

О.А. Букин¹, А.Н. Павлов², П.А. Салюк¹, Ю.Н. Кульчин², К.А. Шмирко¹,
С.Ю. Столярчук³, А.Ю. Бубновский¹

Особенности высотного распределения аэрозоля во время прохождения пылевых бурь над заливом Петра Великого в 2006 г. и их воздействие на фитопланктонные сообщества Японского моря

¹ Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН,

² Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН,

³ Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, г. Владивосток

Поступила в редакцию 28.09.2006 г.

Рассмотрены результаты исследования структуры атмосферного аэрозоля и воздействие аэрозольных выносов на активность фитопланктонных сообществ в различных районах Японского моря в период наиболее активных пылевых бурь в пустыне Гоби за период с марта по июнь 2006 г. В результате совместного анализа данных лидарного зондирования и данных сканера цвета морской поверхности MODIS-Aqua выявлены характерные для периода пылевых бурь стратификации тропосферного аэрозоля, получено соответствие с теоретическими расчетами. Определена высота локализации аэрозоля, и зарегистрировано увеличение концентрации хлорофилла «А», вызванное поступлением аэрозольного вещества в верхний слой океана на исследуемой акватории.

Введение

Атмосферный аэрозоль не только играет существенную роль в формировании климатических условий, но и является одним из факторов, оказывающих существенное влияние на активность фотосинтезирующих систем в океане. Это воздействие осуществляется непосредственно в результате поступления огромного количества минеральных веществ с континента в фотический слой океана (что приводит к локальному цветению водорослей на акваториях, подверженных аэрозольному воздействию), а также в результате изменения альбедо и спектрального состава солнечного излучения, достигающего морской поверхности.

Некоторая часть континентального аэрозоля, попадая в атмосферу в результате таких явлений, как пылевые бури или извержения вулканов, локализуется на высотах, соответствующих особенностям высотного распределения температуры, где аэрозоль может находиться очень долго [1–3]. Под действием ветрового режима аэрозольные массы, находящиеся на резких температурных градиентах, могут переноситься на далекие расстояния. Так, выносы аэрозоля, вызванные пылевыми бурями в пустыне Сахара, наблюдаются над Атлантическим океаном и достигают берегов Америки [4, 5]. В процессе переноса через Атлантику происходит поступление аэрозоля в океан, что увеличивает концентрацию микроэлементов в верхнем слое океана (BCO). Увеличение их концентрации (особенно

железа, кремния, фосфора) даже в незначительных количествах способно приводить к локальному цветению фитопланктона и к значительному увеличению концентрации хлорофилла «А» [6–8].

Сложность исследования процессов переноса аэрозоля и особенно его воздействия на фитопланктонные сообщества обусловлена большими пространственными и временными масштабами явлений, необходимостью проведения измерения параметров, характеризующих непосредственно аэрозольный транспорт, а также реакцию фитопланктонного сообщества на него. Несмотря на это, имеются работы, в которых описаны подобные исследования, например [4–6]. Можно отметить, что одной из задач лидарных сетей, расположенных в регионах, подверженных выносам аэрозоля (EARLiNet, ADNet, CISLiNet), является мониторинг пылевых выносов, генерируемых песчаными бурями, протекающими в пустынях Сахара, Гоби, и их воздействия на морские экосистемы [9–11].

Интенсивные пылевые бури в континентальных районах Китая и Монголии можно рассматривать не только как климатообразующий фактор, действующий в Азии, но и как процесс, интенсивно влияющий на функционирование фитопланктонных сообществ на акватории окраинных морей западной части Тихого океана — Восточно-Китайского, Японского и Охотского. Максимальный вынос аэрозоля в северо-восточном и восточном направлениях происходит в период с марта по июнь и достигает пика Камчатка и берегов Калифорнии соответственно

[12, 13]. Так как фитопланктон играет ключевую роль в процессах жизнеобеспечения на планете, то весьма важным является исследование реакции фитопланктонных сообществ на аэрозольные выносы с континента.

В данной статье по результатам анализа спутниковых и лидарных данных, полученных в период максимальной аэрозольной активности в марте–июне 2006 г., выявлены некоторые особенности распределения аэрозоля в атмосфере в этот период и его воздействие на поля концентрации хлорофилла «А» на выбранных морских акваториях.

1. Описание экспериментальных данных

К анализу были привлечены данные аэрозольного зондирования, полученные на стационарной лидарной станции в г. Владивостоке, а также спутниковые данные о параметрах атмосферного аэрозоля и концентрации хлорофилла «А». При сравнительном анализе использовались результаты измерения аэрозольной оптической толщи (АОТ) атмосферы и концентрации хлорофилла «А» со сканера цвета морской поверхности MODIS-Aqua за период наблюдений. Прибрежное расположение станции лидарного зондирования позволяет исследовать перенос аэрозольного облака из континентальных районов Китая над заливом Петра Великого. Кроме лидарных измерений и данных спутникового зондирования, к анализу привлекались высотные распределения влажности, температуры и давления, полученные с метеозондов, запуск которых осуществляется с периодичностью 12 ч на расстоянии 5 км от лидара [14]. Данные о температуре и давлении использовались для расчета высотного профиля молекулярного рассеяния и оценки критерия устойчивости аэрозольных слоев.

