти, угля и этилированного бензина, вносящие малый вклад в общую массовую концентрацию атмосферного аэрозоля, но являющиеся наиболее опасными для здоровья человека из-за своих размеров и содержания тяжелых металлов. Зарегистрирована высокая концентрация субмикронных серосодержащих частиц хемоконденсационной природы. Обсуждаются естественные и антропогенные источники аэрозоля юга России.

Ключевые слова: аэрозоль, массовая концентрация, функция распределения, элементный состав, перенос, степная зона.

PACS 92.60.Mt

Введение

Атмосферный аэрозоль является важнейшим компонентом атмосферы, оказывающим сильное воздействие на биосферу и климат. Это уникальная по своим свойствам динамическая система, которая характеризуется пространственно-временной изменчи-

востью физико-химических параметров [Ивлев, 1982; Кондратьев и др., 1983; Seinfeld, Pandis, 2006]. Обладая большой поверхностью, атмосферные аэрозольные частицы могут служить катализаторами гетерогенных процессов, быть эффективными сорбентами следовых газовых составляющих атмосферы, и также в силу своих физических свойств (размера, прозрачности, плотности) оказывать влияние на радиационный баланс и климат Земли [Аэрозоль и климат, 1991; Qin et al., 2014].

В последние годы в связи с возрастанием экологической нагрузки на окружающую среду, изменением климата Земли и обострением связанных с этими факторами проблем исследование состава атмосферы приобретает все большее значение. Изучение физико-химических свойств, структуры и источников образования атмосферных аэрозолей вызывает повышенный интерес. Однако роль аэрозолей в экосистеме до сих пор остается недооцененной.

Являясь одним из самых распространенных и сильных загрязнителей атмосферы, аэрозоль вносит весомый вклад в эволюцию экосистем регионов, наиболее уязвимых и подверженных экологической нагрузке вследствие особенностей своих природно-географических и климатических условий. К таким районам относятся, в частности, степные зоны засушливого типа юга России. Как известно, засушливые территории – один из основных и важнейших источников аэрозоля, поступающего в атмосферу как во время пыльных бурь, так и в сухую жаркую погоду [Кондратьев и др., 1983; Советско-американский..., 1993; Андропова и др., 1998; Голицын и др., 1998; Горчаков и др., 1998; Гледзер и др., 2009; Chkhetiani et al., 2012]. Эффект аэрозольного загрязнения воздушного бассейна этих регионов, а вместе с тем и экологическая нагрузка увеличиваются при существовании локальных антропогенных источников. В таких зонах важны комплексные исследования физико-химических параметров атмосферных аэрозолей и особенностей их трансформации, а также выявление источников аэрозольных частиц различной природы и условий их возникновения для оценки возможного воздействия аэрозолей на экологию и климат в региональном масштабе.

С целью решения вышеуказанных задач в рамках данной работы проводились комплексные исследования изменчивости массовой концентрации аэрозольных частиц, их микрофизических характеристик и элементного состава по результатам натурных наблюдений в приземном слое воздуха вблизи г. Цимлянск. Была изучена зависимость массовой концентрации, дисперсного и элементного состава приземного аэрозоля от метеорологических и синоптических условий степной зоны засушливого типа, а также установлена корреляция между элементным составом аэрозольных частиц и химическим составом почв Цимлянского р-на Ростовской обл., соседнего Чернышковского р-на Волгоградской обл. и Республики Калмыкия. Идентифицированы источники эмиссии аэрозольных частиц.

Использованные данные и методы исследования

Полевые наблюдения проводились в период 02–15.08.2012 г. на Цимлянской научной станции Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН (ЦНС ИФА им. А.М. Обухова РАН), расположенной на северо-западной окраине г. Цимлянск, в 2.5 км от побережья Цимлянского водохранилища. В ходе натурных исследований осуществлялись измерения массовой концентрации и микрофизических характеристик (счетная концентрация, дисперсный состав) аэрозоля в приземном слое атмосферы, параллельно измерялись метеорологические параметры (температура и относительная влажность воздуха, атмосферное давление, скорость и направление ветра).

Для определения микрофизических характеристик аэрозоля использовали два идентичных комплекта измерительной аппаратуры, в состав каждого из которых входили:

– лазерный аэрозольный спектрометр ЛАС-П (разработчик – Научно-исследовательский физико-химический институт (НИФХИ) им. Л.Я. Карпова), предназначенный для определения счетной концентрации и дисперсного состава частиц с диаметром 0.15–1.5 мкм и более;

– аэрозольный спектрометр ROYCO, модель 220 (производство США), предназначенный для определения счетной концентрации и дисперсного состава аэрозольных частиц с диаметром 0.5–15 мкм.

Отбор проб и синхронные измерения с помощью данных комплектов приборов осуществлялись на высоте 0.5 и 2.0 м над ур. земли. Цикл измерений приборами ЛАС-П и ROYCO составлял 3 мин. Используемая в ходе измерений методика отбора проб подробно описана в [Ивлев, 1982; Andronova et al., 2003].

Для определения счетной концентрации и дисперсного состава аэрозольных частиц с диаметром от 0.0032 до 0.562 мкм на высоте 2.0 м над ур. земли применяли электростатический датчик аэрозолей (ДАЭС).

Для определения массовой концентрации атмосферного аэрозоля и его элементного состава производили забор проб на высоте 2.0 м над ур. земли на аналитические фильтры ХА-20 с помощью аспирационного пробоотборника с расходом 12 м³/ч. Время отбора каждой пробы составляло не менее 12 ч. Смена фильтров проводилась 2 раза в сутки. Массовая концентрация аэрозольных частиц на фильтре определялась методом взвешивания полученных дискретных проб.

Контроль метеорологических параметров осуществляли с помощью метеостанции Davis Instruments Vantage Pro 2, установленной на высоте 2.0 м над ур. земли и регистрирующей измерения с интервалом 1 мин, а также с использованием интернет-ресурсов.

В состав измерительного комплекса входил 6-каскадный импактор, с помощью которого определяли массовые фракционные доли аэрозольных частиц, а также отбирали пробы для определения элементного состава частиц каждой фракции. Размеры частиц, осаждавшихся на каскадах импактора (мкм): 6.5–500, 4.0–6.5, 2.5–4.0, 1.5–2.5, 0.5–1.5, < 0.5. Перед входным отверстием импактора с целью предохранения от попадания на его каскады крупных соринки и насекомых была размещена сетка с размерами ячеек 500×500 мкм. Отборник импактора был установлен на высоте 1.5 м над ур. земли. За период наблюдений было произведено два отбора проб: с 2 по 9 августа и с 9 по 15 августа 2012 г.

Анализ элементного состава аэрозольных частиц, содержащихся в пробах на фильтрах ХА-20, осуществлялся методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой с помощью атомно-эмиссионного спектрометра TRACE ICAP 61E (производства фирмы «Thermo Jarrell Ash», США) [Кудряшов, 1997; Andronova et al., 2003; Карандашев и др., 2007].

Для сравнения элементного состава аэрозоля с элементным составом почв региона был произведен отбор проб поверхностного слоя почв методом конверта (толщиной 1–1.5 см) на двух пробоотборных площадках на территории ЦНС ИФА им. А.М. Обухова РАН и на четырех пробоотборных площадках в Чернышковском районе Волгоградской обл. на территории природного парка «Цимлянские пески», расположенного в 70 км от основного места работ. Элементный анализ каждой пробы проводился для всего образца, без разбиения его на фракции, с помощью указанного выше метода масс-спектрометрии.

Для оценки вклада каждого источника поступления в атмосферные аэрозоли и определения степени загрязнения воздуха были рассчитаны коэффициенты обогащения

элементов ($EF_{\text{ап}}$, $EF_{\text{ак}}$) относительно содержания элементов в пробах почвы и относительно среднего содержания элементов в земной коре [Виноградов, 1956] по методике, изложенной в [Виноградова и др., 1993]. Расчет производился по формулам

$$EF_{\text{ак}} = (C_{\text{э}}/C_{\text{Al}})_{\text{пр}} / (C_{\text{э}}/C_{\text{Al}})_{\text{к}}, \quad (1)$$

$$EF_{\text{ап}} = (C_{\text{э}}/C_{\text{Al}})_{\text{пр}} / (C_{\text{э}}/C_{\text{Al}})_{\text{п}}, \quad (2)$$

где $C_{\text{э}}$ и C_{Al} – концентрации данного элемента и алюминия в пробе (индекс «пр»), в земной коре (индекс «к») и в почве (индекс «п»). В качестве опорного элемента, как и в работе [Трефилова и др., 2012], был взят алюминий (как элемент почвенного происхождения с достаточно точно установленным кларком).

Полученные результаты и их обсуждение

Вариации массовой концентрации аэрозольных частиц

Массовая концентрация является одним из основных параметров атмосферного аэрозоля, который определяет степень негативного воздействия окружающей воздушной среды на человека. Она сильно зависит как от мощности различных источников атмосферных аэрозолей, так и от метеорологических и синоптических условий, влияющих на характер переноса и осаждения аэрозоля [Кондратьев и др., 1983].

Рисунок 1 иллюстрирует характер изменения массовой концентрации аэрозоля, определенной по привесам на фильтрах ХА-20, за весь период наблюдений. Графики изменения метеорологических параметров (атмосферного давления и приземной скорости ветра) представлены там же.

