

УДК 551.46.5

© Д. В. Калининская, В. В. Суслин

Морской гидрофизический институт, Севастополь
kalinskaya_d_v@mail.ru

ПРОСТОЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ ПРИЗЕМНОГО АЭРОЗОЛЯ НА ОСНОВЕ РЕЗУЛЬТАТОВ АНАЛИЗА ОБРАТНЫХ ТРАЕКТОРИЙ

Изложен простой метод пространственно-временной локализации источников приземного аэрозоля, основанный на анализе обратных траекторий. Ключевым параметром метода является производная давления по времени (P'_t). Положительная величина P'_t соответствует восходящим воздушным потокам, отрицательная — нисходящим. Критерием источника аэрозоля, образовавшегося в определенном месте у поверхности Земли, считалась ситуация, когда одновременно были выполнены два условия. Первое — воздушная масса находится в приземном слое (ниже 700 мбар). Второе — $P'_t > 20$ мбар/ч эквивалентно восходящему потоку со скоростью несколько см/с и более. Последнее соответствует мезомасштабным вертикальным движениям одного знака объемов воздуха с горизонтальными размерами порядка 10–100 км. Оценка 20 мбар/ч взята исходя из анализа всего многолетнего массива (2007–2012 гг.) результатов анализа обратных траекторий для севастопольской станции AERONET. Мы также попытались учесть процесс «удаление аэрозоля с осадками». Критерием такого нисходящего воздушного потока является одно условие $P'_t < -20$ мбар/ч. Если это условие выполнялось, то считалось, что атмосферный слой уже не содержит аэрозоль, захваченный ранее восходящими потоками с поверхности Земли. Валидация метода проведена по данным севастопольской станции сети AERONET и спутникового оптического сканера MODIS. На примере пылевого аэрозоля из двух аридных районов было показано наличие связи между районом зарождения аэрозоля и специфическими оптическими характеристиками аэрозоля, наблюдаемыми на севастопольской станции сети AERONET, и особенностью его влияния на результаты стандартной атмосферной коррекции спутниковых измерений, выполненных оптическим сканером MODIS. Результаты работы представляют интерес для специалистов, решающих задачи атмосферной коррекции измерений восходящей яркости на верхней границе атмосферы в видимом диапазоне спектра над водной поверхностью.

Ключевые слова: метод, приземный источник аэрозоля, AERONET, Черное море.

D. V. Kalinskaya, V. V. Suslin

Marine Hydrophysical Institute, Sevastopol
kalinskaya_d_v@mail.ru

SIMPLE METHOD OF DETERMINATION OF GROUND-BASED AEROSOL SOURCES USING BACK TRAJECTORY ANALYSIS RESULTS

A simple method of spatio-temporal localization of the ground-based aerosol sources, using the results of back trajectory analysis (BTA), is described in the paper. The key parameter of the method is the derivative of pressure by time (P'_t). A positive value corresponds to an upward air flow, negative one corresponds to a downward air flow. Two conditions are needed to satisfy in order to identify the ground source of aerosols in a specific location of the Earth: air mass is in the surface layer (below 700 mbar); $P'_t > 20$ mbar/hour, that is equivalent to an upstream flow with a velocity of several cm/s or more. Latter condition corresponds to the mesoscale vertical movements of the same signs of the air volumes with the horizontal dimensions of the order of 10–100 km. The value of 20 mbar/h is based on the analysis of the long-term (2007–2012) array of data of BTA for AERONET station Sevastopol. We also tried to take into account the process of «aerosol removing with precipitation». The criterion for a downward air flow is: $P'_t < -20$ mbar/h. If this condition is satisfied, it means that the atmospheric layer does not contain aerosol captured earlier by upstream flows from Earth's

surface. Method validation was carried out using data of Sevastopol station (network AERONET) and satellite optical scanner MODIS. The relation between the area of origin and specific aerosol optical properties was observed at Sevastopol station (network AERONET). The features of its impact on the results of the standard atmospheric correction of MODIS measurements have been shown on the example of dust aerosol from two arid zones. The results of this study will be useful to specialists, solving the problem of atmospheric correction of measurements of upward radiance on top of the atmosphere in visible range of spectrum above the water surface.

Key words: method, ground-based aerosol source, AERONET, Black Sea.

Оптические характеристики аэрозоля востребованы в ряде важных прикладных задач. Химический и физический состав частиц, из которых состоит аэрозоль, определяет видимость в горизонтальном направлении, которая является одним из основных навигационных параметров [1]. Кроме того, аэрозоль можно рассматривать в качестве внешнего источника неорганических и органических соединений [2], которые по-разному могут влиять на морскую экосистему. Пример такого влияния описан в работе [3], в которой обнаружена связь между выпадением минеральных частиц из атмосферы на поверхность океана и первичной продукцией, производимой фитопланктоном в процессе фотосинтеза. Оптические свойства аэрозоля лежат в основе так называемых таблиц lookup tables [4], которые представляют собой набор аэрозольных моделей, используемых для атмосферной коррекции. Эти таблицы позволяют интерполировать свойства аэрозоля из длинноволновой области спектра ($\lambda > 750$ нм) в коротковолновую область спектра $\lambda \in 400\text{--}700$ нм, т. е. восстанавливать спектр излучения света, выходящего из-под поверхности воды, по измерениям спектра восходящей яркости на верхней границе атмосферы. Одним из ключевых элементов, влияющих на качество атмосферной коррекции, является адекватное описание свойств аэрозоля. Стандартный алгоритм атмосферной коррекции, который используется в НАСА (Национальное управление по воздухоплаванию и исследованию космического пространства США) [4], имеет существенный недостаток. Он не работает в случае, если аэрозоль поглощает свет в видимой области спектра [5, 6]. На рис. 1 (см. цветную вклейку) дана иллюстрация влияния поглощающего аэрозоля на результаты стандартной атмосферной коррекции НАСА и источника его происхождения. Вынос пылевого аэрозоля хорошо виден на фоне воды Средиземного моря (рис. 1, а). Он имеет по сравнению с водой более светлый серый цвет и соседствует с облачным образованием, которое достигает Черного моря. Зелено-желто-красная область (рис. 1, б) показывает район в Черном море, в котором выполнена стандартная атмосферная коррекция НАСА. Весь этот район, как следует из анализа спутниковых данных (рис. 1, в; зеленая область), имеет нефизические отрицательные значения коэффициента яркости моря (КЯМ — продукт атмосферной коррекции, который равен отношению яркости света, вышедшего из-под поверхности воды, к облученности над границей воздух-вода и имеет размерность sr^{-1}) в коротковолновой части спектра. Некоторые примеры спектров КЯМ из разных точек этого района показаны на рис. 1, г. Ниже мы вернемся к этому рисунку, отметим только, что характерный масштаб этого явления порядка 100 км.

