

Многолетняя изменчивость состава приземного аэрозоля в опустыненных и засушливых зонах юга России

Д.П. Губанова^{✉1}, О.Г. Чхетиани¹, Т.М. Кудерина², М.А. Иорданский¹,
Л.О. Максименков¹, М.С. Артамонова^{1*}

¹Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН
119017, г. Москва, Пыжевский пер., 3

²Институт географии РАН
119017, г. Москва, Старомонетный пер., 29

Поступила в редакцию 21.03.2022 г.;
после доработки 10.04.2022 г.;
принята к печати 11.04.2022 г.

Проведен анализ результатов многолетних (2007–2021 гг.) комплексных экспериментальных исследований микрофизических параметров, массовой концентрации и элементного состава аэрозольных частиц в приземном слое атмосферы семиаридных зон юга европейской территории России (ЕТР). Установлены фоновые значения среднесуточной массовой концентрации приземных аэрозолей в летний жаркий период в опустыненных районах Калмыкии и сухостепной зоне Ростовской обл., составившие 125 и 34 мкг/м³ соответственно. Определены функции распределения частиц по размерам, характерные для атмосферных аэрозолей юга ЕТР. Установлена связь между выносом частиц в атмосферу и основными атмосферными процессами. Исследована многолетняя изменчивость элементного состава приземных аэрозолей. Выявлены незначительные вариации массовой концентрации Cd, Hg, Cu в составе аэрозольных частиц в Ростовской обл. Элементный состав аэрозолей в Калмыкии подвержен большей изменчивости по содержанию как природных, так и техногенных элементов, в основном химических элементов солевого баланса и тяжелых металлов. Показано, что для большинства элементов характерна слабая интенсивность накопления в аэрозолях, а их дифференциация в большей мере зависит от мозаичности подстилающей поверхности. За исследованный многолетний период наблюдается тенденция очищения атмосферы опустыненных территорий европейского юга России от вредных примесей за счет уменьшения аридизации климата и снижения антропогенного влияния.

Ключевые слова: семиаридная зона, юг ЕТР, приземный аэрозоль, массовая концентрация, функция распределения частиц по размерам, элементный состав, метеорологические условия, синоптическая обстановка, многолетняя изменчивость; semiarid zone, south of the ETR, near-surface aerosol, mass concentration, particle size distribution function, elemental composition, meteorological conditions, synoptic situation, long-term variability.

Введение

Современные изменения климата вызывают широкий общественный, экономический и политический резонанс [1]. При усилении колебаний климатической системы происходит интенсификация процессов в природных и антропогенных ландшафтах и приземной атмосфере. Это особенно свойственно зонам с экстремальными природно-климатическими условиями, к которым относятся засушливые и опустыненные (семиаридные) районы юга европейской территории России (ЕТР).

Атмосферный аэрозоль является одним из самых изменчивых компонентов семиаридных экосистем и служит индикатором их антропогенной трансформации и аридизации [2]. Кроме того, аэрозольные частицы обладают уникальной совокупностью непостоянных в пространстве и времени физико-химических характеристик, которые оказывают сильное влияние на оптические свойства, химическую активность и состав атмосферы [3, 4]. Поэтому особый интерес представляет изучение многолетней изменчивости геофизических и геохимических свойств приземных аэрозолей в природных зонах юга ЕТР с учетом различных источников их эмиссии.

Экспериментальные исследования физико-химических и оптических свойств приземных аэрозолей в засушливых регионах юга ЕТР и Средней Азии стали проводиться несколько десятилетий назад в связи с обострившимися проблемами опустынивания и осушения Аральского моря [5–13]. Обзор

* Дина Петровна Губанова (gubanova@ifaran.ru; dgubanova@mail.ru); Отго Гурамович Чхетиани (ochkheti@gmail.com); Татьяна Маратовна Кудерина (kuderina@igras.ru); Михаил Алексеевич Иорданский (miordan@mail.ru); Леонид Олегович Максименков (maksimenkov@ifaran.ru); Мария Стеленовна Артамонова (artamonova@ifaran.ru).

некоторых опубликованных работ на эту тему приведен в [14]. В последние годы большое внимание уделяется изучению особенностей ветрового [15–25] и конвективного выноса пылевого аэрозоля в атмосферу [26–29], его микрофизических и оптических характеристик [8, 14, 30–38] на юге ЕТР, Прикаспия и Средней Азии. Химический состав приземного аэрозоля в этих регионах исследуется в меньшей степени [38–42]. Однако эта характеристика аэрозольных частиц может определять их оптические свойства, а также влияет на особенности протекания различных химических и фотохимических процессов в атмосфере [3, 4].

С изучением элементного и дисперсного состава атмосферных аэрозолей и механизмов их локальной эмиссии и трансграничного переноса в природных и антропогенных ландшафтах связаны многолетние полевые наблюдения в степной и сухостепной природных зонах юга ЕТР, проводимые учеными ИФА РАН совместно со специалистами НИФХИ им. Л.Я. Карпова и ИГРАН. Однако полученные результаты натурных экспериментов описаны фрагментарно в отдельных публикациях, например [14, 38, 44]. Первые попытки их обобщения представлены в [14, 43].

Настоящая работа посвящена обобщению многолетних рядов данных наблюдений с целью изучения межгодовой изменчивости элементного состава и микрофизических параметров пылевого аэрозоля в приземном слое атмосферы опустыненных и субаридных территорий юга ЕТР.

Объекты, методы и средства наблюдений

Проанализируем экспериментальные данные, полученные в ходе многолетних (2007–2021 гг.) комплексных натурных исследований микрофизических параметров, массовой концентрации и элемент-

ного состава аэрозолей в приземной атмосфере засушливых и опустыненных районов юга ЕТР в летний период. Ключевые районы полевых наблюдений располагались в Ростовской обл. (ЦНС ИФА РАН) и в Черноземском районе Республики Калмыкия (рис. 1).

Выбор районов исследования на равнинном юге ЕТР основан на географическом зональном подходе с учетом типичных ландшафтов [45, 46]. ЦНС ИФА РАН находится в степной зоне ЕТР на высоте 60 м н.у.м. (47°39'21,1" с.ш., 42°04'49,6" в.д.); эта зона окружена агроландшафтами и селитебной зоной г. Цимлянска. Климат на ЦНС ИФА РАН – европейский, атлантико-континентальный, дефицит осадков составляет 200–400 мм. Черноземельский район Республики Калмыкия расположен в сухостепной зоне, которая представлена типичными белопольными степями, песчаными массивами антропогенного происхождения и солончаками на морских палеотложениях Каспийской низменности. Мозаичность ландшафта обусловлена микро- и мезорельефом, связанным с грунтовыми водами и процессами эоловой обработки поверхности, а также заметным антропогенным влиянием, обусловленным сельскохозяйственным использованием песчаных массивов на легких подстилающих породах и заиливанием верхних горизонтов почв. Для исследования были выбраны опустыненные песчаные массивы на слабоволнистой низменной равнине северо-западной части Прикаспийской низменности с континентальным климатом восточно-европейской области с дефицитом осадков 400–700 мм.

