Аномальный перенос поглощающего аэрозоля над Чёрным морем за весенний период 2020 г.

Д. В. Калинская, А. С. Папкова, А. В. Вареник

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, 299011, Россия
E-mail: kalinskaya_d_v@mail.ru

Исследованы события пылевых переносов над Крымским полуостровом и Чёрным морем за март 2020 г. Согласно обратным семидневным траекториям, предоставляемым сетью наземных фотометров AERONET, наблюдалось 16 событий пылевого переноса: со стороны Африканского континента (Сахара) и Сирийской пустыни, а также нетипичный перенос со стороны Азии. Аномальным источником переноса минеральной пыли в регион Чёрного моря в период с 23 по 26 марта стал Капланкырский заповедник (Туркменистан). Результаты анализа пылевого переноса за этот период показали, что основные микроэлементы, входящие в состав поглощающего аэрозоля со стороны Азии, — неорганический азот и фосфор. Концентрация фосфатов за 23 марта превышала средневзвешенную величину концентрации для первой половины 2020 г. в 90 раз. За исследуемый период также были получены данные концентрации в воздухе взвешенных частиц PM_{10}, которые являются опасными загрязнителями атмосферы. По данным приложения Ventusky за 25 и 26 марта была зафиксирована аномально высокая концентрация частиц PM_{10}. Концентрации PM_{10} доходили до значений, превышающих 300 мг/м^3, что критично для здоровья человека и живой природы в частности. Направления пылевого переноса по данным Ventusky (модель SILAM) совпали с направлениями переноса частиц PM_{10}. Представлен анализ спутниковых данных MODIS для оценки пространственно-временных характеристик событий переноса, спутника CALIPSO — для определения типа переносимого аэрозоля за исследуемый период.

Ключевые слова: пылевой аэрозоль, MODIS, VIIRS, Ventusky, SILAM, AERONET, PM, CALIPSO, обратные траектории HYSPLIT, Чёрное море

Одобрена к печати: 25.02.2021
DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-287-298

Введение

Перенос и осаждение взвешенных частиц в атмосферном слое на различных высотах — важная эколого-климатическая проблема для многих регионов. Показатели загрязнения воздуха определяются изменениями выбросов промышленных предприятий, транспортной инфраструктуры, а также индивидуальными метеорологическими условиями, уникальными для каждого региона, которые также обладают значительной временной изменчивостью. Существует два направления исследований влияния пыли на климат: в первом случае рассматривают пыль как источник охлаждения Земли, поскольку она препятствует попаданию солнечного света на земную поверхность; во втором направлении исследований считается, что пыль — это источник поглощения части солнечного света, а следовательно, она является источником нагревания атмосферы (Ridgwell, 2002; Ridgwell, Watson, 2002).

При анализе антропогенных изменений климата часто пренебрегают минеральной пылью, рассматривая её как часть естественного аэрозоля. Несмотря на то, что полностью невозможно определить влияние минеральной пыли на глобальный климат, исследования по данной теме являются междисциплинарными и актуальными. Некоторые исследователи считают, что пыль может быть важным климатообразующим компонентом, особенно над определёнными океаническими областями и регионами, где её концентрации высоки (Koren et al., 2006; Kubilay et al., 2003).

В данной работе представлены результаты исследования переноса атмосферного аэрозоля со стороны Азии, а как известно, на протяжении многих лет в Китае и Казахстане проводились испытания ядерного оружия. Морская вода аккумулирует большую часть попавших во внешнюю среду микроэлементов независимо от природы их источника. Значительная доля

веществ, включая радионуклиды, находится в водорастворимых формах и поэтому быстро вовлекается в гидрологические и гидрохимические процессы, происходящие в океане или море. Поверхностный слой почвы, в том числе и на значительных расстояниях от полигонов, содержит повышенные концентрации долгоживущих техногенных радионуклидов. За десятилетия пыль неоднократно может переноситься на значительные расстояния от мест первоначального загрязнения, поэтому необходимо учитывать различные типы загрязняющих веществ, которые могли переместиться с пылевым аэрозолем в исследуемый регион. Отдельные компоненты морской среды (планктон, донные отложения) обладают высокой аккумулирующей способностью по отношению к попавшим во внешнюю среду и осаждаемым на поверхностный слой веществам (в частности, и радионуклидам), что может приводить к резким локальным повышениям уровня радиоактивности, изменению оптических свойств и прозрачности морской воды (Адушкин и др., 2016; Аникиев, Колесов, 2008; Вареник и др., 2019; Гинзбург и др., 2008; Чен и др., 2018). Все эти факторы обуславливают широкое использование результатов подобных исследований как для океанологов, так и исследователей, которые занимаются разработками средств космического, самолётного, корабельного и наземного базирования.

История исследований влияния пылевых аэрозолей на характеристики экосистем описана в работах различных авторов, однако в основном они посвящены влиянию пылевых аэрозолей для региона Средиземного моря, где данное воздействие имеет максимальную степень влияния на климатообразующие факторы. Исследования воздействия поглощающего аэрозоля на оптические характеристики атмосферы и подстилающей поверхности над Чёрным морем были начаты в начале 2000-х гг. (Suslin et al., 2007), и до сих пор данное направление актуально, так как благодаря появлению новых приборов и спутниковой информации с более высоким пространственным разрешением можно получить более точное описание различных событий и явлений, происходящих в атмосфере над исследуемым регионом.

Март 2020 г. показал аномальное количество пылевых переносов над Крымским полуостровом и Чёрным морем. Согласно обратным семидневным траекториям, предоставляемым сетью наземных фотометров AERONET, наблюдалось 16 событий пылевого переноса: со стороны Африканского континента (Сахара) и Сирийской пустыни, а также нетипичный перенос со стороны Азии. Аномальным источником переноса минеральной пыли в регион Чёрного моря в период с 23 по 26 марта стал Капланкырский заповедник (Туркменистан), который стоит на стыке южной и северной подзон пустынь Турана. Климат заповедника очень сухой (за год выпадает менее 100 мм осадков), преобладают северные и северо-восточные ветры. Характерная особенность заповедника — пылевые бури, которые чаще всего наблюдаются в весенне-летний период. Песчаные почвы расположены в основном в восточной и юго-восточной частях заповедника (Соколова, Сыроечковский, 1990).

Приборы и материалы

Для анализа пылевого переноса были получены данные спутника MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) Aqua, который оснащён атмосферным инфракрасным зондом AIRS (*англ.* Atmospheric Infrared Sounder). Зонд предоставляет данные, важные для мониторинга атмосферы Земли, которые также позволяют улучшать прогнозы погоды и способствуют пониманию изменений климата.

Для определения типа аэрозоля, находящегося в атмосфере с 23 по 26 марта 2020 г. над исследуемым регионом, были проанализированы данные со спутника CALIPSO (*англ.* Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation). Основной измерительный инструмент CALIPSO — это трёхканальный радиометр (рабочие длины волн каналов: 8,65; 10,6 и 12,05 мкм). Поскольку система является лидаром, с её помощью можно восстанавливать вертикальную структуру атмосферы.

