

ОПТИКА КЛАСТЕРОВ, АЭРОЗОЛЕЙ И ГИДРОЗОЛЕЙ

УДК 502.07; 504.3.054; 55.423

Особенности распределения и состава аэрозоля на юго-востоке Крыма весной 2020 г.

М.С. Артамонова^{✉1}, О.Г. Чхетиани¹, М.А. Иорданский¹,
Л.О. Максименков¹, В.А. Лапченко^{2*}

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

²Карадагская научная станция им. Т.И. Вяземского – природный заповедник РАН –
филиал ФИЦ «Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН»
298188, г. Феодосия, пос. Курортное, ул. Науки, 24, Республика Крым

Поступила в редакцию 30.12.2022 г.;
после доработки 10.04.2023 г.;
принята к печати 12.04.2023 г.

Представлены результаты исследования аэрозоля в приземном слое атмосферы в юго-восточной части Крымского полуострова на «Карадагской научной станции им. Т.И. Вяземского – природный заповедник РАН» филиала ФИЦ «Института биологии южных морей им. А.О. Ковалевского». Работы проводились с 21 марта по 17 июня 2020 г. Среднесуточная массовая концентрация аэрозоля за весь период измерений варьировалась от 3 до 35 мкг/м³ при среднем значении 13 мкг/м³. Исключение составили высокие концентрации частиц во время эпизода 25–27.03.2020 г. (48, 195 и 49 мкг/м³), когда был зарегистрирован мощный восточный перенос от источников в Казахстане (пыльная буря на Арале) через Калмыкию в Крым. С учетом этого эпизода среднее значение массовой концентрации аэрозоля – 16 мкг/м³. Из 89 дней наблюдений выделены дни с различными направлениями прихода воздушных масс, а также дни с наиболее высокими среднесуточными значениями массовой концентрации аэрозоля. Для этой выборки (31 проба) определено содержание 64 химических элементов в пробах. Проведена оценка аккумуляции химических элементов в почве и аэрозольных частицах, рассчитаны кларки концентрации химических элементов в почве, коэффициенты аэрозольной концентрации и обогащения химических элементов в аэрозолях. Рассмотрены вопросы зависимости массовой концентрации, дисперсного и элементного составов приземного аэрозоля от дальней аэрозольной миграции.

Ключевые слова: Крым, приземный аэрозоль, массовая концентрация, функция распределения частиц по размерам, элементный состав почвы и аэрозоля, метеорологические условия; Crimea, ground-level aerosol, mass concentration, particle size distribution function, elemental composition of soil and aerosol, meteorological conditions.

Введение

В настоящее время изучение механизмов выноса аэрозоля из пустынных и засушливых регионов Земли, его дальнейший трансграничный перенос, влияние эмиссии и осаждения аэрозоля на климатическую и экологическую системы регионов и здоровье людей [1–3], а также учет этого выноса в численных моделях динамики атмосферы и климатических моделях является актуальной задачей. Ей посвящены многочисленные междисциплинарные исследования [4–7].

При численной реализации моделей климата и атмосферы необходимо знание начальных (средних, фоновых) параметров атмосферы, в нашем случае параметров приземного аэрозоля: его массовой и счетной концентрации, распределения частиц по размерам в конкретном регионе и в конкретный период года.

Точность применяемых численных моделей сильно зависит от точности начальных данных, поэтому необходимо проводить наземные исследования приземного аэрозоля для дальнейшего сравнения рассчитанных величин с реально измеренными значениями физических параметров. Использование данных, полученных по численным моделям, которые не «откалиброваны» для данного региона (не прошли сверку с данными наземных измерений), может приводить к сильному завышению/занижению реальных значений параметров аэрозоля, например массовой концентрации или размеров составляющих его частиц.

*Мария Стеленовна Артамонова (artamonova@ifaran.ru);
Отто Гурамович Чхетиани (ochkhetti@gmail.com); Михаил
Алексеевич Иорданский (miordan@mail.ru); Леонид Оле-
гович Максименков (maksimenkov@ifaran.ru); Владимир
Александрович Лапченко (ozon.karadag@gmail.com).

Природные эмиссии минерального аэрозоля характерны для зон с экстремальными климатическими условиями, к которым относятся засушливые и опустыненные районы юга европейской территории России (ЕТР). Авторский коллектив много лет проводил экспериментальные исследования физико-химических и оптических свойств приземных аэрозолей в этих регионах [8–13].

В настоящей работе представлены результаты исследований характеристик приземного аэрозоля (массовой и счетной концентрации, распределение частиц по размерам и их элементный состав) еще в одном регионе ЕТР — Республике Крым — субъекте Российской Федерации в составе Южного федерального округа.

Данные многолетних исследований аэрозоля на побережье Черного моря и в Крыму, в частности на территории Карадагского природного заповедника, приведены в [14–24], но полноценные базы данных по сезонным экспериментальным измерениям в Крыму, в которых приводились бы микрофизические характеристики и элементный состав аэрозольных частиц, отсутствуют.

Получение данных о параметрах аэрозольных частиц в ходе полевых наблюдений, изучение процессов распространения и трансформации аэрозольных загрязнений в атмосфере, выяснение проблем, связанных с влиянием дальней аэрозольной миграции на изменение массовой концентрации и химического состава аэрозоля является актуальной проблемой для Крыма. Дисперсный и химический анализ твердых взвешенных частиц дает представление не только о состоянии атмосферного воздуха с точки зрения его загрязненности и экологической опасности, но и о двух составляющих аэрозоля: местного аэрозоля, поднятом с подстилающей поверхности, и аэрозоле, принесенном вместе с пришедшей воздушной массой.

Цель исследований — оценить влияние местных источников пылевого аэрозоля из степных районов Крыма, дальнего переноса из аридных районов ЕТР и сопредельных территорий (Казахстан, Турция, Туркмения), антропогенных источников, расположенных на близлежащих территориях, на экологическое благополучие полуострова Крым — курортного региона РФ.

Объекты, средства наблюдения и методы исследования

В настоящей работе представлены результаты комплексных наземных исследований аэрозоля в юго-восточном Крыму на станции фоновой экологической мониторинга (СФЭМ) «Карадагская научная станция им. Т.И. Вяземского — природный заповедник РАН» (КНС — ПЗ РАН) филиала ФИЦ «Института биологии южных морей им. А.О. Ковалевского» (ИнБИОМ) в рамках исследования состава и оценки экологического воздействия аэрозолей на состояние окружающей среды в природных и антропогенных ландшафтах с учетом механизмов локальной эмиссии и трансграничного переноса ве-

щества. Настоящая работа является продолжением исследований, начатых в 2018 г. [25]. Станции фоновой мониторинга рассматриваются в качестве составной части национальной и международной (глобальной) сети мониторинга окружающей среды, а полученные результаты могут служить региональными стандартами и характеристиками условно чистых территорий.

Станция фоновой экологической мониторинга (44°94' с.ш., 35°23' в.д.), где проходили измерения аэрозоля с 21.03 по 17.06.2020 г. (в период пандемии COVID-19), расположена в юго-восточной части горного Крыма в природном заповеднике (рис. 1, цв. вкладка) на границе дубово-фисташкового редколесья с элементами разнотравно-злаковых сообществ, включающими редкие и эндемичные виды флоры. В непосредственной близости от СФЭМ находятся искусственные посадки сосны крымской и дубово-грабовый лес. В заповеднике преобладают коричневые типы почвы, они развиваются под петрофитными и настоящими степями, нагорно-ксерофитной растительностью с островками леса, под пушистодубовыми, фисташковыми, можжевельниковыми редколесьями со степным травостоем, светлыми пушистодубовыми лесами шиблякового типа, кустарниковыми сообществами [26]. В целом климат большей части заповедника можно определить как переходный от субсредиземноморского, характерного для западной части Южного берега Крыма, к умеренно континентальному умеренно жаркому сухому, характерному для степной части полуострова. Среднегодовая температура воздуха на побережье заповедника составляет 12,1 °С. Карадагский заповедник является одним из самых засушливых районов горного Крыма, среднегодовое количество осадков составляет 357 мм. Многолетние данные показывают, что в холодный и теплый сезоны выпадает примерно одинаковое количество осадков, хотя бывает годы, когда в осенне-зимний период их больше, чем в весенне-летний.

Станция расположена на высоте 180 м н.у.м. на северо-восточном склоне г. Святая (высота 576 м), в горной долине, которая протянулась с юга на север от скалы Чертов палец до пос. Коктебель. Вдоль скалистой береговой линии следуют один за другим хребты Магнитный (378 м) и Кок-Кая (314 м), которые прикрывают станцию от влияния бризовой циркуляции. На северо-западе от станции находится хребет Сюрю-Кая (507 м). Наименьшее расстояние от точки измерений до Черного моря, через хребет Кок-Кая, — 1000 м (рис. 1). На севере и востоке гор нет. Расстояние до ближайших промышленных центров (г. Керчь и Симферополь) более 100 км, до п. Коктебель — 2,0 км, до Феодосии — 20 км. С 2014 г. морские порты Феодосии не работают, город стал курортным. Следует отметить, что само место размещения станции как фоновой было согласовано в 2012 г. с Координационным химическим центром (Норвегия) для участия в международных программах сотрудничества по интегрированному мониторингу влияния загрязнения воздуха на экосистемы.

Микрофизические параметры аэрозольных частиц измерялись приборным комплексом с использованием лазерного и оптико-электрического спектрометров (ЛАС и ОЭАС) (разработчик приборов — НИФХИ им. Л.Я. Карпова), предназначенных для определения счетной концентрации и дисперсного состава частиц диаметром 0,15–5,0 мкм. Состав комплекса и методика измерений подробно описаны в [8, 10]. Измерения проводились круглосуточно.

Пробы воздуха для определения среднесуточной массовой концентрации и элементного анализа аэрозоля отбирались на фильтры АФА-ХА-20 (аспирационным пробоотборником) со скоростью прокачки 14 м³/ч. Время отбора каждой пробы составляло 24 ч.

Аспирационный пробоотборник и пробоотборники аэрозольных спектрометров (ЛАС и ОЭАС) были установлены на высоте 2 м над уровнем земли. Массовая концентрация аэрозольных частиц на фильтре определялась весовым методом. Фильтр взвешивался до измерений, во время измерений через него прокачивался определенный объем воздуха, и далее на основании привеса фильтра и прокачанного объема воздуха вычислялась среднесуточная массовая концентрация аэрозоля в мкг/м³.

Для определения параметров приземного аэрозоля на СФЭМ было отобрано 86 проб. Для определения элементного состава аэрозоля химический анализ был проведен для 31 пробы воздуха с наиболее высокой среднесуточной массовой концентрацией аэрозоля, взятых для воздушных масс, пришедших в точку измерения с разных направлений.