Наблюдения проводились с помощью аэрозольного комплекса ИФА РАН, подробно описанного в [20, 38]. В состав измерительной аппаратуры и оборудования входили: аспирационные пробоотборники для забора аэрозольных проб на аналитические фильтры типа АФА-ХА-20, АФА-ВП-20



Рис. 1. Схема расположения ключевых районов наблюдений

с последующим гравиметрическим и химическим анализом; шестикаскадные импакторы, снаряженные гидрофобными фильтрами для определения массового фракционного и элементного составов аэрозольных частиц в спектральных каналах > 6,5; 4,0–6,5; 2,5–4,0; 1,5–2,5; 0,5–1,5 и < 0,5 мкм; аэрозольный оптический блок приборов, включающий лазерные аэрозольные спектрометры типа ЛАС-П и оптико-электронные аэрозольные спектрометры типа ОЭАС-05 для регистрации микрофизических характеристик аэрозольных частиц; портативные приборы для измерения счетной концентрации аэрозольных частиц ИГРАН; метеостанция Davis Vantage Pro 2. Для оценки синоптической обстановки в периоды наблюдений привлекались онлайн-ресурсы и архивы данных о метеорологических параметрах из открытых Интернет-источников. В частности, для траекторного анализа воздушных масс рассчитывались обратные траектории переноса воздушных масс к точкам наблюдений с помощью модели HYSPLIT [47, 48] на сайте ARL NOAA [49].

В исследовании приземных аэрозолей использовались физико-химические методы измерений в сочетании с геосистемным и ландшафтно-геохимическим подходом [42]. Регистрация микрофизических характеристик (дисперсного состава и счетной концентрации) аэрозольных частиц проводилось оптическими методами, основанными на свойствах рассеянного и поглощенного в аэрозольной среде оптического излучения [50]. Забор проб на гравиметрический анализ осуществляли на аналитические фильтры типа АФА [51] на высоте 1,5–2,0 м от подстилающей поверхности с помощью аспирационного пробоотборника, с временем отбора каждой пробы 12 ч (дневное и ночное время суток) или 24 ч. Массовую концентрацию аэрозолей устанавливали дискретно весовым методом, который заключается в улавливании аэродисперсных примесей на фильтр из известного объема воздуха, определения привеса фильтра и вычисления значения массовой концентрации (в мкг/м³). В разные годы наблюдений для измерения массовой концентрации аэрозолей наряду с аспирационными пробоотборниками применяли шестикаскадные импакторы и нефелометры. Кроме того массовую концентрацию субмикронных и микронных фракций аэрозольных частиц размером 0,15–10 мкм рассчитывали с использованием данных о счетной концентрации частиц по известной формуле [3, С. 356].

Одновременно с характеристиками аэрозолей измерялась падающая и отраженная радиация, учитывались актуальные метеопараметры и параметры турбулентности.

Исследование элементного состава приземных аэрозолей и подстилающих почв как компонентов геохимических ландшафтов выполняли лабораторными аналитическими методами атомно-эмиссионной спектрометрии (ICP-AES), масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) и рентгенофлуоресцентного анализа (XFA) [52–54].

Результаты и их обсуждение

Массовая концентрация приземных аэрозолей

Микрофизические параметры (дисперсный состав, счетная концентрация) и массовая концентрация аэрозольных частиц – важнейшие характеристики атмосферных аэрозолей, изменение которых обусловлено различными факторами. В приземном слое атмосферы семиаридных районов при малой антропогенной нагрузке они сильно зависят от особенностей подстилающей поверхности, метеорологических условий и синоптической обстановки.

Анализ метеорологических параметров многолетних летних наблюдений показал, что натурные экспериментальные исследования в Калмыкии и степной зоне Ростовской обл. проходили в основном в температурно-влажностных условиях, соответствующих климатической норме второй половины XX – начала XXI вв. для этих регионов [55, 56], при различных параметрах ветра.

Результаты полевых исследований многолетней изменчивости среднесуточной массовой концентрации приземного аэрозоля субмикронных и микронных фракций, полученной по данным гравиметрического анализа аэрозольных проб, представлены для субаридных засушливых зон юга ЕТР в табл. 1 (полужирным выделены наибольшие величины). Видно, что в Калмыкии на опустыненных участках с подвижными песчаными массивами среднесуточная массовая концентрация аэрозольных частиц при усилении ветра (до 8–12 м/с) и возникновении пыльных бурь может возрастать в 5–10 раз по сравнению с «невозмущенными» условиями (при тихом и слабом ветре). Подобное явление наблюдалось, в частности, в 2011 г. Период летней экспериментальной кампании 2009 г., наоборот, сопровождался слабоветренной погодой (со средней скоростью ветра 1–4 м/с). В это время были зарегистрированы

Таблица 1

Многолетняя изменчивость среднесуточной массовой концентрации приземных аэрозолей в Калмыкии и на ЦНС ИФА РАН в летний период

Год	Период наблюдений	min	max	среднее	СКО	Медиана
<i>Калмыкия</i>						
2007	21–31.07	24,2	203,76	73,82	55,93	46,75
2009	17–27.07	20,3	64,1	36,11	12,29	35,78
2011	20–29.07	44,83	575,5	346,34	186,46	390,54
2013	19–27.07	33,33	186,06	85,06	51,59	58,67
2014	22–31.07	25,34	758,29	197,67	258,48	57,54
2016	19–30.07	16,56	138,99	57,76	33,94	49,23
2020	23.07–1.08	16,68	214,2	86,31	61,88	70,06
2021	21–31.07	24,33	631,28	114,08	177,42	45,96
<i>ЦНС ИФА РАН</i>						
2012	3–14.08	18,87	63,94	42,9	14,95	44,49
2017	29.07–8.08	22,9	42,95	31,46	6,64	31,51
2018	29.07–3.08	18,39	32,16	24,9	4,84	24,15
2019	29.07–5.08	23,98	48,8	34,21	10,62	30,14
2020	4.08–13.08	13,55	32,91	21,76	6,92	20,45
2021	4.08–15.08	26,29	69,54	46,54	18,02	43,05

наименьшие флуктуации среднесуточной массовой концентрации (в диапазоне от 20 до 64 мкг/м³). Такие условия можно рассматривать как фоновые. Более подробный анализ метеоусловий в период наблюдений в Калмыкии в 2007–2016 гг. приведен в [14].

В 2020 и 2021 гг. период наблюдений приземных аэрозолей в Калмыкии сопровождался в основном типичными для лета погодными условиями, схожими с условиями более ранних лет наблюдений. Температура воздуха в дневное время достигала +31 ÷ +35 °С (за исключением 27.07.2021 г.), в ночные часы снижалась до +18 ÷ +22 °С. Днем наименьшие значения относительной влажности воздуха изменялись в диапазоне 18–25%, за исключением нескольких дней (23–25.07.2020 г. и 27.07.2021 г.), возрастая в ночные часы в среднем до 50–65%. Изучение полей геопотенциалов показало неустойчивый характер синоптической обстановки со сменой воздушных масс и их траекторий и колебаниями атмосферного давления. Сравнение метеорологических и синоптических условий в июле 2020 и 2021 гг. в Калмыкии с данными ранее проведенных исследований подтвердило их типичность для опустыненных районов республики [14, 43].