Типы аэрозолей, используемые в CALIPSO, были идентифицированы из кластерного анализа AERONET: дым (горящая биомасса), пыль, загрязнённая пыль (смесь пыли и дыма),

загрязнённый континентальный и чистый континентальный аэрозоль (Müller et al., 2007; Omar et al., 2005, 2009). Анализ данных по кластеризации типов аэрозолей даёт шесть различных вариантов, у каждого из которых есть определённое распределение основных оптических характеристик, используемых в анализе. В этой классификации загрязнённая пыль относится к загрязнению, содержащему значительное количество поглощающих частиц. Предполагается, что пустынная пыль в основном является минеральной почвой. Дым — это дымовой аэрозоль, состоящий преимущественно из сажи и органического углерода. Загрязнённый морской аэрозоль состоит в основном из морской соли в конгломерате с различными континентальными типами загрязнителей или пылью.

За исключением чистого морского и загрязнённого континентального аэрозоля, все типы аэрозолей определяются по спутниковым данным с пространственным разрешением 80 км. Почти 80 % смогов и 60 % загрязнённого пылевого аэрозоля регистрируются над водой, в то время как пыль детектируется как на суше, так и на воде на сопоставимых частотах (Бондур и др., 2016; Кондратьев, Григорьев, 2004; Рахимов, 2014).

Для определения химического состава аэрозоля были проанализированы пробы осадков, полученные с помощью двух видов осадкосборников. С 2004 по 2016 г. на территории Черноморского гидрофизического полигона (пос. Кацивели) производился отбор проб атмосферных выпадений с использованием осадкомера Третьякова. Отобранные пробы анализировались на содержание в них биогенных элементов, в том числе неорганического фосфора и кремния, в Морском гидрофизическом институте РАН.

В 2016 г. на данной территории был установлен автоматический осадкосборник (АСО), соответствующий требованиям ВМО (Всемирная метеорологическая организация), для отбора проб атмосферных осадков и аэрозолей с целью определения их количества и последующего химического анализа в лабораторных условиях. Основной режим работы АСО — дежурный. В этом режиме собирающая осадки воронка плотно закрыта. При попадании на датчик индикатора осадков — капли воды или снежинки — крышка переместится в положение «открыто». После высыхания индикатора осадков с задержкой 2 мин крышка переместится в положение «закрыто», и устройство перейдёт в дежурный режим ожидания осадков. Задержка вводится с целью исключения нерационального перемещения крышки при особо низкой интенсивности осадков. При этом датчик индикатора осадков постоянно находится в нагретом состоянии до температуры 45–50 °C.

Как известно, одним из важных факторов, влияющих на атмосферную диффузию, является свойство загрязнения. Если выбросы содержат крупные частицы аэрозолей, то под действием силы тяжести они осаждаются вблизи источника выбросов или при наличии сильных восходящих потоков могут переноситься на значительные расстояния на большой высоте, постепенно осаждаясь по ходу движения потока (Калинская, 2012). Вещества, способные адсорбироваться на мелких частицах аэрозолей, с одной стороны, легче подвергаются химическим превращениям, а с другой — могут способствовать коагуляции или служить ядрами конденсации с более быстрым стоком их из атмосферы.

Согласно механике аэрозолей скорость коагуляции пылевых частиц пропорциональна их концентрации. Коагуляция пылевых частиц ускоряется во влажном воздухе, так как адсорбционная плёнка влаги увеличивает силы сцепления между частицами при столкновениях (Фукс, 1955).

Так как фосфор и кремний входят в состав минеральной пыли пустынь, именно эти минералы могут служить маркерами, подтверждающими наличие переноса пылевого аэрозоля в исследуемый регион (Калинская и др., 2018).

Результаты

На спутниковом изображении MODIS Aqua от 26.03.2020 хорошо видно пылевое облако, перемещающееся в сторону Черноморского региона со стороны Азии (*рис. 1*, см. с. 290).