Элементный состав аэрозольных частиц, содержащихся на фильтрах АФА ХА-20, после кислотного разложения в автоклавах (аэрозоли на фильтрах) и открытой системе (почва) вычислялся методами атомно-эмиссионной и масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (АЭС–ИСП и МС–ИСП). Содержание Li, B, Na, Mg, Al, Si, P, S, K, Ca, Ti, V, Mn, Fe, Cu, Zn, Sr и Ba в пробах определяли методом АЭС–ИСП (iCAP-6500 Duo, Thermo Scientific, США). Содержание Li, Be, Sc, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Ru, Rh, Pd, Ag, Cd, In, Sn, Sb, Te, Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Ta, W, Re, Os, Ir, Pt, Au, Hg, Tl, Pb, Bi, Th и U — методом МС–ИСП (X-7, Thermo Scientific, США). Для проверки правильности анализа образцов использовали стандартный образец Andesite, AGV-2 (US Geological Survey). Подробно методика проведения химического анализа проб аэрозоля, собранного на фильтрах, изложена в работе [27].

По результатам элементного анализа состава 31 пробы аэрозоля на фильтрах определено 64 химических элемента (от Li до U). Элементы Si, Cl и S не определялись.

Для оценки избирательной аккумуляции химических элементов в аэрозольных частицах были рассчитаны коэффициенты концентрации (аккумуляции) [28, 29]:

$$KK_{ак} = A/K,$$

где A — содержание химического элемента в твердой фазе аэрозолей; K — кларк этого элемента, т.е. среднее содержание химического элемента в верхней части континентальной земной коры [30].

Для оценки степени обогащения химическими элементами аэрозольных частиц из почвы вычислялись коэффициенты местной аэрозольной концентрации

$$KK_{ап} = A/П,$$

где П — содержание химического элемента в почве.

Для оценки вклада источника в атмосферные аэрозоли и определения степени загрязнения воздуха были рассчитаны коэффициенты обогащения элементов ($EF_{ап}$, $EF_{ак}$) относительно содержания элементов в пробах почвы и относительно среднего содержания элементов в верхней части континентальной земной коры [30]:

$$EF_{ак} = (C_e/C_{La})_{пробы}/(C_e/C_{La})_{коры}, \quad (1)$$

$$EF_{ап} = (C_e/C_{La})_{пробы}/(C_e/C_{La})_{почвы}, \quad (2)$$

где $(C_e/C_{La})_{пробы}$ — отношение концентрации данного элемента к концентрации лантана в пробе, $(C_e/C_{La})_{коры}$ — в земной коре и $(C_e/C_{La})_{почвы}$ — в почве соответственно. В качестве нормирующего элемента использовался лантан, который практически не поступает в атмосферу от техногенных источников и имеет достаточно точно установленный кларк [31, 32].

При сравнении оценки избирательной аккумуляции химических элементов для наглядной интерпретации было отобрано 33 элемента: Li, Na, Mg, Al, P, S, K, Ca, Fe, Cs, Ba, Sr, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Mo, Cd, W, Hg, Pb, Hf, As, Se, Sn, Sb, Bi, La, Th, U в соответствии с классификациями [33], включающими элементы глобального и смешанного локального распространения, редкоземельные и радиоактивные элементы, тяжелые металлы и металлоиды, характеризующиеся наибольшими значениями массовой концентрации и коэффициентов обогащения и являющиеся трассерами источников аэрозолей.

Для сравнения элементных составов аэрозоля и почвы на СФЭМ на площадке размером 5 × 5 м, расположенной вблизи места установки измерительной аэрозольной аппаратуры, были отобраны образцы поверхностного слоя почвы толщиной 5 см [34] методом «конверт» (пробы почвы отбирают на выбранном участке в пяти точках: четыре точки по углам и одна в центр). Из этих проб составляется сборная проба весом не менее 500 г, которая затем анализируется. Методика подготовки и определения элементного состава отобранного образца почвы также представлена в [27].

С целью ландшафтно-геохимического анализа были рассчитаны кларки концентрации (KK) элементов в почве на СФЭМ, характеризующие отклонение содержания элемента в почве от кларка в верхней части континентальной земной коры [30]:

$$KK = П/K.$$

Контроль метеорологических параметров в точке измерений проводился при помощи метеостанций «Тропосфера-Н» и WS-600. Определение направления прихода воздушных масс в точку измерений на СФЭМ выполнялось с помощью открытых интернет-ресурсов [35] методом обратных траекторий движения воздушных масс, рассчитанных по модели NOAA's HYSPLIT [36].

Результаты и обсуждение

Метеорологические параметры

Температура воздуха в период измерений в дневное время колебалась от +4 до +30 °С, в ночные часы — от +1 до +12 °С. Относительная влажность воздуха в Крыму высокая, в дневные часы она опускалась до 25%, в ночные — возрастала до 90%. Атмосферное давление в течение натурных наблюдений изменялось в диапазоне 737–760 мм рт. ст. Периоду наблюдений предшествовала сухая зима, весной также было мало осадков, что характерно для юго-восточного Крыма. На розе ветров, построенной для СФЭМ, практически отсутствует ветер западного направления, с которым приходят осадки. Скорость ветра в дневные часы достигала 9,5 м/с, но большей частью не превышала 6 м/с, в то время как ночью ветер стихал до 0,5–2 м/с или наблюдались штилевые условия. Преимущественное направление ветра во время измерений — южное (34%), примерно одинаковая частота повторений ветров северо-восточного и восточного направлений (11–17%) и юго-западного и юго-восточного направлений (10–12%), меньше — ветров северного и западного румбов (5%). Из-за месторасположения СФЭМ практически отсутствует северо-западное направление ветра.

Элементный состав почвы на СФЭМ

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. В табл. 1 приведены концентрации химических элементов (С) в составе почвы на территории СФЭМ и КК элементов в почве [30].

Содержание химических элементов В, Se, Rh, Pd, Te, Re, Ir, Pt, Au в исследованных пробах почвы были ниже порога обнаружения (ПО) применяемого для анализа метода МС–ИСП.

В химическом составе почвы на СФЭМ первые элементы располагаются в следующей последовательности по процентному содержанию химических элементов глобального распространения в пробе: Al > Fe > K > Ca > Mg > Na > Ti. Такая последовательность совпадает с последовательностью химических элементов в почве степных агроландшафтов юга России и горно-луговых почв Кавказа (плато Шаджатмаз, Al > Fe > K > Ca > Mg > Na > Ti) [12, 37]

Таблица 1

Химические элементы и их КК в почве на СФЭМ

Элемент	С	КК	Элемент	С	КК
Li	46 мкг/г	1,9	Cd	0,17 мкг/г	1,9
Be	1,75 мкг/г	0,8	Sn	1,76 мкг/г	0,8
Na	0,63%	0,3	Sb	0,64 мкг/г	1,6
Mg	0,88%	0,6	Cs	5,02 мкг/г	1,0
Al	7,02%	0,9	Ba	389 мкг/г	0,6
P	0,11%	1,7	La	26 мкг/г	0,8
S	0,14%	2,3	Ce	53 мкг/г	0,8
K	2,34%	1,0	Pr	5,39 мкг/г	0,8
Ca	1,91%	0,7	Nd	20 мкг/г	0,8
Sc	7,23 мкг/г	0,5	Sm	4,04 мкг/г	0,9
Ti	0,22%	0,6	Eu	0,77 мкг/г	0,8
V	65 мкг/г	0,7	Gd	3,22 мкг/г	0,8
Cr	38 мкг/г	0,4	Tb	0,46 мкг/г	0,7
Mn	0,10%	1,3	Dy	2,84 мкг/г	0,7
Fe	2,91%	0,7	Ho	0,58 мкг/г	0,7
Co	9,91 мкг/г	0,6	Er	1,74 мкг/г	0,8
Ni	29 мкг/г	0,6	Tm	0,28 мкг/г	0,9
Cu	24 мкг/г	0,8	Yb	1,78 мкг/г	0,9
Zn	100 мкг/г	1,5	Lu	0,28 мкг/г	0,9
Ga	13 мкг/г	0,7	Hf	2,73 мкг/г	0,5
As	12 мкг/г	2,4	Ta	0,43 мкг/г	0,5
Rb	82 мкг/г	1,0	W	0,99 мкг/г	0,5
Sr	158 мкг/г	0,5	Hg	0,21 мкг/г	4,2
Y	17 мкг/г	0,8	Tl	0,38 мкг/г	0,4
Zr	83 мкг/г	0,4	Pb	26 мкг/г	1,5
Nb	5,97 мкг/г	0,5	Bi	0,27 мкг/г	1,7
Mo	1,03 мкг/г	1,0	Th	8,83 мкг/г	0,8
Ag	0,06 мкг/г	1,1	U	2,07 мкг/г	0,8

и близка к последовательности элементов в верхней части континентальной земной коры. Основная масса элементов находится в рассеянном состоянии, наблюдается умеренное превышение концентрации (в 1,5–2,4 раза) относительно кларков элементов Р, S, Mn, Zn, As, Cd, Sb, Pb, Bi и максимальное (в 4,2 раза) Hg. Накопление этих элементов в почве, возможно, связано с близким расположением Черного моря (1000 м) и техногенным влиянием.

На рис. 2 приведены значения КК для выбранных 33 элементов в почве на СФЭМ (Крым) и в горно-луговой почве на плато Шаджатмаз (Кавказ). В основном повышенные значения КК химических элементов в почве на СФЭМ характерны для элементов дальнего переноса и элементов, входящих в морской аэрозоль.