В степной зоне Ростовской обл. (ЦНС ИФА РАН) многолетние температурно-влажностные характеристики в период летних наблюдений, как и в Калмыкии, соответствовали климатической норме. Так, например, в 2020 г. температура воздуха в дневное время на ЦНС ИФА РАН в среднем изменялась в диапазоне +25 ÷ +30 °С, в ночные часы — от +16 до +23 °С, а в 2021 г. была чуть выше и составляла в среднем днем +30 ÷ +33 °С и ночью +21 ÷ +23 °С. Относительная влажность воздуха в 2020 г. в среднем снижалась днем до 30%, возрастая в ночные часы до 65–75%. В 2021 г. в первой половине полевой кампании в среднем относительная влажность воздуха была чуть ниже, снижаясь днем до 25% и возрастая в ночные часы до 50%. Однако во второй половине полевого эксперимента 2021 г. на ЦНС ИФА РАН наблюдался положительный тренд величины относительной влажности, достигшей 14.08.2021 г. днем значения 45%, а ночью — 90%. Как показал траекторный анализ, это связано с неустойчивой синоптической обстановкой и перестройкой воздушных масс.

В 2020 и 2021 гг. скорость ветра в дневные часы достигала 4–6 м/с, в то время как ночью ветер стихал до тихого и легкого (0,5–2 м/с) или наблюдались штилевые условия. То есть по ветровому режиму характерная для аридных зон и засушливых южных степей картина схожа.

Синоптическая обстановка на ЦНС ИФА РАН, как и в Калмыкии, отличалась неустойчивостью и в последние годы, и в более ранний период натурных исследований [38].

Как показали результаты многолетних исследований, минимальная массовая концентрация аэрозолей наблюдалась при спокойной атмосфере,

максимальная — при увеличении скорости ветра до 10 м/с и выше. Среднеквадратическое отклонение (СКО) массовой концентрации приземных аэрозолей в Калмыкии имеет большой разброс (см. табл. 1) за счет частой неустойчивости атмосферы из-за мозаичности типов подстилающей поверхности и, как следствие, сильных градиентов нагрева поверхности. При этом медиана близка к средним показателям. Следовательно, можно принять средние массовые концентрации приземных аэрозолей в степной — ЦНС ИФА РАН (34 мкг/м³) — и сухостепной — Калмыкия (125 мкг/м³) — зонах как фоновые для дальнейших исследований по изменениям климата и оценке антропогенного влияния.

Функция распределения аэрозольных частиц по размерам

В семиаридных районах ветровые условия оказывают сильное влияние и на дисперсный состав аэрозольных частиц. Ранее [14] были описаны особенности изменения дисперсного состава приземного аэрозоля в Калмыкии при различных скоростях ветра. С возрастанием скорости ветра увеличивается концентрация микронной фракции частиц ($d = 1 \div 10$ мкм) и снижается концентрация субмикронной ($d = 0,15 \div 1$ мкм). Так, при сильном ветре, постоянно наблюдавшемся в дневное время в период полевой кампании 2011 г., измеренная счетная концентрация микронных частиц были на порядок выше, чем в другие годы исследований, характеризующиеся тихим, слабым или умеренным ветром [14]. Одновременно с ростом количества микронных частиц (размером более 1 мкм) наблюдается уменьшение счетной концентрации субмикронных (среднедисперсных) частиц ($d = 0,15 \div 1$ мкм) диаметром 0,15 мкм. При сильном ветре доминирует сальтационный механизм эмиссии частиц с подстилающей поверхности, способствующий выносу в приземный слой атмосферы микронных частиц. В «спокойных» ветровых условиях количество тонко- и среднедисперсных частиц в атмосфере увеличивается вследствие их термоконвективно-го выноса [20, 26, 27, 57].

На рис. 2 (цв. вкладка) приведены функции распределения счетной концентрации аэрозольных частиц по размерам, полученные по данным многолетних наблюдений в Калмыкии и на ЦНС ИФА РАН и усредненные за весь период каждой летней кампании. Сравнение форм функции распределения счетной концентрации частиц в приземном слое атмосферы выявило различие в диапазоне размеров 0,6–2,0 мкм. В Калмыкии для спектра размеров аэрозолей характерно наличие максимума в области 0,9–2,0 мкм, что не наблюдается у функции распределения частиц по размерам в приземном слое атмосферы ЦНС ИФА РАН. Следует отметить, что функция распределения со слабовыраженным (размытым) максимумом характерна для сельского континентального аэрозоля [3]. Кроме того, функция распределения аэрозольных частиц

в приземном воздухе в окрестностях ЦНС ИФА РАН по форме схожа с типичной функцией распределения городского аэрозоля [3], но с некоторым сдвигом в сторону более крупных частиц. Вероятно, на таком типе функции распределения сказывается расположение ЦНС ИФА РАН на окраине небольшого города Цимлянска и влияние локальных антропогенных источников.

В силу непостоянства ветровых условий в Калмыкии в дневное время функция распределения частиц претерпевает большую изменчивость по сравнению с функцией распределения частиц в приземном слое атмосферы в окрестностях ЦНС ИФА РАН. Это особенно заметно в вариациях числа частиц размером 1–10 мкм, а также в численном соотношении счетной концентрации субмикронной и микронной фракций аэрозоля в связи с тем, что подстилающая поверхность в опустыненных и засушливых зонах является мощным источником солепылевых аэрозольных частиц, интенсивность которого главным образом определяется синоптическими и метеорологическими условиями.

Различие по абсолютным значениям счетной концентрации аэрозольных частиц в диапазоне 0,8–10 мкм в приземном воздухе Калмыкии и ЦНС ИФА РАН также обусловлено в основном спецификой ветровых условий и подстилающей поверхности на опустыненных участках Калмыкии.

Однако необходимо отметить, что из года в год и в Калмыкии, и на ЦНС ИФА РАН наблюдается хорошая воспроизводимость формы функции распределения частиц, что свидетельствует о постоянстве характерных типов аэрозоля в пунктах наблюдений.

Элементный состав приземного аэрозоля

Анализ элементного состава приземных аэрозолей семиаридных зон юга ЕТР по данным многолетних наблюдений в Калмыкии и на ЦНС ИФА РАН позволил выявить динамику изменения массовой концентрации химических элементов в составе аэрозольных частиц. Всего было определено 65 элементов (от Li до U). Их дифференциация рассматривалась в соответствии с известной экогеохимической систематикой элементов по масштабам воздействия на окружающую среду, с учетом распространенности в земной коре [58], по элементам глобального, регионального и локального значений.

Для наглядности представления и удобства интерпретации результатов далее будет уделено внимание наиболее значимым элементам как изменчивым компонентам исследуемых ландшафтов. На рис. 3 (цв. вкладка) показаны многолетние вариации массовой концентрации элементов в относительных единицах: $(C_i - C_{cp})/C_{cp}$, где C_i – массовая концентрация элемента в i -м году; C_{cp} – усредненная за все годы массовая концентрация элемента. Видно, что элементный состав приземного аэрозоля в Калмы-

кии подвержен более сильной межгодовой изменчивости, что связано с особенностями синоптической обстановки и ветровых условий.