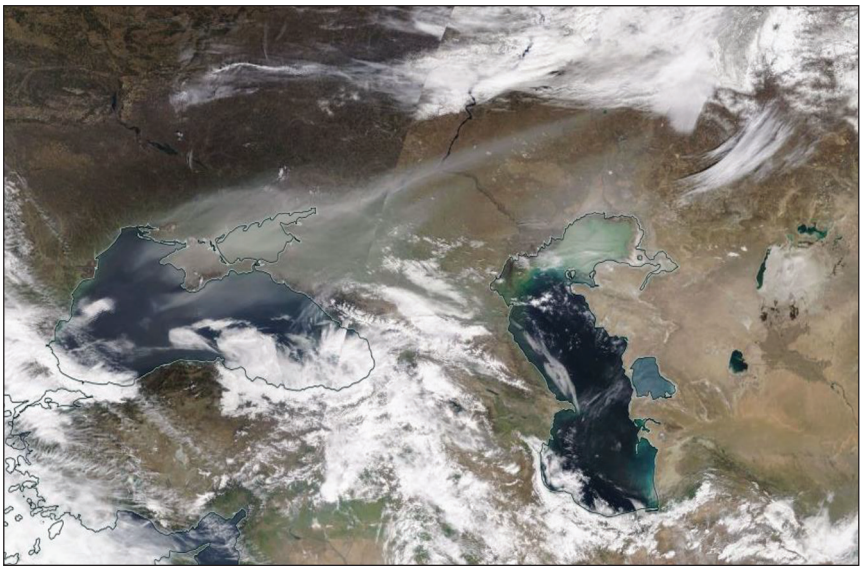

Рис. 1. Спутниковое изображение MODIS Aqua за 26.03.2020

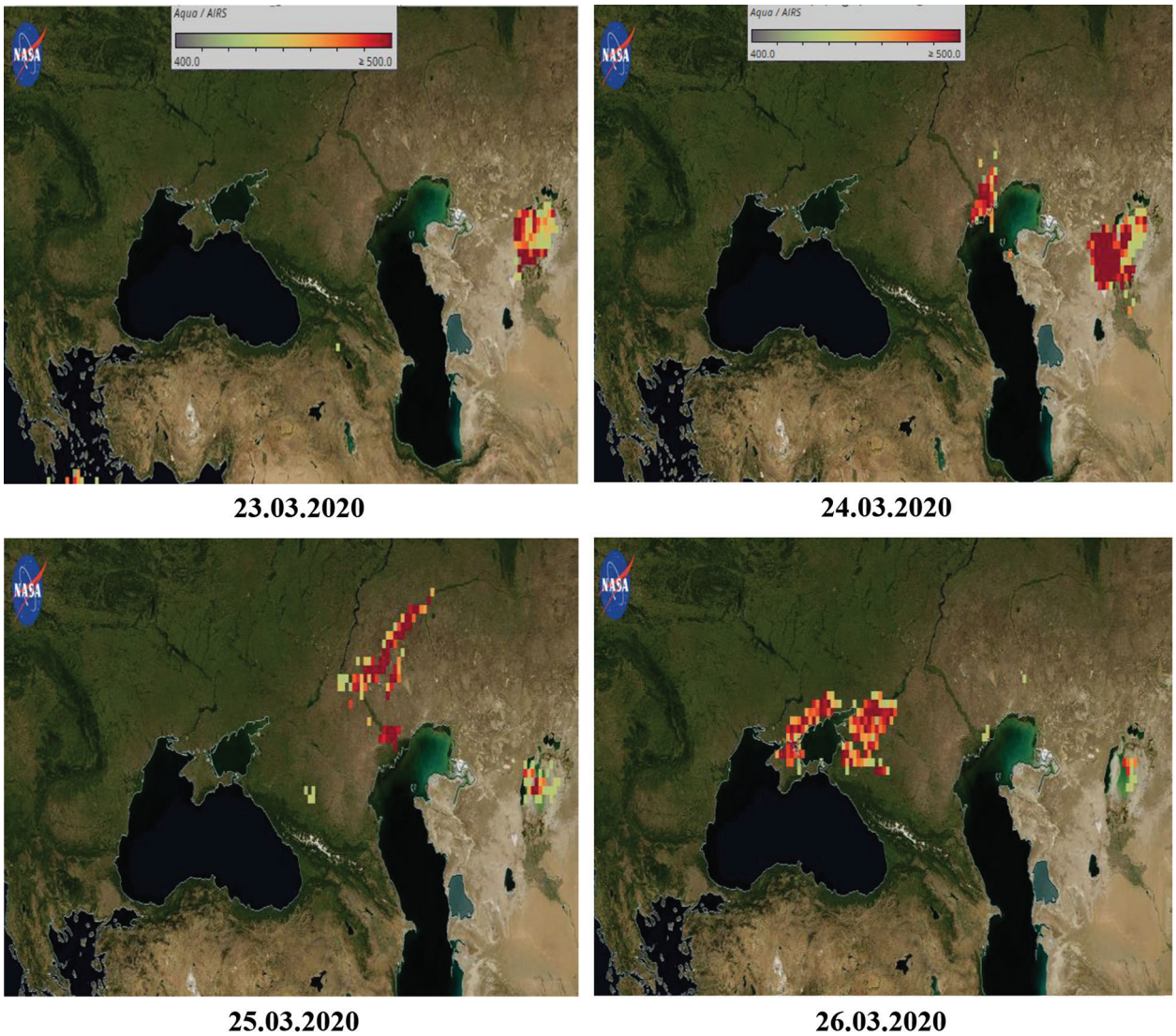

Рис. 2. Перенос пылевого аэрозоля в регион Чёрного моря за период с 23 по 26 марта 2020 г. по спутниковым данным MODIS Aqua атмосферного инфракрасного зонда AIRS

На *рис. 2* (см. с. 290) представлены спутниковые изображения MODIS Aqua зонда AIRS, экранированные от облаков, на которых видна траектория перемещения пылевого облака со стороны Азии в направлении Чёрного моря.

Анализ типизации аэрозоля по данным спутника CALIPSO показал, что за все четыре дня доминирующим типом аэрозоля над исследуемым регионом был пылевой аэрозоль, однако за 23.03.2020 (начало регистрации переноса) в атмосфере содержалось также большое количество дыма (*рис. 3*).

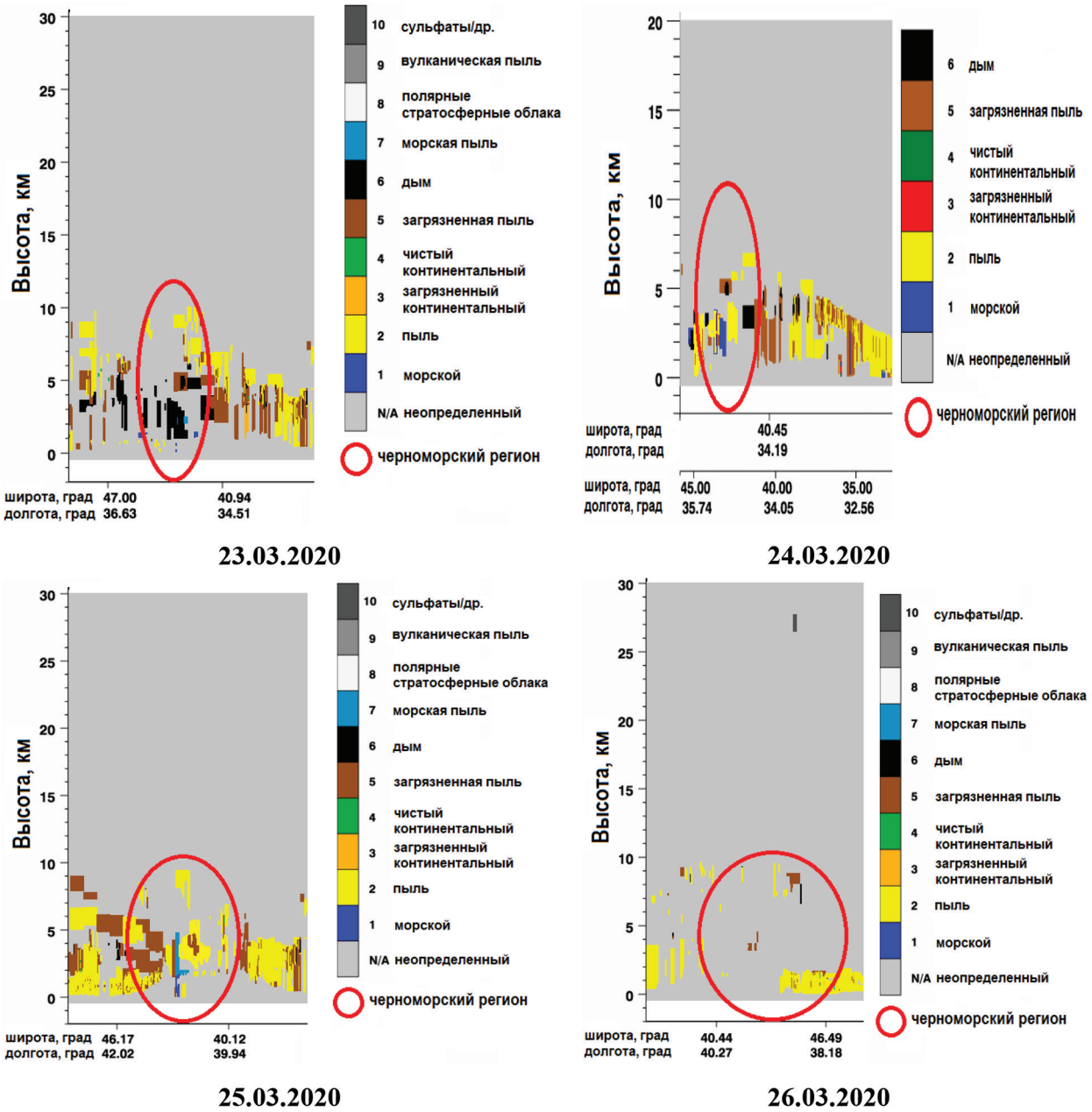

Рис. 3. Типизация атмосферного аэрозоля по спутниковым данным CALIPSO

Для подтверждения траектории переноса поглощающего аэрозоля азиатской пыли в Черноморский регион были проанализированы обратные семидневные траектории AERONET для станции Севастополя за 25.03.2020 и 26.03.2020 (*рис. 4*, см. с. 292).

Как видно на *рис. 4*, для 25 и 26 марта 2020 г. характерен перенос аэрозоля в приземных слоях атмосферы (до 1 км) с востока.