Одночастотное лазерное зондирование на длине волны 532 нм проводилось в дневное и ночное время вдоль наклонной трассы, проходящей над акваторией залива Петра Великого (зенитный угол при зондировании был равен 50°). Описание лидара можно найти в работе [15]. Для проведения анализа были выбраны два района.

Первый район (рис. 1,а) – морская акватория залива Петра Великого, расположенная в непосредственной близости к лидарной станции. Для него был проведен сравнительный анализ данных лидарного зондирования атмосферного аэрозоля и результатов спутниковых измерений параметров аэрозоля. Сравнение изменений оптической толщи атмосферного аэрозоля и концентрации C хлорофилла «А» с использованием только спутниковых данных было проведено также и для второго района – участка шельфа Японского моря (рис. 1,б).

Средние значения оптической толщи атмосферы и концентрации хлорофилла «А», измеренные со спутника, были получены путем усреднения по пикселям изображений внутри водной акватории, ограниченной радиусом 30 км (см. рис. 1,а) и в границах второго района (см. рис. 1,б).

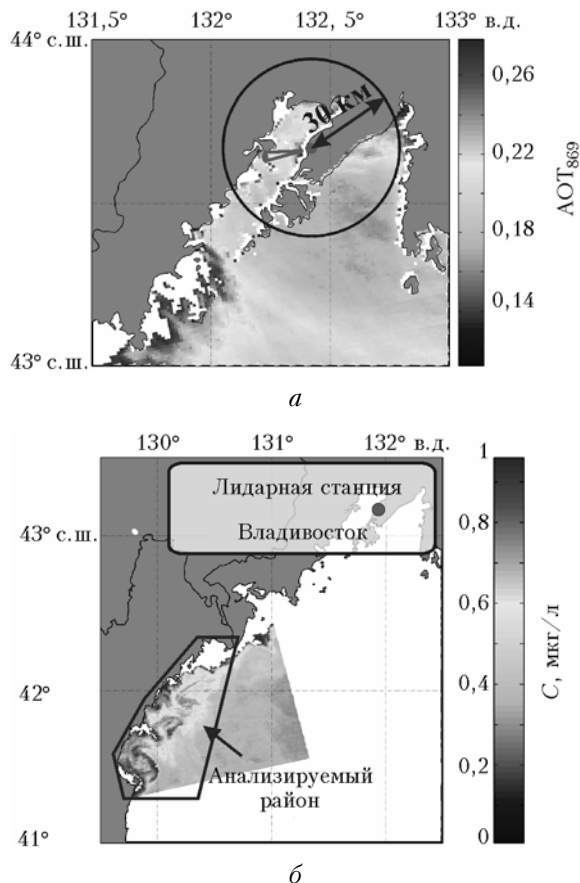


Рис. 1. Место расположения лидарной станции, наложенное на изображение распределения оптической толщи атмосферы по измерениям с MODIS-Aqua (а); изображенные распределения концентрации хлорофилла «А» по данным MODIS-Aqua (б)

Процедура усреднения заключалась в нахождении среднего арифметического значения АОТ или концентрации хлорофилла «А» по всем пикселям, которые содержат данные (после проведения соответствующей фильтрации исходных данных).

Второй район находился практически в восточном направлении распространения аэрозольных выносов из пустыни Гоби. Он был выбран потому, что фитопланктонные сообщества на данной акватории менее подвержены воздействию терригенных факторов (иных, чем аэрозольные выносы с континента), чем в первом районе. Кроме того, для этой акватории было получено максимальное количество качественных изображений с MODIS-Aqua за анализируемый период.

2. Рассмотрение стратификации аэрозоля

На примере высотных профилей температуры и распределения аэрозоля продемонстрируем подходы, которые использовались нами при анализе связи высот локализации аэрозольных выносов в исследуемый период и особенностей распределения температуры. На рис. 2,а приведено распреде-

ление температуры с метеозонда за 07.04.2006 г. (в 9:00 по местному времени) и показаны результаты измерения высотного распределения коэффициента обратного рассеяния β_a на длине волны 532 нм, полученного при лидарном зондировании (рис. 2,б) в это же время.

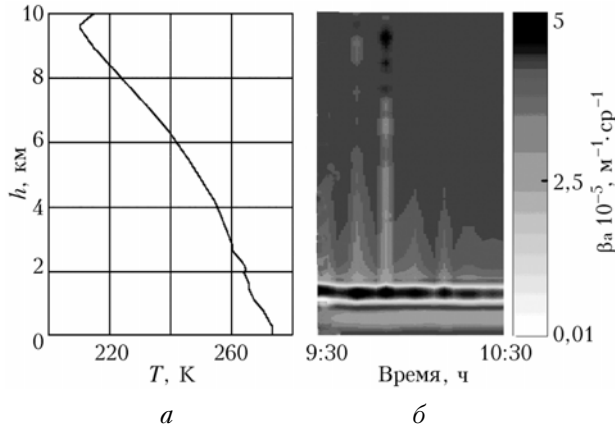


Рис. 2. Вертикальное распределение температуры (метеозонд) (а) и коэффициента обратного рассеяния (лидар) (б)

В этот день были зарегистрированы наиболее интенсивные выносы аэрозоля из континентальных районов Китая над Владивостоком за весь период наших наблюдений (в некоторых районах города было зафиксировано выпадение характерной песчаной пыли, а в дневное время наблюдалась сильная дымка над заливом Петра Великого).