Массовая, счетная концентрация и элементный состав аэрозоля

Общая массовая концентрация приземного аэрозоля в период измерений варьировалась от 3 до 35 мкг/м³ (рис. 3). Исключение составил один эпизод 25–27.03.2020 г., когда массовая концентрация составляла 49, 195 и 48 мкг/м³ соответственно. Среднесуточная массовая концентрация аэрозоля за весь период измерений — 13 мкг/м³, с учетом этого эпизода ее значение составляет 16 мкг/м³. Из 86 дней измерений среднесуточная массовая

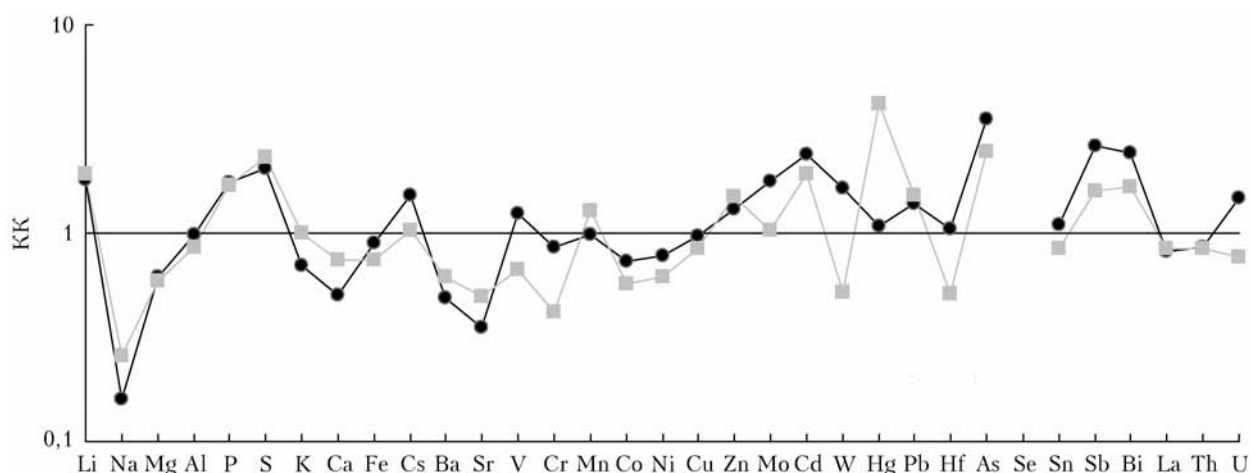


Рис. 2. Относительная концентрация химических элементов в почве СФЭМ, Крым (кривая с квадратами) и горно-луговой почве на плато Шаджатмаз, Кавказ (кривая с точками)

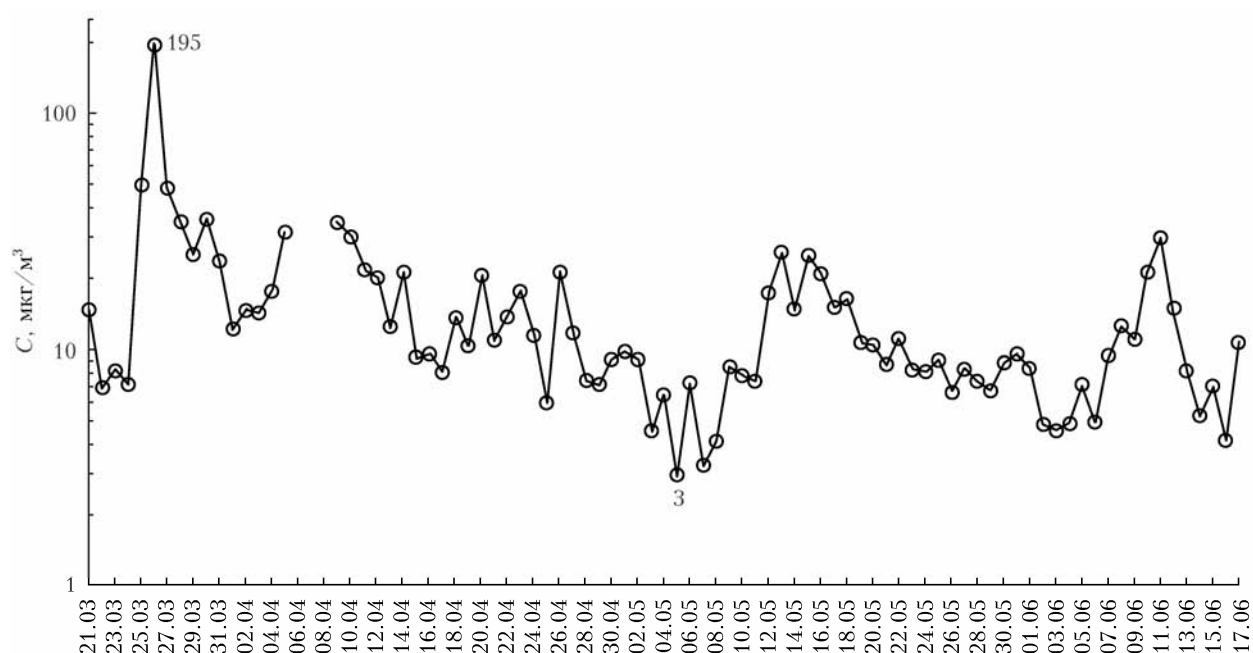


Рис. 3. Среднесуточная массовая концентрация аэрозоля в период измерений на СФЭМ с 21.03 по 17.06.2020 г.

концентрация на фильтрах была меньше 10 мкг/м^3 в 50% случаев, от 10 до 20 мкг/м^3 в 26%, от 20 до 30 мкг/м^3 в 15% и больше 30 мкг/м^3 в 9% случаев (средняя концентрация 16 мкг/м^3 была ниже среднесуточного значения ПДК PM_{10} (по российским стандартам) — 60 мкг/м^3 [38]).

Высокие значения массовой концентрации для эпизода 25–27.03.2020 г. были обусловлены приходом воздушной массы с востока из Казахстана, где 23.03.2020 г. был зарегистрирован мощный вынос пылевого аэрозоля из района Арала (рис. 4, цв. вкладка). Минеральная пыль, поднятая в Казахстане, вместе с воздушной массой проследовала через Каспийское море и Калмыкию в Крым и далее

на запад в Болгарию и Румынию, на что указывают спутниковые снимки (рис. 4), также это событие подробно рассмотрено в [39]. Анализ типизации аэрозоля 26.03.2020 г. по данным спутников CALIPSO [40] и MODIS [41] показал, что доминирующим типом аэрозоля над исследуемым регионом был пылевой аэрозоль. Для данной точки наблюдений это событие является нетипичным.

Для определения дисперсного состава аэрозоля в период измерений были построены графики распределения среднесуточной счетной концентрации аэрозоля (N) в зависимости от диаметра аэрозольных частиц (d), которые представлены на рис. 5 для различных направлений прихода воздушной массы

в точку измерений. Характер кривых на рис. 5, а указывает на содержание в аэрозоле 25–28.03.2020 г. большого количества крупных частиц диаметром больше 1 мкм, в следующие дни измерений (30.03 и 1.04) увеличивается количество субмикронных частиц. После 30.03 поведение счетной концентрации частиц имеет иной характер (рис. 5, б).

Для определения происхождения аэрозолей были рассчитаны коэффициенты обогащения $EF_{ак}$ и $EF_{ап}$ (по лантану). Также рассчитаны коэффициенты $KK_{ак}$ и $KK_{ап}$, средние значения массовой концентрации элементов C_1 и их среднеквадратичные отклонения S_1 , содержание химических элементов в составе аэрозольных частиц C_2 и их среднеквадратичные отклонения S_2 , полученные по результатам химического анализа 31 пробы (табл. 2).

Содержание химических элементов Rh, Pd, Ta, Ir, Pt, Au в исследованных пробах было ниже порога обнаружения МС–ИСП.

Химические элементы имеют следующую последовательность по среднему массовому содержанию в составе аэрозольных частиц (C_2): $S > Ca > Na > Al > Fe > K > Mg > P$. Здесь сера стоит на первом месте, что указывает на сильное влияние Черного моря на элементный состав аэрозоля и отличает его от «минеральной пыли» аридных зон, для которой характерен порядок $Ca > Al > Fe > Mg > K > Na > S$ [12], и от аэрозоля индустриального центра: $Ca > Fe > Al > Mg > K > Na > S$ [42].

По уровню $EF_{ак}$ все рассматриваемые химические элементы разделены на группы: в первую группу входят элементы, для которых $EF_{ак} \leq 10$,

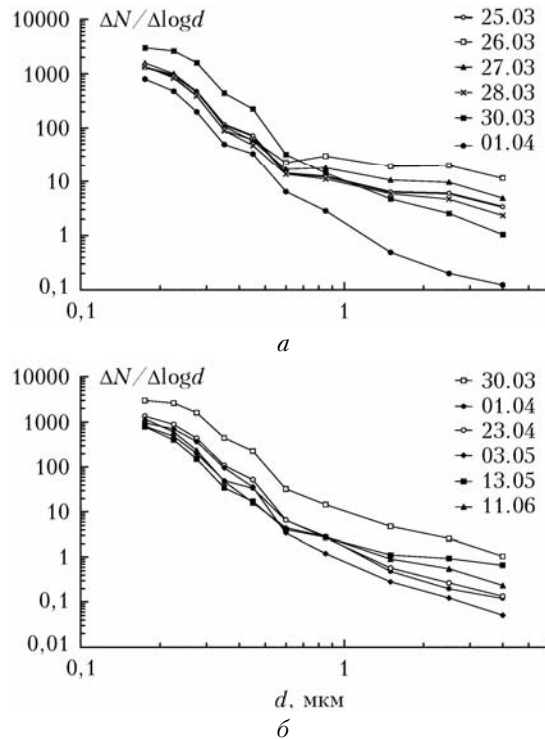


Рис. 5. Распределение среднесуточной счетной концентрации аэрозольных частиц по размерам: а – 25–28.03.2020 г., «минеральная пыль» с Арала при среднесуточной массовой концентрации 49, 195, 48 и 35 мкг/м³ соответственно, 30.03.2020 г. и 1.04.2020 г. – дни смены направления переноса; б – дни, когда среднесуточная массовая концентрация меньше 30 мкг/м³

Таблица 2
Содержание химических элементов в аэрозольных пробах

Элемент	C_1	S_1	C_2	S_2	$EF_{ак}$	$EF_{ап}$	$KK_{ак}$	$KK_{ап}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Li	0,54 нг/м³	0,8	17 мкг/г	5,7	1,7	0,8	0,7	0,4
Be	0,02 нг/м³	0,02	0,78 мкг/г	0,2	0,9	0,9	0,4	0,4
B	3,4 нг/м³	2,9	134 мкг/г	48	18	< ПО	7,9	< ПО
Na	0,93 мкг/м³	2,4	2,3%	2,4	2,3	7,8	0,9	4
Mg	0,34 мкг/м³	0,8	0,86%	0,5	1,4	2,1	0,6	1
Al	0,64 мкг/м³	0,8	2,2%	0,8	0,6	0,7	0,3	0,3
P	0,03 мкг/м³	0,01	0,12%	0,05	4,4	2,3	1,8	1,1
S	1,3 мкг/м³	2,0	5,3%	2,9	206	80	85	38
K	0,3 мкг/м³	0,3	1,1%	0,3	1,2	1	0,5	0,5
Ca	1,4 мкг/м³	3,1	3,4%	1,9	3,2	3,9	1,3	1,8
Sc	0,14 нг/м³	0,2	4,6 мкг/г	1,9	0,8	1,3	0,3	0,6
Ti	16 нг/м³	13,0	0,10%	0,07	0,4	0,7	0,3	0,3
V	1,5 нг/м³	1,6	56 мкг/г	15	1,4	1,9	0,6	0,8
Cr	2,5 нг/м³	1,8	88 мкг/г	53	2,3	4,8	1,0	2,3
Mn	0,02 мкг/м³	0,01	0,06%	0,02	1,7	1,2	0,8	0,6
Fe	0,58 мкг/м³	0,6	2,1%	0,7	1,2	1,5	0,5	0,7
Co	0,20 нг/м³	0,2	6,7 мкг/г	2,3	0,9	1,4	0,4	0,7
Ni	0,86 нг/м³	0,7	42 мкг/г	22	2,1	3,1	0,9	1,4
Cu	6,5 нг/м³	7,2	323 мкг/г	567	28	29	12	14
Zn	14 нг/м³	7,5	693 мкг/г	337	25	15	10,3	7
Ga	0,2 нг/м³	0,2	6,6 мкг/г	3,0	0,9	1,1	0,4	0,5
As	0,53 нг/м³	0,5	20 мкг/г	13	10,2	3,7	4,3	1,7
Se	0,36 нг/м³	0,2	22 мкг/г	15	577	< ПО	240	< ПО
Rb	1,5 нг/м³	1,6	52 мкг/г	15	1,5	1,3	0,6	0,6
Sr	0,02 мкг/м³	0,06	318 мкг/г	456	2,4	4,4	1	2