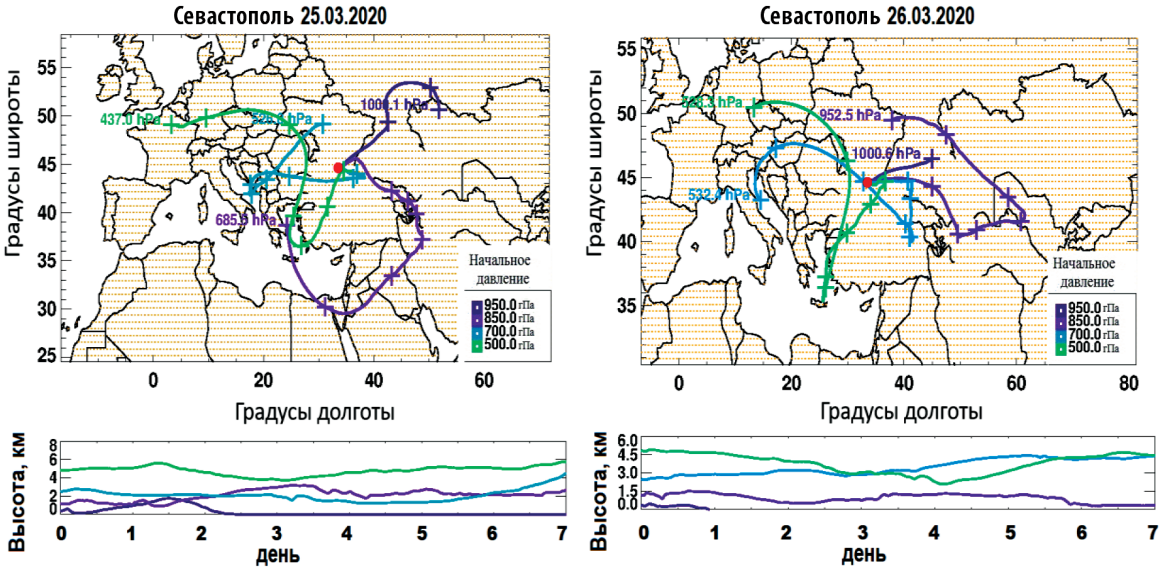

Рис. 4. Семидневные обратные траектории по данным AERONET для станции Севастополя

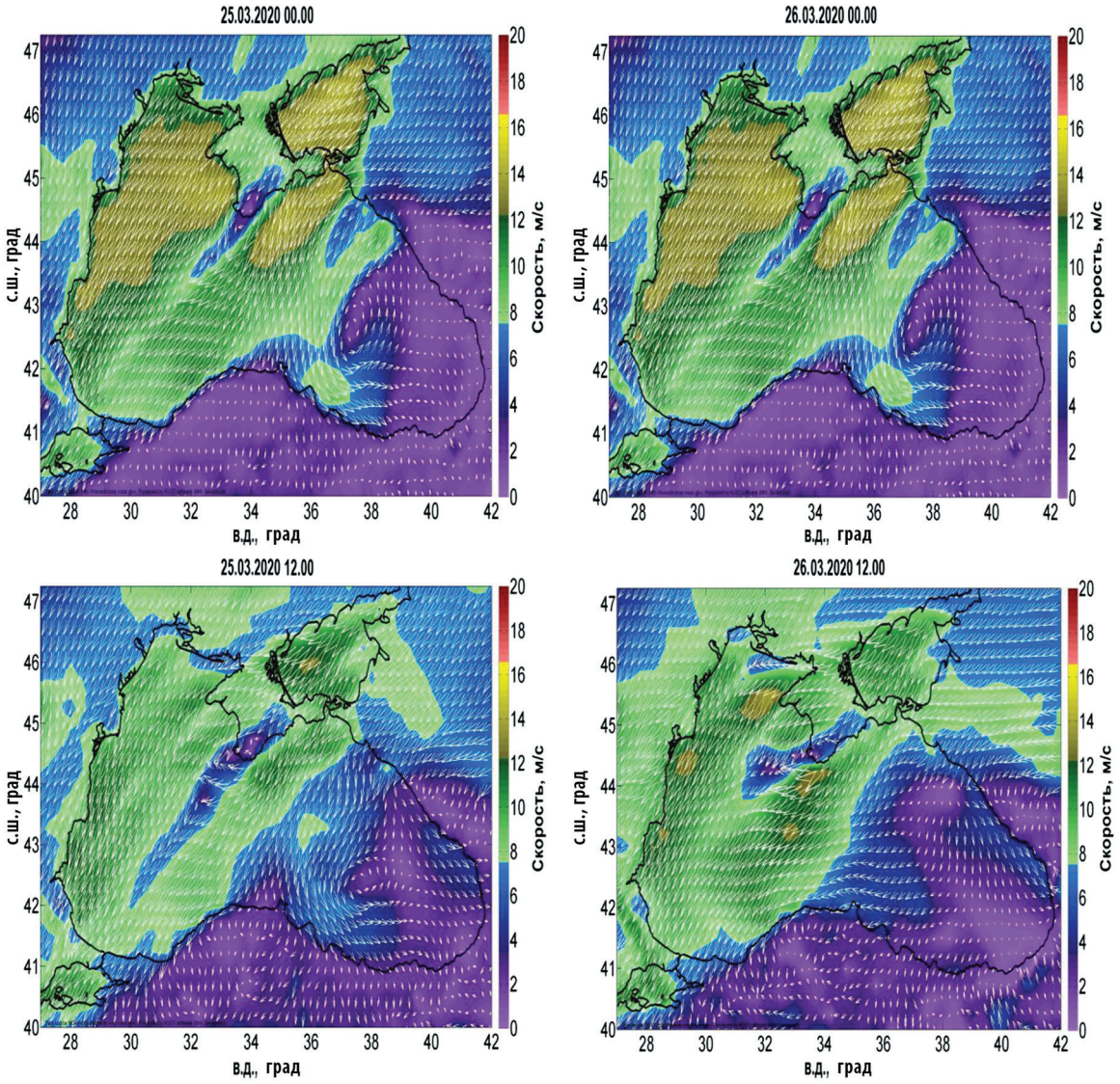

Рис. 5. Направление приземного ветра над черноморским регионом за 25–26 марта 2020 г.

Проведённый анализ скорости и направления ветра за эти же дни также показал преимущественное направление с северо-востока и востока со средними скоростями 13 м/с (*рис. 5*).

За период с 21 по 26 марта 2020 г. нет результатов измерений аэрозольной оптической толщины (АОТ) на станциях Черноморского региона, предоставляемых сетью AERONET, так как все эти дни над ним наблюдалась сплошная облачность. Спутниковые данные MODIS также не содержат измерений оптических характеристик атмосферного аэрозоля из-за условий сплошной облачности, а спутниковые данные VIIRS (*англ.* Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) за 25 и 26 марта отсутствуют для Черноморского региона в принципе.

Таким образом, возникла необходимость поиска альтернативных источников информации для анализа свойств и характеристик аномального для исследуемого региона азиатского пылевого аэрозоля.

Для определения возможного влияния азиатского пылевого аэрозоля на состояние загрязнения атмосферного воздуха в Севастополе был проведён анализ проб атмосферных осадков, отобранных за исследуемый период на метеостанции города. В пробах, отобранных в два типа осадкосборника: закрытый, открывающийся только с началом выпадения осадков, и постоянно открытый — было определено содержание неорганического азота, фосфатов и кремнекислоты. В результате анализа концентраций химических элементов и веществ в пробах осадков, полученных из открытого осадкосборника, было выявлено повышенное содержание неорганического азота и фосфора за 23 марта 2020 г. При этом концентрация фосфатов составила 3,34 мкмоль/л и превышала средневзвешенную величину для первой половины 2020 г. (0,37 мкмоль/л) в 90 раз. Концентрация неорганического азота в осадках (380,16 мкмоль/л) превысила средневзвешенную величину для этого же периода в три раза, что может быть обусловлено содержанием дыма или мелкодисперсной пыли в воздухе за исследуемый период. Концентрация кремнекислоты в пробах атмосферных осадков в этот день соответствовала величине средневзвешенной концентрации для первой половины 2020 г.