Анализ метеорологической обстановки показал, что весь период наблюдений условно можно разделить на три эпизода, характеризующиеся различным синоптическим характером. На рис. 2 приведены трехсуточные трехмерные обратные траектории движения воздушных масс, построенные с помощью модели NOAA HYSPLIT [Draxler, Hess, 1998; Draxler et al., 2009] для этих эпизодов.

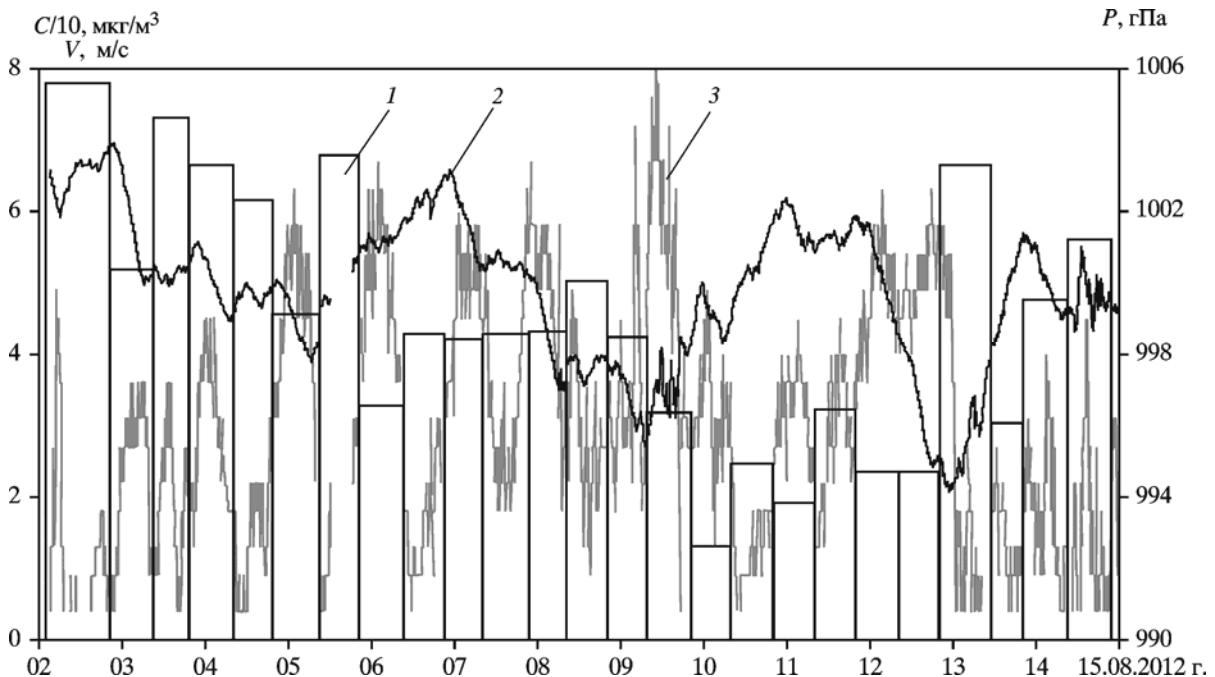


Рис. 1. Массовая концентрация аэрозольных частиц (1), атмосферное давление (2) и скорость приземного ветра (3) в районе исследования в период 02–15.08.2012 г.

Дата на рисунке соответствует времени регистрации – 12.00 ч дня

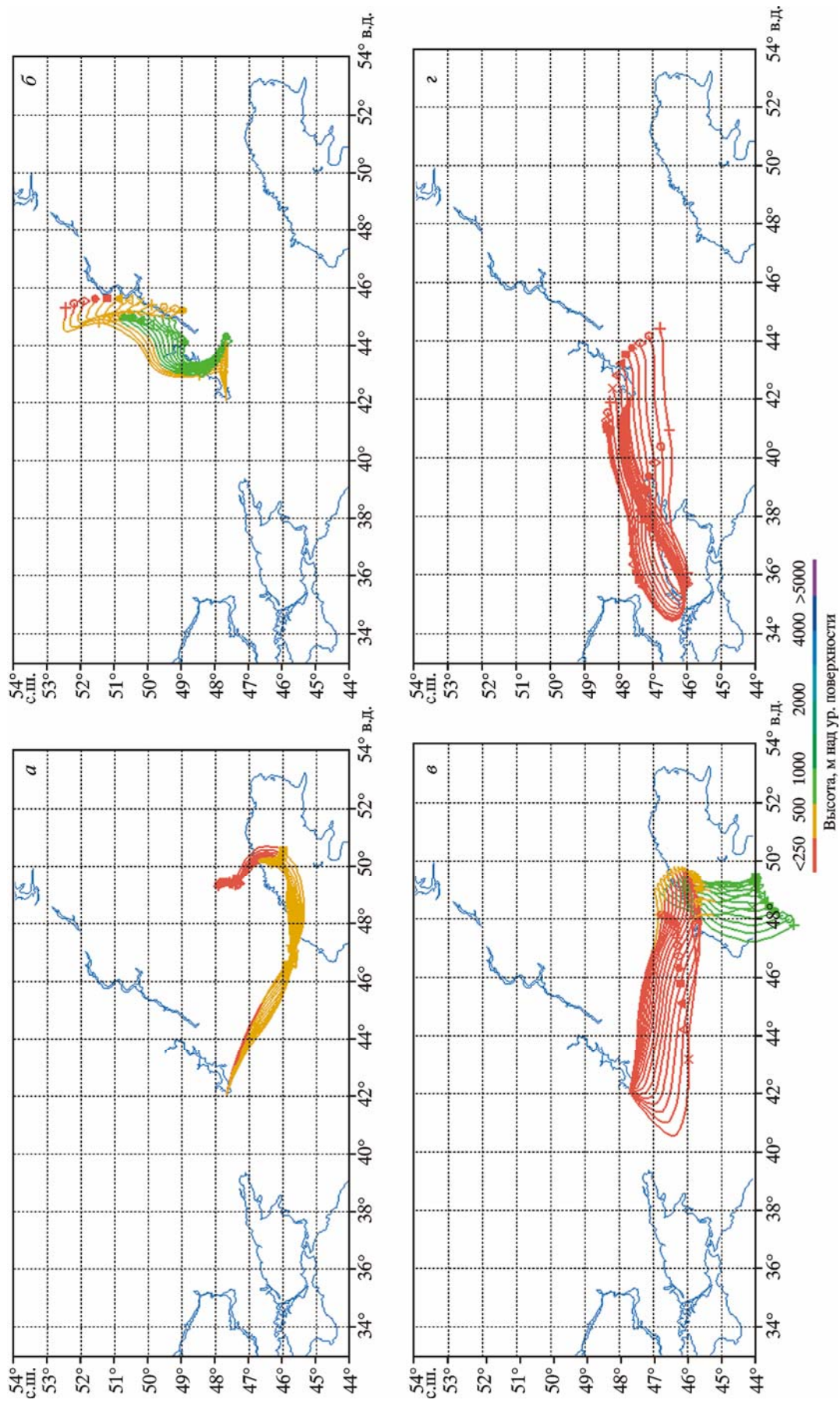


Рис. 2. Ансамбли трехсуточных обратных траекторий движения воздушных масс в точке наблюдений (высота 250 м над ур. земли)
 а – 03.08.2012 г. с 8:00 до 20:00 ч; б – с 19:00 ч 11.08.2012 г. до 6:00 ч 12.08.2012 г.; в – 13.08.2012 г. с 6:00 до 21:00 ч; г – 14.08.2012 г. с 6:00 до 19:00 ч.
 Время – местное

В первом эпизоде (2–9 августа) – над центральным районом Европейской части России один за другим перемещались два антициклона. При прохождении первого антициклона было зарегистрировано максимальное содержание аэрозольных частиц в приземном слое атмосферы в точке наблюдений. В дальнейшем происходило постепенное уменьшение массовой концентрации аэрозоля (как суммарного ее значения, так и массовой концентрации отдельных химических элементов в составе приземного аэрозоля). Это связано с ослаблением первого антициклона и перемещением воздушных масс на восток. 6 августа зафиксировано временное повышение массовой концентрации аэрозоля, которая далее оставалась практически неизменной в течение двух последующих суток. Такой всплеск значений массовой концентрации мог быть следствием действия двух антициклонов. Траектории движения воздушных масс в период 2–9 августа были направлены с востока на запад; воздушные массы перемещались к г. Цимлянск от Каспийского моря через территорию Республики Калмыкия (см. рис. 2, а), что создавало благоприятные условия для переноса аэрозольных частиц.

Второй эпизод (10–13 августа) характеризуется уменьшением концентрации аэрозольных частиц. Наблюдалось столкновение воздушных масс, следовавших с северо-запада и с юго-востока. Образование небольшого циклона привело к выпадению осадков 10 августа и снижению концентрации атмосферного аэрозоля до фонового значения, несмотря на усиление приземного ветра. Траектории движения воздушных масс в этот период были направлены вдоль р. Волга (см. рис. 2, б). 11 и 12 августа наблюдались низкие значения массовой концентрации. В эти дни район измерений находился в малоградиентном поле атмосферного давления.

Третий эпизод (13–15 августа) характеризовался ростом массовой концентрации аэрозольных частиц, что связано с прохождением теплого фронта. Воздушные массы перемещались со стороны Каспийского моря через территорию Республики Калмыкия (см. рис. 2, в). После прохождения фронта концентрация частиц незначительно снизилась. 14 и 15 августа продолжился рост массовой концентрации аэрозольных частиц. В этот момент происходила атмосферная циркуляция в области между Азовским морем и Цимлянским водохранилищем (см. рис. 2, г). Соответственно, увеличение концентрации аэрозоля в этот момент может быть обусловлено его привнесом из урбанизированных и промышленных районов юга России и прилегающих областей Украины.

