

Результаты комплексного аэрозольного эксперимента в переходной зоне «материк–океан» (Приморье и Японское море). Часть 1. Вариации аэрозольной оптической толщи атмосферы и вертикальные профили

С.М. Сакерин¹, А.Н. Павлов², О.А. Букин³, Д.М. Кабанов¹, Г.И. Корниенко⁴,
В.В. Полькин¹, С.Ю. Столярчук², Ю.С. Турчинович¹, К.А. Шмирко²,
А.Ю. Майор^{2*}

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

²Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН
690032, г. Владивосток, ул. Радио, 5

³Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского
690059, г. Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а

⁴Уссурийская астрофизическая обсерватория ДВО РАН
692533, пос. Горнотаежное, Приморский кр., Уссурийский район

Поступила в редакцию 22.03.2010 г.

Обсуждаются результаты комплексного аэрозольного эксперимента, проведенного весной 2009 г. параллельно в двух районах – вблизи Уссурийска и в Японском море с борта парусного учебного судна «Надежда». В измерениях аэрозольной оптической толщи (АОТ) и влагосодержания атмосферы использовались многоволновые солнечные фотометры, работающие в диапазоне спектра 0,34–2,14 мкм. Измерения вертикальных профилей характеристик аэрозоля проводились двумя типами лидаров – на основе трехчастотного (1,064; 0,532; 0,355 мкм) Big Sky Laser CFR-200 в Приморье и одночастотного лазера на второй гармонике Nd:YAG (0,532 мкм) на паруснике «Надежда». Выявлено, что весенняя атмосфера в Дальневосточном регионе отличается в 2 раза большим аэрозольным замутнением в сравнении с другими (морскими и континентальными) районами умеренных широт. Средние значения АОТ атмосферы в области 0,5 мкм составили в Приморье 0,46, а в Японском море 0,35. Повышенная мутность атмосферы обусловлена выносами континентального аэрозоля различного типа (дымового, антропогенного, пылевого) из соседних регионов. Приводятся характерные вертикальные профили аэрозольно-молекулярного рассеяния для случаев адвекции воздушных масс из аридных районов Юго-Восточной Азии и бореальной зоны Сибири. Показана связь между пылевой активностью в пустыне Такла-Макан и светорассеивающими характеристиками аэрозольных слоев в области тропопаузы.

Ключевые слова: солнечная фотометрия, аэрозольная оптическая толщина, лазерное зондирование, лидарное отношение, вертикальные профили; solar photometry, aerosol optical depth, laser sensing, lidar ratio, vertical distribution.

Введение

Одна из задач климатологии связана с изучением радиационных факторов климата и оптически-активных компонентов атмосферы. Аэрозоль, наряду с парниковыми газами и облачностью, является

ключевым климатообразующим фактором, который отличается большой динамикой, многообразием взаимодействий с солнечной радиацией, другими физическими полями (облачность, водяной пар, озон), а также компонентами биосферы.

Интересным, но пока недостаточно изученным регионом в азиатской части России является переходная зона «материк–океан» (Дальневосточное Приморье). На специфику оптически-активных компонентов атмосферы и формирование климата в Приморье кроме океана оказывают влияние соседние районы – выносы пылевого аэрозоля из пустыни Гоби и антропогенного аэрозоля из промышленных густонаселенных районов Китая, Кореи, Японии. В теплый период заметный вклад в аэрозольный

* Сергей Михайлович Сакерин (sms@iao.ru); Андрей Николаевич Павлов (aravlov@iasp.dvo.ru); Олег Алексеевич Букин (o_bukin@mail.ru); Дмитрий Михайлович Кабанов (dkab@iao.ru); Геннадий Иванович Корниенко (kornienko@utl.ru); Виктор Викторович Полькин (victor@iao.ru); Сергей Юрьевич Столярчук; Юрий Сергеевич Турчинович (tus@iao.ru); Константин Александрович Шмирко (shmirko.konstantin@gmail.com); Александр Юрьевич Майор (mayor@iasp.dvo.ru).

состав атмосферы вносят дымы лесных пожаров, которые характерны для лесной зоны.

О важности климатического влияния аэрозоля свидетельствуют интенсивные исследования (фотометрические, лидарные и др.), которые ведутся в последние 10–20 лет в соседних странах [1–4 и др.]. Однако многочисленные уже имеющиеся данные не могут быть автоматически перенесены на Приморье. Более того, получение результатов в этом районе необходимо для более полного представления роли и свойств азиатского аэрозоля.

Атмосферный аэрозоль над океаном и континентом имеет контрастные отличия из-за разных метеорологических условий и типов подстилающей поверхности, как источника частиц. Вместе с тем в прибрежной зоне благодаря циркуляциям (общей и бризовой) происходит смешивание аэрозоля, приводящее к трансформации свойств и сглаживанию различий. Сложность процессов формирования аэрозольных полей, их географического и вертикального распределения, разнообразие химического состава диктуют необходимость использования всего арсенала современных средств аэрозольных исследований: сетевого фотометрического [5, 6 и др.] и лидарного мониторинга [7, 8 и др.], данных космического зондирования (MODIS [9, 10]), детальных измерений характеристик в приземном слое локальными методами (нефелометры, азталометры) [11–13].

При сотрудничестве нескольких организаций СО и ДВО РАН весной 2009 г. был проведен комплексный аэрозольный эксперимент параллельно в двух районах: на территории Уссурийской астрофизической обсерватории ДВО РАН (пос. Горнотаежное) и в Японском море с борта парусного учебного судна (ПУС) «Надежда».

Основные результаты исследований, проведенных в переходной зоне «материк–океан», обобщены в трех статьях. В данной статье проанализированы особенности изменчивости в двух районах аэрозольной оптической толщи (АОТ) атмосферы и вертикальных профилей характеристик аэрозоля. Во второй статье [10] рассмотрена пространственно-временная изменчивость АОТ в Японском море и Приморье по данным спутниковых наблюдений и продолжен анализ результатов лидарного зондирования. В третьей статье [13] обсуждаются микрофизические характеристики и химический состав аэрозоля в приземном слое атмосферы в сопоставлении с многолетними данными в Томске.

