

УДК 551.521.31(5-191.2)

**СЛОИ МЕЛКОМАСШТАБНЫХ ЧАСТИЦ АЭРОЗОЛЯ И ПЕРЕНОС РАДИАЦИИ  
В АТМОСФЕРЕ РЕГИОНА.**

**Часть 1. ЦИРКУЛЯЦИОННЫЕ УСЛОВИЯ НАЛИЧИЯ СЛОЕВ В АТМОСФЕРЕ**

***Б.Б. Чен, С.И. Попель, В.В. Адушкин, О.М. Стрижанцева, Ф. Голоуб, П.Г. Вайдлер***

Выявлены связи между наличием слоев в атмосфере и источниками переноса мелкомасштабных частиц, видом воздушных масс и типом циркуляционных процессов на основе вертикальных аэрозольных профилей, полученных путем совместной обработки данных фотометра CIMEL и лидарного сигнала обратного рассеяния по годам и сезонам за период с 2015 по 2016 г. В среднем в году большинство переносов воздушных масс со слоями мелкомасштабных частиц происходил через секторы С (западный перенос) при малоградиентном поле пониженного давления и западном вторжении, западном циклоне и D (северный, северо-западный перенос) при южной периферии антициклона. Установлено, что большинство слоев в рассматриваемые годы наблюдалось при антициклонических (СА), адвективном южном (АС) и адвективном западном (АВ) типах погоды. Основным типом погоды, при котором наблюдается только пограничный слой без приподнятых слоев, является антициклонический, а также нейтральный, адвективный южный и адвективный западный типы погоды.

*Ключевые слова:* атмосфера; слои; мелкомасштабные частицы; воздушная масса; пограничный слой; свободная тропосфера; тип циркуляционных процессов; фотометр; лидар; секторы переноса.

---

**АЭРОЗОЛДУН МАЙДА БӨЛҮКЧӨЛӨРҮНҮН КАТМАРЛАРЫ ЖАНА АЙМАКТЫН  
АТМОСФЕРАСЫНА РАДИАЦИЯНЫН ТАРАЛЫШЫ. 1-бөлүк. АТМОСФЕРАДАГЫ  
КАТМАРЛАРДЫН БОЛУШУНУН ЦИРКУЛЯЦИЯЛЫК ШАРТТАРЫ**

CIMEL фотометринин маалыматтарын биргеликте иштеп чыгуу аркылуу алынган вертикалдуу аэрозолдук профилдердин жана 2015-2016-жылдар аралыгында жылдар жана сезондор боюнча артка чагылган лидардык сигналдын негизинде атмосферадагы аэрозолдун катмарларынын болушу менен майда бөлүкчөлөрдүн таркалуу булактарынын, аба массасынын түрү менен циркуляциялык процесстердин түрүнүн ортосундагы байланыштар аныкталды. Орто эсеп менен бир жылда аэрозолдун майда бөлүкчөлөрүнүн катмарларынан турган аба массаларынын жылып жүрүшү көпчүлүк учурда төмөнкү басымдагы аз градиенттүү талаада жана батыштан кирүүдө, батыштан келген циклондо С сектору аркылуу (батыштан жылып келүү) жана түштүктөн келген циклонго каршы агымда (түндүк, түндүк-батыштан жылып келүү) D сектору аркылуу өтөт. Каралып жаткан жылдары катмарлардын көбү аба-ырайынын циклонго каршы агымында (СА), түштүк адвективдүү (АС) жана батыш адвективдүү (АВ) типтеринде байкалган. Катмарлар көтөрүлбөстөн, чек арадагы катмар гана байкалгандагы аба-арайынын негизги түрү циклонго каршы, ошондой эле нейтралдык, түштүк адвективдүү жана батыш адвективдүү түрү болуп эсептелет.

*Түйүндүү сөздөр:* атмосфера; катмарлар; майда бөлүкчөлөр; аба массасы; чек арадагы катмар; эркин тропосфера; циркуляциялык процесстердин түрү; фотометр; лидар; өтүү сектору.

---

**LAYERS OF SMALL-SCALE PARTICLES OF AEROSOL AND RADIATION TRANSFER  
IN THE ATMOSPHERE OF THE REGION  
PART 1. CIRCULATION CONDITIONS OF THE PRESENCE LAYERS IN THE ATMOSPHERE**

***B.B. Chen, S.I. Popel, V.V. Adushkin, O.M. Strigantseva, Ph. Goloub, P.G. Weidler***

The relationships between the presence of layers in the atmosphere and the sources of small-scale particle transport, the type of air masses, and the type of circulation processes based on vertical aerosol profiles obtained by joint

processing of CIMEL photometer data and lidar backscatter signal by Years and Seasons for the period from 2015 to 2016 are revealed. On average, in the year, most air mass transfers with layers of small-scale particles occurred through sectors C (western transport) at a low-gradient reduced-pressure field and a western invasion, a western cyclone and D (northern, northwestern transport) at the southern periphery of the anticyclone. It was found that the majority of layers in the considered years were observed at anticyclonic (CA), advective southern (AS) and advective western (AW) types of weather. The main type of weather, in which only the boundary layer without elevated layers, is the anticyclonic as well as the neutral, advective southern and advective western types of weather is observed.

**Keywords:** atmosphere; layers; small-scale particles; air mass; boundary layer; free troposphere; type of circulation processes; photometer; lidar; transfer sector.