Также был проведён анализ физических и химических характеристик смеси взвешенных атмосферных частиц PM (*англ.* particulatematter), которые меняются в зависимости от местонахождения (Голохваст и др., 2012). Частицы PM являются распространённым загрязнителем атмосферы. К наиболее часто встречающимся химическим компонентам PM относятся сульфаты, нитраты, аммиак, другие неорганические ионы, такие как ионы натрия, калия, кальция, магния и хлорид-ионы, органический и элементарный углерод, минералы земной коры, связанная частицами вода, металлы и полициклические ароматические углеводороды.

В составе PM также встречаются биологические компоненты, такие как аллергены и микроорганизмы. Микрочастицы могут иметь как природное происхождение (пылевой перенос, эрозия почвы), так и антропогенное (сажа, пыль, микрофрагменты асфальта и резины, минеральных солей, сульфаты, нитраты, соединения тяжёлых металлов) (Зверев, 1977; Калаева и др., 2016; Лисицын, 1978; Симонова, Антонюк, 2015; Brines et al., 2015; Vu et al., 2015).

Частицы PM диаметром от 0,1 до 1 мкм могут находиться в атмосферном воздухе в течение многих дней и недель и, соответственно, подвергаться трансграничному переносу на большие расстояния.

Особое внимание необходимо уделять концентрации переносимых в воздухе веществ с размерами частиц меньше 2,5 мкм ($PM_{2,5}$) и 10 мкм (PM_{10}). Анализ концентрации частиц PM_{10} был проведён по данным приложения Ventusky (https://www.ventusky.com). Основные поставщики метеорологических данных для этого приложения — DWD (*нем.* Deutscher Wetterdienst — Метеорологическая служба Германии) и NOAA (*англ.* National Oceanic and Atmospheric Administration — Национальное управление океанических и атмосферных исследований, США).

Загрязнение атмосферы взвешенными частицами PM в приложении Ventusky рассчитывается по модели SILAM (*англ.* System for Integrated modeLling of Atmospheric coMposition). Компьютерный пакет программ SILAM (http://silam.fmi.fi) широко используется для исследования влияния лесных пожаров, извержений вулканов, пылевых переносов, а также иных природных и техногенных катастроф на загрязнение атмосферы. Расчётная схема основана

на модели Лагранжа – Эйлера, которая описана в работе (Белихов и др., 2013). Система компьютерного моделирования распространения атмосферных примесей SILAM, разработанная Финским метеорологическим институтом (*англ.* Finnish Meteorological Institute), представляет собой современный мощный инструмент моделирования распространения в атмосфере аэрозолей, газовых примесей, пыли, радионуклидов и природных аллергенов. Дисперсность аэрозольных частиц может варьировать в широких диапазонах. Природные аномалии сильно влияют на углеродный цикл земной биосферы и представляют собой значительный источник выбросов в атмосферу фосфатов, силикатов, оксидов азота, летучих органических веществ, оксидов углерода, оксида серы и метана. Система SILAM позволяет моделировать распространение значительного количества химических веществ и их смесей с различными типами взаимодействий между ними.

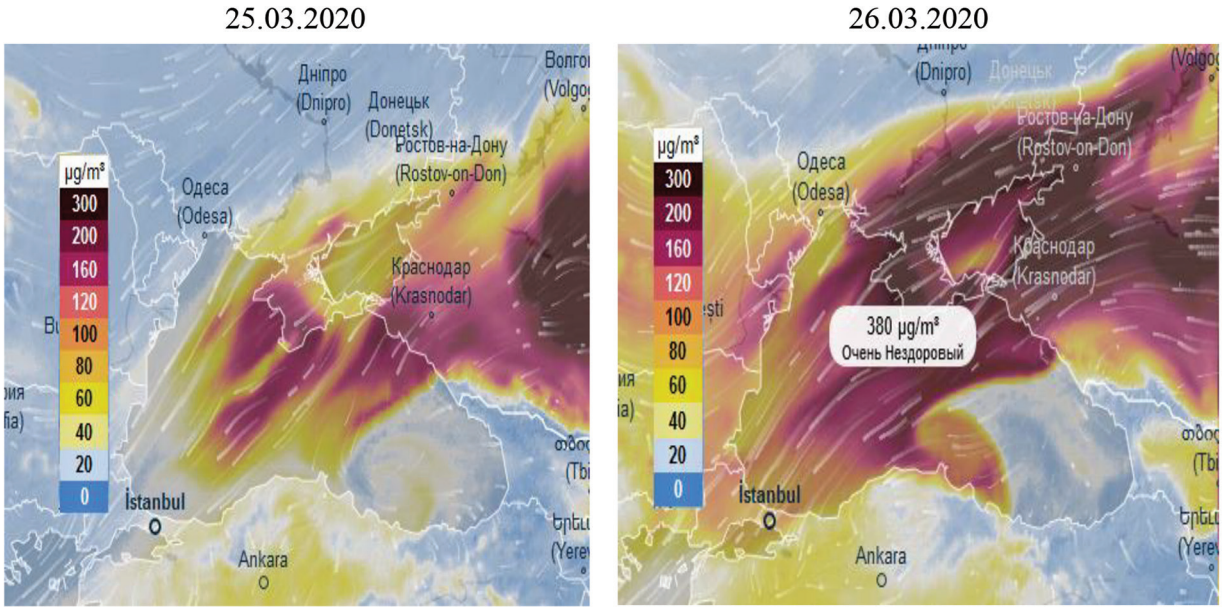

Рис. 6. Концентрация частиц PM_{10} за 25 и 26 марта 2020 г. по данным приложения Ventusky