1. Общая характеристика и задачи эксперимента

Одной из основных задач комплексного аэрозольного эксперимента было получение данных об особенностях формирования и изменчивости аэрозольного ослабления радиации как всей толщи атмосферы, так и вертикального распределения вблизи границы раздела «материк–океан». Наиболее распространенными методами исследований указанных характеристик являются солнечная фото-

метрия и лазерное зондирование атмосферы. Лидарно-фотометрические измерения проводились в пос. Горнотаежное (на удалении ~ 80 км от океана) и с борта ПУС «Надежда» по маршруту Владивосток–Нагасаки–Пусан и обратно. Объем данных по различным характеристикам аэрозоля, полученных в период с 5 апреля по 15 мая 2009 г., приведен в табл. 1.

Таблица 1

Сроки измерений и объем данных, полученных солнечными фотометрами (τ_λ^a , W) и лидарами (профили характеристик аэрозоля)

Место измерения	пос. Горнотаежное		ПУС «Надежда»	
	Фотометр	Лидар	Фотометр	Лидар
Сроки	05.04–08.05	15.04–08.05	14.04–09.05	14.04–09.05
Количество дней измерений	24	16	15	15
Количество серий измерений	16658	55	445	42

В измерениях АОТ и влагосодержания атмосферы использовались три типа солнечных фотометров: на борту ПУС «Надежда» – портативный фотометр SPM [14]; в пос. Горнотаежное – экспедиционный фотометр SP-Э и фотометр CE-318 сети AERONET (<http://aeronet.gsfc.nasa.gov>). Фотометром CE-318 измерялась прямая и рассеянная радиация в диапазоне 0,34–1,02 мкм, а фотометрами типа SP – только прямое излучение, но в более широкой области спектра 0,3–2,14 мкм. Аппаратурно-методические вопросы определения АОТ и влагосодержания приведены в работах [15–18]. На основе полученных данных анализировались средние за час и за день значения следующих характеристик: АОТ на разных длинах волн τ_λ^a , грубо- и мелкодисперсная компоненты (τ^c , $\tau_{0,5}^f = \tau_{0,5}^a - \tau^c$), влагосодержание W , а также параметры α , β формулы Ангстрема $\tau^a(\lambda) = \beta\lambda^{-\alpha}$.

В измерениях вертикальных профилей характеристик аэрозоля использовались два типа лидаров. Зондирование атмосферы на борту ПУС «Надежда» проводилось одночастотным Nd:YAG (0,532 мкм, 50 мДж)-лидаром с излучателем на второй гармонике и фотообъективом МТО-1000 системы Максудова с апертурой 100 мм. Регистрация сигналов обратного рассеяния осуществлялась в диапазоне от 400 м до 10 км через селективный интерференционный фильтр фотоумножителем ФЭУ-84 и 12-разрядным АЦП с частотой дискретизации 20 МГц.

В пос. Горнотаежное использовался лидар на основе трехчастотного Nd:YAG-лазера с энергией в импульсе 50 (1,064 мкм), 70 (0,532 мкм) и 40 мДж (0,355 мкм) и расходимостью зондирующего пучка менее 1 мрад. Фотоприемная система выполнена на

основе телескопа Ньютона (апертура 200 мм, поле зрения 1 мрад) с четырехканальным спектральным блоком, содержащим дихроичные зеркала и интерференционные фильтры. Система регистрации сигналов обратного рассеяния включала: лавинный фотодиод (1,064 мкм), ФЭУ-84 (0,355, 0,532 мкм) и 12-разрядный АЦП с частотой дискретизации, обеспечивающей пространственное разрешение 15 м. В чистой атмосфере диапазон зондирования составлял от 700 м до 15 км.

По данным лидарного зондирования рассчитывались вертикальные профили аэрозольно-молекулярного отношения R (отношение суммы коэффициентов обратного аэрозольного и молекулярного рассеяния $b^a + b^m$ к коэффициенту молекулярного рассеяния b^m). При одновременных лидарно-фотометрических экспериментах использовался итерационный метод расчета коэффициента b^a и лидарного отношения S [19] с привлечением АОТ, измеренных солнечным фотометром. В отсутствие сопутствующей информации об АОТ (зондирование в вечернее и ночное время) коэффициент обратного рассеяния рассчитывался методом Ферналда–Клета [20] с использованием лидарного отношения, полученного накануне вечером.

При наличии перистой облачности C_i , которая определялась по условию $R > 2$ и высоте нижнего среза облака больше 6 км, в тропосфере условно выделялись два участка: подоблачная часть – интервал высот от 700 м до нижнего среза облачности, и верхняя тропосфера – от нижней границы облака до тропопаузы.

Как правило, C_i располагались в примыкающем к тропопаузе 2-км слое. В этом случае фотометрическая АОТ, не включающая C_i , относилась только к подоблачной части атмосферы и расчет коэффициента обратного рассеяния в нижней тропосфере осуществлялся итерационным методом. Расчет оптической толщи C_i в верхней тропосфере проводился методом Ферналда–Клета с лидарным отношением $S_{cloud} = 25$, характерным для C_i [21].

Для расчета молекулярного рассеяния привлекались данные станции высотного метеозондирования Садгород, расположенной вблизи Владивостока – на удалении 70 км от точки зондирования.

При анализе вариаций аэрозольной загрузки тропосферы и характеристик C_i использовались значения АОТ подоблачной части атмосферы $\tau_{0,532}^a$ (для зондирующей длины волны 0,532 мкм), оптические толщи облака $\tau_{0,532}^{cloud}$ и их первые моменты M_1^a , M_1^{cloud} [22], которые характеризуют вертикальное распределение аэрозоля в подоблачной части атмосферы и облачном слое:

$$M_1^a = \frac{1}{M_0^a} \int_{h=700}^{h_{base}} [R(h) - 1] h dh; \quad (1)$$

$$M_1^{cloud} = \frac{1}{M_0^{cloud}} \int_{h_{base}}^{h_{top}} [R(h) - 1] h dh;$$

$$M_0^a = \int_{h_{base}}^{h_{top}} [R(h) - 1] dh; \quad (2)$$

$$M_0^{cloud} = \int_{h=700}^{h_{base}} [R(h) - 1] dh,$$

где h_{base} и h_{top} – высоты нижней и верхней кромок облаков.

Из (1) следует, что M_1^a и M_1^{cloud} определяют средневзвешенные высоты распределения тропосферного аэрозоля и перистой облачности соответственно.

На основе характеристик C_i и данных станции высотного метеозондирования были получены оценки радиационного форсинга облачности по формуле, предложенной в [22]:

$$f = \sigma(T_S^4 - T_C^4)[1 - \exp(-D\tau_{0,532}^{cloud} / C)], \quad (3)$$

где σ – константа Стефана–Больцмана; T_S , T_C – температуры у поверхности Земли и на высоте расположения облака; D – коэффициент диффузии (1,66); C – отношение оптических толщ в инфракрасном и видимом диапазонах (~ 2).