**Введение.** Известно [1], что большинство эффектов влияния аэрозолей на климат происходит в приподнятых слоях атмосферы и в современной климатологии вертикальное распределение аэрозоля играет важную роль в переносе радиации. Методы дистанционного зондирования, в частности, с помощью лидаров, позволяют получать вертикальные профили распределения аэрозоля, а также снижать неопределенность, которая возникает при расчетах радиационного форсинга из-за наличия слоев загрязнения в атмосфере [2].

**Цель работы** – исследовать влияние слоев мелкомасштабных частиц аэрозоля на перенос радиации и оценить их вклад в климатическую изменчивость региона.

Первая часть посвящена выявлению связей между наличием слоев в атмосфере и источниками переноса мелкомасштабных частиц, видом воздушных масс и типом циркуляционных процессов на основе вертикальных аэрозольных профилей, полученных путем совместной обработки данных фотометра CIMEL и лидарного сигнала обратного рассеяния по годам и сезонам за период с 2015 по 2016 г. Во второй части рассмотрены влияние слоев на перенос радиации и их вклад в региональные климатические изменения.

### 1. Использованный материал

В работе использованы экспериментальные результаты лидарных и фотометрических измерений, дополнительная метеорологическая информация, расчеты обратных и прямых траекторий переноса воздушных масс и данные спутниковых наблюдений. Использована методология сочетания одновременных лидарных и фотометрических измерений и численные расчеты, объединяющая информационные возможности лидарных и фотометрических измерений и обеспечивающая получение новой информации о высотном профиле спектров оптических характеристик и микроструктуры аэрозоля, а также спектральной радиации. Обработке были подвергнуты радиационные данные и аэрозольные оптические толщи, измеренные с помощью лидара и фотометра CIMEL.

За период с 2015 по 2016 г. были выбраны дни лидарного зондирования при наличии

пограничного слоя (PBL) и приподнятых слоев в свободной тропосфере (FT) и рассмотрены типы циркуляционных синоптических процессов в эти дни по годам и сезонам. За 2015 г. наблюдалось 60, в 2016 г. – 57 таких дней.

Многолетние лидарные измерения показывают, что высота PBL имеет явную сезонную зависимость и изменяется в достаточно широких пределах (от ~2.0 до 4.5 км), но редко (примерно в 3–5 % случаев) превышает уровень 4.0 км. Высота 4.0 км представляет собой уровень, ниже которого в отсутствие облаков содержится большая часть тропосферного аэрозоля.

Таким образом, оптические характеристики в области высот 0.8–4.0 км определяются главным образом аэрозолями, содержащимся в пределах PBL, в котором доминирующую роль играют генерируемые региональными источниками частицы (например, пыль с Аральского бассейна или с Ферганской долины). А диапазон высот от 4.0 до 12.0 км в свободной тропосфере будет характеризовать, в основном, трансграничный и дальний перенос аэрозоля.

## 2. Анализ полученного материала

### 1.1. Повторяемость типов циркуляции с PBL и слоями в FT по годам и сезонам

На рисунке 1 видно, что в целом за 2015 год в 27,5 % слои формируются при юго-западной периферии антициклона (тип 9), в 12,5 % – при предфронтальном положении или теплом секторе циклона (типы 13,13а), в 11,7 % – при малоградиентном поле пониженного давления (тип 12а), в 10,8 % – при западных вторжениях и западном циклоне (типы 10,14) и южной периферии антициклона (тип 9б). Названия типов циркуляции (синоптических процессов) и далее будут приведены по ходу изложения.

При типах 1, 2, 4, 5, 6, 7, 8, 9а, 11, 12 слои наблюдались всего в 0,8–5,8 % случаев, а при верхнеамударьинском циклоне (тип 3) формирование слоев не наблюдалось.

В 2016 г. (рисунок 2) в 27,8 % слои формируются также при юго-западной периферии антициклона (тип 9), в 18,5 % – при западных вторжениях и западном циклоне (типы 10,14), в 16,8 % – при

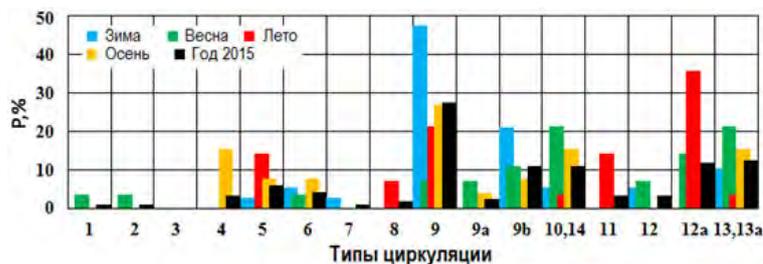


Рисунок 1 – Повторяемости типов циркуляции с PBL и слоями в FT. 2015 г.



Рисунок 2 – Повторяемости типов циркуляции с PBL и слоями в FT. 2016 г.

предфронтальном положении или теплом секторе циклона (типы 13,13а), в 10,8 % – при малоградиентном поле пониженного давления (тип 12а).

При северном вторжении и малоградиентном поле повышенного давления повторяемость составила 7,6–9,4 %. При типах 1, 2, 5, 9а, 9б, 11 слои наблюдались всего в 0,8–3,2 % случаев. При типах 3, 4, 7, 8 слои не наблюдались.