Анализ полученных результатов показывает, что в Калмыкии синоптическая ситуация в 2009 и 2011 гг. способствовала эмиссии химических элементов в приземную атмосферу за счет северо-западного ветрового выноса и близости антропогенных источников. Последние также могли внести вклад в вынос тяжелых металлов и радиоактивных элементов в Калмыкии в 2011 г., во время пыльной бури при северо-восточном и восточном направлениях движения воздушных масс. На ЦНС ИФА РАН в 2012 г. в приземном аэрозоле наблюдались повышенные концентрации кадмия и ртути, что могло быть обусловлено трансграничным переносом. В целом характер изменчивости массовой концентрации химических элементов схож с особенностями вариаций общей массовой концентрации приземных аэрозолей.

Для оценки избирательной аккумуляции химических элементов в аэрозольных частицах рассчитывались коэффициенты концентрации (обогащения) K_k (в англоязычной литературе – enrichment factor) [46]:

$$K_k = \frac{(C_a / C_{Al}) \text{ аэрозольной пробы}}{(C_a / C_{Al}) \text{ земной коры}},$$

где C_a и C_{Al} – концентрация данного химического элемента и опорного элемента (алюминия) в твердой фазе аэрозолей и в гранитном слое континентальной земной коры [59] соответственно. Выбор алюминия в качестве опорного элемента обусловлен тем, что это типоморфный элемент в палеогеновых породах и морских отложениях степной зоны юга ЕТР, он может использоваться для нормирования при геохимических расчетах.

Многолетняя изменчивость средних значений коэффициентов концентрации химических элементов в составе аэрозолей в приземном слое атмосферы Калмыкии и в окрестностях ЦНС ИФА РАН показана на рис. 4 (цв. вкладка).

Представленные в геохимических спектрах на рис. 4 элементы в составе атмосферных аэрозолей семиаридных зон юга ЕТР имеют в основном смешанное природно-антропогенное происхождение и характеризуются изменчивостью массовой концентрации. Концентрации элементов глобального значения варьируются слабо. Сильная изменчивость свойственна химическим элементам солевого баланса и тяжелым металлам. В целом прослеживается многолетняя тенденция к снижению концентрации большинства элементов начиная с 2016–2017 гг., что может быть обусловлено главным образом снижением антропогенной нагрузки в этом регионе. Высокое содержание серы связано преимущественно с природными источниками (солончаки в Калмыкии и Прикаспии), а также с антропогенными – предприятиями нефтегазового комплекса и автотранспортом.

Интенсивность аккумуляции химических элементов в составе приземных аэрозолей семиаридных зон юга России (по данным наблюдений в Калмыкии и на ЦНС ИФА РАН)

Год	Кларки концентрации			
	0–10	10–50	50–100	> 100
<i>Калмыкия</i>				
2007	Ca, Mo, Sb, Cs, W, Pb	S, Sn, Hg	Bi	Se, Cd
2009	P, Li, Be, Mg, Al, K, Ca, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Rb, Sr, Y, Cs, Ba, La, Tl, Th, U	B, Cu, Mo, Ag, Sb, Pb	Sn	S, Se, Cd, Hf, W, Re, Hg, Bi
2011	P, Li, Ca, Sc, V, Cr, Ni, Cu, Ag, Sn, Sb, Hg, Pb	S, Bi		Se, Cd
2013	B, Cr, Mo, Ag, Sb, Hg	S, Ni, Cu, Cd, Sn, Pb, Bi		Te
2014	B, S, Ca, Ag, Cd, Sn, Sb, Hg, Pb	Bi		
2016	B, Ca, Sb	S, Cd		
2020	P, Li, Ca, Sc, V, Cr, Co, Cu, Mo, Ag, Sn, Sb, Cs, La, Hg, Pb	B, S, Cd, Re, Bi	Te	Se
<i>ЦНС ИФА РАН</i>				
2012	P, Li, Ca, Sc, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Ga, Sr, Mo, Sn, Cs, La, Hf, W, Tl	B, Zn, As, Ag, Sb, Hg, Pb	S	Se, Cd, Te, Bi
2017	B, P, Zn, Mo, Ag, Sn, Hg, Pb	S, As, Sb, Re	Bi	Se, Cd
2018	B, Li, Cr, Cu, Zn, As, Mo, Ag, Sn, Hg, Pb	S, Cd, Sb	Bi	Se, Te
2019	P, Ni, Cu, Zn, As, Mo, Sn, Hg, Pb	B, S, Cd, Sb	Bi	
2020	P, V, Cr, Cu, Zn, Mo, Ag, Sn, Cs, Hg, Pb	B, As, Cd, Sb	S, Bi	Se, Te
2021	B, P, Cu, Zn, As, Mo, Sb, Hg, Pb	S, Cd, Sb	Bi	Se, Te

Для выявления роли атмосферных аэрозолей в функционировании ландшафтов степной зоны были рассчитаны кларки аэрозольной концентрации (содержание элемента в аэрозольной пробе/кларк земной коры) [46] и оценена интенсивность накопления элементов в приземных аэрозолях (слабая: 0–10, средняя: 10–50, сильная: 50–100, высокая: > 100). В табл. 2 приведена степень аккумуляции химических элементов в составе приземных аэрозолей в Калмыкии и на ЦНС ИФА РАН.

Как видно из табл. 2, слабая интенсивность накопления характерна для большинства химических элементов, и их дифференциация в большей мере зависит от мозаичности подстилающей поверхности. Основная аккумуляция в приземных аэрозолях семиаридных зон юга ЕТР наблюдается для тяжелых металлов как природного, так и антропогенного регионального и локального происхождения. Высокое содержание селена и теллура может быть обусловлено техногенной миграцией, связанной с региональной экономикой и трансграничным переносом загрязнений.

Заключение

Исследована изменчивость элементного состава и микрофизических параметров приземного аэрозоля опустыненных участков Калмыкии и засушливой степной зоны Ростовской обл. (ЦНС ИФА РАН) в летний период по данным многолетних наблюдений, включая результаты последних полевых экспедиций 2020 и 2021 гг.

Подтверждено, что на динамику изменчивости микрофизических параметров и массовой концентрации приземного аэрозоля семиаридных районов европейского юга России сильное влияние оказывают синоптическая обстановка и метеорологические

условия. На основе анализа многолетних данных установлено, что по величинам массовой концентрации (20–40 мкг/м³) субмикронных и микронных аэрозольных частиц в приземном слое атмосферы природно-антропогенные ландшафты засушливых южных степей Ростовской обл. можно отнести к фоновым районам с преимущественно сельскохозяйственным использованием земель. Микрофизические параметры (концентрация и дисперсный состав) аэрозоля характеризуются незначительными вариациями в типичных (невозмущенных) условиях южной степной зоны (при отсутствии неблагоприятных метеорологических и опасных природных и техногенных явлений). Первая половина августа 2021 г. стала исключением, связанным с нехарактерной, повышенной (до 7 м/с) скоростью ветра, наблюдаемой в окрестностях ЦНС ИФА РАН. Это обусловило рост концентрации приземного аэрозоля: за весь период многолетних наблюдений 7–10 августа 2021 г. были зарегистрированы наибольшие значения среднесуточной массовой концентрации субмикронных и микронных аэрозольных частиц (до 70 мкг/м³).