Анализ изменения массовой концентрации аэрозоля за весь период наблюдений выявил ее сильную зависимость от протекающих в атмосфере синоптических процессов и связанных с этим механизмов образования аэрозолей и переноса их воздушными массами. Однако для идентификации аэрозольных источников необходимо учитывать микрофизические параметры и химический состав аэрозольных частиц в приземном слое атмосферы, а также элементный состав почв подстилающей поверхности.

Результаты фракционного и химического анализа состава приземного аэрозоля представлены ниже. В табл. 1 приведены значения (минимальные, средние и максимальные) массового содержания химических элементов в составе аэрозольных частиц, полученные дискретным методом. В течение каждого из рассматриваемых эпизодов для химического анализа было отобрано от 4 до 8 проб. Рассчитанные коэффициенты корреляции $K_{кор}$ между средними значениями массового содержания химических элементов на каждой из проб, взятых в ходе первого, второго и третьего эпизодов, составили соответственно 0.97, 0.97 и 0.94. В то же время значения коэффициента корреляции между усредненными (по всем пробам каждого эпизода) значениями массового содержания химических элементов для первого и второго эпизодов составили 0.82, а для первого и третьего эпизодов – 0.86. При этом характер изменения поэлементного массового

Таблица 1. Минимальные (C_{\min}), средние (C_{med}) и максимальные (C_{\max}) значения массового содержания элементов в аэрозольных частицах в Цимлянском р-не Ростовской обл. за период наблюдений, $\text{нг}/\text{м}^3$

Элемент	Эпизод 1 02–09.08.2012 г.			Эпизод 2 09–13.08.2012 г.			Эпизод 3 13–15.08.2012 г.		
	C_{\min}	C_{med}	C_{\max}	C_{\min}	C_{med}	C_{\max}	C_{\min}	C_{med}	C_{\max}
Li	0.634	1.776	2.9	0.275	0.899	1.9	0.569	1.28	1.37
Be	0.042	0.091	0.223	0.012	0.051	0.067	0.026	0.043	0.057
B	3.82	5.03	6.57	1.71	3.37	6.57	1.97	2	2.66
Na	42.1	118.5	273	62.9	116.1	210	148	360	456
Mg	362	570	873	109.4	310	608	196	377	417
Al	932	2018	2971	463	1136	2386	625	1210	1700
P	23.9	47.9	83.9	8.2	30	45.2	18.8	43	48.9
S	377	671	1063	717	917	1076	652	1048	1182
K	275	668	1151	193	360	428	272	760	841
Ca	1239	2199	3425	327	1256	2074	610	1267	1558
Sc	0.02	0.536	0.938	0.218	0.423	0.545	0.212	0.307	0.442
Ti	2.23	90.20	148.93	14.29	44.11	88.89	33.38	53.46	72.70
V	1.97	3.35	5.13	0.257	1.91	5.13	1.15	2.60	3.86
Cr	0.177	3.55	7.72	0.66	3.11	6	0.476	1.55	2.86
Mn	14.9	37.2	57.5	6	20.2	40.7	13.7	26.7	29.4
Fe	576	1511	2489	318	906	1624	631	1185	1437
Co	0.286	0.747	2.8	0.094	0.342	0.726	0.194	0.389	0.477
Ni	1.31	3.04	5.13	1.5	1.74	4.01	1.01	1.81	2.53
Cu	1.12	3.15	4.72	1.9	4.5	10.5	0.77	2.79	4
Zn	10.5	14	26.2	10.3	13.6	29.5	33.3	53.5	63.7
Ga	0.244	0.706	0.894	0.049	0.313	0.562	0.092	1.54	5.37
As	0.335	0.710	1.36	0.647	0.689	1.26	0.121	0.323	0.431
Se	261	445	630	0.164	0.372	0.631	0.285	0.421	0.715
Rb	0.036	3.3	5.12	0.568	1.65	3.52	1.09	2.3	2.86
Sr	6.92	13	21	1.72	7.62	17.9	4.62	8.41	12
Y	0.304	0.698	1.036	0.107	0.331	0.742	0.208	0.426	0.474
Zr	0.797	1.84	2.84	0.322	0.914	1.7	0.694	1.08	1.24
Nb	0.127	0.239	0.352	0.046	0.113	0.225	0.072	0.132	0.164
Mo	0.215	0.308	0.514	0.085	0.204	0.514	0.005	0.005	0.005
Pd	0.031	0.056	0.065	0.021	0.024	0.038	0.019	0.029	0.029
Ag	0.017	0.028	0.062	0.017	0.027	0.043	0.021	0.052	0.129
Cd	2.1	3.24	5.61	1.14	2.1	4.76	0.840	0.956	1.32
Sn	0.049	0.559	0.612	0.207	0.323	1.102	0.055	0.192	0.41
Sb	0.105	0.234	0.589	0.091	0.195	0.277	0.139	0.329	0.616
Te	0.009	0.012	0.019	0.006	0.011	0.021	0.008	0.017	0.029
Cs	0.09	0.211	0.312	0.044	0.114	0.24	0.086	0.174	0.177
Ba	7.67	18.4	26	4.33	10.9	23.1	6.82	11.5	11.7
La	0.486	1.216	1.844	0.183	0.582	1.296	0.32	0.742	0.862
Ce	1.02	2.56	3.96	0.372	1.19	2.68	0.68	1.54	1.879
Pr	0.12	0.296	0.455	0.048	0.144	0.316	0.086	0.182	0.214
Nd	0.474	1.152	1.748	0.182	0.558	1.281	0.336	0.728	0.858
Sm	0.092	0.232	0.353	0.035	0.115	0.265	0.069	0.147	0.172
Eu	0.028	0.047	0.074	0.007	0.023	0.052	0.014	0.029	0.034
Gd	0.085	0.2	0.301	0.032	0.098	0.234	0.06	0.129	0.156
Tb	0.013	0.03	0.044	0.005	0.015	0.035	0.01	0.02	0.024
Dy	0.068	0.158	0.229	0.025	0.077	0.185	0.05	0.102	0.124
Ho	0.014	0.03	0.044	0.005	0.015	0.036	0.01	0.02	0.025
Er	0.037	0.083	0.118	0.014	0.041	0.096	0.027	0.054	0.066
Tm	0.005	0.011	0.016	0.002	0.006	0.013	0.004	0.008	0.01
Yb	0.032	0.071	0.104	0.012	0.035	0.082	0.023	0.046	0.056

Таблица 1 (окончание)

Элемент	Эпизод 1 02–09.08.2012 г.			Эпизод 2 09–13.08.2012 г.			Эпизод 3 13–15.08.2012 г.		
	C_{\min}	C_{med}	C_{\max}	C_{\min}	C_{med}	C_{\max}	C_{\min}	C_{med}	C_{\max}
Lu	0.005	0.01	0.014	0.002	0.005	0.013	0.004	0.007	0.009
Hf	0.029	0.054	0.074	0.012	0.03	0.066	0.02	0.038	0.049
W	0.008	0.051	0.078	0.01	0.042	0.175	0.005	0.015	0.027
Re	0.001	0.001	0.011	0.002	0.003	0.007	0.001	0.001	0.001
Au	0.001	0.001	0.005	0.004	0.004	0.004	0.006	0.006	0.006
Hg	0.044	0.087	0.219	0.015	0.036	0.105	0.05	0.061	0.077
Tl	0.019	0.029	0.037	0.014	0.023	0.045	0.029	0.049	0.095
Pb	3.07	5.86	8.81	4.32	5.85	11.9	6.93	7.85	13.3
Bi	0.022	0.035	0.057	0.022	0.041	0.151	0.024	0.048	0.078
Th	0.153	0.362	0.528	0.061	0.176	0.398	0.117	0.237	0.267
U	0.033	0.067	0.101	0.012	0.034	0.074	0.027	0.058	0.059

содержания в целом повторяет на качественном уровне характер изменения общей концентрации аэрозольных частиц по рассмотренным трем эпизодам и может быть связан с особенностями синоптических условий во время полевых наблюдений.

Дисперсный и элементный состав аэрозольных частиц

В процессе измерений определялся дисперсный и элементный состав аэрозольных частиц. На рис. 3 представлены спектры распределения аэрозольных частиц по размерам, полученные для описанных выше эпизодов.