Именно интерес к этому типу аэрозоля побудил нас дать возможность исследователю простой инструмент для определения места и времени образования приземного, в том числе поглощающего, аэрозоля. Накопление подобного материала с одновременными измерениями оптических характеристик аэрозоля (в данном случае в рамках сети AERONET [7]) позволит в дальнейшем улучшить качество атмосферной коррекции спутниковых измерений в видимом диапазоне спектра [8–10]. Эта работа актуальна не только для Черного моря, но и для других морских акваторий (Каспийское море, Красное море и др.) и озер (например, оз. Байкал), атмосфера над которыми подвержена влиянию аэрозолей из аридных районов суши.

Описание данных. Данный метод использует готовые результаты расчетов обратных траекторий, полученных Томом Кушера (Tom Kucsera) в лаборатории НАСА на основе анализа данных из NASA GMAO (Global Modeling Assimilation Office) и NCEP (National Centers for Environmental Prediction) [11]. Обратные траектории подготовлены для всех станций сети AERONET для каждого дня с начала работы соответствующей станции и выложены в открытом доступе в сети Интернет [7]. Пример обратной траектории для 17 декабря 2008 г., который можно найти по ссылке [12], рассмотрен ниже.

Для валидации данного метода использованы результаты обработки прямых измерений, выполненных на севастопольской станции AERONET многоканальным солнечным фотометром CE-318. Характеристики прибора, методики измерения оптических свойств аэрозоля и их точности описаны в работах [13, 14]. Измерения выполняются с крыши лабораторного корпуса на высоте 80 м от уровня моря у входа в главную бухту на мысе Хрустальном [15]. AERONET предлагает большой набор продуктов [16]. Нами были использованы три продукта: (500) — аэрозольная оптическая толщина на длине волны 500 нм, α — показатель Ангстрема аэрозольной оптической толщины, рассчитанный для диапазона длин волн 440–870 нм, и $\tau_{ab}(440)$ — компонента аэрозольной оптической толщины на длине волны 440 нм, связанная с поглощением света.

Для иллюстрации работы метода привлекались результаты стандартной атмосферной коррекции второго уровня спутниковых измерений и изображения в псевдоцветах на верхней границе атмосферы, полученные прибором MODIS [17]. Примеры таких продуктов были использованы выше для рис. 1. В англоязычной литературе аналог КЯМ называется Remote Sensing Reflectance [18].

Описание метода. Результаты ВТА (англ. Back Track Analysis — анализ обратных траекторий) лежат в основе предлагаемого нами метода пространственно-временной локализации источников аэрозоля, образовавшегося в нижних слоях атмосферы за счет частиц подстилающей поверхности и достигшего определенного района, в нашем случае — севастопольской станции сети AERONET. На рис. 2 представлены исходные данные о давлении и последовательные шаги нашей методики на примере одного дня — 17 декабря 2008 г. Исходный файл ВТА в acsii-кодах

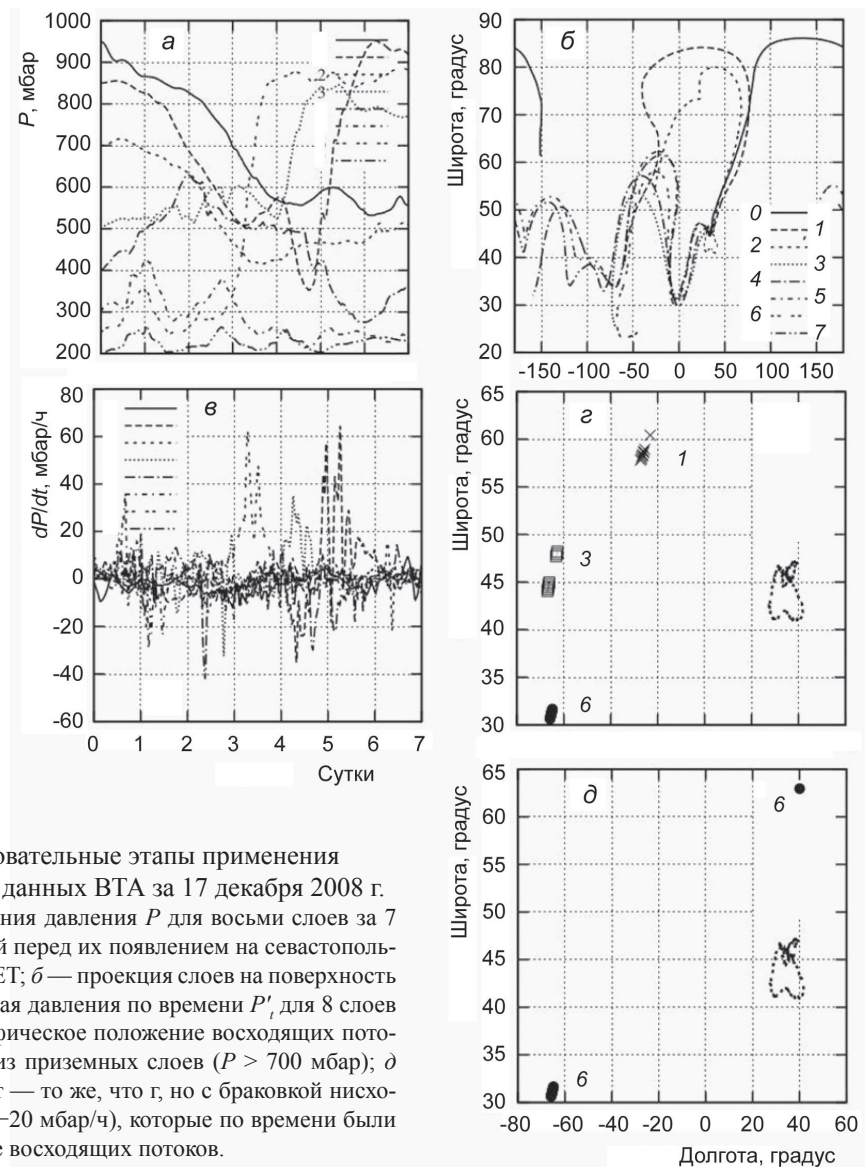


Рис. 2. Последовательные этапы применения метода на примере данных ВТА за 17 декабря 2008 г. *а* — динамика изменения давления P для восьми слоев за 7 предшествующих дней перед их появлением на севастопольской станции AERONET; *б* — проекция слоев на поверхность Земли; *в* — производная давления по времени P' для 8 слоев за 7 дней; *г* — географическое положение восходящих потоков ($P' > 20$ мбар/ч) из приземных слоев ($P > 700$ мбар); *д* — конечный результат — то же, что *г*, но с браковкой нисходящих потоков ($P' < -20$ мбар/ч), которые по времени были позже восходящих потоков.