В зимнее время, как в 2015 г., так и в 2016 г. максимум повторяемости наблюдался при юго-западной периферии антициклона (тип 9), при которой слои в свободной тропосфере формируются за счет нисходящих движений воздуха в антициклоне, а PBL – за счет мощных приземных инверсий в антициклональном поле. На втором месте по повторяемости в 2015 г. стоит южная периферия антициклона (тип 9б) – 21,1 %. При этом типе в средней тропосфере в слое 3,0–5,5 км наблюдался перенос мелкомасштабного аэрозоля преимущественно через сектор D.

В 2016 г. на втором месте по повторяемости стоят западное вторжение, западный циклон (типы 10 и 14) – 26,9 %. При этом типе в средней тропосфере наблюдается перенос мелкомасштабного аэрозоля через сектор С. На третьем месте стоят типы 13,13а – 11,6 %, при которых крупномасштабный аэрозоль поступает через сектор А. В 2015 г. повторяемость этих типов составила 10,4 %.

Весной 2015 г. над Центральноазиатским регионом начинает активизироваться циклоническая деятельность. При этом максимум слоев

формируется при западных вторжениях и циклонах (типы 10, 14), приходящих через сектор С, и предфронтальных положениях (типы 13,13а) через сектор А – 21,4 %. В 2016 г. максимум повторяемости слоев наблюдался при юго-западной периферии антициклона – 30 %, при которой воздушные массы переносятся через сектор В.

При западных вторжениях и западных циклонах (типы 10, 14) через сектор С, и предфронтальных положениях (типы 13,13а) через сектор А, повторяемости процессов составили 13,3 и 26,7 % соответственно.

На рисунке 3 в качестве примера приведена временная трансформация распределения аэрозоля в атмосфере 28 марта 2016 г. в виде вертикальных профилей отношения рассеяния и деполаризационного отношения и соответствующие им по времени карты пространственного распределения *NAAPS AOD*.

Видно, что аэрозольное загрязнение охватывало весь Центральноазиатский регион и занимало область высот до 11,0 км. При теплом секторе циклона (тип 13) вынос тепла происходил через сектор А перед выходом южно-каспийского циклона. Высокие значения деполаризационного отношения, наблюдаемые в слоях (0,13–0,18), были обусловлены наличием субмикронных мелкомасштабных частиц и их смеси с пылевыми частицами несферической формы. Данные поляризационных измерений хорошо согласуются с результатами расчета параметра Ангстрема для обратного рассеяния на длинах

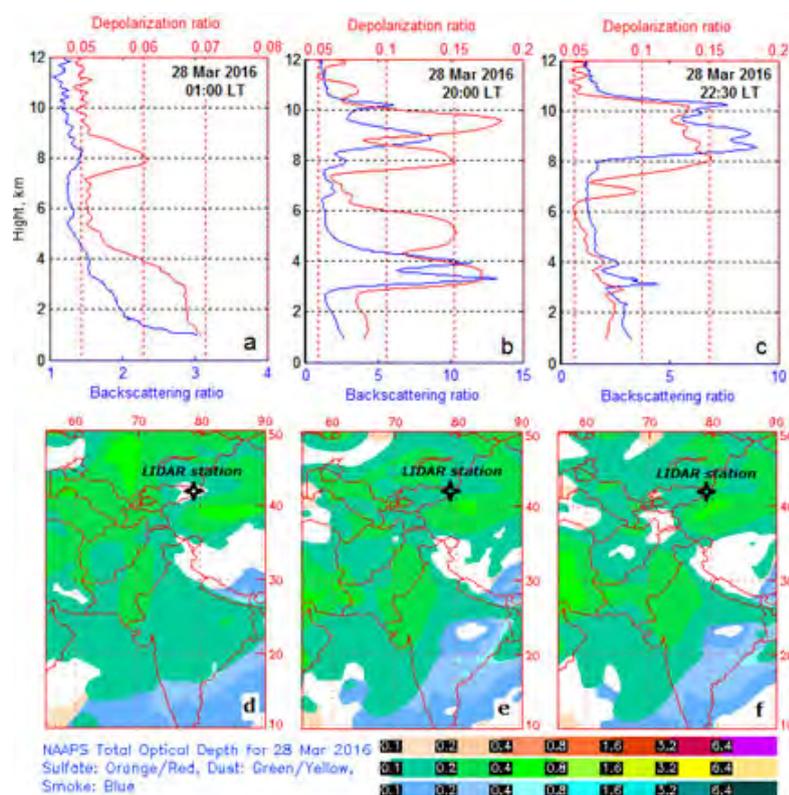


Рисунок 3 – Вертикальные профили отношения обратного аэрозольного рассеяния и деполяризации отношения и соответствующие им карты пространственного распределения NAAPS AOD 28 марта 2016 г.: (a, d) – в 01:00; (b, e) – в 20:00; (c, f) – в 22:30 LT

волн  $\lambda_1 = 532$  нм,  $\lambda_2 = 1064$  нм, значения которого изменялись от 0.09 до 1.56. Аэрозольная оптическая толщина на 532 нм, измеренная 28 марта 2016 г., и усредненная за периоды времени 00:30–01:30; 19:30–20:30 и 22:00–23:00 LT, оценивается значениями: 0.235, 0.699 и 0.540, соответственно.