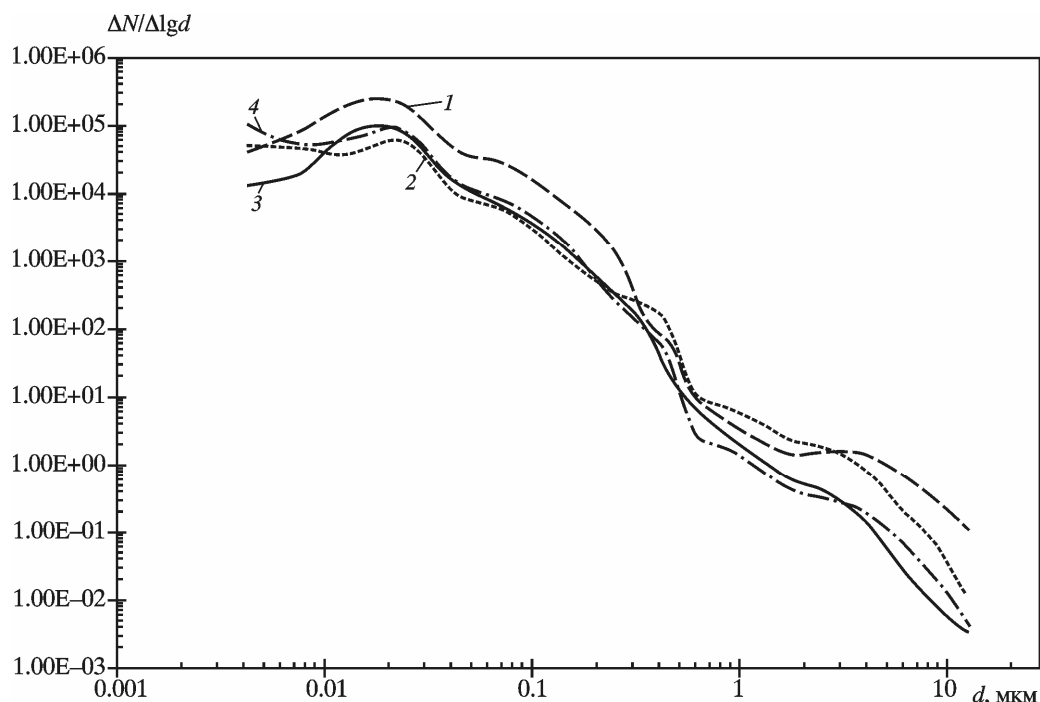


Рис. 3. Спектры распределения аэрозольных частиц по размерам для эпизодов с различными синоптическими условиями в районе исследования

1 – антициклон, 02.08.2012 г., время регистрации – 22.00 ч; 2 – теплый фронт, 13.08.2012 г., время регистрации – 22.00 ч; 3 – минициклон, 10.08.2012 г., время регистрации – 22.00 ч; 4 – поступление воздушных масс из промышленных районов юга России, 14.08.2012 г., время регистрации – 17.00 ч. Время – местное

Функция распределения частиц по размерам для первого эпизода значительно отличается от функций распределения частиц, относящихся ко второму и третьему эпизодам, во всем диапазоне размеров. В данный период наблюдений количество субмикронных частиц увеличивается вдвое по сравнению с другими периодами наблюдений, а число частиц микронного размера – почти на порядок. С учетом синоптических условий следует предположить, что такой рост аэрозольных частиц в приземном слое атмосферы связан с ветровым выносом частиц верхнего слоя почвы с территории Калмыкии при прохождении над ней воздушных масс.

Функция распределения частиц, относящаяся ко второму эпизоду, характеризуется наименьшим числом частиц микронной и субмикронной фракции, что связано с выпадением осадков во время господства циклона.

В течение третьего эпизода наблюдается некоторое увеличение числа частиц с диаметром 0.2–0.3 мкм, что указывает на наличие солевых частиц, образовавшихся над поверхностью моря во время шторма [Жуланов и др., 1982; Аникиев, Колесов, 2008] и перенесенных в район наблюдений воздушными массами. Также происходит увеличение количества частиц микронной фракции, связанное с ветровым выносом с территории Калмыкии. В спектре распределения частиц (данные 14 и 15 августа) ярко выражен пик субмикронных частиц, который может быть обусловлен переносом аэрозольных частиц антропогенного происхождения из промышленных районов юга России и Украины, а увеличение числа частиц микронной фракции вызвано ветровым выносом терригенных частиц.

В табл. 2 приведены результаты элементного фракционного анализа состава приземного аэрозоля в исследуемый период. Используя описанный выше метод, в составе атмосферных аэрозольных частиц идентифицировано свыше 60 химических элементов. Многие из элементов содержатся в аэрозольных частицах всех фракций (Li, Be, Al, P, K, Ca, Mn, Fe, Ga, Cs, Ba, La, Ce, Pr и др.). Причем элементы ряда La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu имеют схожий характер процентного распределения по фракциям, поскольку все они относятся к лантаноидам и обладают сходными физико-химическими свойствами.

Обращают на себя внимание элементы, содержащиеся главным образом в ультрамелких фракциях частиц PM_{2.5} (размером до 2.5 мкм). К таким элементам относятся S, Ti, Se, Mo, Cd, Hg, Pb, Bi, W. Суммарное процентное содержание каждого из этих элементов на 4-м, 5-м и 6-м каскадах импактора превышает 60 %. Максимальное процентное содержание ртути обнаружено в самой мелкой фракции частиц (размером до 0.5 мкм) на 6-м каскаде импактора.

Фракционный анализ, коэффициенты обогащения и возможные источники атмосферного аэрозоля

В табл. 3 приведены данные об элементном составе почвы (пробы взяты в двух районах степной зоны засушливого типа). У всех проб оказался практически одинаковый процентный состав элементов, на что указывает, в частности, высокий коэффициент корреляции между почвами $K_{кор} = 0.98–0.99$.

Для выявления элементов терригенного и техногенного происхождения использовались средние значения коэффициентов обогащения химических элементов в аэрозолях относительно кларков земной коры ($EF_{med\ ak}$) и относительно почвы ($EF_{med\ an}$) и средние значения коэффициентов обогащения в почвах относительно кларков земной коры ($EF_{med\ nk}$). Формула расчета $EF_{med\ nk}$ аналогична формуле (1). Эти данные представлены в табл. 4, 5.

Таблица 2. Элементный фракционный состав аэрозольных частиц на каскадах (1–6) импактора в Цимлянском р-не Ростовской обл. за период наблюдений, %

Элемент	Отбор 02–09.08.2012 г.						Отбор 09–15.08.2012 г.					
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
	Диаметр частиц, мкм						Диаметр частиц, мкм					
	> 6.5 (до 500)	4.0–6.5	2.5–4.0	1.5–2.5	0.5–1.5	< 0.5	> 6.5 (до 500)	4.0–6.5	2.5–4.0	1.5–2.5	0.5–1.5	< 0.5
Li	18.6	31.3	25.2	14.5	6.8	3.5	24	28.3	21.7	15.7	5.1	5.3
Be	18.9	31.0	26.7	13.6	5.8	4	24	30.1	22.1	13.8	3.1	6.8
Na	11	12.1	12.9	24.2	12.9	26.8	12.8	23.7	11.2	16.8	9.2	26.4
Mg	16.5	28.4	26.9	16.3	7.6	4.2	22.3	29.9	15.6	18.5	5.6	8.1
Al	19.3	28.9	26.7	15.2	6.7	3.2	27.9	30.4	15.8	14.5	5.2	6.1
P	19.7	26.7	23	12.1	10.2	8.4	30.5	30	8.3	12.8	6.2	12.2
S	2.2	4.4	5.5	17.6	36.8	33.5	2.2	3.9	3.8	26	34.2	29.9
K	14.0	19.7	18.7	16.3	16.5	14.9	19.1	18.5	9.8	15.5	14.3	22.7
Ca	18.4	31	26.0	14.1	5.9	4.6	24	32.9	14.2	15.1	4.9	8.8
Sc	30.8	37.8	31.4	н.о.	н.о.	н.о.	100.0	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.
Ti	9.7	14.9	15.7	25.6	н.о.	34	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	100
Cr	22.9	11.2	16.4	10.6	13.2	25.6	36.6	11.4	7.9	9.3	2.6	32.1
Mn	19.8	29	24.1	14	7.5	5.6	23	25.9	19.2	16.4	6.7	8.8
Fe	18.8	29.3	25.4	13.7	6.8	5.9	27.3	29.4	12.3	15	5.4	10.6
Co	18	26.8	25.8	14.4	7.6	7.4	31.7	23.5	18.8	11.6	2.9	11.5
Ni	21.4	10.9	16	9.5	15.3	26.9	44.8	8.6	7.1	7.3	0.6	31.6
Cu	11.3	28.4	17.5	18	9.6	15.3	11	4.7	21.8	9.7	43	9.7
Zn	11.8	15.7	25.6	14.6	16.7	15.7	14.6	9.5	14.2	23.1	20.9	17.6
Ga	16.1	15.7	27.2	15.8	19.8	5.5	29.7	15.5	16.7	11.7	16.7	9.7
As	н.о.	17.1	29.7	31.8	21.4	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.
Se	н.о.	н.о.	39	35.5	н.о.	25.5	н.о.	н.о.	29.0	50.7	н.о.	20.2
Rb	18.0	28.2	24.2	15.6	8.3	5.6	22.6	24.7	19.3	16.1	9.3	8.1
Sr	17.6	29.1	25.2	16.6	7.2	4.3	18.1	27.2	24.1	19.5	5.9	5.2
Y	21.3	32.6	26.1	14.6	5.4	н.о.	29.8	34	23.2	13	н.о.	н.о.
Zr	20.2	20.7	22	17.1	н.о.	20	29.6	30.2	н.о.	н.о.	н.о.	40.3
Nb	25.6	25.8	29	19.7	н.о.	н.о.	100	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.
Mo	10	5.5	5.4	12.2	14	52.9	20.4	3.4	11.4	15.2	18	31.7
Ag	н.о.	94.7	н.о.	н.о.	5.3	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.
Cd	6.8	12.7	16.5	18.8	26.4	18.9	6.2	4.4	11	50.6	17	10.8
Sn	3.3	4.2	32.4	43.8	6.3	10	15.5	10.2	9.9	20.2	16.5	27.7
Sb	7.9	32.9	9.3	15.8	17.2	16.9	8.3	8.7	9.3	23.2	26.6	23.9
Cs	19.2	28.4	23.7	15.1	8.2	5.4	19.1	23.1	18.9	18.9	12.7	7.3
Ba	19	29	25.1	15.9	6.5	4.5	24.6	27.1	21	15.5	5.4	6.3
La	24.3	30.2	24	13	5.4	3.2	27	27.8	21.6	14.2	4	5.4
Ce	19.9	32.3	25.5	13.4	5.3	3.6	28.7	28.4	20.7	12.9	3.5	5.7
Pr	20.1	33.5	25.4	12.6	4.9	3.6	29.5	29.6	22	12.8	н.о.	6.1
Nd	20.3	33.2	24.8	13	5.2	3.6	27.4	30.3	20.4	12.4	3.5	5.9
Sm	20.4	30.9	26.7	13.5	5.9	2.7	26.7	30.2	23	12.9	2.9	4.2
Eu	20.8	34	24.8	14.4	5.9	н.о.	28.6	31.4	25.3	14.7	н.о.	н.о.
Gd	14.5	21.7	15.6	18.4	27.1	2.8	27.6	25.4	18.1	10.7	12.3	6
Tb	н.о.	100	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.
Dy	19.7	31.3	25.6	14.3	5.8	3.3	27.2	29.3	22.8	11.6	3.7	5.4
Ho	20.8	32.7	27.5	13.8	5.2	н.о.	29.3	34.3	21.5	14.9	н.о.	н.о.
Er	19.2	30.9	28.1	12.9	5.4	3.5	31.2	29	20.7	13.2	н.о.	5.8
Tm	18.4	37.2	28	16.4	н.о.	н.о.	н.о.	100	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.
Yb	19.9	31.4	24.7	14.6	5.6	3.8	29.8	30.1	18.8	14.7	н.о.	6.6
Lu	24.5	43	32.4	н.о.	н.о.	н.о.	50.3	49.7	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.
W	10.7	58.8	8.2	11.6	6.5	4.2	39.3	н.о.	н.о.	40.2	н.о.	20.4
Re	59	н.о.	н.о.	41	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	100	н.о.	н.о.
Au	н.о.	н.о.	100	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.
Hg	3.1	0.1	н.о.	н.о.	н.о.	96.8	8.0	3.4	н.о.	н.о.	н.о.	88.6
Tl	9	16.8	14.8	18.7	21.5	19.2	8.5	10.7	10.5	25.6	28.3	16.4
Pb	3.2	5.9	13.2	23.5	18.1	36.1	4.9	5	7	22.8	19.4	40.9
Bi	н.о.	н.о.	16.2	32	30.5	21.3	н.о.	н.о.	н.о.	41.0	28.3	30.6
Th	23	34	28.3	14.7	н.о.	н.о.	28.9	34	23.2	13.9	н.о.	н.о.
U	16.9	29.6	22.5	15.2	6.7	9	20.9	24.6	21.2	17.2	5	11.2