2. Вариации АОТ и влагосодержания атмосферы

Годовой ход аэрозольного замутнения во многих районах умеренных широт характеризуется наличием весеннего максимума [23 и др.]. Приморье в этом отношении не является исключением, но отличается более высокими значениями АОТ в сравнении с другими регионами азиатской части России [5]. Результаты, полученные в экспедиции с помощью солнечных фотометров (рис. 1), подтвердили высокий уровень и широкий диапазон изменчивости АОТ (более одного порядка), как в континентальном, так и в морском районе.

Наиболее высокие значения (всплески) аэрозольного замутнения в пос. Горнотаежное наблюдались 10 и 27 апреля ($\tau_{0,5}^a > 0,75$). По измерениям на ПУС «Надежда» максимумы АОТ ($\tau_{0,5}^a > 0,5$) были зарегистрированы 21 апреля (порт Нагасаки), 1 мая (порт Йосу) и 9 мая в центральной части Японского моря. Минимальные замутнения, характерные для условий чистой атмосферы, наблюдались в двух районах 14 апреля.

Не следовало ожидать синхронности вариаций и одинаковых причин всплесков аэрозольного замутнения в двух районах, разнесенных на 150–1500 км. Повышенные значения АОТ в пос. Горнотаежное, по крайней мере в начале экспедиции, были обусловлены дымами лесных пожаров. Основной вклад в увеличение АОТ в акватории Японского моря давали выносы антропогенного и пылевого аэрозоля с континента. Сложнее определить конкретный тип (источник) аэрозоля, приносимого

в район наблюдений в каждом конкретном случае. Заметим, что два из трех максимумов АОТ были зарегистрированы в районе портов Нагасаки и Йосу. Поэтому более вероятным в этих случаях было большое содержание антропогенного аэрозоля.

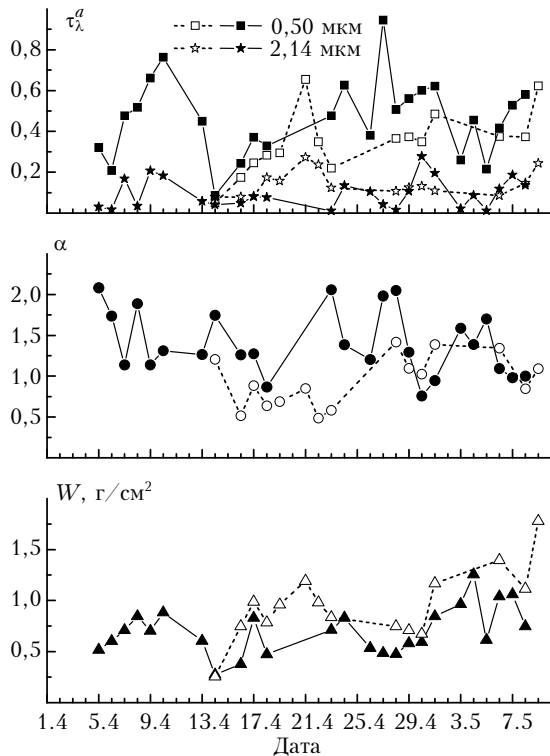


Рис. 1. Изменение характеристик атмосферной толщи в пос. Горнотаежное (темные значки) и над Японским морем (светлые значки) весной 2009 г.

Для пос. Горнотаежное были сопоставлены результаты параллельных измерений АОТ фотометрами SP-Э и CE-318 (AERONET). Отличие среднечасовых значений не превысило погрешности определения спектральных АОТ (менее 0,02) при коэффициентах корреляции 0,97–0,99, что свидетельствует о высокой достоверности полученных данных.

Проведем сравнение характеристик АОТ в период экспедиции с данными в других районах (см. рис. 2 и табл. 2). В среднем более высокие значения АОТ во всем диапазоне спектра наблюдались в пос. Горнотаежное — превышение в ~ 2,3

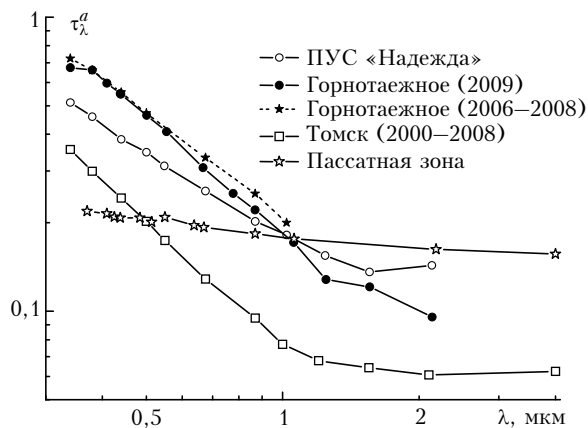


Рис. 2. Средние спектральные зависимости АОТ атмосферы весной 2009 г. в Японском море и пос. Горнотаежное в сравнении с данными в других районах

раза над данными в фоновом районе Сибири (Томск) для этого же периода.

Указанное различие обусловлено высоким содержанием как мелко-, так и грубодисперсного аэрозоля: $\tau_{0,5}^f$ в Приморье больше, чем в Томске, в 3,2 раза, а превышение τ^c — почти в 2 раза. Заметим, что средние значения АОТ (особенно в коротковолновой части спектра) близки к данным весенних AERONET наблюдений в этом районе за последние 5 лет (2005–2009), т.е. полученные результаты не являются уникальной особенностью оптической погоды, сложившейся весной 2009 г., а типичны для Приморья.