содержит информацию о семисуточной истории с шагом 15 мин для восьми атмосферных слоев (от 1000 до 200 мбар): номер атмосферного слоя (от 0 до 7), давление (P , мбар), широту и долготу. На рис. 2, а показано изменение положения в атмосфере каждого слоя от времени. На рис. 2, б показана проекция на поверхность Земли каждого из восьми слоев в течение семи суток до их появления на станции AERONET. Ключевым параметром метода является производная давления по времени (P'). Для нашего примера на рис. 2, в показан расчет этого параметра для всех восьми слоев как функция времени.

Положительная величина P'_i соответствует восходящим воздушным потокам, отрицательная — нисходящим. Критерием источника аэрозоля, образовавшегося в определенном месте у поверхности Земли, считалась ситуация, когда одновременно были выполнены два условия. Первое — $P > 700$ мбар. Это условие означает, что изначально воздушная масса находится в приземном слое. Второе — $P'_i > 20$ мбар/ч эквивалентно восходящему потоку со скоростью несколько см/с и более. Последнее соответствует мезомасштабным вертикальным движениям одного знака объемов воздуха с горизонтальными размерами порядка 10–100 км. Оценка 20 мбар/ч взята исходя из анализа всего многолетнего массива (2007–2012 гг.) результатов ВТА для севастьяпольской станции AERONET. Доля таких значений составила около 1.5 % по отношению ко всему массиву, что характеризует это явление как редкое. Таким образом, можно определить географическое положение района (рис. 2, г) и время (рис. 2, а, в), для которых выполнялись оба условия, описанные выше. Цифра к легенде рис. 2 соответствует номеру слоя, в котором эта воздушная масса оказалась над севастьяпольской станцией на 0 UTC 17 декабря 2008 г. Мы так же попытались учесть процесс «удаление аэрозоля с осадками». Критерием такого нисходящего воздушного потока является одно условие $P'_i < -20$ мбар/ч. Численное значение выбрано симметрично первому условию, восходящему потоку, и интуитивно соответствует удалению аэрозоля вместе с «дождем». Вклад таких ситуаций в общем потоке данных около 1 %. Если последнее условие выполняется, то с этого момента времени «забывается» вся предыстория соответствующего атмосферного слоя, т. е. считается, что атмосферный слой уже не содержит аэрозоль, поднятый ранее восходящими потоками с поверхности Земли. На рис. 2, д показан результат применения нашего метода. Он означает, что 17 декабря 2008 г. в 0 часов по UTC на высоте 300–400 мбар (слой 6) над севастьяпольской станцией AERONET оказалась воздушная масса, которая сформировалась 13 декабря 2008 г. в приземном слое западной части Атлантического океана.

Валидация метода и обсуждение ее результатов. Все результаты ВТА за период с 1 января 2007 г. по 31 декабря 2012 г. были обработаны по методу, описанному в предыдущем разделе. На выходе был получен один файл, который состоял из строк исходных ежедневных файлов ВТА, удовлетворяющих вышеописанным критериям. Дополнительно каждая строка в выходном файле содержала информацию о производной давления по времени, признаке подстилающей поверхности — суша/море, дате (год/месяц/день) появления воздушной массы над севастьяпольской станцией и сдвиге по времени, определяющем дату и время образования приземного аэрозоля. Далее каждую такую строку выходного файла мы будем для краткости называть «событием». Этот файл мы проанализируем ниже тремя способами: отдельно сам по себе, совместно с данными AERONET и совместно со спутниковыми продуктами.

Мы понимаем, что существует множество способов, которыми можно было бы получить обратные траектории. В данной работе этот вопрос не обсуждается. Как сказано выше, мы используем готовые расчеты ВТА, из которых с помощью нашей методики получен суммарный файл «событий» за период с 2007 по 2012 гг. Используя этот файл, были построены карты плотности «событий» для каждого года отдельно. Карты состоят из ячеек размером 2×2 градуса по широте и долготе соответственно. Цвет каждой ячейки является функцией числа «событий», реализовавшихся внутри нее в течение года. Размер ячейки был выбран несколько больше, чем горизонтальный масштаб мезомасштабных явлений, которые нас интересовали. Основные особенности этих карт (увеличение плотности «событий» вблизи Черного моря, отсутствие «событий» восточнее Черного моря, сосредоточение «событий» в узкой широтной полосе и др.) слабо зависят от года, поэтому на рис. 3 представлена только одна карта за 2010 год.

Во-первых, очевиден западный перенос, т. к. количество «событий» западнее Черного моря гораздо больше, чем восточнее. В основном все «события» сосредоточены в полосе $30\text{--}50^\circ\text{с.ш.}$

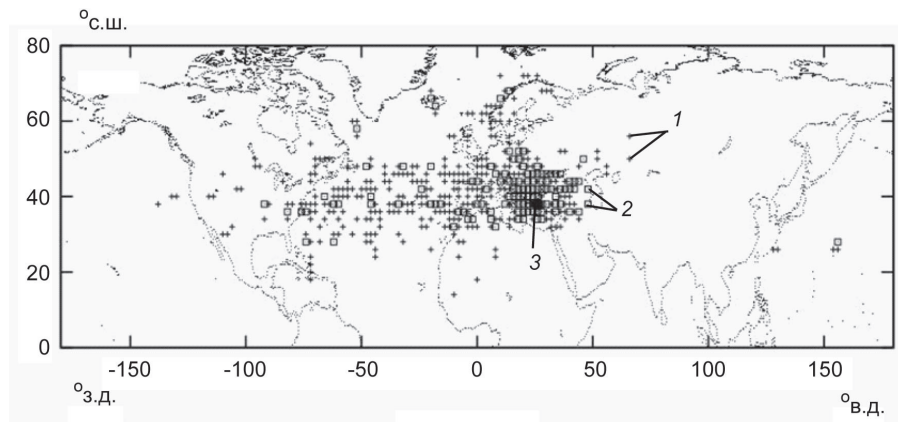


Рис. 3. Карта плотности источников приземного аэрозоля («событий») за 2010 год. Значки соответствуют количеству «событий», реализовавшихся в течение года в ячейке 2×2 градуса.