В период с января по май 2016 г. установлено преобладание аэрозольного загрязнения, содержащего, в основном, субмикронные наномасштабные частицы. При этом величины оптических толщин безоблачной атмосферы оставались в пределах  $AOD_{532} \leq 0.150$ . Наиболее высоким значениям аэрозольной оптической толщи ( $AOD_{532} \geq 0.250$ ) соответствовали низкие значения показателя Ангрстрема ( $A_{532/1064} < 0.5$ ).

Перенос аэрозольного загрязнения за рассмотренный период в пограничном слое и свободной тропосфере осуществлялся преимущественно через секторы В и D (~50 % и ~30 % соответственно). При этом, как правило, при переносах через сектор D наблюдались фоновые уровни аэрозольной нагрузки атмосферы ( $AOD_{532} \leq 0.150$ ). А оптически более плотные воздушные массы, содержащие

частицы пылевого аэрозоля, поступали в регион через сектор А. Слои же аэрозольные в переносимых воздушных массах через сектор В характеризовались широким диапазоном изменения значений  $AOD_{532}$  (0.030–0.800) и  $A_{532/1064}$  (0.3–1.8).

Летом 2015 г. в 35,7 % случаев загрязняющие слои формировались при наиболее повторяющемся летнем типе – малоградиентном поле пониженного давления (тип 12a), воздушные массы при котором переносятся через сектор С. В 21,4 % случаев слои возникали при юго-западной периферии антициклона.

Летом 2016 г. загрязняющие слои формировались при наиболее повторяющихся летних типах – малоградиентном поле пониженного давления (тип 12a) и западных вторжениях и западных циклонах (типы 10, 14) в 25 % случаев каждый воздушные массы при которых переносились через сектор С. Также в 25 % случаев слои возникали при малоградиентном поле повышенного давления (тип 12), воздух при котором перемещался через сектор D.

При малоградиентных полях пониженного и повышенного давления 12 и 12a характерен

конвективный безразличный погодный тип с чередованием восходящих и нисходящих потоков малого масштаба. Вертикальная мощность ВМ при этом не превышает высоты PBL. Вынос аэрозольного загрязнения происходил из региональных источников – в основном из бассейна Аральского моря и из пустыни Такла-Макан. При таких процессах высотный теплый и малоподвижный высотный гребень повышенного давления в средних широтах длительное время препятствует зональному переносу, то есть создает меридиональное направление течений в тропосфере и отклоняет движение воздушных масс от зонального (западно-восточного) направления. Высотный гребень со временем распространяется на север, охватывая все большую территорию, включая весь Центральноазиатский регион. В это время в тропосфере происходит накопление загрязнения.

В целом за летний период 2016 г. в пограничном слое (700 hPa) и свободной тропосфере (500 hPa) перенос аэрозоля происходил с Юго-западного (сектор В, ~60 % и ~40 %, соответственно) и Северного, Северо-западного (сектор D, ~25 % и ~40 %) направлений. Поступление аэрозоля с Южного (сектор А) и Западного (сектор С) направлений имело низкую повторяемость: ~5–10 % в пограничном слое и в свободной тропосфере. Фоновые уровни аэрозольной нагрузки атмосферы ( $AOD_{532} \leq 0.150$ ) наблюдались, как правило, в условиях переноса воздушных масс с направления D.

На протяжении всего периода в свободной тропосфере преобладали относительно высокие значения показателя Ангстрема ( $0.9 < A_{532/1064} < 1.7$ ), что характеризуют аэрозоль, содержащий в основном субмикронную фракцию частиц наномасштаба. При этом величины оптических толщин безоблачной атмосферы не превышали  $AOD_{532} \leq 0.200$ .

Как и в весенний период, наиболее высоким значениям аэрозольной оптической толщи ( $AOD_{532} \geq 0.250$ ), измеренным в условиях присутствия аэрозольных слоев в свободной тропосфере на высотах 5.0–9.0 км, соответствовали низкие значения показателя Ангстрема ( $A_{532/1064} < 0.5$ ).

В пограничном слое атмосферы примерно в 60 % дней измерения значения показателя Ангстрема соответствовали смешанному типу аэрозоля ( $0.6 < A_{532/1064} < 1.2$ ). В остальных случаях доминировали крупнодисперсные частицы. Значения  $A_{532/1064}$  составляющие в области свободной тропосферы 1.5–1.7, соответствуют функции распределения по размерам, в которой доминирует фракция субмикронных наномасштабных частиц.

В осенние периоды 2015–2016 гг., как и в зимние, опять на первое место по повторяемости выходит юго-западная периферия антициклона

(тип 9) – 26,9 и 23,5 % повторяемостей соответственно, типы 10,14 (западные вторжения и западные циклоны) и 13,13а наблюдаются в 15,4 % случаев в 2015 г., а в 2016 г. типы 13,13а (предфронтальные положения) наблюдались в 20,6 % случаев. 15,4 % повторяемость имела в 2015 г. очень редко встречающийся тип 4 – широкий вынос теплого воздуха, когда во всей тропосфере преобладают юго-западные потоки и через сектор В выносятся теплый тропический воздух с переднеазиатских пустынь. Малоградиентное поле пониженного давления (тип 12а) имело повторяемость 14,7 % в 2016 г.

