

УДК 551.501.42

## Результаты исследования внутригодовой изменчивости наполнения стратосферы фоновым аэрозолем над Томском по данным лидарных измерений в 2011–2015 гг.

В.Н. Маричев, Д.А. Бочковский\*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 3.03.2017 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований изменчивости вертикально-временной структуры аэрозоля в стратосфере над Томском на лидарном комплексе станции высотного зондирования атмосферы ИОА СО РАН за период 2011–2015 гг. Как и раньше, акцент сделан на изучении возмущений аэрозольной компоненты в стратосфере, вызываемых извержениями вулканов, и выявлении особенностей внутригодовой изменчивости содержания стратосферного аэрозоля. Указанный период, за исключением второй половины 2011 г. (появление над Томском эруптивных слоев от извержения вулкана Гримсвотн), характеризуется практически полным отсутствием вулканической активности, приводящей к образованию стратосферного аэрозоля и его переносу в сторону Томска, в связи с чем появилась возможность для изучения поведения вертикальной структуры фонового аэрозоля в стратосфере в течение 2011–2015 гг. По анализу полученных лидарных данных выявлена устойчивая тенденция аэрозольного наполнения нижней стратосферы в холодные периоды года с его максимальным содержанием в декабре–январе и почти полным его отсутствием во всем слое стратосферы в теплые периоды.

*Ключевые слова:* лидар, стратосферный фоновый аэрозоль; lidar, stratospheric background aerosol.

### Введение

Лидарные исследования вертикальной структуры аэрозоля над Томском, проводимые на малой станции высотного зондирования атмосферы ИОА СО РАН (МСВЗА) на регулярной основе, были начаты в 1986 г. и продолжаются с некоторыми перерывами по настоящее время. Накоплены многолетние (более 30 лет) ряды наблюдений за вертикальной стратификацией аэрозоля в стратосфере умеренных широт, которые, в силу расположения единственного пункта зондирования в континентальной зоне Сибири, следует отнести к уникальным. За этот период получены следующие важные и интересные результаты. Выявлены неустойчивость аэрозольной стратификации весной и ее стабилизация летом; обнаружено образование кратковременных рассеивающих слоев на высотах 22–25 и 30–40 км, коррелирующих по времени с возникновением сильных магнитных бурь [1–4]. Во время поствулканического возмущения стратосферы, вызванного сильнейшим извержением вулкана Пинатубо в конце прошлого столетия (1991–1995 гг.), была изучена динамика переноса и изменчивости эруптивного аэрозольного облака

над Томском; даны интегральные и дифференциальные оценки аэрозольного наполнения стратосферы [5, 6]. На основе анализа рядов наблюдений за 1996–2000 гг. установлено влияние глобальных геофизических процессов на изменчивость вертикальной структуры аэрозоля [7].

В начале XXI в. в исследованиях стратосферного аэрозоля был сделан перерыв, вызванной модернизацией лидарного комплекса МСВЗА, после окончания которой в 2008 г. измерения в мониторинговом режиме возобновились. Следует отметить, что в результате модернизации значительно улучшились качественные и количественные характеристики измерений параметров аэрозоля, включая повышение точности и потолка зондирования до высот мезосферы.

Результаты наблюдений, полученные за 2008–2009 гг. на настоящем лидарном комплексе, представлены в [8]. Для данного периода характерным являлась активная вулканическая деятельность на дальневосточных островах Тихого океана, приводящая к возмущениям аэрозольной компоненты стратосферы. В 2008 г. на гряде Алеутских о-вов произошло извержение двух вулканов: Окмок, 12 июля, и Касаточи, 8 августа, с высотой выброса 15 и 13–15 км соответственно. 12 июня 2009 г. произошло самое мощное извержение вулкана Пик Сарычева, расположенного на острове Матуа и относящегося

\* Валерий Николаевич Маричев (marichev@iao.ru);  
Дмитрий Андреевич Бочковский (moto@iao.ru).

к гряде Курильских о-вов. За неделю наблюдалось 11 гигантских взрывов, при этом столбы пепла поднимались на высоту от 13 до 16 км. Появление образовавшихся в стратосфере аэрозольных слоев от указанных вулканов неоднократно регистрировалось над Томском. С описанием некоторых особенностей структуры и динамики их переноса, включая вулканический аэрозоль от последующих извержений вулканов Эйяфьятлайокудль и Гримсвотн (Исландия) можно ознакомиться в [8–13].