и от 100° з.д. до 50° в.д. Во-вторых, если проанализировать распределение «событий» по месяцам (которое слабо зависит от конкретного года), то имеет место летний минимум (рис. 4, а), что совпадает с атмосферной активностью (частотой циклонов) над Черным морем [19]. Оба эти обстоятельства находятся в полном согласии с метеонаблюдениями и косвенно подтверждают непротиворечивость использованных нами результатов ВТА. В-третьих, наибольшая плотность «событий» сосредоточена в непосредственной близости от района Черного моря. А так как Черное море окружено сушей, то имеет место доминирование «событий», произошедших

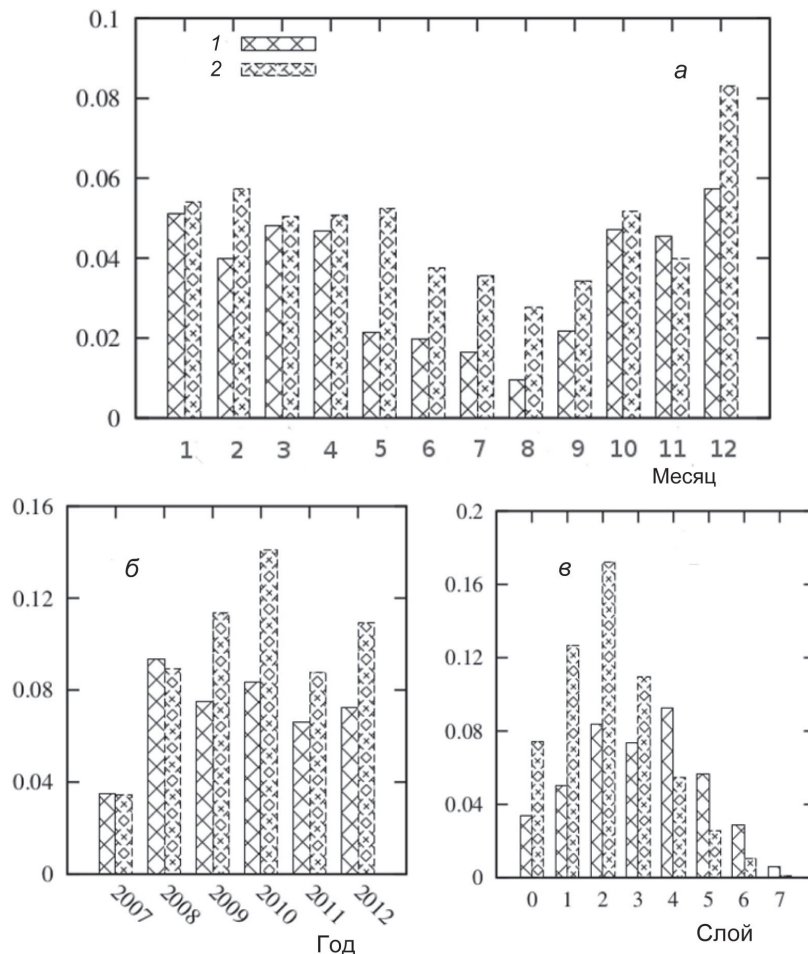


Рис. 4. Частота «событий» за период 2007–2012 гг. на севастопольской станции AERONET с учетом подстилающей поверхности (1 — море / 2 — суша): по месяцам (а), годам (б) и слоям (в). Высота прямоугольника определяет долю наблюдаемых «событий» за указанный выше период, где $N = 19413$ — суммарное число «событий».

над сушей. Это хорошо видно из гистограммы на рис. 4, б, хотя некоторая межгодовая изменчивость присутствует. Тот же факт доминирования в нижних слоях «событий» над сушей отражен на рис. 4, в. В более высоких слоях увеличивается вклад удаленных районов от Черного моря, что с учетом западного переноса соответствует районам Северной Атлантики и Средиземного моря.

Используя специальные измерения AERONET, подготовим и проанализируем подвыборку «событий». А именно, определим все даты за период 2007–2012 гг., когда на севастопольской станции фиксировались значения $\tau_{ab}(440) > 0.04$. Это ситуации с высоким уровнем поглощения аэрозолем в коротковолновой области спектра. Всего таких дней оказалось 135. Географическое положение «событий» для всех этих дней представлено на рис. 5.

Хорошо видно, что подавляющее количество «событий» расположено над сушей. В нижние слои (0–2) над севастопольской станцией попадают аэрозоли от источников, расположенных вблизи Черного моря: Западная Европа и Турция. В верхних слоях увеличивается вклад «событий», расположенных в Северной Африке (Сахара), северной части Аравийского полуострова и восточного побережья США. Местоположение перечисленных выше «событий» (аридные зоны, промышленные районы) косвенно подтверждают изначально выбранные свойства аэрозоля. Небольшое количество «событий» расположено в северной части Атлантического океана. Почему на севастопольской станции для этих случаев наблюдается сильно поглощающий аэрозоль — остается неясным и требует проведения дополнительных исследований.