Достаточно большие замутнения атмосферы наблюдались и в акватории Японского моря — не только в сравнении с другими районами океана, прилегающими к континентам в умеренных широтах (в ~ 2 раза), но и с пассатной зоной Атлантики, хорошо известной пылевыми выносами из Сахары (см., например, [24, 25]). Отличие от пассатной зоны состоит в разном соотношении вкладов в АОТ двух фракций аэрозоля — над Японским морем больше мелкодисперсная компонента и меньше грубодисперсная (рис. 2). Высокие средние значения $\tau_{0,5}^f$ над Японским морем свидетельствует о том, что если замутнение и было обусловлено выносами пылевого аэрозоля, то он более мелкий, чем в пассатной зоне. Обратим также внимание, что АОТ в области $\lambda > 1$ мкм и грубодисперсная компонента

Таблица 2

Средние (\pm СКО) значения основных характеристик АОТ в Приморье и Японском море в сопоставлении с многолетними данными (апрель–май) в Томске

Район измерений	$\tau_{0,5}^a$	α	β	$\tau_{0,5}^f$	τ^c
ПУС «Надежда»	0,348 \pm 0,157	0,94 \pm 0,32	0,178 \pm 0,078	0,215 \pm 0,123	0,145 \pm 0,054
Горнотаежное	0,464 \pm 0,191	1,41 \pm 0,40	0,183 \pm 0,091	0,369 \pm 0,165	0,115 \pm 0,079
Горнотаежное (2005–2009)	0,471 \pm 0,237	1,19 \pm 0,35	0,214 \pm 0,149	—	—
Томск (многолетние)	0,202 \pm 0,146	1,37 \pm 0,36	0,077 \pm 0,051	0,115 \pm 0,082	0,064 \pm 0,035

τ^c над Японским морем оказалась выше, чем в пос. Горнотаежное.

Таким образом, вся переходная зона «материк–океан», охватывающая акваторию Японского моря, в весенний период характеризуется очень высоким замутнением атмосферы, которое обусловлено большим содержанием аэрозоля, выносимого от континентальных источников. Что касается влажностного содержания атмосферы, то его можно считать типичным для исследуемых районов в весенний период: $(0,71 \pm 0,25)$ г/см² в Приморье и $(0,97 \pm 0,37)$ г/см² в акватории Японского моря (по маршруту ПУС «Надежда»).

3. Вертикальные профили характеристик аэрозоля

Как уже отмечалось, атмосфера в исследуемом регионе в весенний период подвержена влиянию многочисленных источников аэрозоля, среди которых особую роль играют пылевые выносы из аридных районов. На лидарных данных их присутствие проявляется в виде слоев повышенного светорассеяния. Высотный диапазон переноса и свойства аридного аэрозоля во многом зависят как от источника пылевых выносов, так и от совокупности атмосферных процессов, обеспечивающих дальний перенос аэрозоля и трансформацию его характеристик. Считается, что трансконтинентальный перенос пыли из пустыни Такла-Макан происходит в подтропопаузном слое (~ 10 км) [26, 27], а на уровне 5 км — из пустыни Гоби. Над Японией азиатский пылевой аэрозоль наблюдается в широком диапазоне высот от 6 до 10 км [28, 29]. Достаточно часто пылевой аэрозоль регистрируется в форме перистой облачности [30], доставляемой в эти районы системой зональных ветров, включая струйные течения.

Среди аридных районов Китая и Монголии по способности к генерации пылевых выносов для дальнего переноса выделяется пустыня Такла-Макан. Орография местности Такла-Макан способствует поднятию пыли до уровня свободной тропосферы даже при слабом ветре [31, 32]. При прохождении барических депрессий и холодных фронтов поднятая ими пыль способна достигать тропопаузы и в условиях влажной атмосферы формировать мощные щиты перистой облачности, переносимые системой зональных ветров на дальние расстояния. В менее экстремальных условиях пыль переносится в восточном направлении на более низких горизонтах, но не ниже 6-км барьера горного массива в восточной части бассейна р. Тарим. Оценки показывают, что распространение пыли из пустыни Такла-Макан оказывает глобальное влияние на климат, воздействуя на радиационный баланс и морские экосистемы всей планеты [33].

Метеоусловия весной 2009 г. характеризовались интенсивной циклонической деятельностью, препятствующей сезонному смещению ядра субтропического струйного течения с юга на север. Его присутствие в районе 35° с.ш. обеспечивало меха-

низм верхнего переноса пылевого аэрозоля из аридных областей Китая и Монголии в восточном и северо-восточном направлениях, захватывая район проведения исследований.

С использованием данных обратного траекторного анализа движения воздушных масс в свободной атмосфере, проведенного с помощью HYSPLIT-WEB-модели (<http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>), результаты зондирования в пос. Горнотаежное были разделены на три выборки по предполагаемым источникам выноса аэрозоля: пустыни Такла-Макан, Гоби и бореальная зона Сибири. Полученные средние профили аэрозольно-молекулярного отношения R для каждой выборки иллюстрируются на рис. 3, а в табл. 3 приведены периоды зондирования, отнесенные к каждой из групп.

Разделение данных на группы «Такла-Макан» и «Гоби» достаточно условно, поскольку при трансграничном переносе аэрозоля из пустыни Такла-Макан траектории воздушных масс достаточно часто проходят над территорией Гоби и различить вклады одной пустыни от другой не всегда возможно. При построении графиков данные лидарного зондирования, содержащие облачность, были исключены.

Таблица 3

Классификация данных по источникам континентального аэрозоля

Район источника	Период
«Такла-Макан»	18, 29 апреля, 7 мая
«Гоби»	17, 23, 24, 26, 30 апреля; 1–2, 4, 6 мая
«Сибирь»	16, 27–28, 30 апреля; 3–5 мая

Общей особенностью вертикальных профилей на рис. 3 является наличие двух областей повышенного содержания аэрозоля — области планетарного пограничного слоя (ППС) и высотного подтропопаузного слоя. Высотный коридор переноса аэрозоля наиболее выражен в группах «Такла-Макан» и «Гоби». Повышенная вариабельность протяженности и мощности аэрозольного слоя для этих групп (в пределах 60%) отражает, по нашему мнению, неравномерный характер пылевых выносов из аридных районов.

Для профилей группы «Сибирь» характерными особенностями являются: слабо выраженный высотный (подтропопаузный) канал переноса аэрозоля; наибольшая высота ППС, определяемая по максимальной величине $|\text{grad}(R)|$; высокая вариабельность аэрозольно-молекулярного отношения R на верхней границе ППС в прилегающем 2-км слое (коэффициент вариации ~ 50%). Результаты многочастотного лидарного зондирования и солнечной фотометрии показали, что периоды переноса воздушных масс из Сибири отличались большим аэрозольным замутнением и высокими значениями показателя Ангстрема, характерными для мелкодисперсной фракции аэрозоля. Совокупность приведенных фактов дает основание предположить, что источником аэрозоля в этих случаях являлись дымы от весенних палов растительности.