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Y	0,26 нг/м ³	0,3	8,9 мкг/г	3,0	1	1,1	0,4	0,5
Zr	0,44 нг/м ³	0,4	18 мкг/г	7,5	0,2	0,4	0,1	0,2
Nb	0,03 нг/м ³	0,02	1,2 мкг/г	0,8	0,2	0,4	0,1	0,2
Mo	0,14 нг/м ³	0,2	4,9 мкг/г	2,6	12	10	4,9	5
Ag	0,02 нг/м ³	0,06	0,62 мкг/г	0,5	28	27	12	6
Cd	0,11 нг/м ³	0,08	5,0 мкг/г	3,3	131	61	56	25
Sn	0,27 нг/м ³	0,1	16 мкг/г	12	18	19	7,4	9
Sb	0,26 нг/м ³	0,2	13 мкг/г	8,2	79	45	33	20
Te	0,01 нг/м ³	0,002	0,2 мкг/г	1,2	20	< ПО	240	< ПО
Cs	0,10 нг/м ³	0,1	3,4 мкг/г	1,2	1,7	1,5	0,7	0,7
Ba	6,60 нг/м ³	10	207 мкг/г	60	0,8	1,1	0,3	0,5
La	0,38 нг/м ³	0,4	13 мкг/г	4,9	1,0	1,0	0,4	0,5
Ce	0,75 нг/м ³	0,7	26 мкг/г	1,1	1,0	1,0	0,4	0,5
Pr	0,08 нг/м ³	0,09	3,0 мкг/г	1,1	1,0	1,2	0,4	0,5
Nd	0,34 нг/м ³	0,3	12 мкг/г	0,8	1,0	1,2	0,4	0,6
Sm	0,07 нг/м ³	0,08	2,4 мкг/г	0,8	1,2	1,3	0,5	0,6
Eu	0,01 нг/м ³	0,02	0,5 мкг/г	0,2	1,1	1,2	0,5	0,6
Gd	0,06 нг/м ³	0,07	1,9 мкг/г	0,6	1,1	1,3	0,5	0,6
Tb	0,01 нг/м ³	0,01	0,3 мкг/г	0,08	0,9	1,3	0,4	0,6
Dy	0,04 нг/м ³	0,05	1,5 мкг/г	0,5	0,9	1,1	0,4	0,5
Ho	0,01 нг/м ³	0,01	0,3 мкг/г	0,09	0,8	1,0	0,3	0,5
Er	0,02 нг/м ³	0,02	0,7 мкг/г	0,2	0,8	0,9	0,3	0,4
Tm	0,003 нг/м ³	0,003	0,1 мкг/г	0,02	0,8	0,8	0,3	0,4
Yb	0,02 нг/м ³	0,02	0,6 мкг/г	0,2	0,7	0,7	0,3	0,3
Lu	0,003 нг/м ³	0,003	0,09 мкг/г	0,03	0,7	0,7	0,3	0,3
Hf	0,01 нг/м ³	0,01	0,1 мкг/г	0,1	0,1	0,1	0,02	0,04
W	0,01 нг/м ³	0,02	0,6 мкг/г	0,9	0,7	1,2	0,3	0,6
Re	0,002 нг/м ³	0,003	0,05 мкг/г	0,04	0,6	< ПО	0,3	< ПО
Hg	0,09 нг/м ³	0,09	4,7 мкг/г	5,8	222	47	94	22
Tl	0,03 нг/м ³	0,02	1,3 мкг/г	0,7	3,4	7,2	1,4	3
Pb	3,4 мкг/м ³	0,002	158 мкг/г	81	22	13	9,3	6
Bi	0,03 нг/м ³	0,02	1,6 мкг/г	1,2	24	13	10	6
Th	0,1 нг/м ³	0,1	3,3 мкг/г	1,2	0,7	0,8	0,3	0,4
U	0,05 нг/м ³	0,1	1,1 мкг/г	0,7	1,0	1,3	0,4	0,5

во вторую группу — $10 < EF_{ак} < 100$, а в третью группу — $EF_{ак} > 100$. Нормировка элементного состава атмосферных аэрозолей по кларкам и элементному составу почвы в районе наблюдения подтвердила, что из 33 отобранных химических элементов, входящих в аэрозоль, Li, Na, Mg, Al, P, K, Ca, Fe, Cs, Ba, Sr, V, Cr, Mn, Co, Ni, Mo, W, La, Hf, Th и U имеют низкую интенсивность обогащения как относительно кларков верхней части континентальной земной коры, так и почвы Крыма ($EF_{ак} \leq 1-10$). Cu, Zn, Sn, Pb, Bi имеют среднюю интенсивность обогащения ($EF_{ак} = 10-50$) и аэрозольной концентрации, а S, Se, Cd, Sb, Hg — высокую и очень высокую ($EF_{ак} = 50-100$ и $EF_{ак} > 100$).

Выбранные химические элементы аэрозоля Крыма (рис. 6) имеют практически те же средние значения коэффициентов обогащения и относятся к той же группе нетерригенных элементов, за исключением W, что и в индустриальном центре [32, 42].

Для выявления геохимических связей в аэрозоле Крыма был выполнен корреляционный анализ, который показал наличие высоких коэффициентов корреляции между концентрациями элементов в пробах, что указывает на их общее происхождение: общие процессы образования (общий генезис и влияние моря) или сходство направлений переноса совершенно разной природы в воздушных пото-

ках, приходящих к пункту наблюдений (общий атмосферный перенос и близкое расположение источников). Анализ изменчивости концентраций разных элементов позволил выделить те, концентрации которых менялись почти синхронно в течение измерений. Коэффициенты корреляции концентрации элементов преимущественно терригенного происхождения (для которых $EF_{ак} = 1-10$) между собой и с элементом As больше 0,8, а с Pb и Bi — 0,5–0,6. Исключение составляет W, у которого положительная корреляция 0,4–0,5 только с Na, As и Sb, а с остальными элементами — отрицательная. Коэффициенты корреляции концентрации элементов смешанного локального происхождения ($EF_{ак} = 10-50$) очень изменчивы. Так, Zn положительно коррелирует с Se, Sn, Sb, Pb и Bi (коэффициенты корреляции от 0,6 до 0,75); As, имея высокую корреляцию с терригенными элементами, коррелирует с Pb и Bi (коэффициент корреляции до 0,7), Sn коррелирует с Cd, Sb, Pb (коэффициенты корреляции 0,6–0,8), Pb — с K, Se, Cd, Sn, Bi (коэффициенты корреляции 0,6–0,8), а Cu имеет положительную корреляцию (коэффициенты корреляции 0,3–0,5) только с Zn, Hf, Hg и As. Такие корреляционные связи предполагают как общий атмосферный перенос этих элементов от промышленных источников, так и влияние моря. Элементы с $EF_{ак} = 50-100$ и > 100

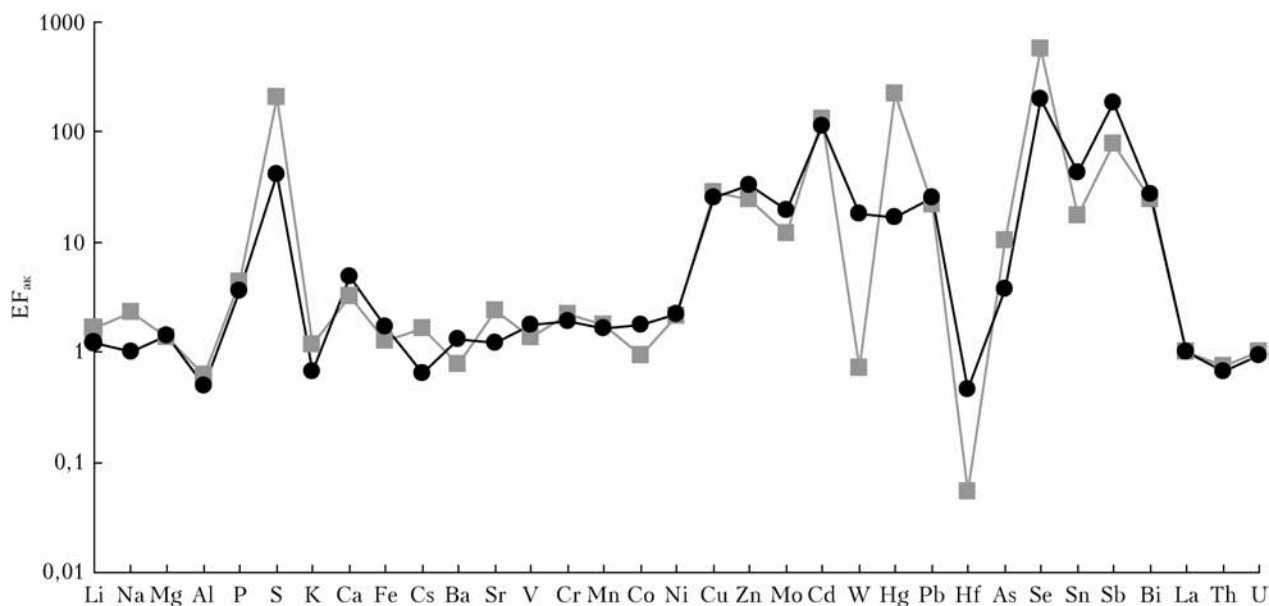


Рис. 6. Коэффициенты обогащения выбранных элементов аэрозоля на СФЭМ, Крым (кривая с квадратами) и в Москве [42] (кривая с точками) относительно концентрации этих элементов в верхней части континентальной земной коры [30]

также имеют изменчивую корреляцию, которая объясняется общими источниками происхождения. Так, Se, имея максимальный коэффициент обогащения, коррелирует только с Zn, Cd, Pb и Bi (коэффициенты корреляции от 0,5 до 0,8). Основным природным источником Se в атмосфере является образование его органических соединений фитопланктоном [43], а антропогенные источники — сжигание угля, нефтепродуктов, горнодобывающие и металлургические предприятия [43]. S коррелирует только с элементами терригенного происхождения (коэффициенты корреляции > 0,8), Cd коррелирует еще и с Bi (коэффициенты корреляции 0,7), а Hg имеет положительную корреляцию 0,4 с элементами терригенного происхождения и с Cu — ~0,5. Такие корреляционные связи, возможно, также указывают на влияние Черного моря.