Примечание. Здесь и далее в табл. 3–6 «н.о.» – не обнаружено.

Таблица 3. Содержание химических элементов в почвах пробоотборных площадок

Элемент	Единица измерения	Точки отбора проб почвы*					
		ЦНС ИФА им. А.М. Обухова РАН		Чернышковский р-н Волгоградской обл.			
		1	2	3	4	5	6
Li	мкг/г	16.8	21	1.84	2.56	1.99	1.9
Be	мкг/г	1.02	1.12	0.07	0.14	0.08	0.08
Na	%	0.425	0.559	0.0145	0.0308	0.009	0.016
Mg	%	0.44	0.487	0.02	0.0405	0.0215	0.0255
Al	%	3.59	4.37	0.221	0.431	0.256	0.302
P	%	0.0628	0.0649	0.00387	0.00847	0.0037	0.00712
S _{общ}	%	0.068	0.0616	0.00771	0.00808	0.00646	0.00614
K	%	1.19	1.42	0.064	0.169	0.085	0.121
Ca	%	0.586	0.663	0.0107	0.0298	0.00974	0.019
Sc	мкг/г	6.87	7.84	0.41	0.85	0.36	0.44
Ti	%	0.246	0.287	0.0461	0.135	0.0266	0.0492
V	мкг/г	54.64	61.8	3.77	8.08	3.36	4.67
Cr	мкг/г	44.62	50.80	4.16	7.36	4.25	4.47
Mn	%	0.0488	0.0612	0.0035	0.0063	0.0026	0.0035
Fe	%	1.95	2.3	0.163	0.291	0.159	0.181
Co	мкг/г	8.47	10.30	0.49	1.06	0.50	0.52
Ni	мкг/г	27.15	31.04	1.05	2.32	1.14	1.79
Cu	мкг/г	17.95	19.88	1.18	2.21	0.90	1.15
Zn	мкг/г	71.47	80.23	7.37	15.33	6.17	7.78
Ga	мкг/г	7.80	9.06	0.57	1.12	0.56	0.71
As	мкг/г	5.47	6.33	0.29	1.00	0.27	0.35
Se	мкг/г	0.80	0.70	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.
Rb	мкг/г	55.20	67.97	4.34	8.14	4.48	5.50
Sr	мкг/г	87.02	107.08	4.60	11.01	5.44	7.06
Y	мкг/г	11.22	13.13	1.12	2.23	0.90	0.96
Zr	мкг/г	79.94	88.31	8.83	33.78	11.53	12.54
Nb	мкг/г	5.73	6.59	0.92	2.48	0.64	1.05
Mo	мкг/г	0.75	0.88	0.11	0.2	0.09	0.09
Ag	мкг/г	0.06	0.05	н.о.	н.о.	0.03	н.о.
Cd	мкг/г	0.33	0.31	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.
Sn	мкг/г	1.04	1.12	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.
Sb	мкг/г	0.79	0.80	0.12	0.18	0.16	0.21
Cs	мкг/г	2.30	2.70	0.19	0.31	0.19	0.21
Ba	мкг/г	331.88	381.16	29.10	73.88	38.97	53.41
La	мкг/г	20	21.65	2.25	5.39	2	2.74
Ce	мкг/г	41.92	51.32	4.91	11.92	4.54	5.94
Pr	мкг/г	4.50	5.29	0.49	1.34	0.46	0.63
Nd	мкг/г	17.28	20.56	1.79	5.07	1.62	2.40
Sm	мкг/г	3.47	4.02	0.32	0.88	0.29	0.43
Eu	мкг/г	0.67	0.77	0.06	0.14	0.05	0.06
Gd	мкг/г	3.02	3.53	0.28	0.73	0.25	0.34
Tb	мкг/г	0.44	0.51	0.04	0.10	0.04	0.05
Dy	мкг/г	2.31	2.58	0.23	0.47	0.17	0.23
Ho	мкг/г	0.48	0.53	0.05	0.09	0.04	0.04
Er	мкг/г	1.34	1.58	0.14	0.25	0.11	0.11
Tm	мкг/г	0.19	0.22	0.02	0.04	0.02	0.02
Yb	мкг/г	1.36	1.53	0.14	0.25	0.12	0.11
Lu	мкг/г	0.20	0.23	0.02	0.04	0.02	0.02
Hf	мкг/г	2.30	2.44	0.26	0.85	0.32	0.37
Ta	мкг/г	0.46	0.53	0.06	0.18	0.04	0.07
W	мкг/г	0.71	0.77	0.06	0.13	0.06	0.08
Hg	мкг/г	0.03	0.02	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.
Tl	мкг/г	0.36	0.41	0.02	0.05	0.03	0.03
Pb	мкг/г	22.2	22.53	1.93	4.36	1.76	2.79
Bi	мкг/г	0.18	0.19	0.02	0.03	0.01	0.02
Th	мкг/г	5.68	6.99	0.50	1.22	0.43	0.79
U	мкг/г	1.28	1.46	0.20	0.37	0.19	0.25

*Координаты точек отбора проб: 1 – 47.656259° с.ш., 42.079935° в.д.; 2 – 47.656934° с.ш., 42.079842° в.д.; 3 – 47.916300° с.ш., 42.616890° в.д.; 4 – 47.907350° с.ш., 42.683160° в.д.; 5 – 47.941110° с.ш., 42.684720° в.д.; 6 – 47.976150° с.ш., 42.649900° в.д.