Концентрация приземного аэрозоля на опустыненных участках Калмыкии изменяется более значительно, что обусловлено в основном ветровыми условиями, спецификой подстилающей поверхности и градиентом нагрева поверхности почв. При усилении ветра до умеренного и свежего (преимущественно в дневное время) массовая концентрация приземного аэрозоля может возрасти на порядок. Явления пыльных бурь в летний исследуемый период в Калмыкии наблюдаются довольно часто, что приводит к значительным кратковременным флуктуациям величин микрофизических параметров аэрозоля.

Анализ многолетней изменчивости элементного состава приземного аэрозоля семиаридных зон юга

ЕТР выявил незначительные вариации в отдельные годы содержания некоторых элементов антропогенной природы (Cd, Hg, Cu) в аэрозольных частицах в приземном воздухе в окрестностях ЦНС ИФА РАН.

Элементный состав аридного аэрозоля Калмыкии подвержен большей изменчивости по содержанию как природных, так и техногенных элементов. Это связано со специфическими особенностями подстилающей поверхности, близостью Каспийского моря, синоптическими условиями, способствующими переносу воздушных масс из регионов с другими ландшафтами и различными антропогенными и природными источниками аэрозолей, а также с деятельностью локальных источников.

В целом за исследованный многолетний период наблюдается тенденция очищения атмосферы опустыненных территорий европейского юга России от вредных примесей за счет уменьшения аридизации климата и снижения антропогенного влияния, однако целесообразно продолжать наблюдения за экологически опасными техногенными химическими элементами.

Благодарности. Авторы благодарны В.А. Лебедеву, А.А. Хапаеву и Ю.И. Обвинцеву за помощь в обеспечении и проведении полевых измерений в ходе многолетних наблюдений физико-химических параметров аэрозолей в Калмыкии и на ЦНС ИФА РАН.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант № 20-17-00214).

Список литературы

1. *United Nations Framework Convention on Climate Change*. URL: <https://unfccc.int/event/cop-26#eq-32> (last access: 21.02.2022).
2. Кудерина Т.М. Атмосферный аэрозоль как индикатор опустынивания в аридных и субаридных ландшафтах ЕТР // Степи Северной Евразии: Материалы VII Междунар. симпозиума. Оренбург: ИС УрО РАН; Димур, 2015. С. 442–443.
3. Seinfeld J.H., Pandis S.N. Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change. New York: Wiley, 2006. 1232 p.
4. Кодратъев К.Я., Ивлев Л.С., Крапивин В.Ф. Атмосферные аэрозоли: Свойства, процессы образования и воздействия. От нано- до глобальных масштабов. СПб.: ВВМ, 2007. 858 с.
5. Семенов О.Е. Введение в экспериментальную метеорологию и климатологию песчаных бурь. Алматы, 2011. 580 с.
6. Жуланов Ю.В., Загайнов В.А., Лушников А.А., Любовецова Ю.С., Невский И.А., Стулов Л.Д. Высокодисперсный и субмикронный аэрозоль аридной зоны // Изв. АН СССР. Физ. атмосф. и океана. 1986. Т. 22, № 5. С. 488–495.
7. Советско-американский эксперимент по изучению аридного аэрозоля / Г.С. Голицын (ред.). СПб.: НПО «Тайфун», 1992. 208 с.
8. Абдуллаев С.Ф., Назаров Б.И., Шукуров А.Х., Жураев А.М. Микрофизические свойства пылевого аэрозоля аридной зоны // Докл. АН Республики Таджикистан. 1995. Т. 38, № 7–8. С. 5–9.
9. Абдуллаев С.Ф., Назаров Б.И., Шукуров А.Х., Жураев А.М. Изменчивость прозрачности атмосферы под воздействием выноса пылевого аэрозоля в условиях высокогорной аридной зоны Таджикистана // Докл. АН Республики Таджикистан. 1995. Т. 38, № 7–8. С. 9–14.
10. Назаров Б.И., Маслов В.А., Абдуллаев С.Ф. Оптические и микрофизические параметры аридного пылевого аэрозоля // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2010. Т. 46, № 4. С. 5–511.
11. Назаров Б.И., Абдуллаев С.Ф., Маслов В.А. Исследования температурных эффектов пылевых бурь // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2010. Т. 46, № 4. С. 512–518.
12. Горчаков Г.И., Шишков П.О., Копейкин В.М., Емленко А.С., Искаков А.А., Захарова П.В., Сидоров В.Н., Шукуров К.А. Лидарно-нефелометрическое зондирование аридного аэрозоля // Оптика атмосф. и океана. 1998. Т. 11, № 10. С. 1118–1123.
13. Горчаков Г.И., Копров Б.М., Шукуров К.А. Вихревой вынос аридного субмикронного аэрозоля // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2003. Т. 39, № 5. С. 596–608.
14. Губанова Д.П., Чхетиани О.Г., Кудерина Т.М., Иорданский М.А., Обвинцев Ю.И., Артамонова М.С. Экспериментальные исследования аэрозолей в атмосфере семиаридных ландшафтов Калмыкии. 1. Микрофизические параметры и массовая концентрация аэрозольных частиц // Геофиз. процессы и биосфера. 2018. № 1. С. 5–29.
15. Малиновская Е.А., Чхетиани О.Г., Панчишкина И.Н., Петрова Г.Г., Петров А.И. О связи приземного электрического поля и аридного аэрозоля при различных ветровых условиях // Докл. РАН. Науки о Земле. 2022. Т. 502, № 2. С. 115–124.
16. Малиновская Е.А., Чхетиани О.Г., Максименков Л.О. Влияние направления ветра на распределение эоловых микрочастиц по размерам // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2021. Т. 57, № 5. С. 539–554.
17. Горчаков Г.И., Бунтов Д.В., Карпов А.В., Копейкин В.М., Мирсаитов С.Ф., Гуцин Р.А., Даценко О.И. Алевритовая фракция сальтирующих частиц в ветропесчаном потоке на опустыненной территории // Докл. АН. 2019. Т. 488, № 2. С. 193–196.
18. Горчаков Г.И., Бунтов Д.В., Карпов А.В., Копейкин В.М., Мирсаитов С.Ф., Гуцин Р.А., Даценко О.И. Влияние ветра на распределение сальтирующих частиц по размерам // Оптика атмосф. и океана. 2019. Т. 32, № 10. С. 848–855; Gorchakov G.I., Buntov D.V., Karpov A.V., Kopeikin V.M., Mirsaitov S.F., Gushchin R.A., Datsenko O.I. Wind effect on the size distribution of saltating particles // Atmos. Ocean. Opt. 2020. V. 33, N 2. P. 198–205.
19. Горчаков Г.И., Ермаков В.Н., Копейкин В.М., Искаков А.А., Карпов А.В., Ульяненко А.В. Электрические токи сальтации в ветропесчаном потоке // Докл. АН. 2006. Т. 410, № 2. С. 259–262.
20. 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, N 11. P. 5147–5162.
21. Горчаков Г.И., Титов А.А., Бунтов Д.В. Параметры нижнего слоя сальтации на опустыненной территории // Докл. АН. 2009. Т. 424, № 1. С. 102–106.
22. Горчаков Г.И., Карпов А.В., Соколов А.В., Бунтов Д.В., Злобин И.А. Экспериментальное и теоретическое исследование траекторий сальтирующих песчинок на опустыненных территориях // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 6. С. 501–506; Gor-