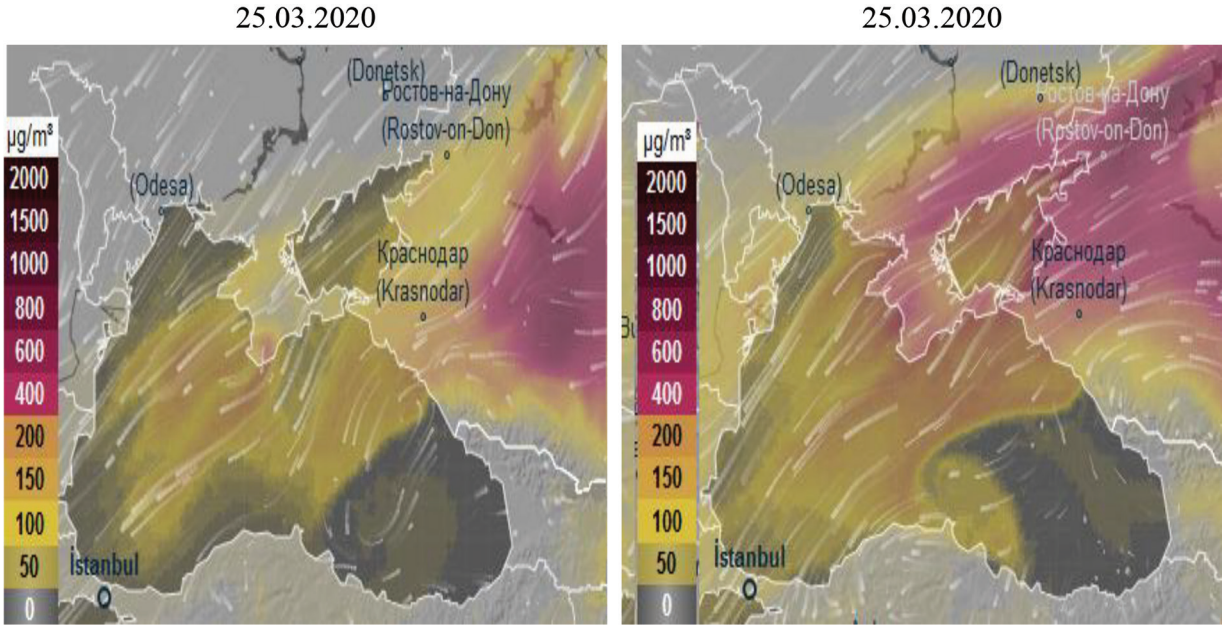

Рис. 7. Концентрация частиц пыли за 25 и 26 марта 2020 г.
по данным приложения Ventusky (модель SILAM)

По данным Ventusky за 25 и 26 марта была зафиксирована аномально высокая концентрация частиц PM_{10}. Она доходили до значений, превышающих 300 мг/м^3, что становится критичным для здоровья человека и живой природы в частности (*рис. 6*).

Также по данным модели SILAM были получены значения концентрации пыли за 25–26 марта над Черноморским регионом. Направление и интенсивность переноса взвешенных частиц PM_{10} совпадает с направлением переноса азиатской пыли в исследуемый регион (*рис. 7*).

Заключение

В результате обработки спутниковых данных для региона Чёрного моря и проб атмосферных осадков, отобранных за весенний период на метеостанции Севастополя, был выявлен период пылевого переноса, аномального для Черноморского региона. Проведённый анализ пылевого переноса за период 23–26 марта 2020 г. показал, что основными микроэлементами, входящими в состав поглощающего аэрозоля со стороны Азии, являются неорганический азот и фосфор. Концентрация фосфатов за 23 марта составила 3,34 мкмоль/л и превышала средневзвешенную величину концентрации для первой половины 2020 г. в 90 раз.

За исследуемый период также были получены данные концентрации в воздухе взвешенных частиц PM_{10}, которые являются опасными загрязнителями атмосферы. Направления пылевого переноса по данным Ventusky (модель SILAM) совпали с направлениями переноса частиц PM_{10}. Концентрация PM_{10} за 26 марта 2020 г. доходила до значений, превышающих 300 мг/м^3, что является критичным для здоровья человека и всей живой природы в частности. Так как отдельные компоненты морской среды (планктон, донные отложения) обладают высокой аккумулирующей способностью по отношению к попавшим во внешнюю среду и осаждаемым на поверхностный слой веществам, это может приводить к резким локальным повышениям уровня радиоактивности, изменению оптических свойств и прозрачности морской воды. Все эти факторы обуславливают широкое использование результатов исследований как для океанологов, так и исследователей, которые занимаются разработками средств космического, самолётного, корабельного и наземного базирования.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований 19-05-50023 и темы госзадания № 0827-2019-0002. Авторы благодарят С. М. Сакерина и Д. М. Кабанова за предоставленный фотометр SPM и программное обеспечение к нему.

Литература

1. *Адушкин В. В.*, *Чен Б. Б.*, *Попель С. И.*, *Вайдлер П. Г.*, *Фридрих Ф.*, *Извекова Ю. Н.* Свойства и происхождение мелкомасштабных частиц в атмосфере Центральной Азии // Докл. Акад. наук. 2016. Т. 446. № 5. С. 592–597.
2. *Аникиев В. В.*, *Колесов Г. М.* Природные факторы, определяющие временную изменчивость основного химического состава минеральных аэрозолей над северным Каспием // Геохимия. 2008. № 12. С. 1304–1321.
3. *Белихов А. Б.*, *Леготин Д. Л.*, *Сухов А. К.* Современные компьютерные модели распространения загрязняющих веществ в атмосфере // Вестн. Костромского гос. ун-та им. Н. А. Некрасова. 2013. Т. 19. С. 14–20.
4. *Бондур В. Г.*, *Гордо К. А.*, *Кладов В. Л.* Пространственно-временные распределения площадей природных пожаров и эмиссий углеродсодержащих газов и аэрозолей на территории Северной Евразии по данным космического мониторинга // Исслед. Земли из космоса. 2016. № 6. С. 3–20.
5. *Вареник А. В.*, *Калинская Д. В.*, *Мыслина М. А.*, *Хоружий Д. С.* Изменение содержания биогенных элементов в поверхностном слое морской воды после выпадения атмосферных осадков // Всероссийская науч. конф. «Моря России: фундаментальные и прикладные исследования»: тез. докл. 2019. С. 51–52.
6. *Гинзбург А. С.*, *Губанова Д. П.*, *Минашкин В. М.* Влияние естественных и антропогенных аэрозолей на глобальный и региональный климат // Российский химич. журн. 2008. Т. 52. № 5. С. 112–119.