Таблица 4. Коэффициенты обогащения элементов относительно кларков земной коры для почв пробоотборных площадок ($EF_{пк}$) и средние значения этих коэффициентов ($EF_{мед\ пк}$)

Элемент	$EF_{пк}$ в точках отбора проб почвы						$EF_{мед\ пк}$	
	1	2	3	4	5	6	для точек 1, 2	для точек 3–6
Li	1	1	2	1	2	2	1	2
Be	1	1	1	1	1	1	1	1
B	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.
Na	0.4	0.4	0.2	0.2	0.1	0.2	0.4	0.2
Mg	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.4
Al	1	1	1	1	1	1	1	1
P	2	1	2	2	1	2	1	2
S _{общ}	3	2	6	3	4	3	3	4
K	1	1	1	1	1	1	1	1
Ca	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.
Sc	2	1	1	2	1	1	1	1
Ti	1	1	4	6	2	3	1	4
V	1	1	2	2	1	1	1	1
Cr	3	3	4	4	4	4	3	4
Mn	1	1	1	1	1	1	1	1
Fe	1	1	1	1	1	1	1	1
Co	1	1	1	1	1	1	1	1
Ni	1	1	1	1	1	1	1	1
Cu	1	1	1	1	1	1	1	1
Zn	2	2	3	3	2	2	2	3
Ga	1	1	1	1	1	1	1	1
As	9	8	7	13	6	7	9	8
Se	36	26	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	31	н.о.
Rb	1	1	1	1	1	1	1	1
Sr	1	1	1	1	1	1	1	1
Y	1	1	1	1	1	1	1	1
Zr	1	1	2	4	2	2	1	2
Nb	1	1	2	2	1	1	1	2
Mo	2	1	4	3	2	2	2	3
Ag	2	2	н.о.	н.о.	17	н.о.	2	17
Cd	6	4	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	5	н.о.
Sn	1	1	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	1	н.о.
Sb	4	3	9	7	10	11	3	9
Cs	1	1	2	2	2	2	1	2
Ba	1	1	2	2	2	2	1	2
La	2	1	3	3	2	3	1	3
Ce	1	1	3	3	2	2	1	3
Pr	1	1	2	3	2	2	1	2
Nd	1	1	2	3	1	2	1	2
Sm	1	1	1	2	1	1	1	2
Eu	1	1	1	2	1	1	1	1
Gd	1	1	1	2	1	1	1	1
Tb	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.
Dy	1	1	2	2	1	1	1	1
Ho	1	1	1	1	1	1	1	1
Er	1	1	2	1	1	1	1	1
Tm	2	1	3	3	2	2	2	2
Yb	9	9	15	14	11	9	9	12
Lu	1	1	1	1	1	1	1	1
Hf	5	4	10	16	10	10	5	11
Ta	н.о.	н.о.	1	1	1	1	н.о.	1
W	1	1	н.о.	2	2	2	1	2
Hg	1	1	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	1	н.о.
Tl	1	1	1	1	1	1	1	1
Pb	3	3	4	5	3	5	3	4
Bi	45	39	75	63	45	65	42	62
Th	1	1	1	2	1	2	1	1
U	1	1	3	3	2	3	1	3

Примечание. Координаты точек отбора проб почвы см. в сноске к табл. 3.

Таблица 5. Средние значения коэффициентов обогащения элементов для аэрозоля относительно кларков земной коры ($EF_{med\ ak}$) и относительно почвы ($EF_{med\ an}$)

Элемент	Эпизод 1 02–09.08.2012 г.		Эпизод 2 09–13.08.2012 г.		Эпизод 3 13–15.08.2012 г.	
	$EF_{med\ ak}$	$EF_{med\ an}$	$EF_{med\ ak}$	$EF_{med\ an}$	$EF_{med\ ak}$	$EF_{med\ an}$
Li	2.1	1.8	2.1	1.6	2.3	2
Be	1.3	2.1	0.7	1.5	0.8	1.4
B	2.2	н.о.	2.0	н.о.	1.5	н.о.
Na	0.2	0.5	0.6	1.5	0.9	2.2
Mg	1.2	2.4	1.2	2.5	1.1	2.2
Al	1	1	1	1	1	1
P	2	1.4	2.6	1.9	2.7	1.9
S	74.3	23.4	173	61	142	50.9
K	1.1	1	1.5	1.5	1.4	1.3
Ca	3	6.9	3.3	8.3	2.1	5
Sc	2.1	1.3	2.9	2	1.9	1.3
Ti	0.8	0.7	0.6	0.5	0.8	0.7
V	1.6	1.2	1.3	1	1.8	1.3
Cr	5.1	1.3	3.3	1.4	2.7	1
Mn	1.5	1.3	1.5	1.3	1.6	1.4
Fe	1.3	1.4	1.4	1.5	1.6	1.8
Co	1.6	1.5	1.4	1.2	1.4	1.3
Ni	2.2	2	2.6	2.5	1.8	1.8
Cu	3.6	3.5	8.3	10.5	2.6	3.2
Zn	8.6	4.1	15.9	8.9	42	22.7
Ga	1.6	1.9	1.2	1.4	5.1	5.6
As	26.9	2.8	24.8	2.8	11.8	1.4
Se	257	8.3	776	23.2	654	21.6
Rb	0.8	1	0.8	1	1	1.2
Sr	1.6	2.7	1.8	3.3	1.4	2.4
Y	0.9	1.1	0.8	1	0.9	1.1
Zr	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
Nb	0.5	0.8	0.4	0.6	0.5	0.7
Mo	12	5.4	3.5	2.3	0.3	0.2
Pd	118	н.о.	114	н.о.	116	н.о.
Ag	27.4	12	30.6	17	75.1	41.4
Cd	1221	239	1113	218	615	123
Sn	9.3	11.2	8.0	8.3	6.6	7.5
Sb	19.9	5.9	31.2	9.6	52.7	16.4
Te	678	н.о.	844	н.о.	1174	н.о.
Cs	2.2	1.7	2.4	1.7	3.1	2.3
Ba	1.1	1.1	1.3	1.1	1.1	1
La	1.6	1.1	1.5	1	1.6	1.1
Ce	1.4	1.1	1.3	0.9	1.4	1
Pr	1.3	1.2	1.2	1	1.3	1.2
Nd	1.2	1.2	1.1	1	1.2	1.2
Sm	1.1	1.2	1	1.1	1.1	1.2
Eu	1.3	1.3	1.2	1.1	1.3	1.2
Gd	1	1.2	0.9	1.1	1	1.2
Tb	0.3	1.2	0.3	1.1	0.3	1.3
Dy	1.2	1.3	1.1	1.1	1.3	1.3
Ho	0.7	1.2	0.6	1.1	0.7	1.2
Er	1	1.1	0.9	1	1	1.2
Tm	1.7	1.1	1.5	1	1.8	1.2

Нормировка элементного состава атмосферных аэрозолей по кларкам и элементному составу почв в районе наблюдения позволила предположить, что химические элементы в аэрозолях, для которых значение коэффициента обогащения аэрозолей элементом относительно кларков $EF_{med\ ak} \leq 10$, независимо от того, каков коэффициент обогащения аэрозолей элементом относительно почв, являются элементами преимущественного терригенного происхождения. Высокий коэффициент обогащения химических элементов в аэрозолях как по кларкам, так и по почве указывает на наличие техногенного источника их происхождения. Если коэффициент обогащения аэрозолей элементом относительно кларков $EF_{med\ ak} > 10$, а относительно почв $EF_{med\ an} \leq 10$, то в этом случае надо учитывать коэффициент обогащения элементом пробы поверхностного слоя почвы ($EF_{med\ nk}$). Элементный состав поверхностного слоя почвы определяется в основном двумя составляющими: терригенной, отражающей элементный состав почвы тех мест, где была взята проба, и техногенной, связанной с производственной деятельностью окружающих промышленных предприятий. Значения коэффициента обогащения для подавляющего большинства химических элементов (см. табл. 4, 5) $EF_{med\ n} \leq 10$, и только Se и Bi имеют высокий коэффициент обогащения. Коэффициенты обогащения аэрозоля большинства химических элементов, идентифицированных на фильтрах относительно кларков и проб почвы, также $EF_{med\ a} \leq 10$. В то же время имеются элементы, для которых характерно среднее значение фактора обогащения $EF_{med\ a} > 10$. К ним относятся халькофильные элементы As, Se, Zn, Cd, Sb, Te, Hg, Pb, Bi, а также S и сидерофильный элемент Mo. Элементы As, Se, Cd, Sb, Te, Hg, Pb, Bi, а также S имеют высокий коэффициент обогащения относительно кларков и почв $EF_{med} > 10$ во всех эпизодах, Zn – во втором и третьем, а Mo – только в первом. В этой группе элементов As и Bi определяются как терригенные, Se и Zn в первом эпизоде определяются как терригенные, а в остальных как антропогенные, остальные элементы во всех эпизодах определяются как антропогенные. Из проведенного анализа следует, что элементы Se, Cd, Sb, Te, Hg, Pb и S имеют антропогенное происхождение и постоянно присутствуют в аэрозоле в точке наблюдений.

Из сказанного можно сделать вывод об источниках поступления идентифицированных химических элементов в атмосферу, выделяя литогенную составляющую элемента и вклад возможных техногенных источников и считая, что вклад биогенного источника (органическое вещество почв) и солевого (солевые частицы из почв и принесенные со стороны Каспийского моря) незначителен.

Анализ элементного состава по фракциям аэрозольных частиц с учетом среднего фактора обогащения EF_{med} для каждого исследуемого химического элемента показал следующее. Элементы Hg, S, As, Se, Cd, Sn, Sb, Pb, Bi, Zn и W, относящиеся к особо вредным веществам, содержатся главным образом в ультрамелких (с размером частиц 0.5–2.5 мкм) фракциях аэрозолей. Аэрозольные частицы этих размеров могут проникать сквозь стенки мембран и накапливаться на стенках кровеносных сосудов и в других органах человека [Куценко, 2004]. Высокие значения коэффициентов обогащения этих элементов, их корреляция с элементами, которые обычно обогащают частицы в процессе горения, а также процентное содержание элементов в частицах дают основания предполагать, что данные элементы в аэрозолях имеют в основном антропогенное происхождение, т.е. конденсируются на частицах в процессе сжигания нефтепродуктов, природного газа или угля.