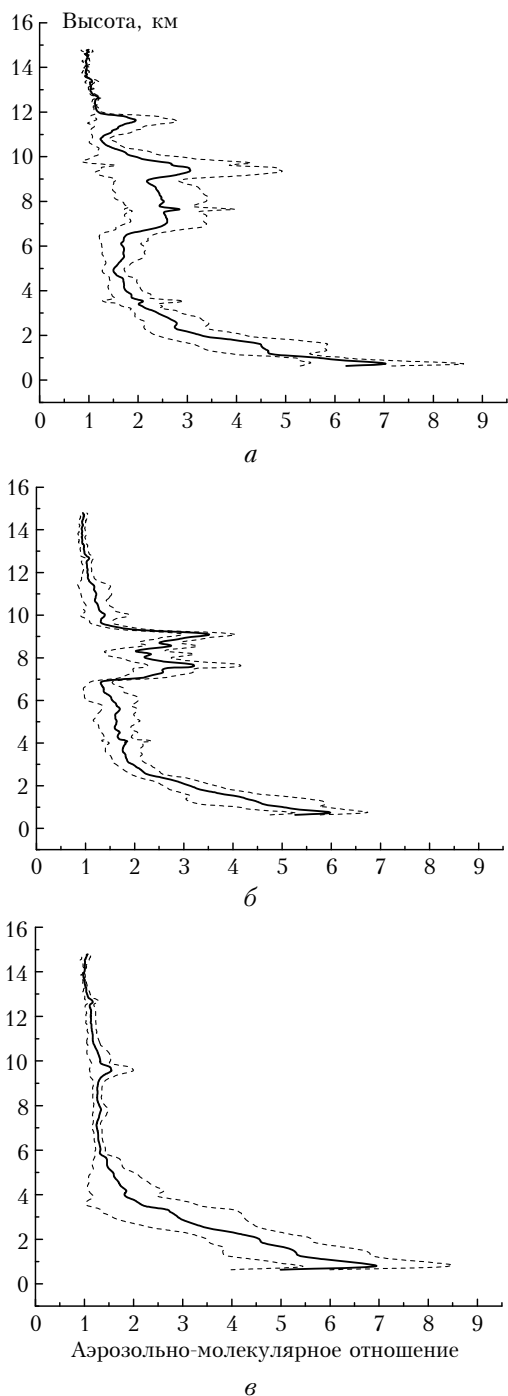


Рис. 3. Средние (\pm СКО) вертикальные профили аэрозольно-молекулярного отношения на длине волны 0,532 мкм для случаев, когда обратный траекторный анализ указывает на источники аэрозоля: *a* – пустыня Такла-Макан; *б* – пустыня Гоби; *в* – boreальные районы Сибири

Сравнение средних (\pm СКО) профилей аэрозольно-молекулярного отношения для Приморья и акватории Японского моря (рис. 4) показывает, что аэрозольное рассеяние в морской атмосфере во всем диапазоне высот значительно слабее.

При общем характере высотного распределения аэрозоля в пределах ППС и свободной атмосфере наблюдаются и существенные различия

в структуре и протяженности аэрозольных слоев. В морской атмосфере можно выделить 3 слоя повышенного аэрозольного рассеяния – подтропаузный (8–11 км), промежуточный (5–8 км) и приводный (в пределах ППС).

Особый интерес представляет наличие промежуточного аэрозольного слоя на уровне 6 км в данных лидарного зондирования над морем, поскольку подобная структура аэрозольного светорассеяния соответствует нашим многолетним наблюдениям в весенний период года в районе Владивостока [7, 34], находящегося в прибрежной зоне Тихого океана. Отсутствие промежуточного аэрозольного слоя в континентальной части (пос. Горнотаежное) и его наличие на границе раздела «материк–океан» наводят на мысль, что на сравнительно небольших расстояниях (порядка 70 км) происходит достаточно резкая смена высотной стратификации и рассеивающих свойств аэрозоля.

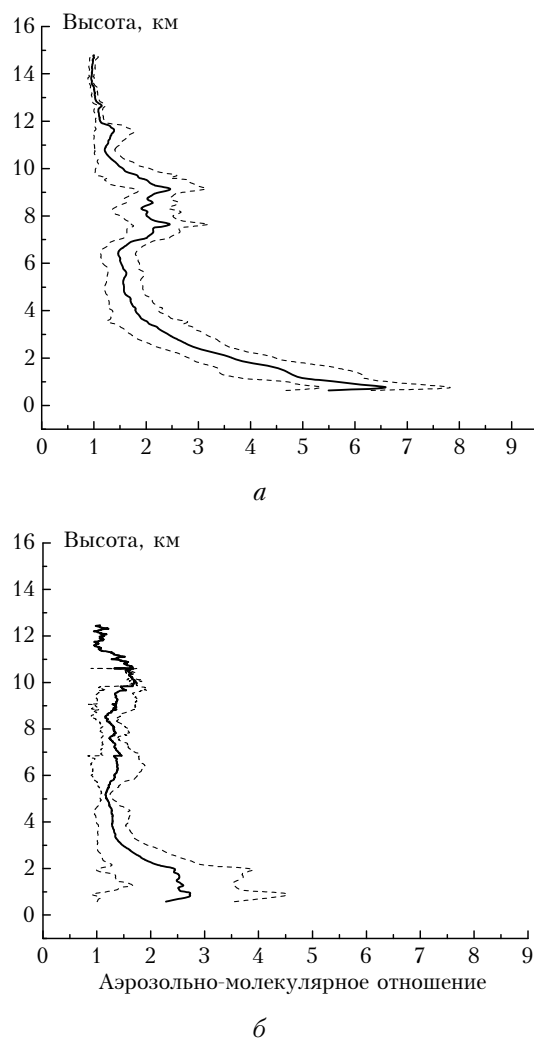


Рис. 4. Осредненные за весь период исследований вертикальные профили аэрозольно-молекулярного отношения: *a* – в континентальной части (пос. Горнотаежное); *б* – в акватории Японского моря

На временном ходе АОТ с учетом перистой облачности (рис. 5, *a*) отчетливо выделяются по-

вышенные значения в период с 30 апреля по 2 мая. По данным обратного траекторного анализа, это соответствует трехсуточному переносу пылевого аэрозоля из пустыни Такла-Макан, где 26–28 апреля был зарегистрирован пик пылевой активности. Существенный вклад C_i в общую АОТ в этот период отражает характерную для Такла-Макан особенность формирования высотных слоев аэрозоля и их транспорта в подтропопаузном слое и в составе перистой облачности.