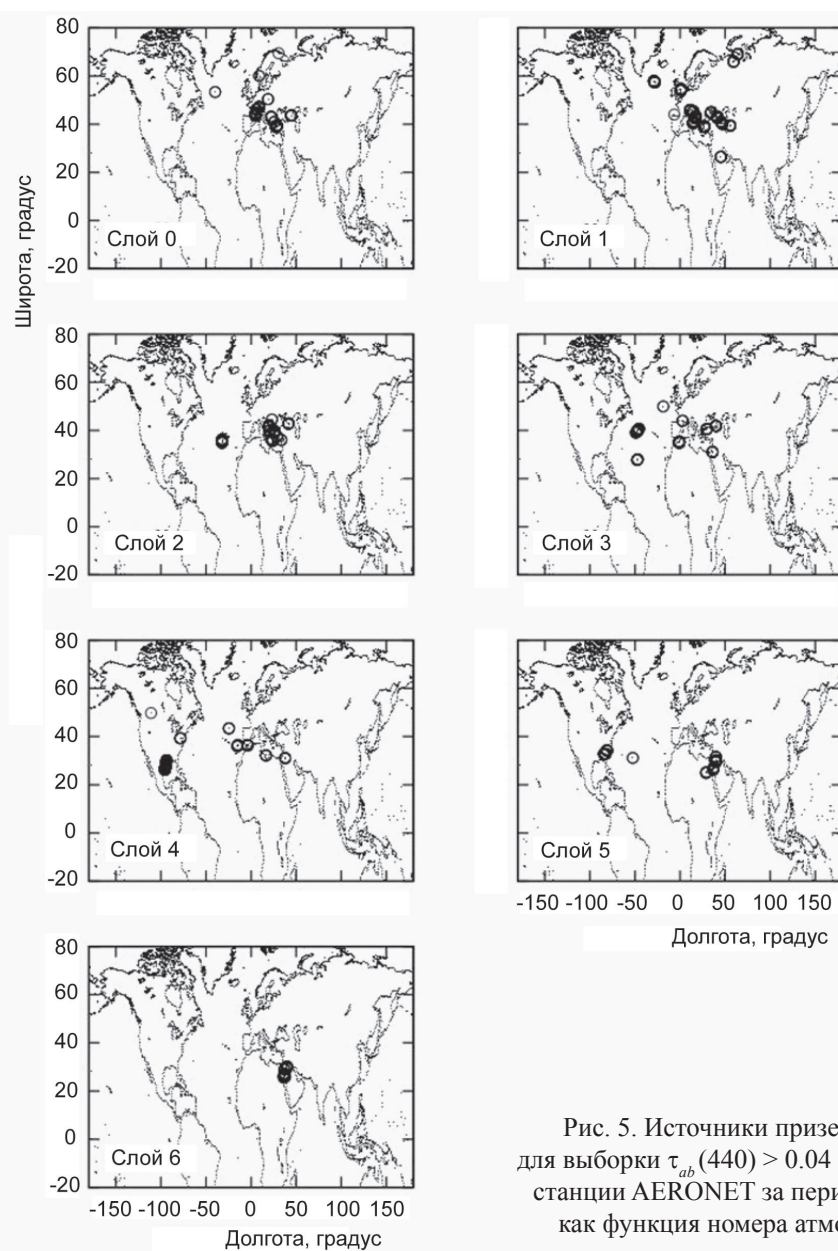


Рис. 5. Источники приземного аэрозоля для выборки $\tau_{ab}(440) > 0.04$ на севастопольской станции AERONET за период 2007—2012 гг. как функция номера атмосферного слоя.

Рассмотрим результаты следующего эксперимента. Из нашего файла «событий» мы получили две подвыборки: район Сахары в Северной Африке (20–30°с.ш. и 10°з.д.–30°в.д.) и Турции (37.95–40°с.ш. и 29.54–38.37°в.д.). Оба района относятся к аридным зонам и являются источниками пылевого аэрозоля [20]. На основе этих подвыборок был составлен список дат, когда, как мы полагаем, пылевой аэрозоль достиг севастопольской станции. Таким образом, мы могли сравнить средние свойства аэрозоля за весь период наблюдения с его свойствами для этих двух подвыборок. На рис. 6 показаны гистограммы результатов измерения двух параметров: аэрозольной оптической толщины на длине волны 500 нм (τ_a^{tot}) и параметра Ангстрема (α). В строке слева направо они расположены в следующем порядке: весь период наблюдения с 2007 по 2012 гг., район Сахары и район Турции. Сдвиг максимума гистограмм в область более высоких значений τ_a^{tot} и более низких значений α относительно их типичных свойств (левая колонка) указывает на увеличение вклада крупных частиц, что является характерным признаком пылевого аэрозоля из рассматриваемых районов [20]. На наш взгляд такое различие гистограмм подтверждает работоспособность нашей методики.

Объем статьи не позволяет изложить анализ всех дней, когда предлагаемая нами методика выявила появление пылевого аэрозоля из двух вышеупомянутых районов — Сахары и Турции. Поэтому проиллюстрируем влияние пылевого аэрозоля из этих районов на нескольких примерах, используя спутниковые данные. Вернемся к рис. 1. Пример за 8 марта 2009 г. выбран не случайно. Именно в этот день, как показала наша методика, из района Турции пришел аэрозоль, который попал во 2 и 3 слои над севастопольской станцией. Особенность этого случая состояла в том, что КЯМ в коротковолновой области спектра имел отрицательные значения для всего безоблачного района Черного моря. Чтобы показать, что это была кратковременная ситуация, связанная именно с этим «событием», мы проанализировали поведение КЯМ в соседние дни в одной и той же географической точке. Результаты этого анализа представлены на рис. 7. Хорошо видно, что до прихода (4 марта) и после прохождения (12 марта) пылевого аэрозоля спектр КЯМ имеет только положительные значения и совпадает в длинноволновой части спектра ($\lambda > 531$ нм), а небольшое различие в коротковолновой области вполне объяснимо изменчивостью во времени оптических свойств морской воды. В то время как в период прохождения пылевого аэрозоля КЯМ «провален» во всем видимом спектре!

Рассмотрим еще один пример «события» за 15 марта 2011 г. Наш метод показал, что источник приземного аэрозоля находится в Сахаре и воздушная масса, пришедшая оттуда, заняла сразу три

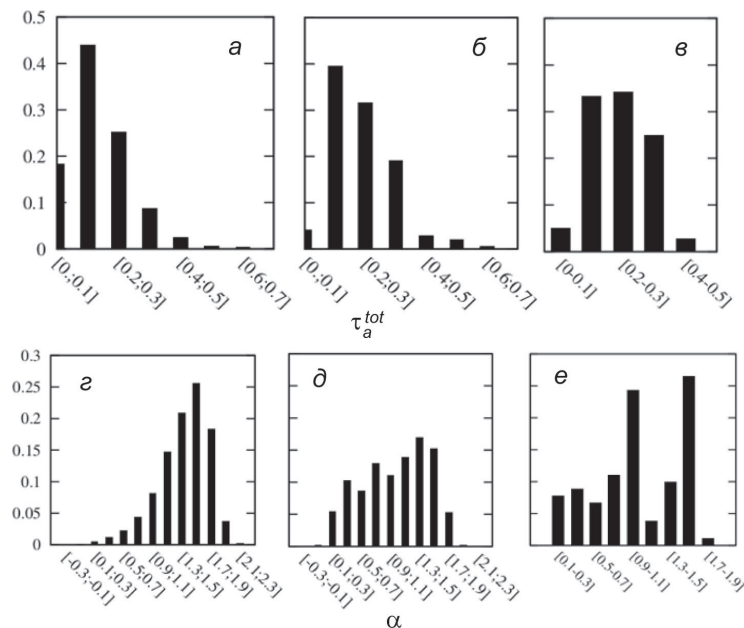


Рис. 6. Распределение измерений аэрозольной оптической толщины τ_a^{tot} (500 нм, а–в) и показателя Ангстрема α (440–870 нм, г–е), полученные по данным измерений на севастопольской станции AERONET за период 2007–2012 гг.