Видно, что на температурном профиле существуют несколько участков, на которых происходят заметные изменения градиентов температуры (до 0,5; 1,5–2,5 и 9–10 км соответственно).

Можно отметить, что этим особенностям температурного распределения соответствуют, по крайней мере, два аэрозольных слоя: нижний – на высоте примерно 0,7 км и слой на высоте около 1 км. Большое содержание аэрозоля в нижнем слое не позволило получить достоверный сигнал с высоты нахождения третьей особенности температурного профиля в этот день.

В процессе наблюдения за вертикальной структурой аэрозоля было отмечено, что аэрозоль, как правило, локализуется в несколько слоев и с течением времени возможно их вертикальное перемещение. Направление этого движения в целом зависит от вертикальной составляющей скорости ветра на данных высотах. В некоторых случаях слой, располагающийся на высоте локальной температурной инверсии, испытывает вертикальное движение. По-видимому, это связано с тем, что вертикальный градиент температуры на высоте расположения слоя таков, что критерий устойчивости Брента–Вяйсяля не выполняется. Используя данные о высотном распределении температуры, можно оценить диапазон высот, где будет выполнен этот критерий и в пределах которого возможна локализация аэрозольных слоев [16].

Частота Брента–Вяйсяля определяется для свободной атмосферы следующим образом [16]:

$$N^2 = -g \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial h} + \frac{g}{c(h)^2} \right), \quad (1)$$

где g – ускорение свободного падения; $\rho(h)$ – плотность атмосферы на высоте h ; $c(h)$ – скорость звука в среде на высоте h .

Вертикальный профиль скорости звука рассчитывался по формуле для идеального газа, что справедливо при рассмотрении распространения звука в атмосфере. Для того чтобы слои находились в состоянии устойчивого равновесия, необходимо выполнение неравенства [16]:

$$N^2 \geq 0. \quad (2)$$

При условии, что ускорение свободного падения неизменно, были рассчитаны положения устойчивых слоев для температурных профилей. На рис. 3 приведена визуализация атмосферных слоев (по лидарным измерениям) и критерия Брента–Вяйсяля (расчетный) за 27.05.2006 г., когда наблюдалась характерная устойчивая «трехслойная» структура распределения аэрозоля.

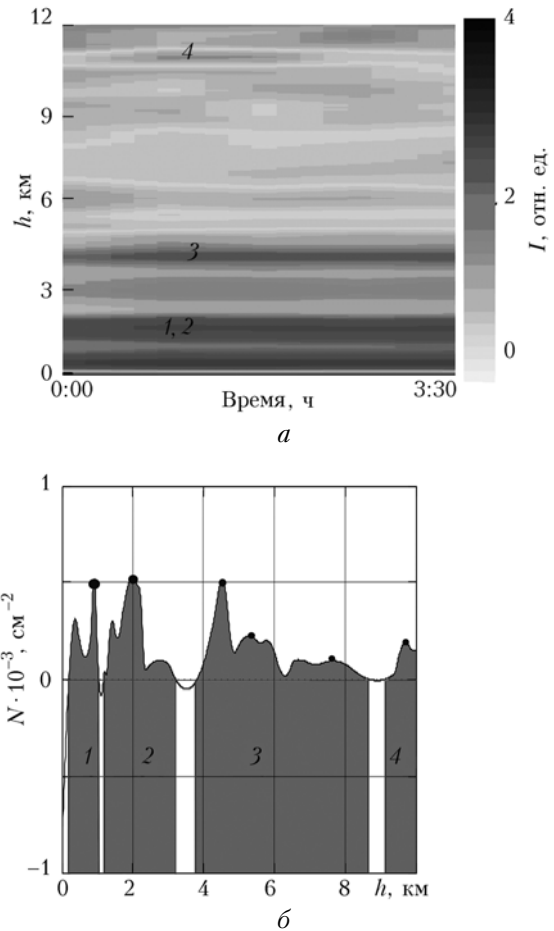


Рис. 3. Структура атмосферы 27.05.06 г. Вертикальная шкала справа – относительная интенсивность сигнала обратного рассеяния в градациях серого (а); высоты локализации устойчивых слоев (б)

По лидарным данным (рис. 3,а) наблюдаются устойчивые аэрозольные слои (черный цвет) на высотах до 1 км; в диапазоне 1,2–2,5 км, около 4 и 10 км критерий устойчивости (рис. 3,б) дает похожую картину: темные области, отмеченные цифрами 1–4, соответствуют максимумам, превышающим величину критерия устойчивости. Согласно рис. 3 следует, что устойчивыми являются слои, локализованные на высотах: 0–1, 2, 4,5 и около 10 км. Другими словами, локализация аэрозольных слоев в исследуемый период над акваторией залива Петра Великого происходила в интервалах высот, в пределах которых выполняется критерий Брента–Вайсяля. Подобная ситуация наблюдалась и в другие дни, когда фиксировалось поступление аэрозоля, которое мы связывали с пылевыми бурями [17].