7. *Голохваст Е. А. Алейникова Е. А.*, *Никифоров П. А.*, *Гульков А. Н.*, *Христофорова Н. К.* Гранулометрический анализ взвешенных микрочастиц в атмосферных осадках г. Хабаровска // Вода: химия и экология. 2012. № 6. С. 117–122.
8. *Зверев А.* С. Синоптическая метеорология. Л.: Гидрометеоиздат, 1977. 711 с.
9. *Калаева С. З.*, *Муратова К. М.*, *Чистяков Я. В.*, *Чеботарев П. В.* Влияние мелкодисперсной пыли на биосферу и человека // Изв. Тульского гос. ун-та. Науки о Земле. 2016. Т. 3. С. 40–63.
10. *Калинская Д. В.* Исследование особенностей оптических характеристик пылевого аэрозоля над Черным морем // Екологічна безпека прибережної та шельфової зон та комплексне використання ресурсів шельфу. 2012. Т. 26. № 2. С. 151–162.
11. *Калинская Д. В.*, *Вареник А. В.*, *Папкова А. С.* Фосфор и кремний как маркеры переноса пылевого аэрозоля 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.
12. *Кондратьев К. Я.*, *Григорьев А. А.* Лесные пожары как компонент природной экодинамики // Оптика атмосферы и океана. 2004. Т. 17. № 4. С. 279–292.
13. *Лисицын А. П.* Процессы океанской седиментации. Литология и геохимия. М.: Наука, 1978. 392 с.
14. *Рахимов Р. Ф.*, *Козлов В. С.*, *Панченко М. В.*, *Тумаков А. Г.*, *Шмаргунов В. П.* Свойства атмосферного аэрозоля в дымовых шлейфах лесных пожаров по данным спектронефелометрических измерений // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 02. С. 126–133.
15. *Симонова И. Н.*, *Антонюк М. В.* Роль техногенного загрязнения воздушной среды в развитии бронхолегочной патологии // Здоровье. Медицинская экология. Наука. 2015. Т. 1. № 59. С. 14–20.
16. *Соколова В. Е.*, *Сыроечковский Е. Е.* Заповедники Средней Азии и Казахстана. М.: Мысль, 1990. 399 с.
17. *Фукс Н. А.* Механика аэрозолей. М.: Москва, 1955. 181 с.
18. *Чен Б. Б.*, *Попель С. И.*, *Адушкин В. В.*, *Стрижанцева О. М.*, *Голоуб Ф.*, *Вайдлер П. Г.* Слои мелкомасштабных частиц аэрозоля и перенос радиации в атмосфере региона. Ч. 2. Влияние слоев на перенос радиации и их вклад в региональные климатические изменения // Вестн. Кыргызско-Российского Славянского ун-та. 2018. Т. 18. № 12. С. 174–183.
19. *Brines M.*, *Dall'Osto M.*, *Beddows D. C.S.*, *Harrison R. M.*, *Gómez-Moreno F.*, *Núñez L.*, *Artíñano B.*, *Costabile F.*, *Gobbi G. P.*, *Salimi F.*, *Morawska L.*, *Sioutas C.*, *Querol X.* Traffic and nucleation events as main sources of ultrafine particles in high-insolation developed world cities // Atmospheric Chemistry and Physics. 2015. V. 15. No. 10. P. 5929–5945. DOI: doi.org/10.5194/acp-15-5929-2015.
20. *Koren I.*, *Kaufman Y. I.*, *Washington R.*, *Todd M. C.*, *Rudich Y.*, *Martins J. V.*, *Rosenfeld D.* The Bodélé depression: a single spot in the Sahara that provides most of the mineral dust to the Amazon forest // Environmental Research Letters / Institute of Physics and IOP Publishing Limited. 2006. V. 1. No. 1. Art. No. 014005. 5 p. DOI: 10.1088/1748-9326/1/1/014005.
21. *Kubilay N.*, *Cokacar T.*, *Oguz T.* Optical properties of mineral dust outbreaks over the northeastern Mediterranean // J. Geophysical Research Atmospheres. 2003. V. 108. No. D21. Art. No. 4666. DOI: 10.1029/2003JD003798.
22. *Müller D.*, *Ansmann A.*, *Mattis I.*, *Tesche M.*, *Wandinger U.*, *Althausen D.*, *Pisani G.* Aerosol-type-dependent lidar ratios observed with Raman lidar // J. Geophysical Research. 2007. V. 112. No. D16. Art. No. D16202. DOI: 10.1029/2006JD008292.
23. *Omar A. H.*, *Won J.-G.*, *Winker D. M.*, *Yoon S.-C.*, *Dubovik O.*, *McCormick M. P.* Development of global aerosol models using cluster analysis of Aerosol Robotic Network (AERONET) measurements // J. Geophysical Research. 2005. V. 110. No. D10. Art. No. D10S14. DOI: 10.1029/2004JD004874.
24. *Omar A. H.*, *Winker D.M*, *Vaughan M. A.*, *Hu Y.*, *Trepte C. R.*, *Ferrare R. A.*, *Lee K.*, *Hostetler C. A.*, *Kittaka C.*, *Rogers R. R.*, *Kuehn R. E.*, *Liu Z.* The CALIPSO Automated Aerosol Classification and Lidar Ratio Selection Algorithm // J. Atmospheric Oceanic Technology. 2009. V. 26. P. 1994–2014. DOI: 10.1175/2009JTECHA1231.1
25. *Ridgwell A.* Dust in the Earth system: the biogeochemical linking of land, air and sea // Philosophical Trans. Royal Society. 2002. V. 360. No. 1801. P. 2905–2924.
26. *Ridgwell A.*, *Watson A.* Feedback between aeolian dust, climate, and atmospheric CO2 in glacial time // Paleoceanography. 2002. V. 17. No. 4. Art. No. 1059. 14 p. DOI: 10.1029/2001PA000729.
27. *Suslin V. V.*, *Suetin V. S.*, *Korolev S. N.*, *Kucheryaviy A. A.* Desert dust effects in the results of atmospheric correction of satellite sea color observations // Current Problems in Optics of Natural Waters: Proc. 4th Intern. Conf. Nizhny Novgorod, 11–15 Sept. 2007. Nizhny Novgorod, 2007. P. 184–187.
28. *Vu T. V.*, *Delgado-Saborit J. M.*, *Harrison R. M.* Review: Particle number size distributions from seven major sources and implications for source apportionment studies // Atmospheric Environment. 2015. V. 122. P. 114–132. URL: https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.09.027.

The case of absorbing aerosol anomalous transport over the Black Sea in the spring of 2020

D. V. Kalinskaya, A. S. Papkova, A. V. Varenik

Marine Hydrophysical Institute RAS, Sevastopol 299011, Russia
E-mail: kalinskaya_d_v@mail.ru

Dust transport events over the Crimean Peninsula and the Black Sea in March 2020 are presented. According to the seven-day backward trajectories provided by the network of ground-based photometers AERONET the 16 dust transport events were observed: from the African continent (Sahara) and the Syrian Desert, as well as an atypical transport from Asia. The Kaplankyr Reserve (Turkmenistan) became an anomalous source of mineral dust transport to the Black Sea region since March 23 to March 26. The dust transport analysis results during this period showed that the main microelements of the absorbing aerosol from Asia are inorganic nitrogen and phosphorus. The phosphate concentration for March 23 exceeded the weighted average concentration for the first half of 2020 by 90 times. During the study period, also data were obtained on the concentration of PM_{10} suspended particles, which are hazardous air pollutants. The Ventusky service (https://www.ventusky.com) reported abnormally high concentrations of PM_{10} particles on March 25 and 26. The PM_{10} concentration values exceeded 300 mg/m^3, what is critical for human health and wildlife in particular. According to Ventusky (SILAM model), the directions of dust transport coincided with the directions of PM_{10} transport. In this paper, an analysis of MODIS satellite data is presented to assess the spatio-temporal characteristics of transport events and the CALIPSO satellite data to determine the type of transported aerosol during the study period.

Keywords: dust aerosol, MODIS, VIIRS, Ventusky, SILAM, AERONET, PM, CALIPSO, HYSPLIT backward trajectories, Black Sea

Accepted: 25.02.2021
DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-287-298