Все измерения (а, г, $N = 45219$), для дат «событий», реализовавшихся в районе Северной Африки (б, д, $N = 478$) и в районе Турции (в, е, $N = 181$). N — число измерений в соответствующей выборке, использованных при построении гистограммы. Высота прямоугольника определяет долю наблюдаемых случаев.

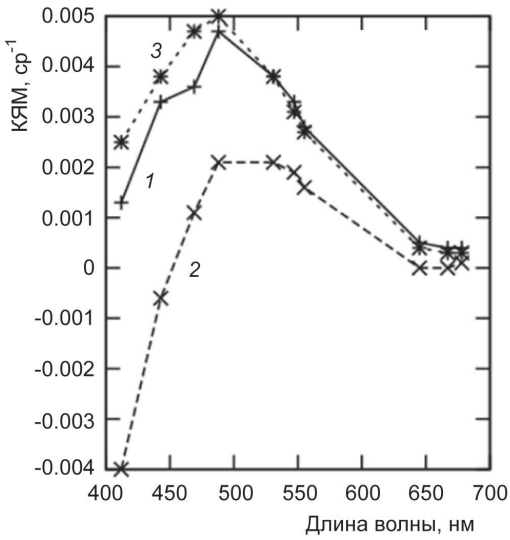


Рис. 7. Спектры КЯМ в Черном море в точке с координатами (42.41°с.ш. и 32.01°в.д.). 1 — 4 марта; 2 — 8 марта; 3 — 12 марта 2009 г., полученные после стандартной атмосферной коррекции измерений, выполненных оптическим сканером MODIS.

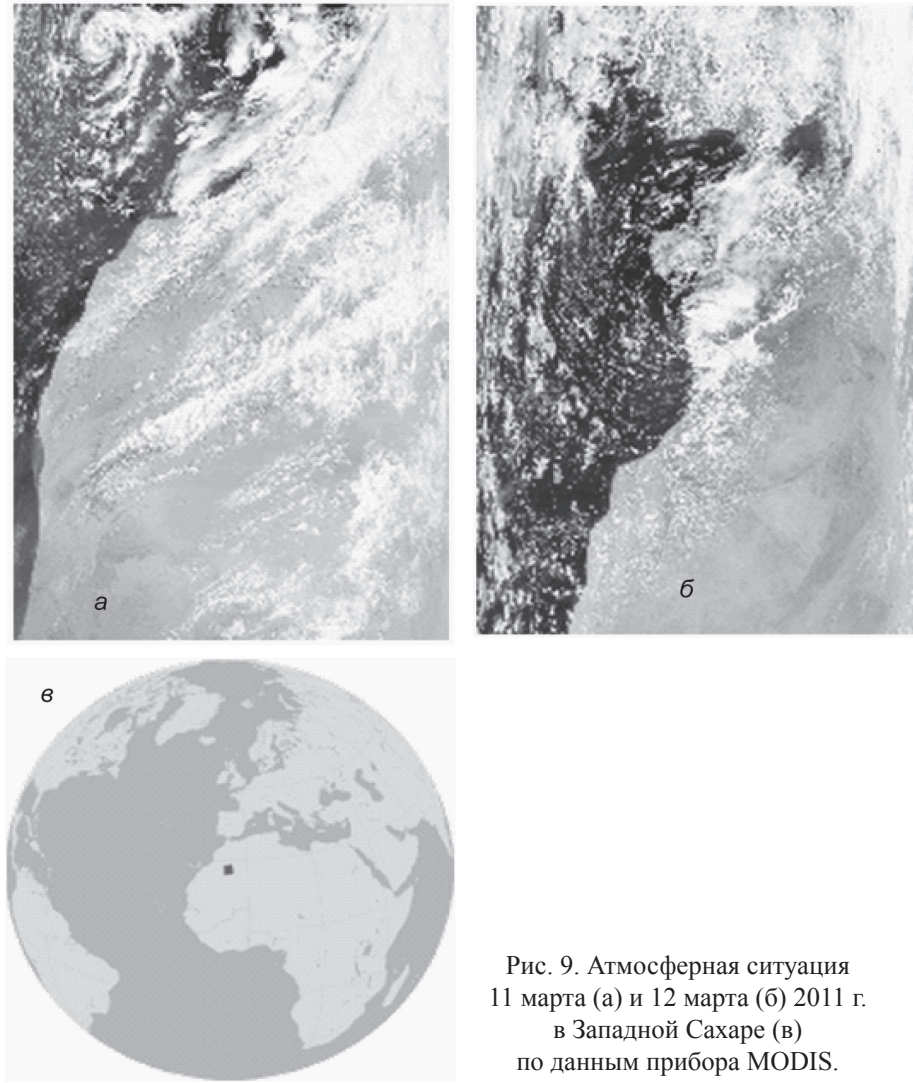


Рис. 9. Атмосферная ситуация 11 марта (а) и 12 марта (б) 2011 г. в Западной Сахаре (в) по данным прибора MODIS.

слоя (4, 5 и 6) над севастопольской станцией. На рис. 8 (см. цветную вклейку) показаны безоблачный участок Черного моря в псевдоцветах (рис. 8, а), географическое положение точек, в которых КЯМ имел отрицательные значения в коротковолновой области спектра (рис. 8, б), и примеры спектров КЯМ (рис. 8, в).