### 1.2. Повторяемость типов циркуляции с PBL и слоями в FT по секторам и сезонам

По повторяемости циркуляционных процессов, при которых формируются слои, по секторам переноса ВМ и сезонам наблюдается определенная закономерность (см. рисунки 4 и 5).

Следует обратить внимание на то, что большинство переносов воздушных масс с мелкомасштабными частицами осуществляется через секторы С (западный перенос) и D (северный, северо-западный перенос) – более чем 60 % повторяемостей в год. При этом через сектор С перенос воздушных масс в 2015 г. достигал максимальных значений летом – 53 %, а в 2016 г. – 44 %, а наибольший вклад в повторяемость вносит синоптический тип 12а – малоградиентное поле пониженного давления.

Весной через этот сектор (С) повторяемость переноса воздушных масс снижалась до 32 % в 2015 и до 41 % в 2016 г., но были максимальными по сравнению с остальными секторами. Наибольший вклад в повторяемость вносили западное вторжение и западный циклон (типы 10 и 14). Зимой и осенью повторяемость составила всего 20–22 % в 2015 г. и 26–31 % в 2016 г., что меньше, чем через секторы В и D.

Перенос воздушных масс через сектор D достигает максимальных значений осенью – 39 %, зимой, весной и летом – 25–29 % в 2015 г., а в 2016 г. летом и осенью – 45–47 %, весной – 26 %, а зимой всего 6 % – минимальная повторяемость, чем через остальные секторы.

Повторяемость переноса воздушных масс через сектор В имеет максимальные значения зимой – 36 % в 2015 г. и 50 % – в 2016 г. за счет вклада таких синоптических процессов как южно-каспийский и мургабский циклоны и юго-западная периферия антициклона (типы 1, 2, 9). Минимальная повторяемость наблюдалась летом – 13 % в 2015 г., а в 2016 г. летом и осенью – 6–13 %.

Через сектор А повторяемости переноса минимальны во все сезоны года по сравнению с остальными секторами. Минимум повторяемости

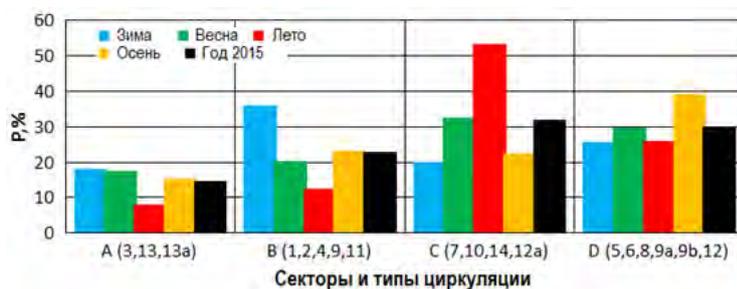


Рисунок 4 – Повторяемости типов циркуляции со слоями по секторам и сезонам. 2015 г.



Рисунок 5 – Повторяемости типов циркуляции со слоями по секторам и сезонам. 2016 г.

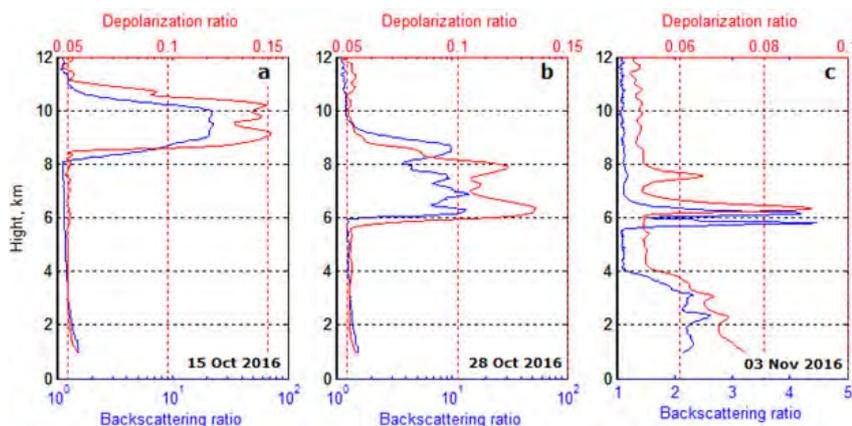


Рисунок 6 – Вертикальные распределения отношения обратного аэрозольного рассеяния и деполаризационного отношения: (а) – 15 октября; (б) – 28 октября; (с) – 03 ноября 2016 г.

отмечается летом – 8 % в 2015 г. и 4 % в 2016 г., зимой, весной и осенью повторяемость составляет 15–18 % и 12–13 % соответственно в 2015 и 2016 г.

В качестве примера на рисунке 6 показаны высотные распределения отношения обратного аэрозольного рассеяния  $R(z)$  и деполаризационного отношения  $D(z)$  на длине волны 532 нм, измеренные 15 октября, 28 октября и 03 ноября 2016 г.

Зондирование было проведено 15 и 28 октября 2016 г. при юго-западной периферии антициклона (тип 9), а 3 ноября – при предфронтальном

положением (тип 13) перед западным вторжением (тип 10).