3. Лидарные и спутниковые измерения АОТ

Рассмотрим результаты лидарного зондирования аэрозоля в период его интенсивного поступления из района песчаных бурь в апреле–мае 2006 г.

Расчет профилей экстинкции, коэффициентов обратного рассеяния и лидарного отношения проводился по алгоритму Klett–Fernald с калибровкой в дальней зоне. В качестве дополнительных входных данных использовались значения АОТ со спутника, пересчитанные на рабочую длину волны лазера [18, 19]. В случае отсутствия спутниковых данных для тех дней, когда проводилось лидарное зондирование, спутниковые АОТ линейно интерполировались. В результате выполнения всех этих процедур рассчитывалась АОТ₅₃₂ по данным лидарного зондирования.

Для учета вклада аэрозоля в оптическую толщину использовались результаты измерений в канале сканера MODIS-Aqua на 869 нм. Оптическая толщина, восстановленная из этого канала сканера, не содержит вклада восходящего из морской толщи излучения. Затем осуществлялся пересчет на АОТ для длины волны 532 нм (для сравнения с лидарными данными) с использованием следующего соотношения [18]:

$$\tau_p = \tau_0(\lambda/\lambda_0)^{-m}, \quad (3)$$

где τ_p и τ_0 – АОТ на длине волны λ и λ_0 ; m – коэффициент Ангстрема для перехода к оптической толщине на длине волны λ .

Анализ временной динамики АОТ был проведен для трех диапазонов высот, в пределах которых производилось интегрирование значений АОТ. Эти диапазоны высот были определены таким образом, чтобы разделить основные слои, которые наблюдались в большинстве случаев за исследуемый период. Первый диапазон от 0 до 3 км включал в себя все аэрозольные структуры, которые образовывались внутри погранслоя (слои 1 и 2 на рис. 3 были объединены). Второй и третий слои находились в пределах высот 3–5 и 5–10 км

(включался аэрозоль, сконцентрированный около тропопаузы).

На рис. 4,а приведен временной ход АОТ₅₃₂, восстановленный по спутниковым и лидарным (в различных слоях) данным для исследуемой области (см. рис. 1,а).

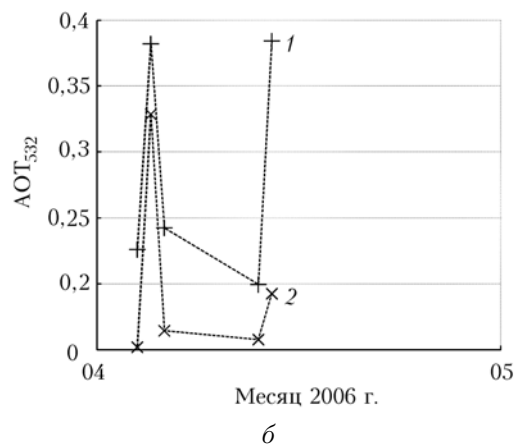
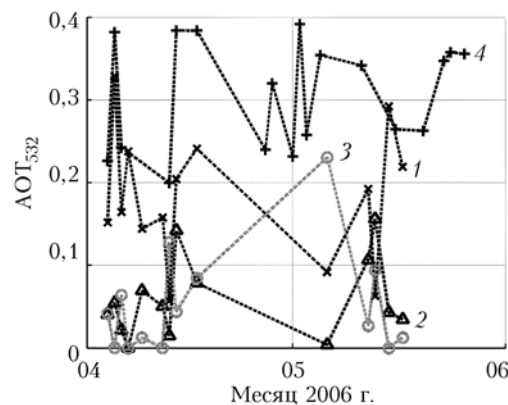


Рис. 4. Временной ход АОТ₅₃₂ в выделенных слоях: а – АОТ₅₃₂ 0–3 км (1); 3–5 км (2); 5–10 км (3); по спутнику (4); б – спутниковые (1) и лидарные (2) измерения в диапазоне высот 0–3 км по совпадающим датам

Максимумы во временном ходе АОТ соответствуют повышению содержания аэрозоля в атмосфере над исследуемой территорией в период наиболее интенсивных выносов из пустыни Гоби. В большинстве случаев дни, когда они наблюдались, совпадали с датами аэрозольных выносов, которые моделировались с учетом реальных метеоданных [17].

Можно отметить, что основная масса аэрозоля, переносимого из пустыни Гоби, сосредоточена в пределах планетарного погранслоя и, как следствие, в эти периоды следует ожидать максимального поступления минеральных веществ в ВСО. Временной ход АОТ₅₃₂ в слое 0–3 км наиболее коррелирован с интегральной АОТ₅₃₂, полученной со спутника. Хотя значение коэффициента корреляции не очень высокое (0,4), можно говорить о том, что основная масса аэрозоля переносится в преде-

лах этих высот (коэффициенты корреляции спутниковой АОТ и лидарной в двух других высотных слоях имеют гораздо меньшие значения). Невысокий коэффициент корреляции в этом случае объясняется движением аэрозольных масс, переходом взвешенного вещества с одного уровня стратификации на другой (наличие участков антикорреляции с данными спутника).