При выявлении возможных источников атмосферного аэрозоля в приземном слое воздуха в точке наблюдений следует также обратить внимание на тот факт, что в течение 1-го эпизода наблюдался перенос аэрозольных частиц воздушными массами с тер-

ритории Калмыкии (см. рис. 2, а). Используя данные об элементном составе, концентрации аэрозольных частиц, химическом составе почвы, полученные ранее в экспедиционных исследованиях на территории Республики Калмыкия [Андропова и др., 1998; Голицын и др., 1998, 1999; Горчаков и др., 1998; Chkhetiani et al., 2012], а также принимая во внимание результаты, представленные в [Mahowald et al., 2014], был произведен расчет концентраций элементов, содержащихся в почвах Калмыкии, исходя из концентраций элементов в аэрозольных частицах в точке наблюдений. В расчетах использовали коэффициент согласования, учитывающий разницу между концентрациями по опорному элементу в аэрозоле и почве ($K = 1.027$). В образцах «цимлянского» аэрозоля данные по 1-му эпизоду были усреднены. Результаты пересчета представлены в табл. 6. Получено хорошее соответствие между расчетными и измеренными значениями процентного содержания элементов в почвах Калмыкии. Это подтверждает, что почвы Калмыкии (в основном песчаного состава) могут служить источником аэрозольных частиц, поступающих в воздушный бассейн г. Цимлянск и окрестностей.

Таблица 6. Содержание основных элементов в почве Калмыкии и в аэрозолях Калмыкии и г. Цимлянск за период наблюдений, %

Элемент	Почва		Аэрозоль		Коэффициент обогачения для аэрозоля (Калмыкия)
	Калмыкия	Калмыкия (расчет)	г. Цимлянск	Калмыкия	
Na	1.1	0.8	0.2	0.4	0.3
Mg	0.4	0.42	1	1.3	2.3
Al	3.4	3.3	3.5	5.1	1
P	0.03	0.02	0.1	0.14	3.6
S	0.01	0.01	1.4	1.8	95
K	1.6	1.5	1.2	1.8	0.7
Ca	0.6	0.6	3.8	5.4	5.9
Ti	0.2	0.3	0.2	0.1	0.5
Fe	1.3	1.4	2.6	3.4	1.7

Выводы

1. В работе представлены результаты исследования вариаций массовой концентрации, фракционного и элементного состава аэрозольных частиц в приземном слое атмосферы степной зоны засушливого типа (по данным натурных наблюдений параметров атмосферных аэрозолей и метеорологических параметров на ЦНС ИФА им. А.М. Обухова РАН в летний период 2012 г.). На основе совместного анализа метеорологических условий и полученных экспериментальных данных о микрофизических характеристиках, элементном составе и массовой концентрации атмосферных аэрозолей и с учетом данных модельных расчетов траекторий движения воздушных масс подтверждено влияние синоптических процессов как на характер изменения общей массовой концентрации аэрозоля, так и на массовое содержание элементов в аэрозолях. Показано, что происходило увеличение содержания атмосферных аэрозольных частиц вследствие солепылепереноса аридных аэрозолей из Калмыкии и привноса аэрозоля из промышленных и урбанизированных районов юга России и областей Украины. Уменьшение массовой концентрации аэрозоля наблюдалось при выпадении осадков и вымывании аэрозольных частиц из атмосферы.

2. Элементный анализ проб атмосферного аэрозоля, проведенный методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой, позволил идентифицировать в составе приземного слоя аэрозоля в районе наблюдений свыше 60 химических элементов. По рассчитанным коэффициентам обогащения всех элементов выявлены возможные источники их происхождения (природные или техногенные). Фракционный и корреляционный анализ позволили классифицировать элементы в составе аэрозолей в зависимости от размеров частиц и происхождения элементов. Анализ химического состава частиц антропогенного происхождения показал, что они представляют собой продукты сжигания нефти, угля или этилированного бензина. Массовая доля таких частиц в общей концентрации мала, однако, благодаря своим размерам и содержанию в них тяжелых металлов, они представляют наибольшую опасность для здоровья человека. Результаты траекторного анализа воздушных масс и синоптических условий позволили сделать предположение о том, что источником таких частиц являются промышленные предприятия городов Цимлянск и Волгодонск, а также других промышленных районов юга России и пограничных областей Украины.

3. Фракционный и химический анализ аэрозоля в приземном слое атмосферы позволил определить элементный состав во фракциях ультрамелких (размером до 2.5 мкм) и крупных (размером 2.5–500 мкм) аэрозольных частиц с учетом среднего фактора обогащения для каждого химического элемента. Выявлено, что элементы Hg, S, As, Se, Cd, Sn, Sb, Pb, Bi, Zn, и W, относящиеся к особо вредным веществам, содержатся в основном в наиболее опасных для здоровья человека ультрамелких фракциях аэрозольных частиц (размером 0.5–2.5 мкм). Высокие значения коэффициентов обогащения данных элементов, корреляция их с другими элементами, которые обычно обогащают частицы в процессе горения, а также процентное содержание элементов в аэрозолях свидетельствуют об антропогенной природе происхождения данных аэрозолей.

4. На основе полученных ранее результатов исследований аэрозоля и почв в Республике Калмыкия и данных наблюдений на ЦНС ИФА им. А.М. Обухова РАН показано, что источником аэрозольных частиц, поступающих в воздушный бассейн г. Цимлянск и окрестностей, могут служить почвы Калмыкии (в основном песчаные).

Благодарности

Работа выполнена в рамках проектов Российского фонда фундаментальных исследований № 13-05-01025-а, № 12-05-10043-к и частичной поддержке программ П4 «Природная среда России: адаптационные процессы в условиях изменяющегося климата и развития атомной энергетики», П-22 «Фундаментальные проблемы исследований и освоения Солнечной системы», ОНЗ-12 «Процессы в атмосфере и криосфере как фактор изменений окружающей среды».

Авторы выражают благодарность Г.С. Голицыну за постоянное внимание, интерес к работе и ценные советы, а также признательны анонимным рецензентам за конструктивные замечания, которые позволили существенно улучшить представление результатов исследования.

Литература

Андропова А.В., Минашкин В.М., Иорданский М.А., Невский И.А., Яблоков М.Ю., Обвинцев Ю.И., Зудин Б.В., Иванов Ю.Н., Лебедев В.А., Чижикова Н.П. Исследования процесса солепылепереноса с вновь осушенных территорий: Экспериментальные исследования //

- Междунар. конф. «Естественные и антропогенные аэрозоли», г. Санкт-Петербург, 29 сентября – 4 октября 1998 г.: Сб. тр. / Под ред. Л.С. Ивлева. СПб.: НИИ химии СПбГУ, 1998. С. 414–446.
- Аникиев В.В., Колесов Г.М.* Природные факторы, определяющие временную изменчивость основного химического состава минеральных аэрозолей над Северным Каспием // *Геохимия*. 2008. № 12. С. 1304–1321.
- Аэрозоль и климат / Под ред. К.Я. Кондратьева. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 511 с.
- Виноградов А.П.* Закономерности распределения химических элементов в земной коре // *Геохимия*. 1956. № 1. С. 6–52.
- Виноградова А.А., Малков И.П., Полиссар А.В., Храмов Н.Н.* Элементный состав приземного атмосферного аэрозоля арктических районов России // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 1993. Т. 29, № 2. С. 164–172.
- Гледзер Е.Б., Гранберг И.Г., Чхетиани О.Г.* Конвективные потоки аэрозоля вблизи поверхности почвы // *Докл. РАН*. 2009. Т. 426, № 3. С. 380–385.
- Голицын Г.С., Андропова А.В., Виноградов Б.В., Гранберг И.Г., Кудерина Т.М., Пономарев В.М.* Вынос почвенных частиц в аридных регионах (Калмыкия, Приаралье) // *Междунар. конф. «Физика атмосферного аэрозоля»: К 85-летию со дня рождения Г. В. Розенберга*, г. Москва, 12–17 апреля 1999 г.: Сб. тр. М.: Диалог-МГУ, 1999. С. 127–138.
- Голицын Г.С., Гранберг И.Г., Алоян А.Е., Андропова А.В., Арутюнян В.О., Виноградов Б.В., Габунцица Э.Б., Горчаков Г.И., Добрышман Е.М., Пономарев В.М.* Исследование термоконвективных выносов аридного аэрозоля в Черных Землях Калмыкии // *Междунар. конф. «Естественные и антропогенные аэрозоли»*, г. Санкт-Петербург, 29 сентября – 4 октября 1998 г.: Сб. тр. / Под ред. Л.С. Ивлева. СПб.: НИИ химии СПбГУ, 1998. С. 342–348.
- Горчаков Г.И., Копейкин В.М., Исаков А.А., Тихонов А.В., Шукуров К.А.* Исследование вариаций параметров аэрозоля в пограничном слое атмосферы // *Междунар. конф. «Физика атмосферного аэрозоля»: К 85-летию со дня рождения Г.В. Розенберга*, г. Москва, 12–17 апреля 1999 г.: Сб. тр. М.: Диалог-МГУ, 1999. С. 151–159.
- Горчаков Г.И., Шишков П.О., Копейкин В.М., Емиленко А.С., Исаков А.А., Захарова П.В., Сидоров В.Н., Шукуров К.А.* Лидарно-нефелометрическое зондирование аридного аэрозоля // *Оптика атмосферы и океана*. 1998. Т. 11, № 10. С. 1118–1123.
- Жуланов Ю.В., Невский И.А., Петрянов И.В.* Исследование параметров морских субмикронных аэрозолей и их роль в атмосферных процессах // *Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана*. 1982. Т. 18, № 9. С. 933–940.
- Ивлев Л.С.* Химический состав и структура атмосферных аэрозолей. Л.: ЛГУ, 1982. 382 с.
- Карандашев В.К., Туранов А.Н., Орлова Т.А., Лежнев А.Е., Носенко С.В., Золотарева Н.И., Москвина И.Р.* Использование метода масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой в элементном анализе объектов окружающей среды // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2007. Т. 73, № 1. С. 12–22.
- Кондратьев К.Я.* Климат и аэрозоль. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 224 с.
- Кондратьев К.Я., Москаленко Н.И., Поздняков Д.В.* Атмосферный аэрозоль. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 224 с.
- Кудряшов В.И.* Анализ элементного состава атмосферных аэрозолей физическими методами // *Проблемы физики атмосферы*. СПб.: Из-во СПбГУ, 1997. Вып. 20. Физика и химия атмосферных аэрозолей. С. 97–130.
- Куценко С.А.* Основы токсикологии. М.: Фолиант, 2004. 570 с.
- Советско-американский совместный эксперимент по изучению аридного аэрозоля: Сб. ст. / Отв. ред. Г.С. Голицын. СПб.: Гидрометеиздат, 1993. 220 с.