Вертикальные профили  $R(z)$  и  $D(z)$ , восстановленные по данным зондирования 03 ноября 2016 г. (рисунок 6, с), иллюстрируют перенос из пустыни Такла-Макан. Значения аэрозольной оптической толщи, вычисленные с использованием профилей обратного рассеяния, измеренных 03 ноября 2016 г., и рассчитанных средних значений лидарного отношения  $LR = 37$  ср., составляли 0.178 (0.8–4.0 км); 0.108 (4.0–12.0 км) и, соответственно,  $AOD_{532} = 0.286$  (0.8–12.0 км). Средние значения

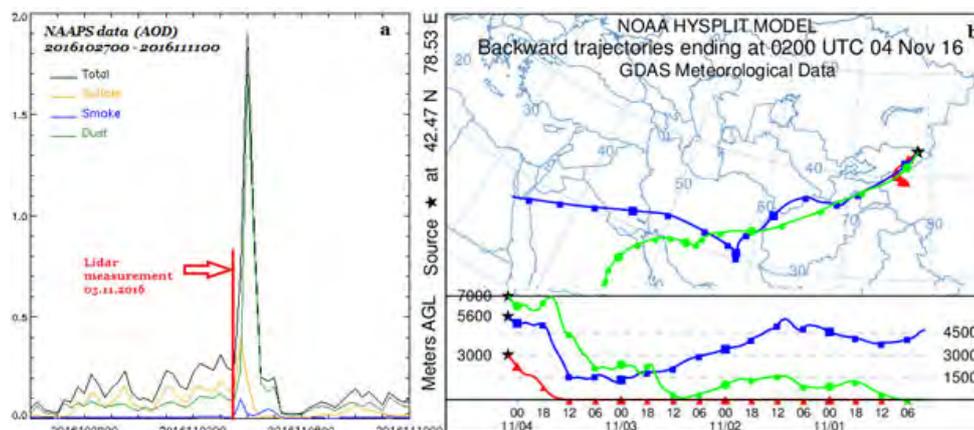


Рисунок 7 – Вариации аэрозольной оптической толщи в регионе по данным модели NAAPS с 27 октября по 11 ноября 2016 г. (а). Обратные траектории перемещения воздушных масс 04 ноября 2016 г. для высот 3000, 5600 и 7000 м (б)

показателя Ангстрема ( $A_{532/1064}$ ) в пограничном слое и свободной тропосфере были соответственно равны 0.44 и 0.56.

Относительно высокие значения деполяризации отношения ( $D = 0.07-0.09$ ), наблюдаемые в слоях с высоким обратным рассеянием ( $z < 3.0$  км и  $z = 6.1$  км), обусловлены влиянием пылевых частиц. Что подтверждается приведенными на рисунке 7,а временными рядами аэрозольной оптической толщи для различных компонентов атмосферы (NAAPS) для периода с 27 октября по 11 ноября 2016 г.

Существенное увеличение NAAPS AOD наблюдалось 03–04 ноября 2016 г. Результаты моделирования обратных траекторий движения воздушных масс (HYSPLIT) для высот 3000, 5600 и 7000 м показаны на рисунке 7,б. Согласно этим данным, 03–04 ноября 2016 г. перенос пылевого аэрозоля в пограничном слое атмосферы происходил из Северо-Западного Китая (пустыня Такла-Макан).

Таким образом, в осенний период 2016 г. в нижней (700 hPa) и свободной тропосфере (500 hPa) перенос аэрозоля происходил с Юго-западного (сектор B, ~60 % и ~50 %, соответственно) и Северного, Северо-западного (сектор D, ~15 % и ~40 %) направлений. Поступление аэрозоля с Западного (сектор C) направления имело достаточно высокую по отношению к предыдущим периодам повторяемость: ~25% и 15 % в PBL и FT, соответственно. Примерно в 90 % случаев лидарные измерения были проведены при близких к фоновым уровням аэрозольных нагрузках в пограничном слое ( $AOD_{532} \leq 0.200$ ) при переносах воздушных масс через все секторы. При этом параметр Ангстрема изменялся в широком диапазоне

( $0.2 < A_{532/1064} < 1.8$ ), то есть период характеризовался значительной изменчивостью дисперсного состава аэрозольных частиц. Так, в свободной тропосфере при переносах воздушных масс через секторы B и D значения  $A_{532/1064}$  изменялись в пределах от -0.5 до 0.7, что является признаком преобладающего содержания в атмосфере крупных частиц. Значительное влияние на состояние пограничного слоя ( $AOD_{532} = 0.850$ ) отмечено при переносе воздушной массой через сектор B смешанного состава аэрозоля ( $A_{532/1064} = 0.65$ ), в котором также преобладала крупнодисперсная фракция.

### 2.3. Повторяемость типов погоды с PBL и слоями по сезонам

Гистограммы повторяемостей типов погоды с PBL и слоями по сезонам приведены на рисунке 8. Видно, что большинство слоев отмечено при антициклонических (CA) – 27,5 и 27,8 %, адвективного южного (AS) – 19,2 и 18,9 %, адвективного западного (AW) – 17,5 и 19,2 % типах погоды соответственно в 2015 и 2016 годах.

При этом следует заметить, что появление слоев по сезонам хорошо коррелирует с типами погоды. Так, например, в 2015 г. зимой повторяемость CA составляет 47,4 %, а смешанный тип 21,2 %, которые в основном складываются из зимних синоптических процессов, а летом слою наблюдались в основном при летних типах – при нейтральном типе – 35,7 % и антициклоническом типе – 21,4 %.