References

1. Adushkin V. V., Chen B. B., Popel S. I., Izvekova Y. N., Weidler P. G., Friedrich F., Properties and origin of small particles in the atmosphere of Central Asia, *Doklady Earth Sciences*, 2016, Vol. 466, No. 5, pp. 177–182.
2. Anikiev V. V., Kolesov G. M., Natural factors controlling the temporal variability of the major-element chemical composition of mineral aerosols over the northern Caspian, *Geochemistry Intern.*, 2008, No. 12, pp. 1228–1244.
3. Belikhov A. B., Legotin D. L., Sukhov A. K., Modern computer models of the pollutants spread in the atmosphere, *Vestnik Kostromskogo gosudarstvennogo universiteta im. N. A. Nekrasova*, 2013, Vol. 19, pp. 14–20 (in Russian).
4. Bondur V. G., Gordo K. A., Kladov V. L., Spatial and temporal distributions of natural fires areas and emissions of carbon-containing gases and aerosols on the territory of Northern Eurasia according to space monitoring data, *Issledovaniye Zemli iz kosmosa*, 2016, No. 6, pp. 3–20 (in Russian).
5. Varenik A. V., Kalinskaya D. V., Myslina M. A., Khoruzhii D. S., Izmenenie soderzhaniya biogennykh elementov v poverkhnostnom sloe morskoi vody posle vypadeniya atmosfernykh osadkov (Changes in the content of biogenic elements in the surface layer of seawater after precipitation), *Morya Rossii: fundamental'nye i prikladnye issledovaniya* (Seas of Russia: fundamental and applied research), Book of abstr., 2019, pp. 51–52 (in Russian).
6. Ginzburg A. S., Gubanova D. P., Minashkin V. M., Influence of natural and anthropogenic aerosols on the global and regional climate, *Rossiiskii khimicheskii zhurnal*, 2008, Vol. 52, No. 5, pp. 112–119 (in Russian).
7. Golokhvast K. S., Aleinikova E. A., Nikiforov P. A., Gulkov A. N., Khristoforova N. K., Size analysis of suspended micro particles in rainfalls of Khabarovsk city, *Voda: khimiya i ekologiya*, 2012, No. 6, pp. 117–122 (in Russian).
8. Zverev A. S., *Sinopticheskaya meteorologiya* (Synoptic meteorology), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1977, 711 p. (in Russian).

9. Kalaeva S. Z., Muratova K. M., Chistyakov Ya.V., Chebotarev P. V., Influence of fine dust on the biosphere and humans, *Izvestiya Tulskogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*, 2016, Vol. 3, pp. 40–63 (in Russian).
10. Kalinskaya D. V., Research of the dust aerosol optical characteristics features over the Black Sea, *Yekologíchna bezpeka priberezhnoĭ ta shel'fovoĭ zon ta kompleksne vikoristannya resursív shel'fu*, 2012, Vol. 26(2), pp. 151–162 (in Russian).
11. Kalinskaya D. V., Varenik A. V., Papkova A. S., Phosphorus and silicon as markers of dust aerosol transport over the Black Sea region, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 3, pp. 217–225, DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-3-217-225 (in Russian).
12. Kondratyev K.Ya., Grigor'ev Al.A., Forest fires as a component of natural ecodynamics, *Optika atmosfery i okeana*, 2004, Vol. 17, No. 4, pp. 279–292 (in Russian).
13. Lisitsyn A. P., *Protsessy okeanskoi sedimentatsii. Litologiya i geokhimiya* (Ocean sedimentation processes. Lithology and geochemistry), Moscow: Nauka, 1978, 392 p. (in Russian).
14. Rakhimov R. F., Kozlov V. S., Panchenko M. V., Tumakov A. G., Shmargunov V. P., Properties of atmospheric aerosol in the plumes of forest fires according to the spectronephelometric measurements, *Optika atmosfery i okeana*, 2014, Vol. 27, No. 2, pp. 126–133 (in Russian).
15. Simonova I. N., Antonyuk M. V., Role of industrial air pollution in growth of bronchopulmonary pathology, *Zdorov'e. Meditsinskaya ekologiya. Nauka*, 2015, No. 1(59), pp. 14–20 (in Russian).
16. Sokolova V. E., Syroechkovsky E. E., *Zapovedniki Sredney Azii i Kazakhstana* (Reserves of Central Asia and Kazakhstan), Moscow: Mysl', 1990, 399 p. (in Russian).
17. Fuks N. A., *Mekhanika aerozolei* (Mechanics of aerosols), Moscow: Moskva, 1955, 181 p. (in Russian).
18. Chen B. B., Popel S. I., Adushkin V. V., Strigantseva O. M., Goloub Ph., Weidler P. G., Layers of small-scale particles of aerosol and radiation transfer in the atmosphere of the region. Part 2. The Influence of layers on radiation transfer and their contribution to regional climatic changes, *Vestnik Kyrgyzsko-Rossiiskogo Slavyanskogo universiteta*, 2018, Vol. 18, No. 12, pp. 174–183 (in Russian).
19. Brines M., Dall'Osto M., Beddows D. C.S., Harrison R. M., Gómez-Moreno F., Núñez L., Artíñano B., Costabile F., Gobbi G. P., Salimi F., Morawska L., Sioutas C., Querol X., Traffic and nucleation events as main sources of ultrafine particles in high-insolation developed world cities, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, Vol. 15, No. 10, pp. 5929–5945, DOI: doi.org/10.5194/acp-15-5929-2015.
20. Koren I., Kaufman Y. I., Washington R., Todd M. C., Rudich Y., Martins J. V., Rosenfeld D., The Bodélé depression: a single spot in the Sahara that provides most of the mineral dust to the Amazon forest, *Environmental Research Letters*, Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2006, Vol. 1, No. 1, Art. No. 014005, 5 p., DOI: 10.1088/1748-9326/1/1/014005.
21. Kubilay N., Cokacar T., Oguz T., Optical properties of mineral dust outbreaks over the northeastern Mediterranean, *J. Geophysical Research*, 2003, Vol. 108, No. D21, Art. No. 4666, DOI: 10.1029/2003JD003798.
22. Müller D., Ansmann A., Mattis I., Tesche M., Wandinger U., Althausen D., Pisani G., Aerosol-type-dependent lidar ratios observed with Raman lidar, *J. Geophysical Research*, 2007, Vol. 112, No. D16, Art. No. D16202, DOI: 10.1029/2006JD008292.
23. Omar A. H., Won J. G., Winker D. M., Yoon S. C., Dubovik O., McCormick M. P., Development of global aerosol models using cluster analysis of Aerosol Robotic Network (AERONET) measurements, *J. Geophysical Research*, 2005, Vol. 110, No. D10, Art. No. D10S14, DOI: 10.1029/2004JD004874.
24. Omar A. H., Winker D.M, Vaughan M. A., Hu Y., Trepte C. R., Ferrare R. A., Lee K., Hostetler C. A., Kittaka C., Rogers R. R., Kuehn R. E., Liu Z., The CALIPSO Automated Aerosol Classification and Lidar Ratio Selection Algorithm, *J. Atmospheric Oceanic Technology*, 2009, Vol. 26, pp. 1994–2014, DOI: 10.1175/2009JTECHA1231.1.
25. Ridgwell A., Dust in the Earth system: the biogeochemical linking of land, air and sea, *Philosophical Trans. Royal Society*, 2002, Vol. 360, No. 1801, pp. 2905–2924.
26. Ridgwell A., Watson A., Feedback between aeolian dust, climate, and atmospheric CO2 in glacial time, *Paleoceanography*, 2002, Vol. 17, No. 4, Art. No. 1059, 14 p., DOI: 10.1029/2001PA000729.
27. Suslin V. V., Suetin V. S., Korolev S. N., Kucheryaviy A. A., Desert dust effects in the results of atmospheric correction of satellite sea color observations, *Current Problems in Optics of Natural Waters*, Proc. 4th Intern. Conf., Nizhny Novgorod, 11–15 Sept. 2007, Nizhny Novgorod, 2007, pp. 184–187.
28. Vu T. V., Delgado-Saborit J. M., Harrison R. M., Review: Particle number size distributions from seven major sources and implications for source apportionment studies, *Atmospheric Environment*, 2015, Vol. 122, pp. 114–132, available at: https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.09.027.