Для расчета коэффициента корреляции спутниковые и лидарные данные интерполировались на равномерную сетку. На рис. 4,б приведены временные зависимости АОТ₅₃₂ по результатам лидарного зондирования в пределах планетарного погранслоя и АОТ₅₃₂ по спутниковым измерениям только за те дни, когда удалось получить спутниковые данные одновременно с лидарным зондированием, выполненным во время пролета спутника над исследуемой акваторией. Малое число синхронных измерений делает недостоверным значение коэффициента корреляции (0,8), однако можно констатировать качественное совпадение временного хода АОТ₅₃₂, интегральной по всей атмосфере, и АОТ₅₃₂ в нижнем слое за эти дни.

В слое турбулентного перемешивания (или конвективном пограничном слое [20, 21]) мы практически всегда наблюдали наиболее высокие значения АОТ₅₃₂ по сравнению со значениями в высоких слоях. Исключение составляет ситуация, которая имела место в первой половине мая (см. рис. 4,а), когда основная масса аэрозоля была сосредоточена в районе тропопавузы.

Необходимо отметить, что наибольшие значения АОТ₅₃₂ в нижнем слое были зарегистрированы 7 апреля и в период с 10 по 17 апреля, а также 17 мая, когда наблюдались наиболее интенсивные аэрозольные выносы в атмосферу над заливом Петра Великого из континентальных районов Китая. Отмеченной особенностью тропосферного аэрозоля (см. рис. 4,а) является его динамическое перераспределение между уровнями стратификации. Действительно, уменьшение АОТ₅₃₂ в одних слоях ведет к увеличению АОТ₅₃₂ на других уровнях, в то время как интегральная аэрозольная оптическая толщина, по данным спутниковых измерений, не испытывает столь существенных флуктуаций.

4. Воздействие аэрозоля на фитопланктонные сообщества

Процесс цветения водорослей состоит в резком увеличении концентрации клеток фитопланктона (концентрации хлорофилла «А»), зависит от очень многих факторов и проявляется по-разному в различных климатических зонах Тихого океана. На акватории Японского моря процесс весеннего цветения начинается в марте и заканчивается к концу мая. Таким образом, перенос аэрозоля песчаными бурями на акваторию окраинных морей западной части Тихого океана приходится как раз на период весеннего цветения. Дополнительное локальное цветение, вызванное выносом минеральных веществ с континента, должно проявляться на фоне весеннего цвета.

Несмотря на то что цветение происходит с некоторой задержкой относительно поступления вещества, должна наблюдаться и некоторая скоррелированность этих двух процессов. Вопрос о том, насколько быстро реагирует фитопланктонное сообщество на поступление дополнительных минеральных веществ в ВСО, слабо изучен к настоящему времени. Можно предположить, что реакция фитопланктона на внешние воздействия зависит от тех условий, в которых происходит развитие клеток, от их стадии развития и видового состава, от типа процессов, воздействующих на них. Так, в работах [22, 23], где исследовались реакции фитопланктонных сообществ на воздействие тропических циклонов, было показано, что наибольшее увеличение концентрации хлорофилла «А» наблюдается примерно через неделю после прохождения тайфуна. А в работе [7] резкое возрастание концентрации хлорофилла «А» наблюдалось уже на 2-е сут после распыления солей железа над исследуемой акваторией. По-видимому, активное перемешивание верхнего слоя тайфуном и изменение гидрологических, геохимических и других параметров морской воды воздействуют на активность фотосинтезирующей системы несколько иначе, чем увеличение скорости электронного транспорта в реакции фотосинтеза, которое происходит при возрастании концентрации железа в морской воде. Те немногочисленные работы, в которых рассматривается реакция фитопланктона на воздействие пылевых выносов, не позволяют даже примерно оценить временной интервал, в течение которого клетки фитопланктона начинают откликаться на вынос аэрозоля. Проведение таких исследований представляет несомненный интерес.

На рис. 5 представлены результаты восстановления концентрации хлорофилла «А» и оптической толщи атмосферы для двух вышеобозначенных районов.

Для первого района (см. рис. 1,а) временной ход концентрации хлорофилла «А», восстановленного из данных MODIS-Aqua, сравнивался с временным ходом АОТ₅₃₂ в диапазоне высот 0–3 км по результатам лидарного зондирования (рис. 5,а). Для второго района (см. рис. 1,б), ввиду отсутствия лидарных данных, сравнения были проведены с временным ходом АОТ₈₆₉ (MODIS-Aqua). На рис. 6 представлены соответствующие кросскорреляционные функции для обоих районов. Максимальные значения коэффициента корреляции для первого и второго районов составляют 0,5 и 0,6 при сдвиге временного хода концентрации хлорофилла «А» на 80 и 40 ч влево соответственно. Это говорит о скоррелированности процессов поступления аэрозоля в атмосферу над исследуемыми акваториями и возрастании концентрации хлорофилла «А».