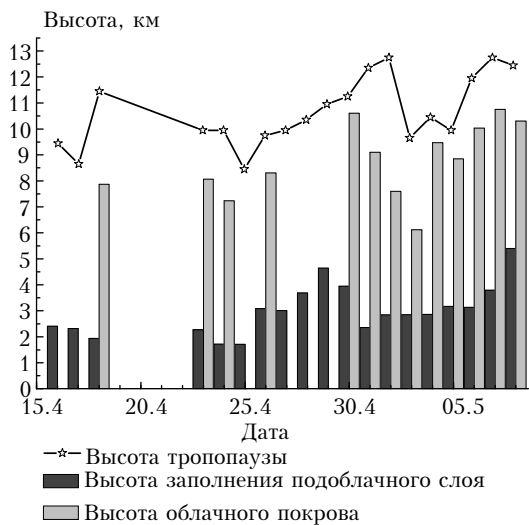
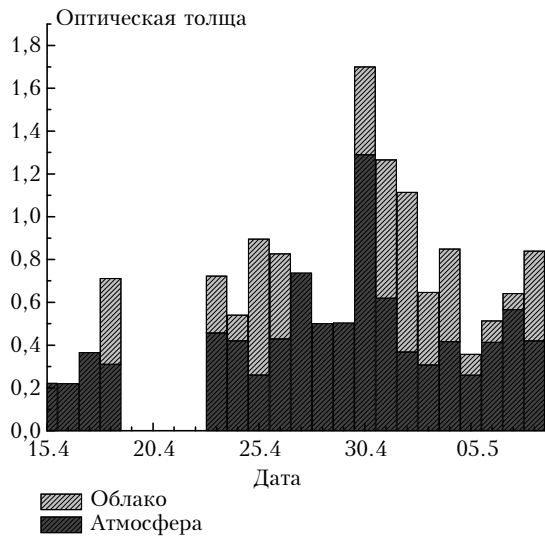


Рис. 5. Временная изменчивость: *a* – АОТ в подоблачной части атмосферы и оптическая толщина C_i ; *b* – средневзвешенных высот распределения аэрозоля в подоблачной части атмосферы и высот C_i

Представляет интерес поведение высоты тропопаузы, максимумы которой наблюдались 18 апреля, 2 и 7 мая (рис. 5, *b*). Согласно траекторному анализу указанные сроки совпадают с приходом воздушных масс из Такла-Макан, где со сдвижкой приблизительно в 3 сут (время переноса по траектории) наблюдались локальные максимумы пыле-

вой активности. Адиабатический процесс поднятия воздушных масс циклоном в его восходящей ветви над Такла-Макан обеспечивает понижение температуры в верхних слоях тропосферы, что неизбежно должно приводить к поднятию уровня тропопаузы. На наш взгляд, поведение высоты тропопаузы, коррелированное с пылевой активностью в Такла-Макан, лишний раз подтверждает принадлежность воздушных масс и регистрируемого аэрозоля к выносам из указанной пустыни.

Вариации средневзвешенных высот аэрозольного заполнения атмосферы во многом зависели от метеорологической ситуации. Так, максимумы 29 апреля и 8 мая наблюдались в условиях, когда юг Приморья и акватория Японского моря находились в области высокого давления. Это способствовало антициклоническому снижению воздушных масс и практически равномерному заполнению аэрозолем всей тропосферы.

Сравнение средних характеристик облачности и подоблачной части атмосферы в исследуемом регионе (табл. 4) показывает, что в целом проявление пылевых выносов в морской атмосфере менее выражено, чем в континентальной части. Это отражается как в АОТ, так и в высотах аэрозольного заполнения атмосферы.

Таблица 4

Средние (\pm СКО) характеристики облачности и подоблачной части атмосферы

Характеристика	пос. Горнотаежное	ПУС «Надежда»
АОТ подоблачной части атмосферы ($\tau_{0,532}^a$)	$0,43 \pm 0,2$	$0,3 \pm 0,1$
Высота заполнения подоблачной части атмосферы (M_1^a), м	2957 ± 892	2795 ± 1161
Оптическая толщина облачного слоя ($\tau_{0,532}^{cloud}$)	$0,38 \pm 0,36$	$0,13 \pm 0,1$
Высота облака (M_1^{cloud}), м	8381 ± 2020	7200 ± 695
Радиационный форсинг C_i (f), Вт/м ²	84 ± 71	–

Заключение

Результаты лидарно-фотометрических исследований аэрозоля, проведенных весной 2009 г. в переходной зоне «материк–океан», позволяют сделать следующие выводы.

1. Весенняя атмосфера в исследованном регионе отличается примерно двукратным превышением аэрозольного замутнения в сравнении с другими (морскими и континентальными) районами умеренных широт. Повышенная мутность атмосферы проявляется во всем диапазоне спектра (0,3–2,14 мкм) за счет большего содержания мелко- и грубодисперсного аэрозоля. Средние и максимальные значения АОТ атмосферы в области 0,5 мкм составили:

в Приморье – 0,46 и более 0,75, в Японском море – 0,35 и более 0,5 соответственно. Высокие значения АОТ обусловлены выносами континентального аэрозоля, преобладающие типы которого (дымовой, антропогенный, пылевой) в конкретных ситуациях различаются.

2. Селективность спектрального хода АОТ атмосфер (средний показатель $\alpha = 0,94$) над Японским морем близка к континентальным значениям из-за большого содержания мелкодисперсного аэрозоля, выносимого с континента.

3. В вертикальных профилях аэрозольно-молекулярного рассеяния отчетливо прослеживаются две области повышенного светорассеяния, характеризующие высотное распределение аэрозоля: широкий подтропопаузный слой со статистическим максимумом на высоте 8 км и слой в области ППС (~ 2 км). Варибельность подтропопаузного слоя в значительной степени отражает пылевую активность и перенос аэрозоля (с задержкой на ~ 3 сут) из аридных районов Китая и Монголии. На форму вертикального распределения характеристик аэрозоля существенное влияние оказывает циклоническая деятельность.

Работа выполнена при поддержке интеграционного проекта СО РАН № 75, ДВО РАН 09-П-СУ07-001 и проекта № 17.1 ПФИП РАН, а также проекта РФФИ – ДВО № 09-05-98523-р_восток_a.