Для сравнения элементного состава и массовой концентрации аэрозольных частиц приземного слоя атмосферы СФЭМ все данные измерений были разбиты на группы, характеризующие направление прихода воздушной массы в точку измерений (рис. 7–9).

При анализе каждого представленного события для визуализации его динамической картины в регионе использовался также открытый Интернет-ресурс earth.nullschool.net [44], реализующий численную математическую модель CAMS расчета движения воздушных масс в тропосфере и показывающий картину переноса аэрозоля текущего дня.

Различия в элементном составе приземного аэрозоля между рассматриваемыми эпизодами проявляются в изменении массовой концентрации элементов и коэффициентов аэрозольной концентрации в зависимости от направления переноса воздушных масс и локальных источников в Крыму.

Воздушные массы в точку измерений, согласно трехдневным обратным траекториям, поступали

с северо-западного направления 34 дня, с севера, с северо-востока и востока — по 3 дня, с юго-востока — 9 дней, с юга — 10 дней, с юго-запада — 5 дней. Остальные 19 дней осуществлялся локальный перенос с разных направлений, который характеризует источники близлежащих регионов.

На рис. 7 представлены траектории, подтверждающие перенос пылевого аэрозоля из Казахстана 25–27.03.2020 г. (под рисунками указана последовательность первых элементов в процентном составе содержания химических элементов глобального распространения в пробе).

Элементный состав аэрозоля при траекториях, указывающих на вынос из Казахстана, имеет следующую последовательность химических элементов: Ca > Na > S > Mg > Al > Fe > K > Sr (рис. 7, а), Ca > Na > S > Al > Mg > Fe > K > Sr (рис. 7, б) и Ca > S > Na > Al > Fe > Mg > K > Sr (рис. 7, в), что отличает его от среднего элементного состава «минеральной пыли» аридного аэрозоля Калмыкии (Ca > Al > Fe > S > K > Mg > Na > Ti [12]) и от аридной почвы Арала (Ca > Al > Fe > K > S > Na > Mg > Ti [45]). Повышенная концентрация Na в пробах этих дней, вероятно, указывает на вынос аэрозоля с солончаков Арала. В пробах других дней (рис. 8, а, в; 9, а, д) сера оказывается всегда на первом месте при прохождении воздушной массы над Черным морем. Постоянное присутствие сульфатных ионов в пределах береговой зоны Черного моря шириной до 2000 м отмечено в [14] как важная особенность химического состава аэрозолей этого приморского района.

Перенос аэрозоля продолжается на юго-восток и массовая концентрация уменьшается 28 и 29.03.2020 г., а 30.03, как показывают траектории (модель NOAA HYSPLITE), аэрозоль перемещался в точку измерений уже с близлежащих территорий (рис. 9, а).

Back Trajectories Duration 72h ending 250 m agl
From 25.03.2020 06:00 UTC to 26.03.2020 06:00 UTC Alt in m above Ground Level
C.III. < 250 500 1000 1500 2000 3000 4000 > 5000



Back Trajectories Duration 72h ending 250 m agl
From 26.03.2020 06:00 UTC to 27.03.2020 06:00 UTC Alt in m above Ground Level
C.III. < 250 500 1000 1500 2000 3000 4000 > 5000



Back Trajectories Duration 72h ending 250 m agl
From 27.03.2020 06:00 UTC to 28.03.2020 06:00 UTC Alt in m above Ground Level
C.III. < 250 500 1000 1500 2000 3000 4000 > 5000

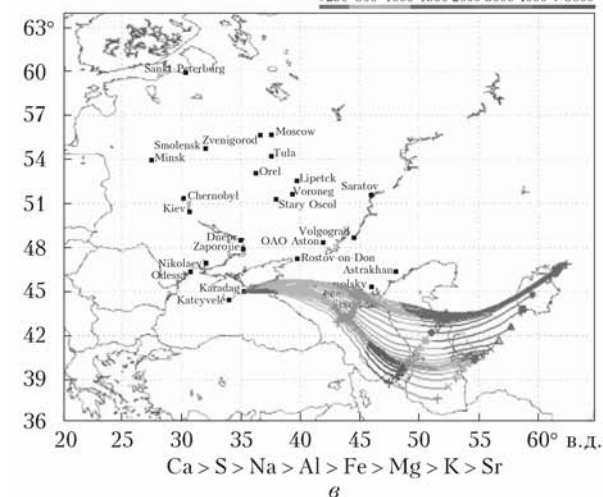


Рис. 7. Трехдневные обратные траектории прихода воздушных масс в точку измерений на СФЭМ для эпизода пылевого выноса из Казахстана: а – 25, 26.03.2020 г., $C = 49 \text{ мкг/м}^3$; б – 26, 27.03.2020 г., $C = 195 \text{ мкг/м}^3$; в – 27, 28.03.2020 г., $C = 48 \text{ мкг/м}^3$. Здесь и далее в подписях указаны даты отбора пробы; C – среднесуточная массовая концентрация аэрозоля на фильтре, определенная весовым методом (см. цветной рисунок на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.36-2023/iss.07>)

Back Trajectories Duration 72h ending 250 m agl
From 30.03.2020 06:00 UTC to 31.03.2020 06:00 UTC Alt in m above Ground Level
C.III. < 250 500 1000 1500 2000 3000 4000 > 5000



Back Trajectories Duration 72h ending 250 m agl
From 09.04.2020 06:00 UTC to 10.04.2020 06:00 UTC Alt in m above Ground Level
C.III. < 250 500 1000 1500 2000 3000 4000 > 5000



Back Trajectories Duration 72h ending 250 m agl
From 23.04.2020 06:00 UTC to 24.04.2020 06:00 UTC Alt in m above Ground Level
C.III. < 250 500 1000 1500 2000 3000 4000 > 5000

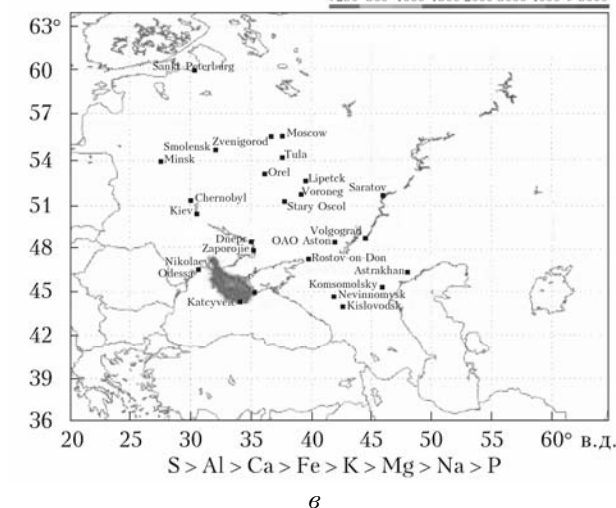


Рис. 8. Трехдневные обратные траектории прихода воздушных масс в точку измерений на СФЭМ для эпизода выноса с близлежащих территорий: а – 30, 31.03.2020 г., $C = 35 \text{ мкг/м}^3$; б – 9, 10.04.2020 г., $C = 35 \text{ мкг/м}^3$; в – 23, 24.04.2020 г., $C = 18 \text{ мкг/м}^3$ (см. цветной рисунок на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.36-2023/iss.07>)

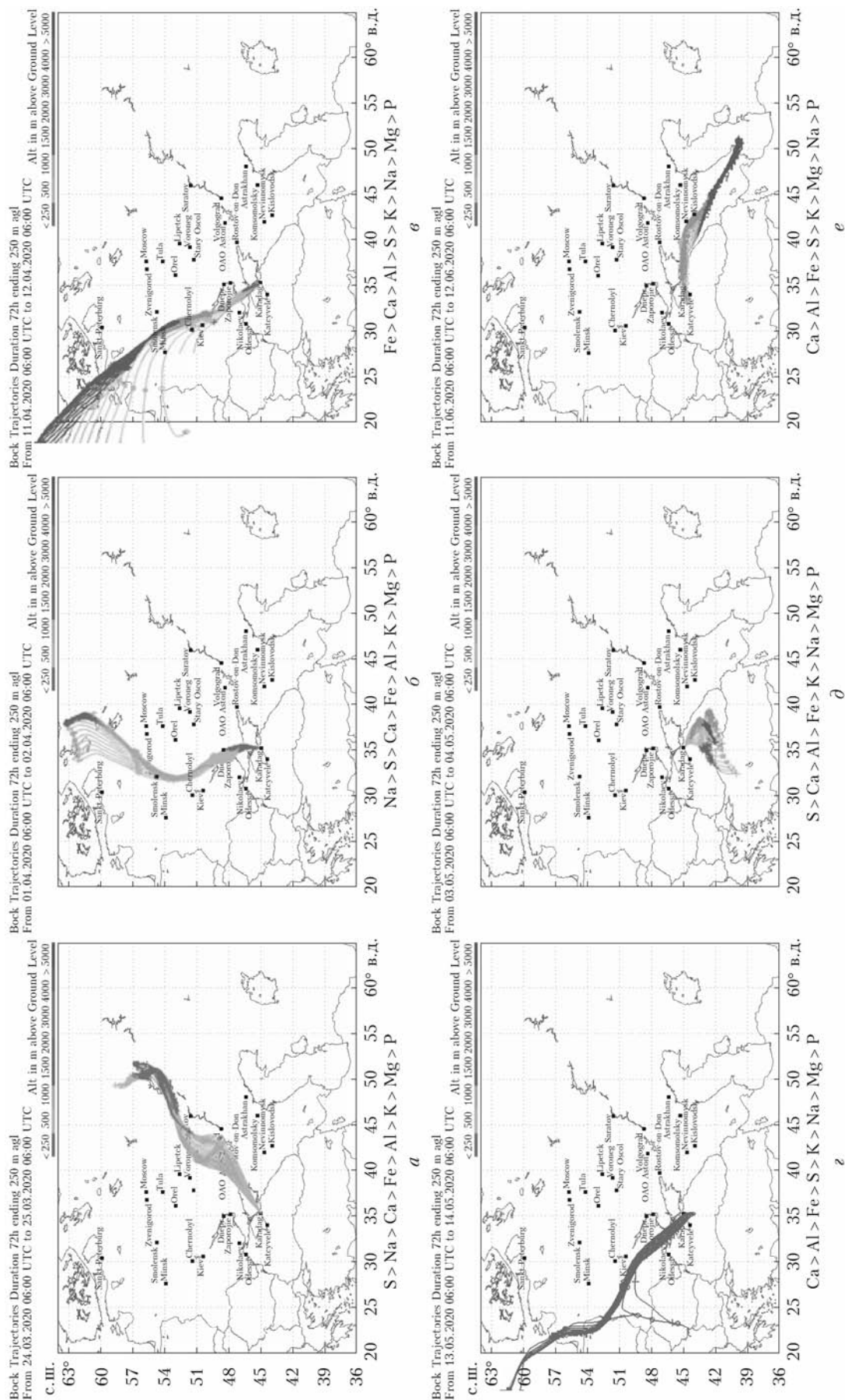


Рис. 9. Трёхдневные обратные траектории прихода воздушных масс в точку измерений на СФЭМ для различных направлений переноса: а – 24, 25.03.2020 г., $C = 7 \text{ мкг/м}^3$, $S > Na > Ca > Fe > Al > K > Mg > P$; б – 1, 2.04.2020 г., $C = 12 \text{ мкг/м}^3$, $Na > S > Ca > Fe > Al > K > Mg > P$; в – 11, 12.04.2020 г., $C = 22 \text{ мкг/м}^3$, $Fe > Ca > Al > S > K > Na > Mg > P$; г – 13, 14.05.2020 г., $C = 26 \text{ мкг/м}^3$, $Ca > Al > Fe > S > K > Na > Mg > P$; д – 3, 4.05.2020 г., $C = 4 \text{ мкг/м}^3$, $S > Ca > Al > Fe > K > Na > Mg > P$; е – 11, 12.06.2020 г., $C = 30 \text{ мкг/м}^3$, $Ca > Al > Fe > S > K > Mg > Na > P$ (см. цветной рисунок на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.36-2023/iss.07>)