Отличие от предыдущего случая заключается в том, что пылевой аэрозоль задел Черное море только полосой, которая прошла над его западной частью, и его влияние, как на площадь покрытия, так и на спектры КЯМ, было существенно меньше, чем для «события» 8 марта 2009 г. Последнее обстоятельство, по-видимому, является следствием удаленности «события» как по времени, так и по расстоянию от Черного моря. На рис. 9, а, б показаны изображения атмосферной ситуации 11 и 12 марта. Обе эти даты охватывают по времени «событие» образования пылевого аэрозоля в районе Западной Сахары (рис. 9, в), пришедшего 15 марта в Черное море.

На рис. 9, а, б хорошо видно, что центр циклонического образования находится в Атлантике и захватывает район «события» (рис. 9, в), который определен по нашему методу. Конечно, этими двумя случаями нельзя описать все многообразие ситуаций появления приземного аэрозоля в рамках нашего простого метода. Ведь за рамками этой работы остались не исследованными такие параметры и связи между ними, как величина P , расстояние и время прохождения воздушной массы от места наблюдения до источника, интенсивность источника (как долго по времени и с какой амплитудой P' превышал пороговое значение) и др. Тем не менее, для всех дней, которые выявил метод для двух тестовых районов, нам удалось найти спутниковые изображения районов зарождения источников пылевого аэрозоля, на которых видны характерные атмосферные явления, аналогичные рис. 9.

Предложен простой метод определения пространственно-временного положения источников приземного аэрозоля, основанный на результатах анализа обратных траекторий. На примере пылевого аэрозоля из двух аридных районов проведена валидация предложенного метода, который показал наличие связи между районом зарождения аэрозоля и специфическими оптическими характеристиками аэрозоля, наблюдаемыми на севастопольской станции сети AERONET, и особенностью его влияния на результаты стандартной атмосферной коррекции спутниковых измерений, выполненных оптическим сканером MODIS.

Авторы благодарят Тома Кушера (Tom Kucsera), Брента Холбена (Brent Holben) и группу Жене Фельдмана (Gene Feldman) из НАСА за расчеты данных БТА, обработку измерений, полученных на севастопольской станции AERONET, и обработку и распространение спутниковых данных. Мы так же благодарим двух анонимных рецензентов, замечания которых были весьма полезными.

Работа была выполнена в рамках проектов НАН Украины «Фундаментальные проблемы оперативной океанографии» и «Риски», а ее развитие планируется в рамках регионального проекта РФФИ р_юг_а № 14-45-01516.

Литература

1. Kneizys F. X. et al. Users Guide to LOWTRAN 7 URL: <http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=ADA206773> (дата обращения: 01.08.2014).
2. Кондратьев К. Я. и др. Атмосферный аэрозоль. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 224 с.
3. Young R. W. et al. Atmospheric iron inputs and primary productivity: Phytoplankton responses in the North Pacific // Global Biogeochem. Cycles. 1991. V. 5, N 2. P. 119–134, doi:10.1029/91GB00927.
4. Gordon H. R. et al. Retrieval of water-leaving radiance and aerosol optical thickness over the oceans with SeaWiFS: A preliminary algorithm // Applied Optics. 1994. 33. P. 443–452.
5. Claustre H. et al. Is desert dust making oligotrophic waters greener? // Geophys. Res. Lett. 2002. V. 29(10), doi:10.1029/2001GL014506.
6. Suslin V. V. et al. Desert dust effects in the results of atmospheric correction of satellite sea color observations // Current Problems in Optics of Natural Waters: Proc. 4th Int. Conf. (Nizhny Novgorod, September 11–15, 2007) Nizhny Novgorod. 2007. P. 184–187.
7. AERONET. URL: <http://aeronet.gsfc.nasa.gov/> (дата обращения: 01.08.2014).
8. Ahmad Z. et al. New aerosol models for the retrieval of aerosol optical thickness and normalized water-leaving radiances from the SeaWiFS and MODIS sensors over coastal regions and open oceans // Applied Optics. 2010. V. 49, N 29. P. 5545–5560.
9. Ahmed S. et al. Hyperspectral and multispectral above-water radiometric measurements to monitor satellite data quality over coastal area // Proc. SPIE 8030, Ocean Sensing and Monitoring III, 803002 (May 04, 2011); doi:10.1117/12.884674; <http://dx.doi.org/10.1117/12.884674>.
10. Moulin C. et al. Atmospheric correction of ocean color imagery through thick layers of Saharan dust // Geophys. Res. Lett. 2001. V. 28. P. 5–8.
11. Pickering K. E. et al. Trace gas transport and scavenging in PEM-Tropics B South Pacific Convergence Zone convection // J. Geophys. Res. 2001. V. 106. P. 32591–32602.
12. Пример результата БТА за 17 декабря 2008 года на 0 часов (UTC) для севастопольской станции AERONET: http://croc.gsfc.nasa.gov/aeronet/IMAGES/Y08/M12/ktraj_tlk_7bck08121700231.asciidat.gz (дата обращения: 01.08.2014).
13. Dubovik O. et al. A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements // J. Geophys. Res. 2000. V. 105, N 20. P. 673–696.
14. Dubovik O. et al. Accuracy assessments of aerosol optical properties retrieved from AERONET sun and sky-radiance measurements // J. Geophys. Res. 2000. V. 105. P. 9791–9806.
15. Севастопольская станция AERONET. URL: http://aeronet.gsfc.nasa.gov/new_web/photo_db/Sevastopol.html (дата обращения: 01.08.2014).
16. Список продуктов AERONET. URL: http://aeronet.gsfc.nasa.gov/new_web/data_description.html (дата обращения: 01.08.2014).
17. NASA Ocean Color Browser. URL: <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/cgi/browse.pl?sen=am> (дата обращения: 01.08.2014).
18. КЯМ. URL: <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/WIKI/AtmoCor.html> (дата обращения: 01.08.2014).
19. Гришин Г. А. и др. Об эволюции южных циклонов, выходящих на Черное море и территорию Украины, по данным спутниковых и наземных наблюдений // Исследование Земли из космоса. 1991. № 3. С. 89–94.
20. Kubilay N. et al. Optical properties of mineral dust outbreaks over the northeastern Mediterranean // J. Geophys. Res. 2003. V. 108, N D21. P. 4666. doi:10.1029/2003JD003798.

Статья поступила в редакцию 18.03.2014 г.