Среди известных зарубежных работ по исследованию изменчивости аэрозольного наполнения стратосферы следует особо выделить работу ученых обсерватории Гармиш-Партенкирхена (Германия) [14], где обобщены результаты лидарных наблюдений за 35 лет, включая период наполнения стратосферы фоновым аэрозолем (1997–2006 гг.) и период активизации вулканической деятельности (2006–2011 гг.).

### Измерительная техника, условия проведения измерений, параметр стратификации аэрозоля, количество наблюдений по годам

Напоминаем основные технические характеристики лидарного комплекса, на котором проводились измерения параметров аэрозольной компоненты.

Передачиком лидара являлся АИГ:Nd<sup>3+</sup>-лазер LS-2137U-UV3 с излучением на длине волны 532 нм, энергией импульса 400 мДж и частотой генерации 10 Гц. Обратное-рассеянное излучение поступало на телескоп системы Ньютона с приемным зеркалом 1 м и фокусным расстоянием 2 м. Прием световых сигналов проводился по двум каналам с разделением в соотношении 10 и 90% в целях уменьшения динамического диапазона (ближняя и дальняя зоны приема). Разделенные оптические сигналы поступали на фотосенсорные модули (фирма Hamamatsu), где происходило их преобразование в электрические сигналы в режиме счета фотонов. Далее производилась их регистрация в счетчике фотонов с дальнейшей передачей данных в компьютер для сбора и накопления.

Зондирование осуществляется в ночное время суток; диапазон высот зондирования — от 10 до 60 км.

Используемое вертикальное разрешение измерения сигнала (длина строба) составляет 192 м (при этом шаг по стробу равен 12 м). Единичная серия измерений длится 10 мин, а среднее время измерений за ночь — около 2 ч.

В качестве параметра, описывающего вертикальную стратификацию аэрозоля, используется оптическая характеристика  $R(H)$  — отношение аэрозольного рассеяния ( $H$  — текущая высота). По определению,  $R(H)$  — отношение суммы коэффициентов аэрозольного и молекулярного обратного рассеяния к коэффициенту молекулярного обратного рассеяния. Для примера, выполнение условия  $R(H) = 1$  означает отсутствие на данных высотах аэрозоля, и наоборот, там, где  $R(H) \geq 1$ , появляется аэрозоль. По значению  $R(H)$  определяется вклад аэрозольного рассеяния в общее, и, косвенным путем, оценивается величина аэрозольной компоненты.

Для анализа результатов лидарных наблюдений за период 2011–2015 гг. в качестве первичной информации использовался массив измерений из 476 суммарных сигналов, накопленных за отдельные ночи, т.е. данные за 476 ночей: 142 в 2011 г., 115 в 2012 г., 79 в 2013 г., 67 в 2014 г. и 73 в 2015 г.

### Результаты наблюдений и их обсуждение

#### Наблюдения за 2011 г.

Зимой 2011 г. вертикальная стратификация аэрозоля напоминала ситуацию в 2010 г. Однако в 2011 г. аэрозоль в стратосфере продолжал наблюдаться в марте и апреле и исчез лишь в мае (рис. 1). Причем аэрозольное наполнение в марте распространялось до высот 40 км и по интенсивности превосходило февральское, а наполнение за апрель было сравнимо с последним.

Дальнейшие наблюдения в 2011 г. осуществлялись в условиях возмущения аэрозольной компоненты в стратосфере, вызванного извержениями вулканов Гримсвотн (Юго-Восточная Исландия) и Набро (граница Эретерии и Эфиопии), начавшимися 21 мая и 14 июня соответственно. Появление аэрозольного вулканического слоя на высоте около 12 км было обнаружено 1 июля по лидарным наблюдениям.