Авторы сочли необходимым рассмотреть отдельно и случаи, когда наблюдались только PBL без слоев в свободной тропосфере (рисунок 9). Таких случаев в 2015 г. было 31, а в 2016 г. – 29, то есть половина от всех дней лидарного зондирования в каждом году.

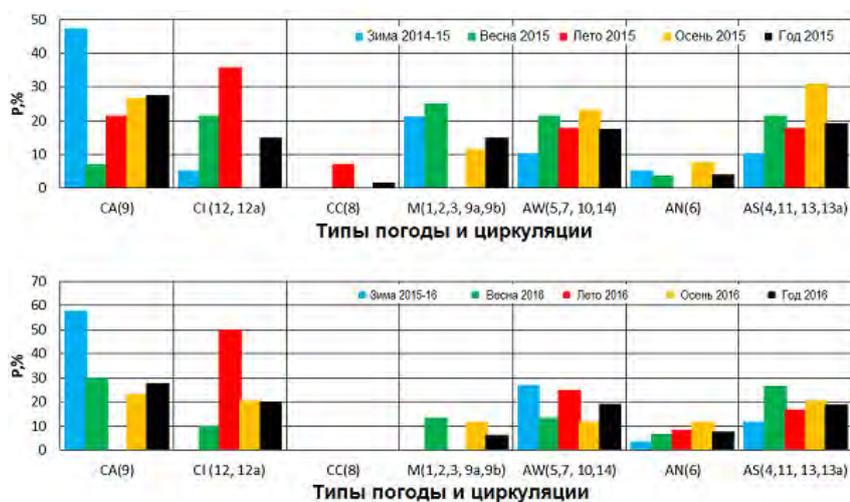


Рисунок 8 – Повторяемости типов погоды с PBL и слоями по сезонам. 2015–2016 гг.

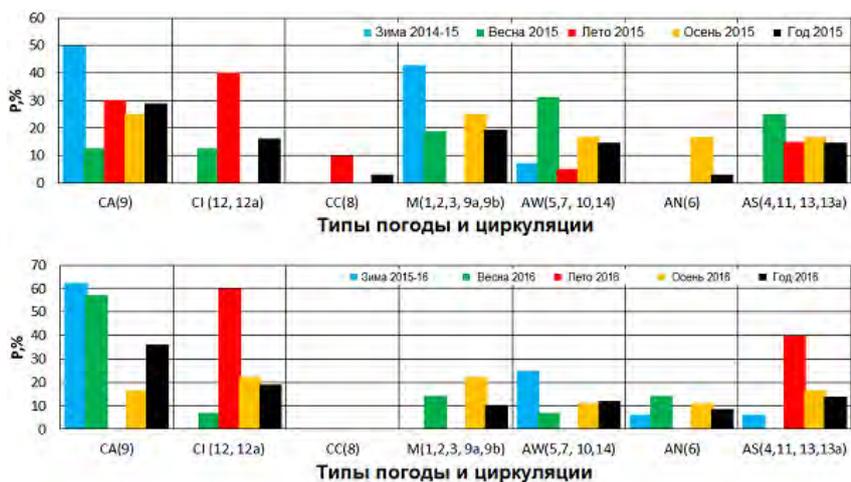


Рисунок 9 – Повторяемости типов погоды только с PBL по сезонам. 2015–2016 гг.

Как и следовало ожидать, основным типом погоды, при котором наблюдается только пограничный слой, является антициклонический тип, максимум повторяемости которого приходится на зимний период – 50 % в 2015 г. и 62,5 % – в 2016 г. Весной максимум повторяемости приходится на адвективный западный тип – 31,2 % в 2015 г., повторяемость остальных типов составила 12,5–25 %, а в 2016 г. весной максимум наблюдался также при антициклоническом типе – 57,2 %, повторяемость остальных типов составила 7,1–14,3 %. Летом 2015 г. слои возникали при нейтральном типе – 40%, а осенью, как и зимой при смешанном и антициклоническом типе – 25,1 %. В 2016 г. летом и осенью слои возникали при нейтральном типе – 60 и 22,2 % соответственно.

Таким образом, основным типом погоды, при котором наблюдается только пограничный слой без приподнятых слоев, является антициклонический, а также нейтральный, адвективный южный и адвективный западный типы погоды.

В заключение этой части статьи на рисунке 10 приведено изменение высоты пограничного слоя, оптической толщи ( $AOD_{layer}$ ) и верхней границы ( $H_{layer}$ ) аэрозольных слоев в свободной тропосфере за 2015–2017 гг.

Видно, что среднее значение высоты пограничного слоя атмосферы составило  $2.9 \pm 0.6$  км, а перенос аэрозоля в свободной тропосфере осуществлялся преимущественно в средней тропосфере в области высот от  $5.7 \pm 2.1$  до  $7.8 \pm 2.2$  км. Оптическая толщина аэрозольных слоев изменялась