- chakov G.I., Karpov A.V., Sokolov A.V., Buntov D.V., Zlobin I.A.* Experimental and theoretical study of the trajectories of saltating sand particles over desert areas // *Atmos. Ocean. Opt.* 2012. V. 25, N 6. P. 423–428.
23. Горчаков Г.И., Карпов А.В., Копейкин В.М., Злобин И.А., Бунтов Д.В., Соколов А.В. Исследование динамики сальтирующих песчинок на опустыненных территориях // Докл. АН. 2013. Т. 452, № 6. С. 669.
 24. Горчаков Г.И., Копейкин В.М., Карпов А.В., Бунтов Д.В., Соколов А.В. Удельный заряд сальтирующих песчинок на опустыненных территориях // Докл. АН. 2014. Т. 456, № 4. С. 476–480.
 25. Горчаков Г.И., Копейкин В.М., Карпов А.В., Титов А.А., Бунтов Д.В., Кузнецов Г.А., Гуцин Р.А., Дазенко О.И., Курбатов Г.А., Серегин А.О., Соколов А.В. Вариации удельного заряда сальтирующих песчинок в ветропесчаном потоке на опустыненной территории // *Оптика атмосфер. и океана.* 2016. Т. 29, № 1. С. 31–39; *Gorchakov G.I., Kopeikin V.M., Karpov A.V., Titov A.A., Buntov D.V., Kuznetsov G.A., Gushchin R.A., Dazenko O.I., Kurbatov G.A., Seregin A.O., Sokolov A.V.* Variations in the specific charge of saltating sand in a windsand flux over a desertified area // *Atmos. Ocean. Opt.* 2016. V. 29, N 3. P. 244–251.
 26. Гледзер Е.Б., Гранберг И.Г., Чхетиани О.Г. Конвективные потоки аэрозоля вблизи поверхности почвы // Докл. АН. 2009. Т. 426, № 3. С. 380–385.
 27. Гледзер Е.Б., Гранберг И.Г., Чхетиани О.Г. Динамика воздуха вблизи поверхности почвы и конвективный вынос аэрозоля // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2010. Т. 46, № 1. С. 35–47.
 28. Горчаков Г.И., Шишков П.О., Копейкин В.М., Емиленко А.С., Сидоров В.Н., Захарова П.В., Шукуров К.А. Аэрозоль в конвективном пограничном слое атмосферы // *Естественные и антропогенные аэрозоли: материалы междунар. конф. Санкт-Петербург, 29 сентября – 4 октября 1998 г.* СПб.: НИИ химии СПбГУ, 1998. С. 408–413.
 29. Горчаков Г.И., Шукуров К.А. Флуктуации концентрации субмикронного аэрозоля в конвективных условиях // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2003. Т. 39, № 1. С. 85–97.
 30. Абдуллаев С.Ф., Маслов В.А., Назаров Б.И. Исследование пылевой мглы аридной зоны // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2013. Т. 49, № 3. С. 304–313.
 31. Назаров Б.И., Абдуллаев С.Ф., Маслов В.А., Абурашулова Н.А., Абдуллаева М.С. Исследования функции распределения аэрозольных частиц и вариация сажевого аэрозоля в атмосфере // Докл. АН Республики Таджикистан. 2010. Т. 53, № 5. С. 358–363.
 32. Абдуллаев С.Ф., Шукуров Т., Марупов Р., Назаров Б.И. Исследование проб почв и пылевого аэрозоля методом ИК-спектроскопии // *Оптика атмосфер. и океана.* 2013. Т. 26, № 2. С. 166–171.
 33. Назаров Б.И., Абдуллаев С.Ф., Маслов В.А. Изменение дисперсного состава аэрозоля в период пыльных бурь // Докл. АН Республики Таджикистан. 2007. Т. 50, № 5. С. 431–435.
 34. Назаров Б.И., Абдуллаев С.Ф., Маслов В.А. О влиянии пылевого аэрозоля на температуру воздуха // Докл. АН Республики Таджикистан. 2007. Т. 50, № 4. С. 340–344.
 35. Маслов В.А., Назаров Б.И., Абдуллаев С.Ф. Влияние изменение концентрации аэрозоля на прозрачность атмосферы // Докл. АН Республики Таджикистан. 2007. Т. 50, № 3. С. 241–247.
 36. Назаров Б.И., Абдуллаев С.Ф., Маслов В.А. Изменение оптических параметров сильно запыленного воздуха в условиях аридной зоны // Докл. АН Республики Таджикистан. 2007. Т. 50, № 7. С. 598–606.
 37. Назаров Б.И., Абдуллаев С.Ф., Маслов В.А., Абурашулова М.А., Абдуллаева М.С. Оптические параметры пылевого аэрозоля для АЭРОНЕТ // Докл. АН Республики Таджикистан. 2010. Т. 53, № 9. С. 685–689.
 38. Артамонова М.С., Губанова Д.П., Иорданский М.А., Лебедев В.А., Максименков Л.О., Минашкин В.М., Обвинцев Ю.И., Чхетиани О.Г. Вариации массовой концентрации и состава приземного аэрозоля степной зоны Юга России в летний период // *Геофиз. процессы и биосфера.* 2016. Т. 15, № 1. С. 5–24.
 39. Абдуллаев С.Ф., Маслов В.А., Назаров Б.И., Мадвалиев У., Давлатшоев Т. Содержание элементов в пробах почв и пылевого аэрозоля в Таджикистане // *Оптика атмосфер. и океана.* 2015. Т. 28, № 2. С. 143–152; *Abdullaev S.F., Maslov V.A., Nazarov B.I., Madvaliev U., Davlatshoev T.* The elemental composition of soils and dust aerosol in the south-central part of Tajikistan // *Atmos. Ocean. Opt.* 2015. V. 28, N 4. P. 347–358.
 40. Абдуллаев С.Ф., Маслов В.А., Назаров Б.И., Мадвалиев У., Давлатшоев Т. Элементный состав почв и пылевого аэрозоля юго-центральной части Таджикистана // *Оптика атмосфер. и океана.* 2015. Т. 28, № 3. С. 246–255.
 41. Абдуллаев С.Ф., Маслов В.А., Назаров Б.И., Мадвалиев У., Джураев А.А., Давлатшоев Т. Динамика распределения тяжелых металлов и радиоактивных изотопов в образцах почвы и пылевого аэрозоля юга Таджикистана // *Оптика атмосфер. и океана.* 2014. Т. 27, № 3. С. 207–214.
 42. Губанова Д.П., Кудерина Т.М., Чхетиани О.Г., Иорданский М.А., Обвинцев Ю.И., Артамонова М.С. Экспериментальные исследования аэрозолей в атмосфере семиаридных ландшафтов Калмыкии 2. Ландшафтно-геохимический состав аэрозольных частиц // *Геофиз. процессы и биосфера.* 2018. Т. 17, № 3. С. 18–44.
 43. Chkhetiani O., Vazaeva N.V., Chernokulsky A.V., Shukurov K.A., Gubanova D.P., Artamonova M.S., Maksimenkov L.O., Kozlov F.A., Kuderina T.M. Analysis of mineral aerosol in the surface layer over the caspian lowland desert by the data of 12 summer field campaigns in 2002–2020 // *Atmosphere.* 2021. V. 12. P. 985. DOI: 10.3390/atmos12080985.
 44. Андронов 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 освоенных территорий. Экспериментальные исследования // *Естественные и антропогенные аэрозоли: материалы междунар. конф. Санкт-Петербург, 29 сентября–4 октября 1998 г.* СПб.: НИИ химии СПбГУ, 1998. С. 414–446.
 45. Перельман А.И., Касимов Н.С. *Геохимия ландшафта.* М.: Астрель-2000, 1999. 610 с.
 46. Добровольский В.В. *Биогеохимия мировой суши / Избранные труды.* М.: Научный мир, 2009. Т. III. 440 с.
 47. Stein A.F., Draxler R.R., Rolph G.D., Stunder B.J.B., Cohen M.D., Ngan F. NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system // *Bull. Am. Meteor. Soc.* 2015. V. 96. P. 2059–2077. DOI: 10.1175/BAMS-D-14-00110.