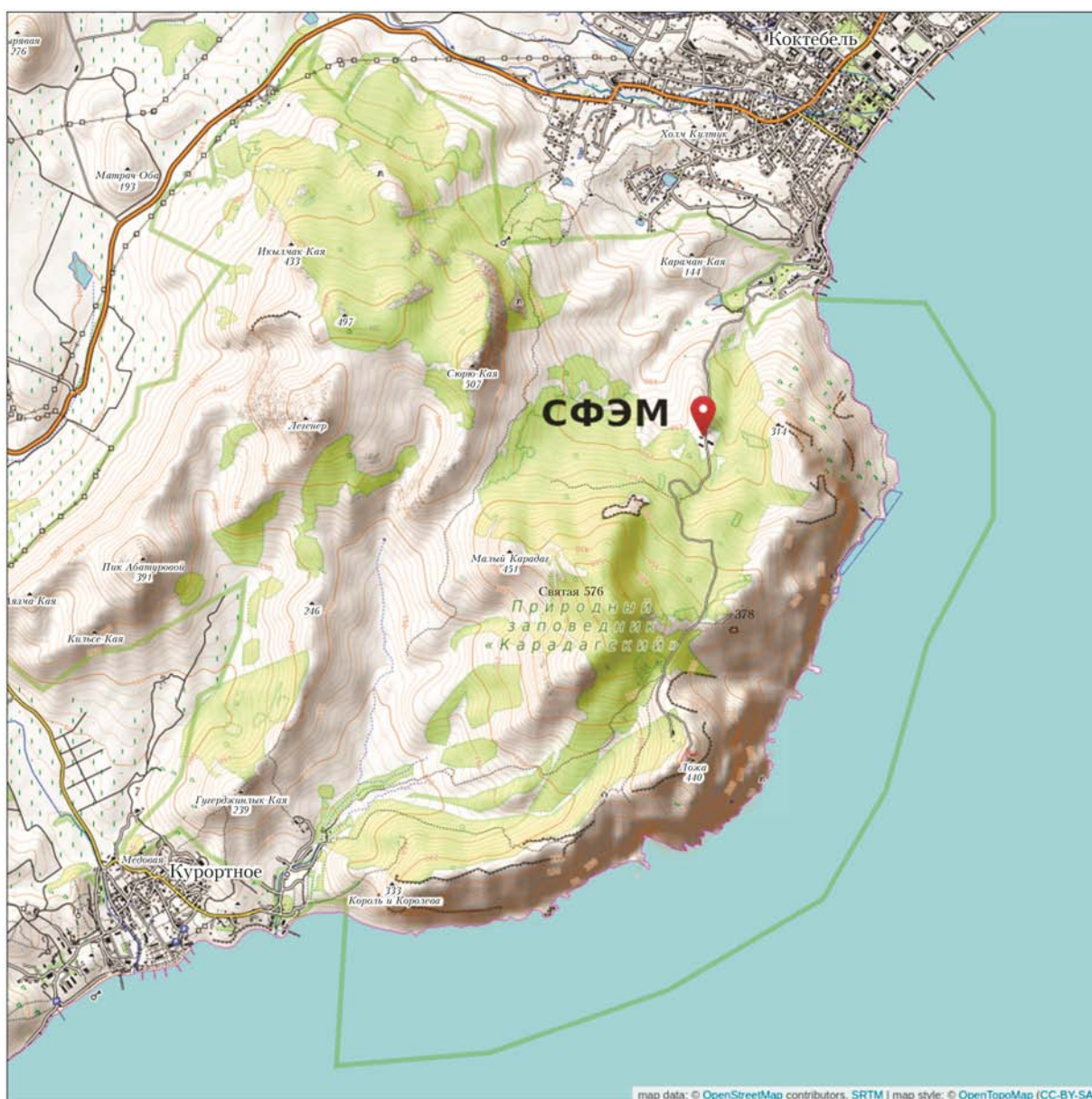


Рис. 1. Расположение СФЭМ, зеленая линия — граница Карадагского заповедника

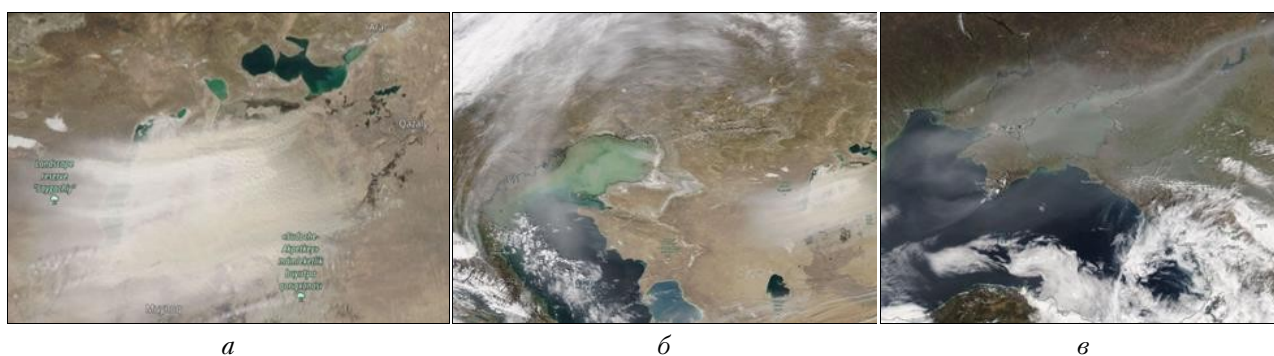


Рис. 4. Снимки начала пыльной бури на Арале спутником MODIS и дальнейшее перемещение пылевого облака в сторону Крыма: а — 23.03; б — 24.03; в — 26.03.2020 г.

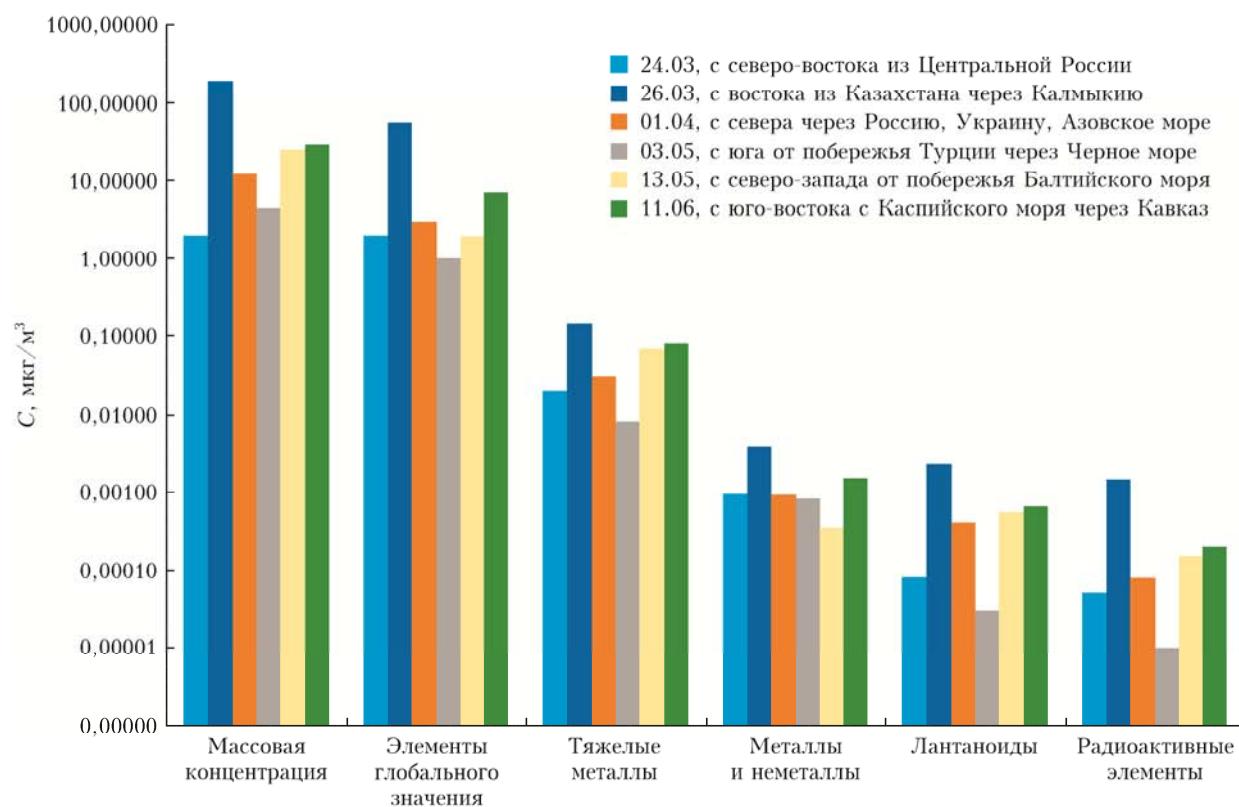


Рис. 10. Массовые концентрации групп химических элементов в пробах аэрозоля в зависимости от направления прихода воздушных масс в точку измерений

После прохождения воздушной массы над морем в химическом составе аэрозоля от источников с близлежащих территорий на первое место выходит сера ($S > Ca > Al > Na > Fe > K > Mg > P$, рис. 8, а). Аэрозоль, пришедший с воздушной массой с северо-востока через Украину, близок по составу к «минеральной пыли» ($Ca > Al > Fe > S > K > Na > Mg > P$, рис. 8, б). Если локальный источник аэрозоля находится в Крыму, то первые химические элементы располагаются в следующем порядке: $S > Al > Ca > Fe > K > Mg > Na > P$ (рис. 8, в). При прохождении воздушной массы с северо-запада через промышленную зону на первое место в распределении химических элементов в аэрозольной пробе на фильтре выходит железо ($Fe > Ca > Al > S > K > Na > Mg > P$ (рис. 8, в)).