1. Li Zh., Chen H., Cribb M., Dickerson R., Holben B., Li C., Lu D., Lyo Y., Maring H., Shi G., Tsay S.-C., Wang P., Xia X., Zheng Y., Yuan T., and Zhao F. Preface to special section on East Asian studies of tropospheric aerosols: An International Regional Experiment (EAST-AIRE) // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112. D22S00, doi:10/1029/2007JD008853.
2. Huebert B.J., Bates T., Russell P.B., Shi G., Kim Y.J., Kawamura K., Carmichael G., Nakajima T. An overview of ACE-Asia: Strategies for quantifying the relationships between Asian aerosols and their climatic impacts // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108. D23,8633, doi:10/1029/2003JD003550.
3. Luo Y.F., Lu D.R., Zhou X.J., Li W.L., He Q. Characteristics of the spatial distribution and yearly variation of aerosol optical depth over China in last 30 years // *J. Geophys. Res.* D. 2001. V. 106. N 13. P. 14,501–14,513.
4. Takamura T., Sasano Y. Aerosol optical properties inferred from simultaneous lidar, aerosol-counter, and sunphotometer measurements // *J. Meteorol. Soc. Jap.* 1990. V. 68. N 6. P. 729–739.
5. Сакерин С.М., Береснев С.А., Горда С.Ю., Кабанов Д.М., Корниенко Г.И., Маркелов Ю.И., Михалев А.В., Николашкин С.В., Панченко М.В., Поддубный В.А., Польшкин В.В., Смирнов А., Тацillin М.А., Турчинович С.А., Турчинович Ю.С., Холбен Б., Еремينا Т.А. Характеристики годового хода спектральной аэрозольной оптической толщины атмосферы в условиях Сибири // *Оптика атмосф. и океана.* 2009. Т. 22. № 6. С. 566–574.
6. Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Панченко М.В., Польшкин В.В., Холбен Б.Н., Смирнов А.В., Береснев С.А., Горда С.Ю., Корниенко Г.И., Николашкин С.В., Поддубный В.А., Тацillin М.А. Результаты мониторинга атмосферного аэрозоля в азиатской

части России по программе AEROSIBNET в 2004 г. // *Оптика атмосф. и океана.* 2005. Т. 18. № 11. С. 968–975.

7. Букин О.А., Павлов А.Н., Салюк П.А., Кульчин Ю.Н., Шмирко К.А., Столярчук С.Ю., Бубновский А.Ю. Особенности высотного распределения аэрозоля во время прохождения пылевых бурь над заливом Петра Великого в 2006 г. и их воздействие на фитопланктонные сообщества Японского моря // *Оптика атмосф. и океана.* 2007. Т. 20. № 4. С. 341–348.
8. Самойлова С.В., Балин Ю.С., Коханенко Г.П., Пеннер И.Э. Исследование вертикального распределения тропосферных аэрозольных слоев по данным многочастотного лазерного зондирования. Часть 2. Вертикальное распределение оптических характеристик аэрозоля в видимом диапазоне // *Оптика атмосф. и океана.* 2009. Т. 22. № 12. С. 1123–1134.
9. Афонин С.В., Белов В.В., Энгель М.В. Сравнительный анализ спутниковых аэрозольных данных типа MODIS Aerosol Products // *Оптика атмосф. и океана.* 2008. Т. 21. № 3. С. 235–239.
10. Афонин С.В., Энгель М.В., Майор А.Ю., Павлов А.Н., Столярчук С.Ю., Шмирко К.А., Букин О.А. Результаты комплексного аэрозольного эксперимента в переходной зоне «материк–океан» (Приморье и Японское море). Часть 2. Пространственно-временная изменчивость характеристик аэрозоля и влажности по спутниковым данным // *Оптика атмосф. и океана.* 2010. Т. 23. № 9 (в печати).
11. Козлов В.С., Панченко М.В., Яушева Е.П. Временная изменчивость содержания субмикронного аэрозоля и сажки в приземном слое атмосферы Западной Сибири // *Оптика атмосферы и океана.* 2007. Т. 20. № 12. С. 1082–1085.
12. Козлов В.С., Тихомиров А.Б., Панченко М.В., Шмаргунов В.П., Польшкин В.В., Сакерин С.М., Луцицын А.П., Шевченко В.П. Оптические и микрофизические характеристики аэрозоля в приземной атмосфере Белого моря по данным одновременных корабельных и береговых измерений в августе 2006 г. // *Оптика атмосф. и океана.* 2009. Т. 22. № 8. С. 767–776.
13. Козлов В.С., Польшкин В.В., Панченко М.В., Голобокова Л.П., Турчинович Ю.С., Ходжер Т.В. Результаты комплексного аэрозольного эксперимента в переходной зоне «материк–океан» (Приморье и Японское море). Часть 3. Микрофизические характеристики и ионный состав аэрозоля в приземном слое // *Оптика атмосф. и океана.* 2010. Т. 23. № 11 (в печати).
14. Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Ростов А.П., Турчинович С.А. Портативный солнечный фотометр // *Приборы и техн. эксперим.* 2009. № 2. С. 181–182.
15. Кабанов Д.М., Сакерин С.М., Турчинович С.А. Солнечный фотометр для научного мониторинга (аппаратура, методики, алгоритмы) // *Оптика атмосф. и океана.* 2001. Т. 14. № 12. С. 1162–1169.
16. Кабанов Д.М., Веретенников В.В., Воронина Ю.В., Сакерин С.М., Турчинович Ю.С. Информационная система для сетевых солнечных фотометров // *Оптика атмосф. и океана.* 2009. Т. 22. № 1. С. 61–67.
17. Сакерин С.М., Веретенников В.В., Журавлева Т.Б., Кабанов Д.М., Насртдинов И.М. Сравнительный анализ радиационных характеристик аэрозоля в ситуациях дымов лесных пожаров и обычных условиях // *Оптика атмосф. и океана.* 2010. Т. 23. № 6. С. 451–461.
18. Holben B.N., Eck T.F., Slutsker I., Tanre D., Buis J.P., Setzer A., Vermote E., Reagan J.A., Kaufman Y.J., Nakajima T., Lavenu F., Jankowiak I., Smirnov A. AERONET – A federated instrument network and data