- Трефилова А.В., Артамонова М.С., Кудерина Т.М., Губанова Д.П., Давыдов К.А., Иорданский М.А., Гречко Е.И., Минашкин В.М. Химический состав и микрофизические характеристики аэрозоля г. Москвы и Подмосковья в июне 2009 г. и на пике пожаров 2010 г. // Геофизические процессы и биосфера. 2012. Т. 11, № 4. С. 65–82.
- Andronova A.V., Granberg I.G., Gricenko A.M., Gubanova D.P., Zudin B.V., Iordanskii M.A., Lebedev V.A., Nevskii I.A., Obvintsev Y.I. Studies of the spatial and temporal distribution of surface aerosol along the trans-Siberian railroad // *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 2003. V. 39. P. S27–S34.
- Chkhetiani O.G., Gledzer E.B., Artamonova M.S., Iordanskii M.A. Dust resuspension under weak wind conditions: direct observations and model // *Atmos. Chem. Phys.* 2012. V. 12. P. 5147–5162.
- Qin D. et al. *Climate change 2013: The physical science basis*. Cambridge (UK); N. Y.: Cambridge Univ. Press, 2014. 1535 с.
- Draxler R.R., Hess G.D. An overview of the Hysplit_4 modeling system for trajectories, dispersion and deposition // *Aust. Met. Mag.* 1998. V. 47. P. 295–308.
- Draxler R., Stunder B., Rolph G., Stein A., Taylor A. Hysplit_4 user's guide version 4.9: Last revision: January 2009. URL: http://www.villasmunta.it/pdf/User_guide.pdf
- Mahowald N., Albani S., Kok J.F., Engelstaeder S., Scanza R., Ward D.S., Flanner M.G. The size distribution of desert dust aerosols and its impact on the Earth system // *J. Aeolian Res.* 2014. V.15. P. 53–71.
- Seinfeld J.H., Pandis S.N. *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*. N.Y.: Wiley, 2006. 1232 p.

Сведения об авторах

АРТАМОНОВА Мария Стеленовна – ведущий математик, Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН. 119017, г. Москва, Пыжевский пер., д. 3. Тел.: +7 (495) 951-13-47. E-mail: artamonova@ifaran.ru

ARTAMONOVA Mariya Stelenovna – leading mathematician, Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences. Moscow, Russia. Tel.: +7 (495) 951-13-47. E-mail: artamonova@ifaran.ru

ГУБАНОВА Дина Петровна – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, АО «Ордена Трудового Красного Знамени Научно-исследовательский физико-химический институт им. Л.Я. Карпова», Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом». 105064, г. Москва, пер. Обуха, д. 3-1/12, стр. 6. Тел.: +7 (495) 916-10-42 (доб. 112). E-mail: dgubanova@mail.ru

GUBANOVA Dina Petrovna – Ph. D., leading researcher, JSC «Karpov Institute of Physical Chemistry», State Corporation «Rosatom». Moscow, Russia. Tel.: +7 (495) 916-10-42 (ext. 112). E-mail: dgubanova@mail.ru

ИОРДАНСКИЙ Михаил Алексеевич – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, АО «Ордена Трудового Красного Знамени Научно-исследовательский физико-химический институт им. Л.Я. Карпова», Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом». 105064, г. Москва, пер. Обуха, д. 3-1/12, стр. 6. Тел.: +7 (495) 916-10-42 (доб. 112). E-mail: miordan@mail.ru

ИОРДАНСКИЙ Михаил Алексеевич – Ph. D., leading researcher, JSC «Karpov Institute of Physical Chemistry», State Corporation «Rosatom». Moscow, Russia. Tel.: +7 (495) 916-10-42 (ext. 112). E-mail: miordan@mail.ru

ЛЕБЕДЕВ Владимир Александрович – ведущий инженер, АО «Ордена Трудового Красного Знамени Научно-исследовательский физико-химический институт им. Л.Я. Карпова», Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом». 105064, г. Москва, пер. Обуха, д. 3-1/12, стр. 6. Тел.: +7 (495) 916-10-42, (доб. 112). E-mail: triak@inbox.ru

LEBEDEV Vladimir Aleksandrovich – lead engineer, JSC «Karpov Institute of Physical Chemistry», State Corporation «Rosatom». Moscow, Russia. Tel.: +7 (495) 916-10-42, (ext. 112). E-mail: triak@inbox.ru

МАКСИМЕНКОВ Леонид Олегович – ведущий инженер, Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН. 119017, г. Москва, Пыжевский пер., д. 3. Тел.: +7 (495) 951-13-47. E-mail: maksimenkov@ifaran.ru

Maksimenkov Leonid Olegovich – leading engineer, Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences. Moscow, Russia. Tel.: +7 (495) 951-13-47. E-mail: maksimenkov@ifaran.ru

МИНАШКИН Вячеслав Михайлович – доктор технических наук, заведующий лабораторией, АО «Ордена Трудового Красного Знамени Научно-исследовательский физико-химический институт им. Л.Я. Карпова», Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом». 105064, г. Москва, пер. Обуха, д. 3-1/12, стр. 6. Тел.: +7 (495) 917-89-04. E-mail: vminash@yandex.ru

Minashkin Vyacheslav Mikhailovich – Ph. D., head of laboratory, JSC «Karpov Institute of Physical Chemistry», State Corporation «Rosatom». Moscow, Russia. Tel.: +7 (495) 917-89-04. E-mail: vminash@yandex.ru

ОБВИНЦЕВ Юрий Иванович – кандидат химических наук, старший научный сотрудник, АО «Ордена Трудового Красного Знамени Научно-исследовательский физико-химический институт им. Л.Я. Карпова», Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом». 105064, г. Москва, пер. Обуха, д. 3-1/12, стр. 6. Тел.: +7 (495) 916-10-42 (доб. 112). E-mail: obvintyu@mail.ru

OBVINTSEV Yurii Ivanovich – Ph. D., senior researcher, JSC «Karpov Institute of Physical Chemistry», State Corporation «Rosatom». Moscow, Russia. Tel.: +7 (495) 916-10-42 (ext. 112). E-mail: obvintyu@mail.ru

ЧХЕТИАНИ Отто Гурамович – доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией, Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН. 119017, г. Москва, Пыжевский пер., д. 3; ведущий научный сотрудник, Институт космических исследований РАН. 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32. Тел.: +7 (495) 951-13-47. E-mail: ochkheta@gmail.com

CHKETIANI Otto Guramovich – Ph. D., head of laboratory, Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences; leading researcher, Space Research Institute, Russian Academy of Sciences. Moscow, Russia. Tel.: +7 (495) 951-13-47. E-mail: ochkheta@gmail.com

VARIATIONS OF THE AEROSOL CONCENTRATION AND CHEMICAL COMPOSITION OVER THE ARID STEPPE ZONE OF SOUTHERN RUSSIA IN SUMMER

M.S. Artamonova¹, D.P. Gubanova², M.A. Iordanskii², V.A. Lebedev²,
L.O. Maksimenkov¹, V.M. Minashkin², Y.I. Obvintsev², O.G. Chketiani^{1,3}

¹ Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

² Joint Stock Company «Karpov Institute of Physical Chemistry»,
State Corporation «Rosatom», Moscow, Russia

³ Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. Variations of the surface aerosol over the arid steppe zone of Southern Russia have been measured. The parameters of atmospheric aerosol (mass concentration, both dispersed and elemental compositions) and meteorological parameters were measured in the Tsimlaynsk region (Rostov-on-Don oblast). The chemical composition of aerosol particles in the atmospheric surface layer has been determined, and the coefficients of enrichment of elements with respect to clarkes in the Earth's crust have been calculated. It is shown that, in summer, arid aerosols are transported from both alkaline and sandy soils in Kalmykia to the air basin over the observation zone. Aerosol particles in the surface air layer over this region have been found to contain the products of combustion of oil, coal, and ethylized fuel. These combustion products make a small contribution to the total mass concentration of atmospheric aerosol; however, they are most hazardous to the health of people because of their sizes and heavy-metal contents. A high concentration of submicron sulfur-containing aerosol particles of chemocondensation nature has been recorded. The sources of aerosol of both natural and anthropogenic origins in southern Russia are discussed.

Keywords: aerosol pollution, mass concentration, dispersed and elemental compositions, transport, steppe zone.