Минимальная среднесуточная массовая концентрация аэрозоля на СФЭМ (4 мкг/м^3) была зарегистрирована 3.05.2020 г. при южном направлении прихода воздушной массы из Турции, прошедшей над акваторией Черного моря (рис. 9, д). В другие дни прихода воздушных масс с этого направления массовая концентрация не превышала 10 мкг/м^3 .

При северном направлении переноса воздушной массы в точку измерений 1.04.2020 г. и ее прохождении над территориями России, Украины и над Азовским морем (рис. 9, б) среднесуточная массовая концентрация аэрозоля составляла 12 мкг/м^3 . Траектории указывают, что воздушная масса проходила над заливом Сиваш, при этом Na в последовательности элементов выходит на первое место: $Na > S > Ca > Fe > Al > K > Mg > P$.

При приходе воздушной массы с северо-запада от побережья Балтийского моря через промышленные районы Белоруссии и Украины среднесуточная массовая концентрация аэрозоля 13.05.2020 г. (рис. 9, г) была 26 мкг/м^3 (за все время измерений изменялась от 8 до 30 мкг/м^3). Низкие среднесуточные массовые концентрации с этого направления говорят о том, что воздушная масса «разворачивалась» над Черным морем.

На рис. 10 (цв. вставка) представлена диаграмма изменения массовой концентрации аэрозоля и выбранных групп химических элементов в зависимости от направления движения воздушных масс для выбранных эпизодов.

При приходе воздушных масс с восточных румбов (см. рис. 7) отмечены повышенные концентрации как элементов терригенной группы, так и других групп. При северном, южном и северо-восточном направлениях переноса воздушных масс концентрация металлоидов и неметаллов почти одинакова.

На рис. 11 представлены коэффициенты обогащения $EF_{ак}$ нетерригенных химических элементов для выбранных направлений прихода воздушных масс.

При приходе воздушной массы с южного направления, когда она долгое время находится над Черным морем, у элементов S, Se очень высокие

- 24.03, с северо-востока из Центральной России
- 26.03, с востока из Казахстана через Калмыкию
- 01.04, с севера через Россию, Украину, Азовское море
- 03.05, с юга от побережья Турции через Черное море
- 13.05, с северо-запада от побережья Балтийского моря
- 11.06, с юго-востока с Каспийского моря через Кавказ

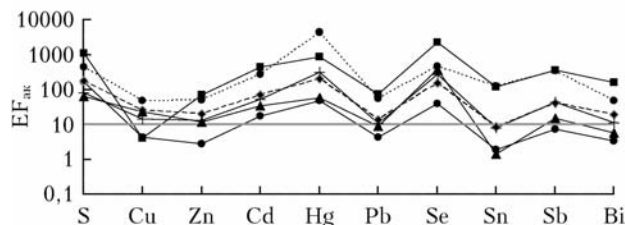


Рис. 11. Коэффициенты обогащения нетерригенных химических элементов относительно концентрации этих элементов в верхней части континентальной земной коры для выбранных направлений прихода воздушных масс [30]

коэффициенты обогащения $EF_{ак} > 1000$, что объясняется, по всей видимости, природным источником Se — деятельностью фитопланктона.

При этом у элемента Bi также очень высокий коэффициент обогащения. В этой пробе коэффициенты обогащения $EF_{ак} > 100$ у антропогенных элементов Cd, Hg, As, Sn, Sb.

Повышение общей массовой концентрации аэрозоля снижает значения коэффициентов обогащения элементов. При приходе воздушной массы с северного направления 1.04.2020 г. коэффициенты обогащения элементов S, Cu, Zn, Hg, Pb, Sb, Bi, за исключением Cd, Se, были выше, чем при приходе воздушной массы с востока из Казахстана 26.03 и с северо-запада 13.05. Наименьшие коэффициенты обогащения элементов были зафиксированы при выносе из Казахстана. Очевидно, что наличие в аэрозоле повышенного содержания «минеральной пыли» микронной фракции разбавляет аэрозоль и вызывает понижение коэффициентов обогащения элементов, связанных с мелкодисперсной фракцией антропогенного аэрозоля [24].

Заключение

Получены экспериментальные данные об элементном составе почвы и атмосферного аэрозоля в юго-восточной части горного Крыма на СФЭМ Карадагского заповедника весной 2020 г. в период пандемии COVID-19. Среднесуточные массовые концентрации аэрозоля изменялись от 3 до 35 мкг/м^3 , что меньше среднесуточных предельно допустимых концентраций PM_{10} — 60 мкг/м^3 (по российским стандартам). Среднее значение массовой концентрации в этот период — 13 мкг/м^3 . Зарегистрирован эпизод прихода шлейфа от пыльной бури в Казахстане в районе Арала 25–27.03.2020 г. со среднесуточной массовой концентрацией аэрозоля 49, 195 и 48 мкг/м^3 соответственно. Это событие является нетипичным для данного региона, и его учет повышает среднюю среднесуточную массовую концентрацию до 16 мкг/м^3 . Определены функции

распределения аэрозольных частиц по размерам для периода весенних измерений и эпизода прихода пылевого следа от пыльной бури в Казахстане.

Последовательность первых элементов по процентному содержанию химических элементов глобального распространения в почве на СФЭМ ($Al > Fe > K > Ca > Mg > Na > Ti$) совпадает с последовательностью для горно-луговых почва Кавказа и близка к последовательности этих элементов в верхней части континентальной земной коры. Основная масса элементов находится в рассеянном состоянии, наблюдается умеренное превышение концентрации (в 1,5–2,4 раза) относительно кларков у элементов P, S, Mn, Zn, As, Cd, Sb, Pb, Bi и максимальное – в 4,2 раза – у Hg.

Сформированы представления о природе химических элементов в аэрозоле Крыма. Последовательности химических элементов по среднему значению массового содержания аэрозольных частиц в весенний период ($S > Ca > Na > Al > Fe > K > Mg > P$) указывает на влияние Черного моря на химический состав аэрозоля и отличает его от аэрозоля аридных зон, для которого характерно высокое содержание «минеральной пыли», и от аэрозоля индустриального центра. Выделены элементы с коэффициентом $EF_{ак} \leq 10$. Это преимущественно терригенные элементы – Li, Na, Mg, Al и т.п., с высокими коэффициентами корреляции между собой. Элементы Cu, Zn, Sn, Pb, Bi имеют среднюю интенсивность обогащения ($EF_{ак} = 10–50$), а элементы S, Se, Cd, Sb, Hg – высокую и очень высокую ($EF_{ак} = 50–100$ и $EF_{ак} > 100$) и как природное, так и антропогенное происхождение.

Совместный анализ направлений поступления воздушных масс и элементного состава аэрозоля показал, что весной в атмосфере в юго-восточной части Крыма преобладает преимущественно северо-западный перенос воздушных масс с побережья Балтийского моря из Восточной Европы через промышленные районы Украины и Белоруссии. Среднесуточная массовая концентрация аэрозоля, поступающего с этого направления, изменялась от 10 до 30 $мкг/м^3$.

В 2021 и в 2022 гг. были продолжены комплексные сезонные измерения аэрозоля на СФЭМ, дополненные параллельными измерениями характеристик аэрозоля в южной части полуострова в пгт. Качивели на станции Черноморского гидрофизического подспутникового полигона Морского гидрофизического института РАН. Результаты измерений 2018–2022 гг. войдут в базу начальных данных о приземных значениях массовой и счетной концентрации аэрозоля и его дисперсном составе на полуострове Крым для численных моделей переноса на юге ЕТР.

Благодарности. Авторы благодарны сотрудникам Лаборатории воздушных ресурсов Американской национальной администрации по исследованию океана и атмосферы за предоставленную возможность строить обратные траектории переноса воздушных масс, пользуясь моделью HYSPLIT.

Авторы выражают благодарность коллегам: Ю.В. Жуланову, разработчику приборов ЛАС и ОЭАС, обеспечившему проведение измерений; В.А. Лебедеву, подготовившему измерительную аппаратуру к работе в Крыму; В.К. Карандашеву, проводившему элементный анализ аэрозоля, а также инженерам СФЭМ Д.Н. Давидовичу, А.Н. Родионову, Л.А. Столярову и В.Г. Медведеву, которые проводили измерения аэрозолей с большим интересом и внимательностью.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 19-05-50110 «Микромир» – Геофизическая и геохимическая дифференциация аэрозолей в приземной атмосфере природных и антропогенных ландшафтов). В.А. Лапченко принял участие в работе также в рамках госзадания (№ 121032300023-7).

Список литературы

1. Seinfeld J.H., Pandis S.N. Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change. New York: Wiley, 2006. 1232 p.
2. Кондратьев К.Я., Ивлев Л.С., Крапивин В.Ф. Атмосферные аэрозоли: свойства, процессы образования и воздействия. От нано- до глобальных масштабов. СПб.: BBM, 2007. 858 с.
3. Кондратьев К.Я., Ивлев Л.С. Климатология аэрозолей и облачности. Природные и техногенные аэрозоли. Т. 1. СПб.: BBM, 2008. 555 с.
4. Meinander O., Dagsson-Waldhauserova P., Amosov P., Aseyeva E., Atkins C., Baklanov A., Baldo C., Barr S.L., Barzycka B., Benning L.G., Cvetkovic B., Enchilik P., Frolov D., Gassy S., Kandler K., Kasimov N., Kavan Ja., King J., Koroleva T., Krupskaya V., Kulmala M., Kusiak M., Lappalainen H.K., Laska M., Lasne Jerome, Lewandowski M., Luks B., McQuaid Ja.B., Moroni B., Murray B., Möhler O., Nawrot A., Nickovic S., Norman T., O'Neill N.T., Pejanovic G., Popovichcheva O., Ranjbar K., Romanias M., Samonova O., Sanchez-Marroquin A., Schepanski K., Semenov I., Sharapova A., Shevnina E., Zongbo Shi, Sofiev M., Thevenet F., Thorsteinsson Th., Timofeev M., Nsikana-basi S.U., Uppstu A., Urupina D., Varga G., Werner T., Arnalds O., Vimic A.Vu. Newly identified climatically and environmentally significant high-latitude dust sources // Atmos. Chem. Phys. 2022. V. 22, iss. 17. P. 11889–11930. DOI: 10.5194/acp-22-11889-2022.
5. Fisher S., Bellinger D.C., Cropper M.L., Kumar P., Binagwah A., Koudonoukpo J.B., Landrigan P.J. Air pollution and development in Africa: Impacts on health, the economy, and human capital // The Lancet Planetary Health. 2021. V. 5, N 10. P. 681–688. DOI: 10.1016/s2542-5196(21)00201-1.
6. Ramanathan V., Chung C., Kim D., Bettge T., Buja L., Kiehl J.T., Wild M. Atmospheric brown clouds: Impacts on South Asian climate and hydrological cycle // Proc. Natl. Acad. Sci. 2005. V. 102, N 15. P. 5326–5333. DOI: 10.1073/pnas.0500656102.
7. Menary M.B., Robson J., Allan R.P., Booth B.B., Cassou C., Gastineau G., Zhang R. Aerosol – forced AMOC changes in CMIP6 historical simulations // Geophys. Res. Lett. 2020. V. 47, N 14. DOI: 10.1029/2020gl088166.