- archive for aerosol characterization // Remote Sens. Environ. 1998. V. 66. N 1. P. 1–16.
19. Marenco F., Santacesaria V., Bais A.F., Balis D., Alcide di Sarra, Papayannis A., Zerefos C. Optical properties of tropospheric aerosols determined by lidar and spectrophotometric measurements (Photochemical Activity and Solar Ultraviolet Radiation campaign) // Appl. Opt. 1997. V. 36. N 27. P. 6875–6886.
 20. Klet J. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns // Appl. Opt. 1981. V. 20. N 2. P. 211–220.
 21. Reichardt J., Reichardt S. Correlations among the optical properties of cirrus-cloud particles: Microphysical interpretation // J. of Geophys. Res. D. 2002. V. 107. N 21. 4562, doi:10.1029/2002JD002589.
 22. Kumara V.S., Parameswarana K., Krishna Murthy B.V. Lidar observations of cirrus cloud near the tropical tropopause: general features // Atmos. Res. 2003. V. 66. N 10. P. 203–227. doi: 10.1016/S0169-8095(02)00159-X.
 23. Ярхо Е.В. Временная изменчивость аэрозольной оптической толщины атмосферы в различных климатических регионах // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана 1994. Т. 30. № 3. С. 417–424.
 24. Sakerin S.M., Kabanov D.M., Smirnov A.V., Holben B.N. Aerosol optical depth of the atmosphere over ocean in the wavelength range 0.37–4 μm // Int. J. Remote Sens. 2008. V. 29. Iss. 9. 2519. doi: 10.1080/01431160701767492. P. 2519–2547.
 25. Сакерин С.М., Кабанов Д.М. Пространственное распределение аэрозольной компоненты прозрачности атмосферы над Атлантическим океаном // Оптика атмосф. и океана. 1999. Т. 12. № 2. С. 99–104.
 26. Eguchi K., Uno I., Yumimoto K., Takemura T., Shimizu A., Sugimoto N., Liu Z. Transpacific dust transport: integrated analysis of NASA / CALIPSO and a global aerosol transport model // Atmos. Chem. Phys. 2009. V. 9. N 9. P. 3137–3145.
 27. Itsushi Uno, Eguchi K., Yumimoto K., Takemura T., Shimizu A., Uematsu M., Liu Z., Wang Z., Hara Y., Sugimoto N. Asian dust transported one full circuit around the globe // Nature Geosci. Lett. Advance Online Publication. 20 July 2009. doi: 10.1038/NGEO583.
 28. Tetsu Sakai, Nagai T., Nakazato M., Mano Y., Matsumura T. Ice clouds and Asian dust studied with lidar measurements of particle extinction-to-backscatter ratio, particle depolarization, and water-vapor mixing ratio over Tsukuba // Appl. Opt. 2003. V. 42. N. 36. P. 7103–7116.
 29. Zhaoyan Liu, Sugimoto N., Murayama T. Extinction-to-backscatter ratio of Asian dust observed with high-spectral-resolution lidar and Raman lidar // Appl. Opt. 2002. V. 41. N 15. P. 2760–2766.
 30. Mikami M., Shi G.Y., Uno I., Yabuki S., Iwasaka Y., Yasui M., Aoki T., Tanaka T.Y., Kurosaki Y., Masuda K., Uchiyama A., Matsuki A., Sakai T., Takemi T., Nakawo M., Seino N., Ishizuka M., Satake S., Fujita K., Hara Y., Kai K., Kanayama S., Hayashi M., Du M., Kanai Y., Yamada Y., Zhang X.Y., Shen Z., Zhou H., Abe O., Nagai T., Tsutsumi Y., Chiba M., Suzuki J. Aeolian dust experiment on climate impact: An overview of Japan–China joint project ADEC // Global and Planetary Change. 2006. V. 52. Iss. 1–4. P. 142–172.
 31. Shao Y., Dong C.H. A review on East Asian dust storm climate, modelling and monitoring // Global and Planetary Change. 2006. V. 52. P. 1–22.
 32. Iwasaka Y., Shi G.-Y., Trochkin D., Matsui A., Kim Y.S., Yamada M., Nagatani T. Processes of Background KOSA outbreak // Proc. EMEA 2005 in Kanazawa, 2005: Int. Sympos. on Environmental Monitoring in East Asia – Remote Sensing and Forests. P. 20–36.
 33. Itsushi Uno, Eguchi K., Yumimoto K., Takemura T., Shimizu A., Uematsu M., Liu Z., Wang Z., Hara Y., Sugimoto N. Asian dust transported one full circuit around the globe // Nature Geosci. Lett. Advance Online Publication. 20 July 2009. doi: 10.1038/NGEO583.
 34. Букин О.А., Шмирко К.А., Майор А.Ю., Павлов А.Н., Столярчук С.Ю., Корниенко Г.И., Ерофеев Д.В. Особенности распределения атмосферного аэрозоля по размерам в переходной зоне «материк–океан» // Изв. РАН. Физика атмосф. и океана. 2010. Т. 46. № 2. С. 50–56.

S.M. Sakerin, A.N. Pavlov, O.A. Bukin, D.M. Kabanov, G.I. Kornienko, V.V. Polkin, S.Yu. Stolyarchuk, Yu.S. Turchinovich, K.A. Shmirko, A.Yu. Mayor. **Results of integrated aerosol experiment in the continent–ocean transition zone (Primorye and the Sea of Japan). Part 1. Variations of atmospheric aerosol optical depth and vertical profiles.**

We discuss the results of the integrated aerosol experiment, performed in spring 2009 simultaneously in two regions: near Ussuriysk and in the Sea of Japan onboard “Nadezhda” sailing trainer vessel. In the measurements of aerosol optical depth (AOD) and moisture content of the atmosphere, we used the multiwavelength sun photometers operating in the wavelength range 0.34–2.14 μm . The measurements of the vertical profiles of aerosol characteristics were made using two types of lidars: a lidar based on three-frequency (1.064, 0.532, and 0.355 μm) Big Sky Laser CFR 200 in Primorye and one-frequency laser on the basis of the second harmonic of Nd:YAG (0.532 μm) laser onboard “Nadezhda” sailing vessel. It was shown that the spring-time atmosphere in the Far East region exhibited by two times larger the aerosol turbidity in comparison with other (maritime and continental) midlatitude regions. Average values of the atmospheric AOD in the region of 0.5 μm were 0.46 in Primorye and 0.35 and in the Sea of Japan. The elevated atmospheric turbidity is caused by continental aerosols of different types (smoke, anthropogenic, and dust) blown from the neighboring regions. We present the characteristic vertical profiles of aerosol-molecular scattering for the cases of advection of air masses from arid regions of Southeastern Asia and boreal zone of Siberia. A relation is demonstrated between the dust activity in Takla Makan desert and light scattering characteristics of aerosol layers in tropopause region.