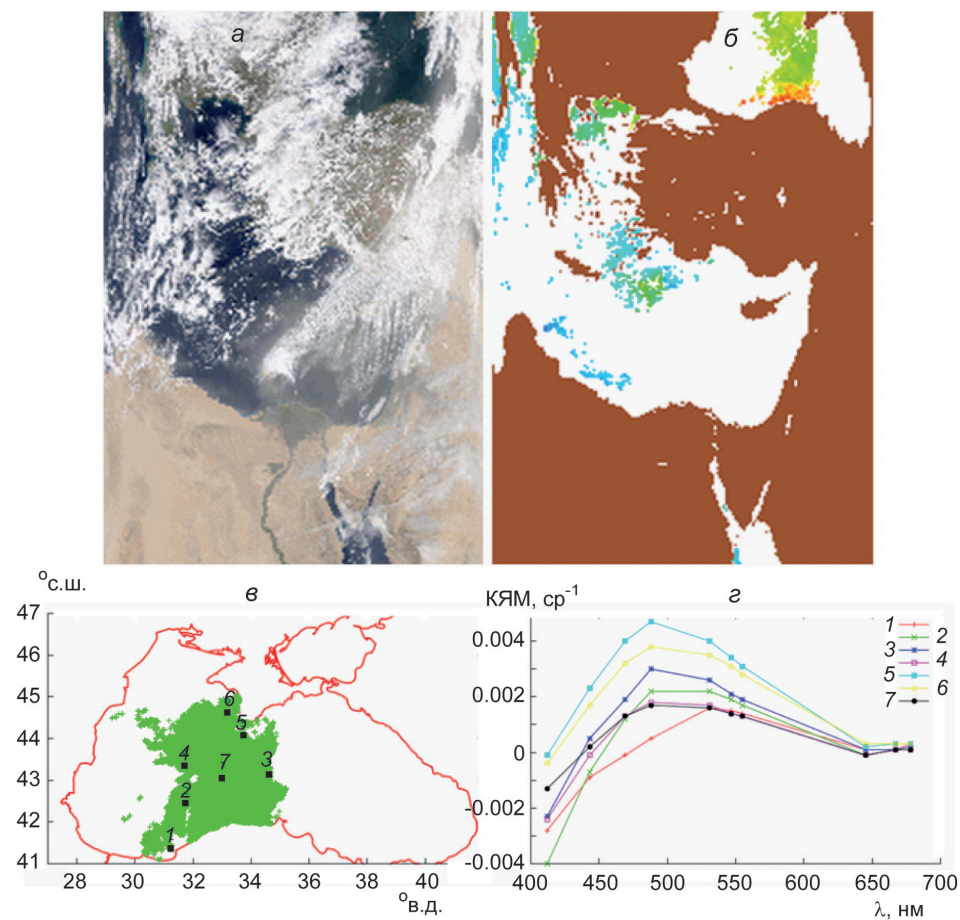


Рис. 1. Иллюстрация влияния поглощающего аэрозоля на результаты стандартной атмосферной коррекции спутниковых данных, полученных прибором MODIS со спутника Aqua 8 марта 2009 г. над Черным морем.

a — карта района в псевдоцветах на верхней границе атмосферы; *б* — тот же район, что и *a* после атмосферной коррекции, где коричневым цветом показана суша, белым — район, где атмосферную коррекцию выполнить невозможно, другие цвета — район, где атмосферная коррекция выполнена; *в* — район, для которого КЯМ восстановлен с ошибками; *з* — примеры спектров КЯМ для точек, положение которых отмечено на в цифрами 1—7.

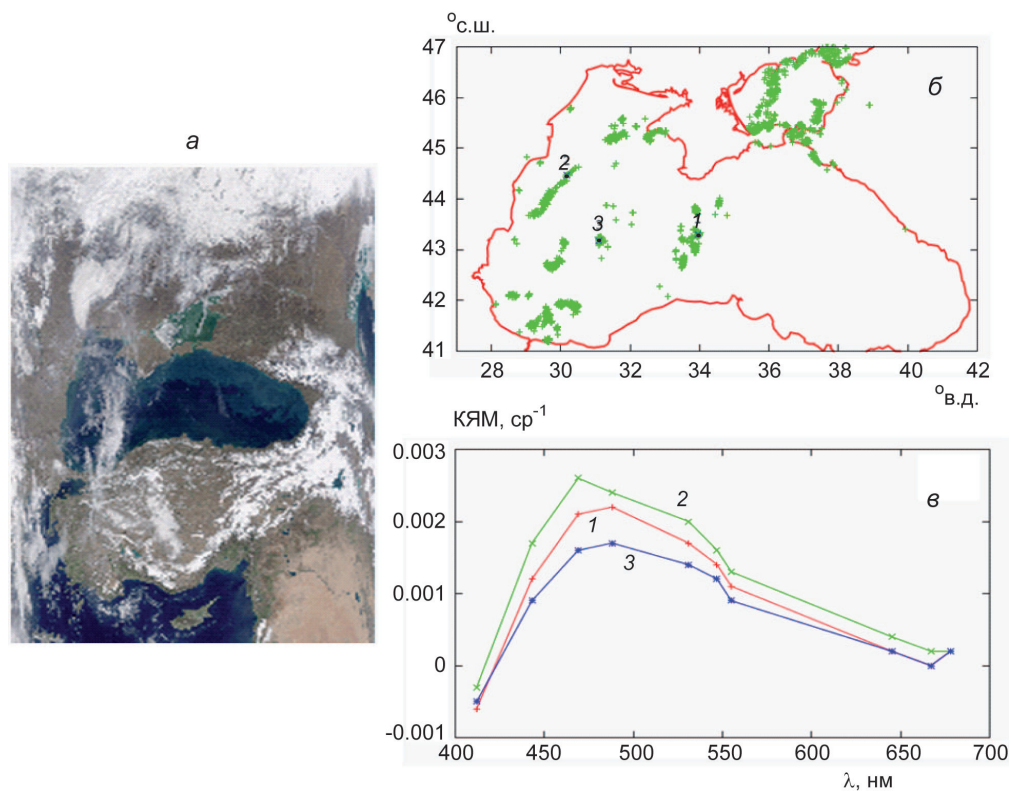


Рис. 8. Результаты измерения прибором MODIS за 15 марта 2011 г.

a — изображения в псевдоцветах района съемок; *б* — положение отрицательных значений КЯМ после выполнения стандартной атмосферной коррекции; *в* — примеры КЯМ в 3-х точках, положения которых показано цифрами на *б*.