Необходимо отметить, что процесс цветения водорослей (глобальное цветение, вызванное наступлением весеннего периода) протекает совершенно по-разному в первом и втором районах. Во втором районе (открытые шельфовые воды, см. рис. 1,б) весеннее цветение водорослей протекает по «классическому» сценарию — монотонное возрастание

концентрации с марта по конец мая и последующее уменьшение в июне.

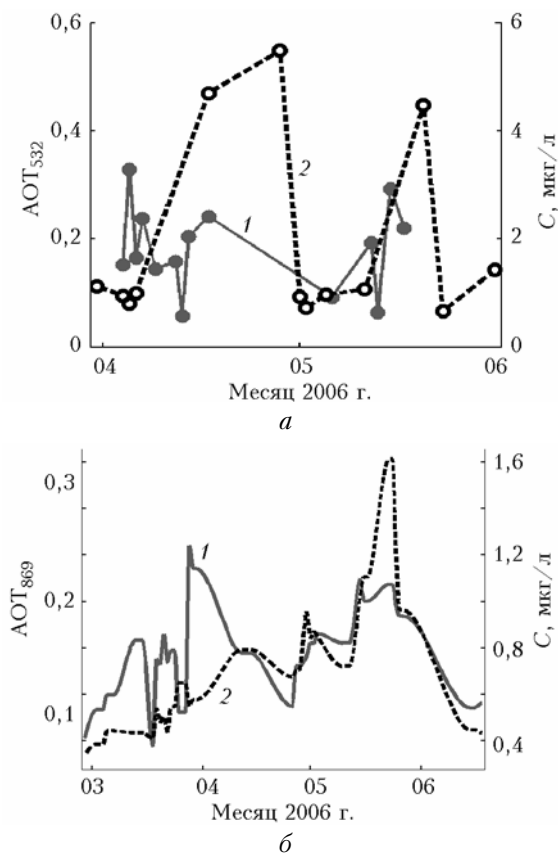


Рис. 5. Временные ходы: *а* – AOT_{532} (лидар) (кривая 1) и концентрации хлорофилла «А» (MODIS) (кривая 2) в первом районе; *б* – AOT_{869} (MODIS) (кривая 1) и концентрации хлорофилла «А» (MODIS) (кривая 2) во втором районе

Особенности первого района (см. рис. 1, *а*) состоят в его относительной закрытости от вод Японского моря и в том, что на процесс цветения водорослей сильно воздействуют антропогенные факторы и поступление терригенного материала в его воды из устьевых зон впадающих в него рек. Это приводит к тому, что весенний пик цветения не столь явно выражен, как во втором районе, и концентрация хлорофилла «А» держится примерно на постоянном уровне в период цветения. На фоне этого глобального цветения выделяются локальные увеличения концентраций, которые можно связать с аэрозольными событиями. Данные события могут увеличивать концентрацию элементов, лимитирующих развитие фитопланктона, например железа [7, 8]. При этом максимум кросскорреляционной функции достигается при сдвиге влево временного ряда концентрации хлорофилла «А» на 80 ч для первого и на 40 ч для второго района (см. рис. 6), т.е. реакция фитопланктона на вынос аэрозоля, по нашим оценкам, составляет 2–3 дня. Это согласуется с экспериментальными данными, приведенными в [4, 7] по реакции фитопланктона на добавления железа в морскую воду.

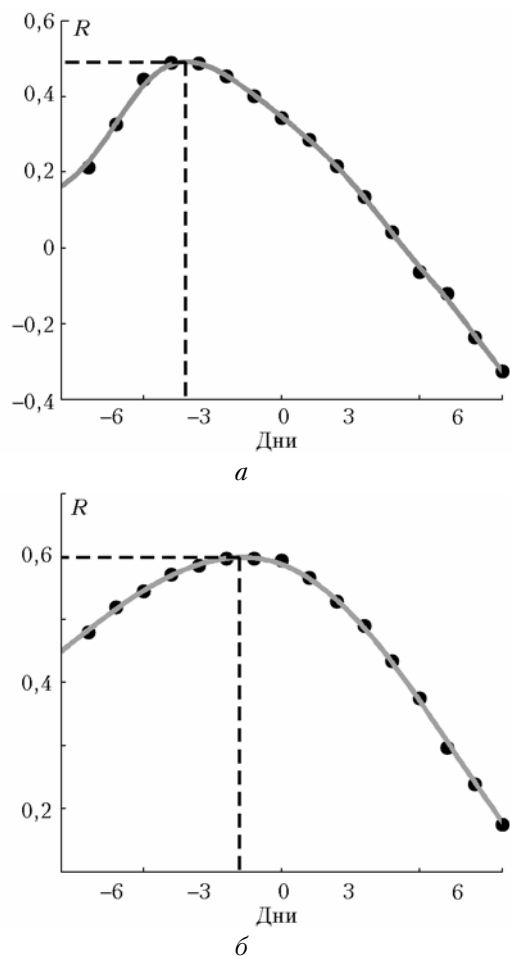


Рис. 6. Зависимость коэффициента корреляции от смещения временного ряда концентрации хлорофилла «А» в первом (*а*) и втором (*б*) районах