48. *Rolph G., Stein A., Stunder B.* Real-time Environmental Applications and Display system: READY // *Environ. Model. Software*. 2017. V. 95. P. 210–228. DOI: 10.1016/j.envsoft.2017.06.025.
49. NOAA Air Resources Laboratory. URL: www.arl.noaa.gov. (last access: 21.02.2022).
50. *Балаханов М.В.* О создании системы метрологического обеспечения измерений дисперсных параметров аэрозолей и взвесей (I) // *Альманах современной метрологии*. 2014. № 1. С. 185–232.
51. *Фильтры АФА* – аналитические аэрозольные. URL: <https://niki-mlt.ru/article/filtry-afa-analiticheskie-aerozolnye.html> (дата обращения: 21.02.2022).
52. *Карандашев В.К., Туранов А.Н., Орлова Т.А., Лезнев 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.
53. *Кудряшов В.И.* Анализ элементного состава атмосферных аэрозолей физическими методами // *Проблемы физики атмосферы: сборник*. СПб.: Изд-во СПбГУ, 1997. Вып. 20. С. 97–130.
54. *Эрхардт Х.* Рентгенофлуоресцентный анализ. Применение в заводских лабораториях. М.: Металлургия, 1985. 256 с.
55. *Виноградова В.В.* Воздействие климатических условий на человека в засушливых землях Европейской России // *Изв. РАН. Сер. Географическая*. 2012, № 2. С. 68–81.
56. *Золотокрылин А.Н., Титкова Т.Б., Черенкова Е.А.* Увлажнение засушливых земель Европейской территории России: настоящее и будущее // *Аридные экосистемы*. 2014. Т. 20, № 2. С. 5–11.
57. *Голицын Г.С., Гранберг И.Г., Алоян А.Е., Андропова А.В., Арутюнян В.О., Виноградов Б.В., Габуница Э.Б., Горчаков Г.И., Добрышман Е.М., Пономарев В.М.* Исследование термоконвективных выносов аридного аэрозоля в Черных Землях Калмыкии / *Естественные и антропогенные аэрозоли: материалы междунар. конф. Санкт-Петербург, 29 сентября – 4 октября 1998 г.* СПб.: НИИ химии СПбГУ, 1998. С. 342–348.
58. *Иванов В.В.* Экологическая геохимия элементов: в 6 кн. М.: Недра, 1994. Кн. 2: Главные р-элементы. 303 с.
59. *Виноградов А.П.* Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных пород земной коры // *Геохимия*. 1962. № 7. С. 555–571.

D.P. Gubanova, O.G. Chkhetiani, T.M. Kuderina, M.A. Iordanskii, L.O. Maksimenkov, M.S. Artamonova.

Long-term variability of the composition of near-surface aerosol in deserted and arid zones of the south of Russia.

The results of long-term (2007–2021) complex experimental studies of microphysical parameters, mass concentration, and elemental composition of aerosol particles in the surface air layer of semiarid zones in the south of European Russia are presented. Background values of the daily average mass concentration of near-surface aerosols in the deserted areas of Kalmykia and dry-steppe zone of Rostov region are estimated for the hot summer period: 125 and 34 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectively. The particle size distribution functions typical for atmospheric aerosols of the regions under study are determined. The processes of aerosol particle removal are studied in connection with the main atmospheric processes. Insignificant variations in the mass concentration of only Cd, Hg, and Cu are revealed in aerosols in Rostov region. The elemental composition of Kalmykia aerosols is more variable in both natural and man-made elements, mainly in chemical elements of salt balance and heavy metals. It is shown that most elements are weakly accumulated in aerosols, and their differentiation depends more on the mosaic of the underlying surface. During the long-term period under study, a trend toward purifying the deserted territories of the south of European Russia from harmful atmospheric impurities is found, presumably as a result of reducing climate aridization and/or anthropogenic effect.

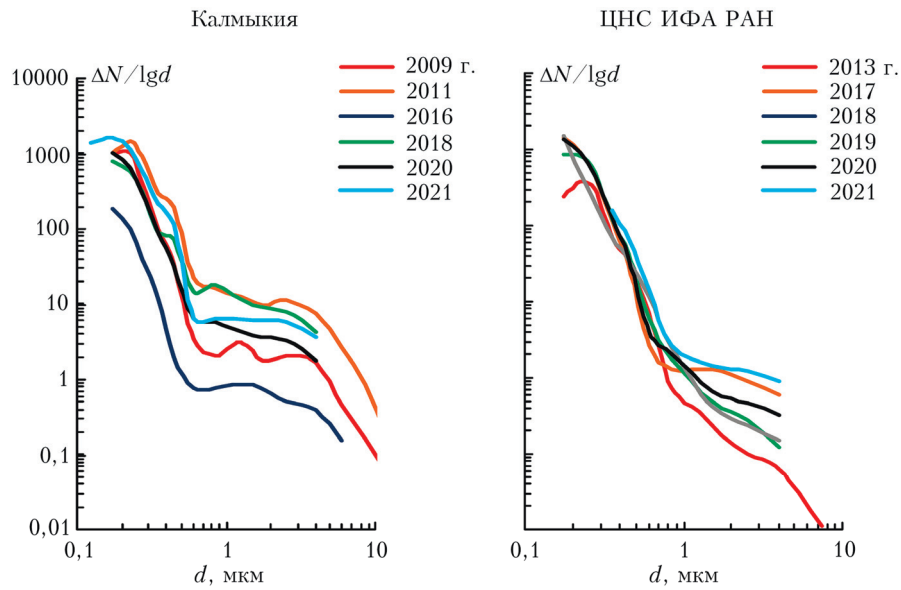


Рис. 2. Функция распределения аэрозольных частиц по размерам по данным многолетних летних наблюдений в Калмыкии и на ЦНС ИФА РАН