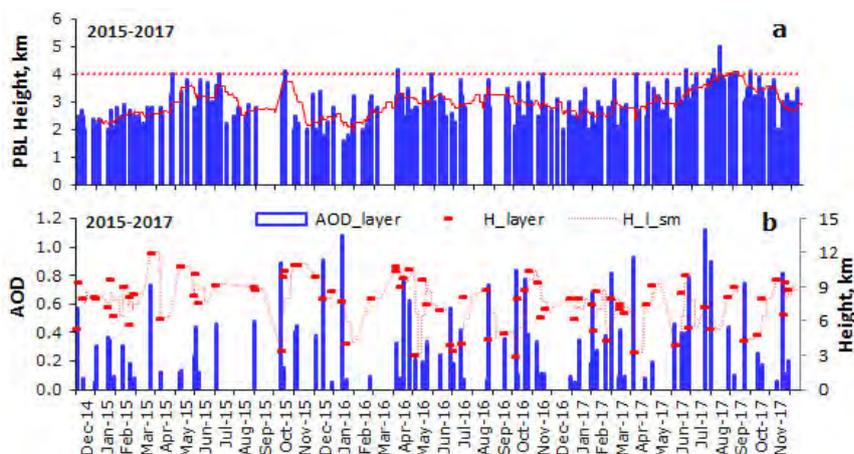


Рисунок 10 – Изменения высоты пограничного слоя (а), оптической толщи и верхней границы аэрозольных слоев в свободной тропосфере (б) по данным лидарных измерений. 2015–2017 гг.

в рассматриваемый период от 0.060 до 1.150 (субмикронные наномасштабные частицы и их смесь), а среднее значение *AOD* слоя равно  $0.350 \pm 0.270$  (смесь наномасштабных частиц).

Выводы. Установлено, что в среднем в году большинство переносов воздушных масс, в которых наблюдаются слои с мелкомасштабными частицами, осуществляется через секторы С (западный перенос) при малоградиентном поле пониженного давления и западном вторжении, западном циклоне и D (северный, северо-западный перенос) при южной периферии антициклона.

Весной максимум слоев формируется при западных вторжениях и циклонах, приходящих через сектор С, предфронтальных положениях (сектор А – южный перенос), а также при юго-западной периферии антициклона, при которой воздушные массы переносятся в регион через сектор В (юго-западный перенос).

В зимнее время максимум повторяемости слоев наблюдается при юго-западной периферии антициклона, при которой слои в свободной тропосфере формируются за счет нисходящих движений воздуха в антициклоне, а пограничный слой – за счет мощных приземных инверсий в антициклональном поле. На втором месте по повторяемости формирования слоев стоит южная периферия антициклона. При этом типе в средней тропосфере в слое 3,0–5,5 км наблюдается перенос мелкомасштабного аэрозоля преимущественно через сектор D. А при западном вторжении, западном циклоне в средней тропосфере наблюдается перенос мелкомасштабного аэрозоля через сектор С. В это время года при предфронтальном положении или теплом

секторе циклона крупномасштабный аэрозоль поступает через сектор А.

В летнее время чаще всего слои формируются при наиболее повторяющемся летнем типе – малоградиентном поле пониженного давления (сектор С). Слои возникали и при юго-западной периферии антициклона и при западных вторжениях и западных циклонах (сектор С), а также и при малоградиентном поле повышенного давления, воздух при котором перемещался через сектор D.

В осенние периоды 2015–2016 гг., как и в зимние, чаще всего слои наблюдались при юго-западной периферии антициклона, западных вторжениях и западных циклонах и предфронтальных положениях. Слои также наблюдались и при очень редко встречающемся типе – широком выносе теплого воздуха, когда во всей тропосфере преобладают юго-западные потоки и через сектор В выносятся теплый тропический воздух с переднеазиатских пустынь, и редко при малоградиентном поле пониженного давления. Выявлено, что большинство слоев в рассматриваемые годы наблюдалось при антициклонических (CA), адвективном южном (AS) и адвективном западном (AW) типах погоды.

При малоградиентных полях пониженного и повышенного давления характерен конвективный безразличный погодный тип с чередованием восходящих и нисходящих потоков малого масштаба. Вертикальная мощность ВМ при этом не превышает высоты PBL. Вынос аэрозольного загрязнения происходил из региональных источников – в основном из бассейна Аральского моря и из пустыни Такла-Макан. При таких процессах высотный теплый и малоподвижный высотный

гребень повышенного давления в средних широтах длительное время препятствует зональному переносу, то есть создает меридиональное направление течений в тропосфере и отклоняет движение воздушных масс от зонального (западно-восточного) направления. Высотный гребень со временем распространяется на север, охватывая все большую территорию, включая весь Центральноазиатский регион. В это время в тропосфере происходит накопление загрязнения.

Установлено также, что основным типом погоды, при котором наблюдается только пограничный слой без приподнятых слоев, является антициклонический, а также нейтральный, адвективный южный и адвективный западный типы погоды.

Работа выполнена в рамках проекта #KR-2105 Международного научно-технического Центра (декабрь 2015 – февраль 2018 гг.). Авторы благодарны поддержке в рамках исследовательской темы «Вселенная» ИКИ РАН и всем исполнителям указанного проекта.

#### *Литература*

1. GAW Report No.178. Plan for the implementation of the GAW Aerosol Lidar Observation Network GALION. Hamburg, Germany, 27–29 March 2007.
2. Адушкин В.В. Радиационный форсинг аэрозолей Центральной Азии / В.В. Адушкин, Б.Б. Чен, С.И. Попель, П.Г. Вайдлер, С.А. Имашев, Т.В. Лосева, Л.Г. Свердлик, Ф. Фридрих // Доклады РАН. 2015. Т. 460. № 4. С. 459–463.