Перенос аэрозоля в восточном направлении (в направлении расположения второго исследуемого района) из континентального Китая в период с марта по июнь носил более сложный характер. Это объясняется тем, что в этом направлении осуществляется основной вынос аэрозоля, причем практически постоянно, в период песчаных бурь [17]. И если в северо-восточном направлении можно отметить только три периода, когда увеличения AOT в слое 0–3 км явно выделялись на общем фоне, то в восточном направлении таких событий было гораздо больше. Вполне возможно, что и сам «классический» ход цветения определяется во многом процессом поступления аэрозоля в ВСО в этом районе, поскольку характер возрастания AOT с марта по июнь демонстрирует такой же монотонный ход, как и значения концентрации хлорофилла «А», на фоне которого наблюдаются резкие увеличения концентрации, скоррелированные с такими же резкими увеличениями AOT .

Заключение

Предложенная трехслойная структура высотного распределения аэрозоля, по-видимому, характерна для данного региона в период прохождения

песчаных бурь и удобна для описания процессов переноса аэрозоля и его воздействия на фитопланктонные сообщества. Разбиение тропосферы на слои (0–3, 3–5, 5–10 км) оказывается вполне приемлемым для данного района, поскольку позволяет оценить не только ту часть аэрозоля, которая сосредоточена в нижнем слое и потенциально может оказывать прямое воздействие на функционирование клеток фитопланктона, но и аэрозоль, локализованный в свободной атмосфере и в районе тропопаузы, воздействие которого на фитопланктонные сообщества осуществляется косвенным образом. Эти слои являются относительно устойчивыми и располагаются на локальных температурных инверсиях, где выполняется критерий устойчивости. Рассчитанные в этих слоях значения АОТ (по лидарным данным) и коэффициенты корреляции их временного хода с динамикой АОТ во всей толще атмосферы (по спутниковым измерениям) показали, что основная масса атмосферного аэрозоля, который сосредоточен в зоне ближнего переноса, локализована в слое 0–3 км. Хотя возможны и ситуации, когда основная часть аэрозоля сосредотачивается на высоте нахождения тропопаузы.

Анализ временных изменчивостей АОТ и концентрации хлорофилла «А», который был проведен для двух районов, расположенных в северо-восточном и восточном направлениях распространения аэрозоля, генерируемого песчаными бурями, показал, что в обоих случаях наблюдаются высокие значения коэффициентов корреляции между процессами локального цвета и возрастаниями АОТ, вызванными переносом аэрозоля в период наиболее интенсивных аэрозольных событий в пустыне Гоби в 2006 г. Это позволяет сделать вывод о том, что атмосферный аэрозоль, поступающий на морские акватории в период интенсивных песчаных бурь в пустыне Гоби, является одним из важных факторов, влияющих на процессы развития фитопланктонных сообществ в данном регионе.

В настоящей статье приведены только качественные результаты воздействия аэрозольных выносов на фитопланктонные сообщества и соответствующие подходы, которые позволяют изучать это воздействие с использованием спутниковых и лидарных измерений. Однако проведение соответствующих калибровок, обеспечивающих разработку региональных алгоритмов для восстановления концентрации хлорофилла «А» по данным MODIS-Aqua и концентрационных измерений аэрозоля, включая измерение его элементного состава, позволит исследовать количественные изменения, происходящие в полях концентрации хлорофилла «А», и их временную динамику, характеризующую реакцию фотосинтезирующего аппарата клеток фитопланктона на поступление минеральных веществ в ВСО.

Спутниковые данные второго уровня были предоставлены нам из архива NASA по цвету океана [24].

Работа выполнена при поддержке интеграционного гранта ДВО РАН – СО РАН (№ 06-II-СО-

07-028), совместных грантов РФФИ – ДВО РАН (№ 06-05-96204, 06-05-96105), грантов ДВО РАН (№ 06-I-П116-060, 06-III-B-07-290).