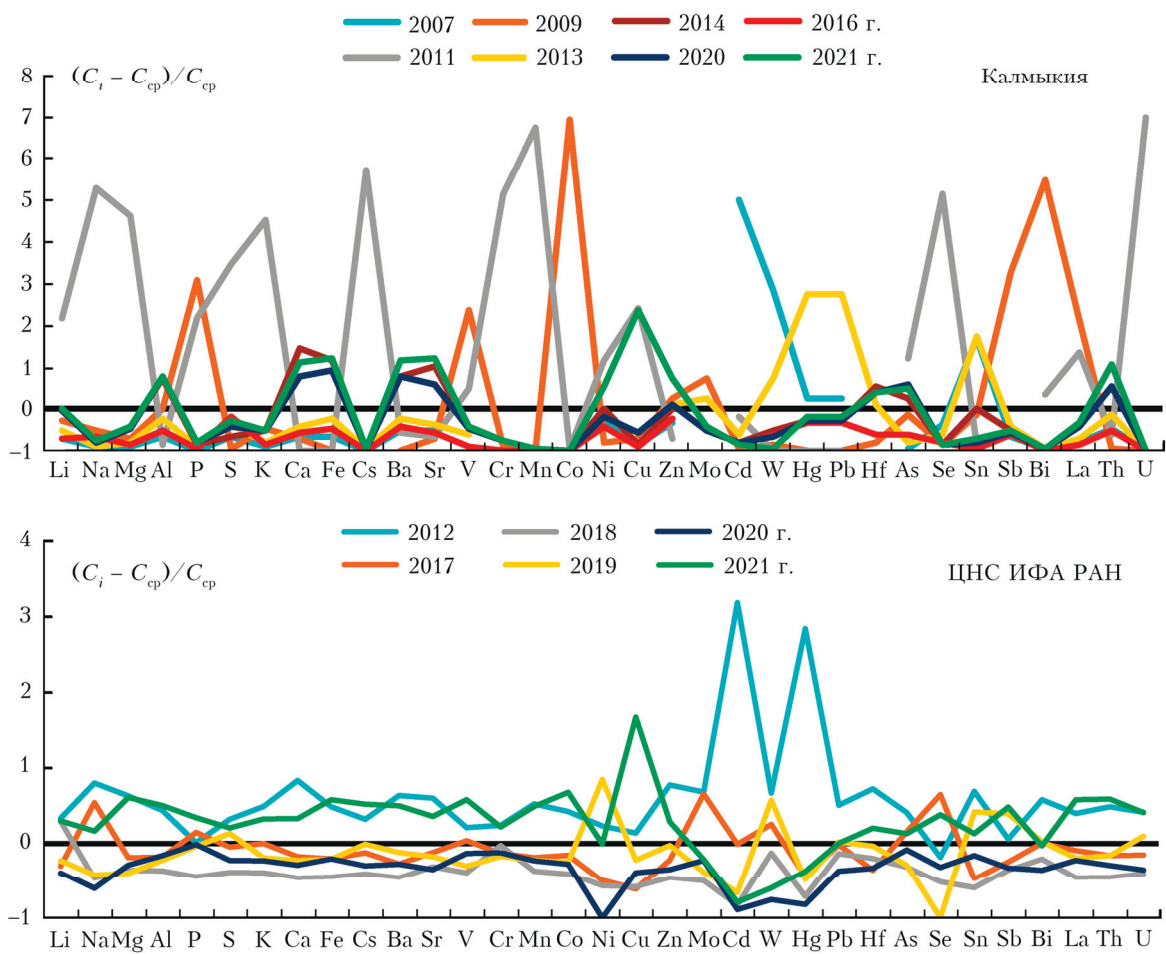


Рис. 3. Динамика изменения элементного состава (массовой концентрации химических элементов в относительных единицах) приземных аэрозолей по данным многолетних наблюдений в Калмыкии и на ЦНС ИФА РАН

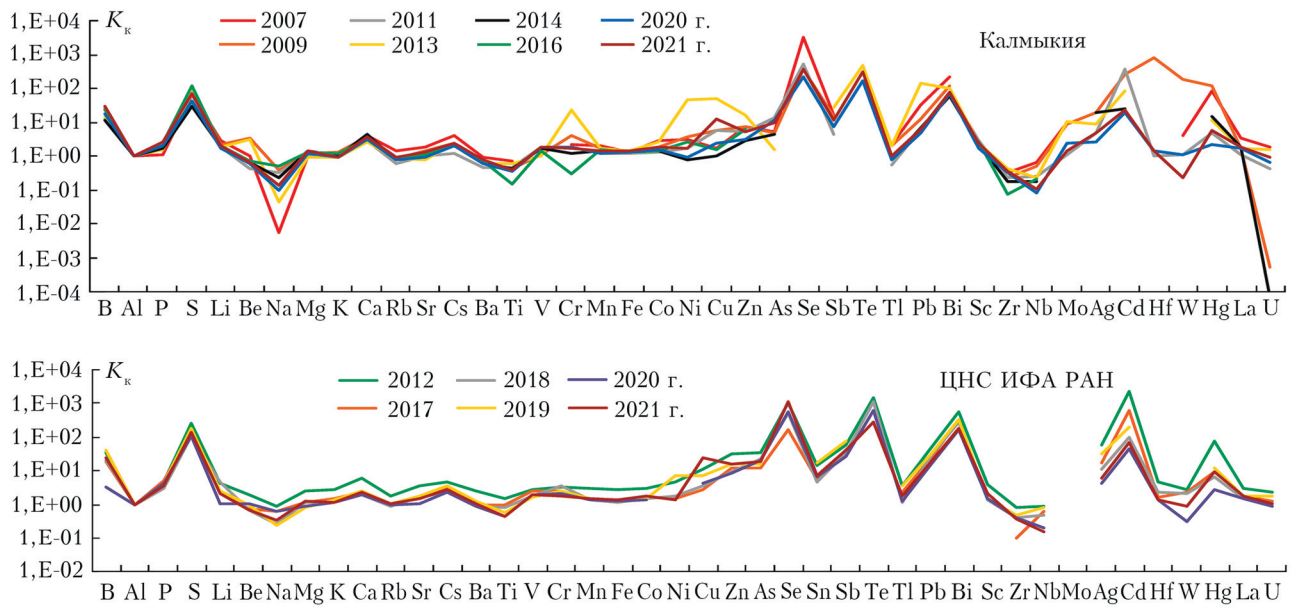


Рис. 4. Многолетняя изменчивость коэффициента концентрации (K_k) элементов в приземных аэрозолях сухостепных (Калмыкия) и степных ландшафтов (ЦНС ИФА РАН)