8. 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.
9. Chkhetiani O.G., Vazaeva N.V., Chernokulsky A.V., Shukurov K.A., Gubanov 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, N 8. P. 985. DOI: 10.3390/atmos12080985.
10. 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.
11. 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. Т. 17, № 1. С. 5–29.
12. 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.
13. Губанова Д.П., Чхетиани О.Г., Кудерина Т.М., Иорданский М.А., Максименков Л.О., Артамонова М.С. Многолетняя изменчивость состава приземного аэрозоля в опустыненных и засушливых зонах юга России // *Оптика атмосф. и океана*. 2022. Т. 35, № 6. С. 456–464; Gubanov D.P., Chkhetiani O.G., Kuderina T.M., Iordanskii M.A., Maksimenkov L.O., Artamonova M.S. Long-term variability of the composition of near-surface aerosol over desertified and arid zones in Southern Russia // *Atmos. Ocean. Opt.* 2022. V. 35, N 6. P. 680–690.
14. Петренчук О.П. Экспериментальные исследования атмосферного аэрозоля. Л.: Гидрометеоиздат, 1979. 264 с.
15. Гончарук В.В., Самсоны-Тодоров А.О., Савченко О.А., Яременко В.А., Лапченко В.А., Коваленко В.Ф. Мониторинг аэрозолей и состояния морской воды акватории Карадагского природного заповедника // *Химия и технология воды*. 2015. Т. 37, № 1. С. 10–22.
16. Гончарук В.В., Лапшин В.Б., Чичаева М.А., Матвеева И.С., Самсоны-Тодоров А.О., Таранов В.В., Сыроешкин А.В. Тяжелые металлы, алюминий и мышьяк в аэрозолях мирового океана // *Химия и технология воды*. 2012. Т. 34, № 1. С. 1–10.
17. Мальченко Ю.А., Боброва С.А., Таранов В.В., Кузнецов А.С. Экспериментальный автономный мониторинг размерных характеристик аэрозолей в прибрежных районах Крыма // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. 2013. № 27. С. 38–42.
18. Лапченко В.А., Чубарова Н.Е., Жданова Е.Ю., Розенталь В.А. Пространственное распределение приземного озона, аэрозоля и солнечной ультрафиолетовой радиации в юго-восточном Крыму // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр.* 2019. № 2. С. 33–44.
19. Milinevsky G., Danylevsky V. Atmospheric aerosol over Ukraine region: Current status of knowledge and research efforts // *Front. Environ. Sci.* 2018. V. 6, N 59. DOI: 10.3389/fenvs.2018.00059.
20. Евстафьева Е.В., Богданова А.М., Тымченко С.Л., Барановская Н.В., Юсупов Д.В., Евстафьева И.А., Макарова А.С. Оценка элементного состава волос жителей города Симферополя // *Экология человека*. 2022. Т. 29, № 6. С. 391–402. DOI: 10.17816/humeco90984.
21. Рябинин А.И., Боброва С.А., Данилова Е.А., Еркушов В.Ю., Мальченко Ю.А. Химико-радиационное состояние атмосферных выпадений и аэрозолей в регионе Севастополя в период 2008–2011 гг. // *Морской эколог. журн.* 2014. Т. 13, № 4. С. 29–39.
22. Калинин Д.В., Вареник А.В., Папкова А.С. Фосфор и кремний как маркеры переноса пыли над Черноморским регионом // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2018. Т. 15, № 3. С. 217–225. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-3-217-225.
23. Калинин Д.В., Суслин В.В. Исследование свойств аэрозолей над Черным морем во время события пылевой бури 2015 года // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2016. № 3. С. 37–43.
24. Шевченко В.П., Стародымова Д.П., Баранов В.И., Гордеев В.В. Рассеянное осадочное вещество атмосферы // *Система Черного моря / отв. ред. А.П. Лисицын*. М.: Научный мир, 2018. С. 323–335.
25. Artamonova M.S., Chkhetiani O.G., Lapchenko V.A., Iordanskii M.A., Maksimenkov L.O. Experimental studies of aerosol in South-East Crimea // *Proc. SPIE*. 2020. V. 11560. P. 1156052. DOI: 10.1117/12.2575651.
26. Драган Н.А. Почвы // *Карадаг заповедный: научно-популярные очерки / под ред. А.Л. Морозовой*. Симферополь: Н. Орианда, 2011. С. 40–43.
27. Ermolin M.S., Fedotov P.S., Karandashev V.K., Dzhenloda R.Kh., Ivaneev A.I., Burkat T.V., Burkat V.S. Fractionation, characterization, and analysis of nano- and microparticles in the estimation of the contribution of a metallurgical enterprise to the pollution of urban dust // *J. Anal. Chem.* 2020. V. 75, N 9. P. 1227–1235.
28. Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафта. М.: Астрель-2000, 1999. 610 с.
29. Добровольский В.В. Биогеохимия мировой суши // *Избр. труды. Т. III*. М.: Научный мир, 2009. 440 с.
30. Rudnick R.L., Gao S. Composition of continental crust // *Treatise on Geochemistry. V. 3. The Crust*. Amsterdam: Elsevier, 2003. P. 1–64.
31. Власов Д.В., Касимов Н.С., Кошелева Н.Е. Геохимия дорожной пыли (Восточный округ г. Москвы) // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр.* 2015. № 1. С. 23–33.
32. Губанова Д.П., Виноградова А.А., Иорданский М.А., Скороход А.И. Временные вариации состава атмосферного аэрозоля в Москве весной 2020 года // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана*. 2021. Т. 57, № 3. С. 334–348.
33. Иванов В.В. Экологическая геохимия элементов. Справочник: в 6 кн. М.: Недра, 1994. Кн. 2: Главные р-элементы. 303 с.
34. ГОСТ 17.4.4.02-84. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа.
35. NOAA Air Resources Laboratory. URL: www.arl.noaa.gov. (last access: 30.11.2022).
36. 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. Meteorol. Soc.* 2015. V. 96. P. 2059–2077. DOI: 10.1175/BAMS-D-14-00110.1.
37. Gubanov D.P., Chkhetiani O.G., Kuderina T.M., Artamonova M.S., Iordanskii M.A., Obvintsev Yu.I.

- Aerosol elemental composition in high-mountain landscape: Caucasian Mineral Waters region // *Proc. SPIE*. 2021. V. 11916. DOI: 10.1117/12.2602161.
38. *Постановление* Главного государственного санитарного врача РФ от 30.05.2003 N 114 «О введении в действие ГН 2.1.6.1338-03» (вместе с «ГН 2.1.6.1338-03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест. Гигиенические нормативы», утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 21.05.2003). Зарегистрировано в Минюсте России 11.06.2003 N 4679.
 39. *Chen Z., Gao X., Lei J.* Dust emission and transport in the Aral Sea region // *Geoderma*. V. 428. 2022. DOI: 10.1016/j.geoderma.2022.116177.
 40. *Папкова А.С., Папков С.О., Шукало Д.М.* CALIPSO стратификация атмосферного аэрозоля с экологической оценкой над Черноморским регионом // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2020. Т. 17, № 1. С. 234–242.
 41. *Калинская Д.В., Папкова А.С., Вареник А.В.* Аномальный перенос поглощающего аэрозоля над Черным морем за весенний период 2020 г. // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2021. Т. 18, № 2. С. 287–298.
 42. *Губанова Д.П., Иорданский М.А., Кудерина Т.М., Скороход А.И., Еланский Н.Ф., Минашкин В.М.* Элементный состав аэрозолей в приземном воздухе Москвы: сезонные изменения в 2019 и 2020 гг. // *Оптика атмосф. и океана*. 2021. Т. 34, № 6. С. 400–407; *Gubanova D.P., Iordanskii M.A., Kuderina T.M., Skorokhod A.I., Elansky N.F., Minashkin V.M.* Elemental composition of aerosols in the near-surface air of Moscow: Seasonal changes in 2019 and 2020 // *Atmos. Ocean. Opt.* 2021. V. 34, N. 5. P. 475–482.
 43. *Шевченко В.П., Лисицын А.П., Виноградова А.А., Смирнов В.В., Серова В.В., Штайн Р.* Аэрозоли Арктики – результаты десятилетних исследований // *Оптика атмосф. и океана*. 2000. Т. 13, № 6–7. С. 551–576.
 44. *Earth*: A global map of wind, weather, and ocean conditions. URL: <http://earth.nullschool.net> (last access: 25.07.2022).
 45. *Dewan N., Majestic B.J., Ketterer M.E., Miller-Schulze J.P., Shafer M.M., Schauer J.J., Solomon P.A., Artamonova M.S., Chen B.B., Imashev S.A., Carmichael G.R.* Stable isotopes of lead and strontium as tracers of sources of airborne particulate matter in Kyrgyzstan // *Atmos. Environ.* 2015. V. 120. P. 438–446.

M.S. Artamonova, M.A. Iordanskii, O.G. Chkhietiani, V.A. Lapchenko, L.O. Maksimenkov. Characteristics of aerosol distribution and composition in the South-East of Crimea in spring 2020.

The results of experimental studies of aerosol in the surface air layer in the southeastern part of the Crimean Peninsula at the background environmental monitoring station of the Vyazemsky Karadag scientific station from March 21 to June 17, 2020, are presented. The daily average mass concentration of aerosol for the entire measurement period ranged from 3 to 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, with an average value of 13 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. The exception was high concentrations of particles during the episode of 25–27.03.2020 (48, 195, and 49 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), when a extreme eastward transfer from sources in Kazakhstan (a dust storm on the Aral Sea) through Kalmykia to the Crimea took place. Taking into account this episode, the daily average aerosol mass concentration was 16 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Days with different directions of air mass arrival, as well as days with the highest daily mean values of aerosol mass concentration were identified out of 89 observation days. For this set (31 samples), the content of 64 chemical elements in the samples was determined. Accumulation of chemical elements in soil and in aerosol particles was estimated; clarks of chemical element concentrations in soil, aerosol concentration coefficients, and enrichment factors of chemical elements in aerosols were calculated. The dependences of the mass concentration, size distribution, and elemental composition of the surface aerosol on further aerosol migration are considered.