1. Hofmann D.J., Rosen J.M. On the prolonged lifetime of the El Chichon sulfuric acid aerosol cloud // J. Geophys. Res. D. 1987. V. 92. N 8. P. 9825–9830.
2. Stone R.S., Key J.R., Dutton E.G. Properties and decay of stratospheric aerosols in the Arctic following the 1991 eruptions of Mount Pinatubo // J. Geophys. Res. Lett. 1993. V. 20. N 21. P. 2359–2362.
3. Williams J., Reus M., Krejci R., Fischer H. Application of the variability-size relationship to atmospheric aerosol studies: estimating aerosol lifetimes and ages, Atmos // Chem. Phys. Discuss. 2002. V. 2. N 1. P. 43–74.
4. Subba Rao D.V., Al-Yaman F., Nageswara Rao C.V. Eolian Dust Affects Phytoplankton in the Waters of Kuwait, the Arabian Gulf // Naturwissenschaften. 1999. V. 86. N 11. P. 525–529.
5. Walsh J.J., Steidinger K.A. Saharan dust and Florida red tides: the cyanophyte connection // J. Geophys. Res. C. 2001. V. 106. N 6. P. 11597–11612.
6. Bishop J.K.B., Davis R.E., Sherman J.T. Robotic observations of dust storm enhancement of carbon biomass in the North Pacific // Science. 2002. V. 298. N 5594. P. 817–821.
7. Coale K.H., Johnson K.S., Fitzwater S.E., Gordon R.M., Tanner S., Chavez F.P., Ferioli L., Sakamoto C., Rogers P., Millero F., Steinberg P., Nightingale P., Cooper D., Cochlan W.P., Landry M.R., Constantinou J., Rollwagen G., Trascvina A., Kudela R. A massive phytoplankton bloom induced by an ecosystem-scale iron fertilization experiment in the equatorial Pacific Ocean // Nature. 1996. V. 383. N 6600. P. 495–501.
8. Boyd P.W., Watson A.J., Law C.S., Abraham E.R., Trull T., Murdoch R., Bakker D.C.E., Bowie A.R., Buesseler K.O., Chang H., Charette M., Croot P., Downing K., Frew R., Gall M., Hadfield M., Hall J., Harvey M., Jameson G., LaRoche J., Liddicoat M., Ling R., Maldonado M.T., McKay R.M., Nodder S., Pickmere S., Pridmore R., Rintoul S., Safi K., Sutton Ph., Strzepek R., Tanneberger K., Turner S., Waite A., Zeldis J. A mesoscale phytoplankton bloom in the polar Southern Ocean stimulated by iron fertilization // Nature. 2000. V. 407. N 6805. P. 695–702.
9. <http://www.cis-linet.basnet.by/>
10. <http://www-lidar.nies.go.jp/AsiaNet/>
11. <http://www.earlinet.org/>
12. <http://polder.cnes.fr>
13. Uno I., Satake S., Carmichael G.R., Tang Y., Wang Z., Takemura T., Sugimoto N., Shimizu A., Murayama T., Cahill T.A., Cliff S., Uematsu M., Ohta S., Quinn P.K. and Bates T.S. Numerical study of Asian dust transport during the springtime of 2001 simulated with the Chemical Weather Forecasting System (CFORS) model // J. Geophys. Res. 2004. V. 109. D19S24. doi:10.1029/2003JD004222.
14. <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>
15. Чайковский А.П., Иванов А.П., Балин Ю.С., Ельников А.В., Тулинов Г.Ф., Плюснин И.И., Букин О.А., Чен Б.Б. Лидарная сеть CIS-LiNet для мониторинга аэрозоля и озона: методология и аппаратур // Оптика атмосф. и океана. 2005. Т. 18. № 12. С. 1066–1072.
16. Хржан А.Х. Физика атмосферы. Л.: Гидрометеопиздат, 1969. 670 с.

17. <http://cfors.ream.kyushu-u.ac.jp/>
18. *Marengo F., Santacesaria V., Bais A.F., Balis D., di Sarra A., Papayannis A., and Zerefos C.* Optical properties of tropospheric aerosols determined by lidar and spectrophotometric measurements // *Appl. Opt.* 1997. V. 36. N 27. P. 6875–6886.
19. *Takamura T., Sasano Y., Hayasaka T.* Tropospheric aerosol optical properties derived from lidar, sun photometer, and optical particle counter measurements // *Appl. Opt.* 1994. V. 33. C. 7132–7140.
20. *Santacesaria V., Marengo F., Balis D., Papayannis A., Zerefos C.* Lidar observations of the Planetary Boundary Layer above the city Thessaloniki, Greece // *Il nuovo cimento. C.* 1998. V. 21. N 6. P. 585–596.
21. *Зуев В.Е., Креков Г.М.* Оптические модели атмосферы. Л.: Гидрометеониздат, 1987. 254 с.
22. *Акмайкин Д.А., Букин О.А., Пермяков М.С., Салюк П.А.* Оценки воздействия тропических циклонов на распределение концентрации хлорофилла «А» в некоторых районах Тихого океана // *Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса.* М.: Полиграфсервис, 2005. Т. 2. С. 64–69.
23. *Lin I., Liu W.T., Wu C.C., Wong G.T.F., Hu Ch., Chen Zh., Liang W.-D., Yang Y., Liu K.-K.* New evidence for enhanced ocean primary production triggered by tropical cyclone // *Geophys. Res. Lett.* 2003. V. 30. N 13. P. 1718.
24. <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>

O.A. Bukin, A.N. Pavlov, P.A. Saluk, Yu.N. Kulchin, K.A. Shmirko, S.Yu. Stolyarchuk, A.Yu. Bubnovskii. **Peculiarities of aerosol altitude distribution during dust storms above the Peter the Great bay and their impacts on phytoplankton communities in the Sea of Japan.**

The results of the atmospheric aerosol structure studies and aerosol impact on the phytoplankton community activity inside various regions of the Sea of Japan during the most intensive dust storms in the Goby desert (from March to June) are presented. The joint analysis of the lidar sounding and (MODIS-Aqua) data reveal the typical troposphere aerosol stratifications during the dust storm periods. The results of analysis are in accord with the theoretical simulation. The aerosol localization heights and the chlorophyll «A» concentration increase caused by the dust storms are measured.