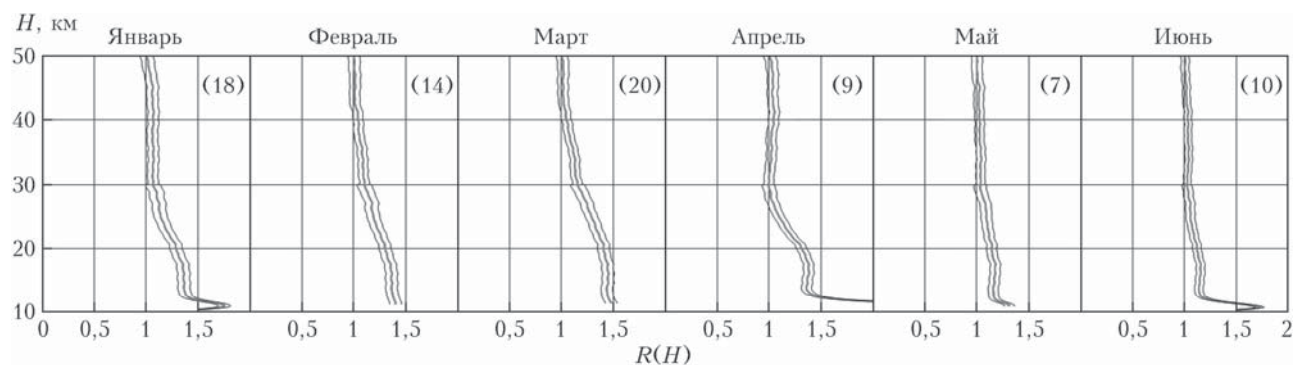


Рис. 1. Типичное наполнение аэрозолем стратосферы в первое полугодие 2011 г. На всех рисунках средняя кривая — значение  $R(H)$ , крайние кривые — среднеквадратичное отклонение; в скобках указано количество профилей за месяц

Впоследствии в течение всего месяца аэрозольные слои различной интенсивности регистрировались на высотах 15 км (6 июля), 17 км (14 июля), 15 и 17 км (15 июля), 15 км (22 и 23 июля), 16 км (25 июля) (рис. 2). Особенно четко выделялся тонкий слой 6 и 22 июля с отношениями аэрозольного рассеяния  $R = 2$  и 1,8, тогда как для других отмеченных случаев  $R = 1,2-1,5$ .

Интересное событие наблюдения серебристых облаков отражено на рис. 3. Это был второй случай их появления над Томском в 2011 г., зарегистрированный в лидарных наблюдениях 4 июля. Из рис. 3, где показаны лидарные сигналы с сериями накоплений по 10 мин, видно, что серебристые облака устойчиво локализируются на высоте 80 км, а их толщина изменяется от 2 до 3 км. Ранее, в 2008 г., серебристые облака в лидарных наблюдениях отмечались над Томском постоянно, с июня по сентябрь. Они имели два максимума аэрозольного рассеяния, расположенных на высотах около 78 и 88 км.

Поведение вертикального распределения аэрозоля, наблюдаемого в последующие месяцы 2011 г. (август–декабрь), приведено на рис. 4.

В августе формирование вертикальной стратификации аэрозоля продолжалось под влиянием переноса вулканического шлейфа. В первой половине месяца отмечалось аэрозольное наполнение в нижней части стратосферы до высот 25 км. Максимум отношения рассеяния превышал 1,4 и находился на уровне около 15 км. Минимальное аэрозольное наполнение на рис. 4 показано кривой 1. Во второй половине месяца происходили значительное возрастание аэрозольной компоненты до значений  $R = 1,7-1,9$  (23 и 24 августа, кривые 2, 3) на уровне 15 км

и увеличение толщины аэрозольного слоя до высоты 40 км.

В сентябре наблюдалось заметное увеличение содержания вулканического аэрозоля в нижней половине стратосферы до значений  $R > 4$  на высоте около 12 км (5 и 16 сентября, кривые 4, 5). Отмечалась выраженная временная динамика аэрозольного наполнения: от распространения аэрозольной компоненты до высот 35 км и ее полного отсутствия в интервале 20–50 км. Основное содержание аэрозоля смещалось вниз. Почти в половине случаев наблюдалась двух- или трехслойная структура. Минимальное аэрозольное наполнение регистрировалось в конце месяца (28 сентября, кривая 6).

В октябре аэрозольное наполнение стратосферы несколько уменьшилось. Четко прослеживался интервал распространения аэрозоля в стратосфере до высот 30 км; выше аэрозоль практически отсутствовал. Динамика вертикальной структуры аэрозоля уменьшилась до вариаций  $R(H)$  в пределах 1,4–1,8 на уровне около 12 км. Минимальное аэрозольное наполнение наблюдалось в начале месяца (1 октября, кривая 7), максимальное – в конце второй декады (16, 17 октября, кривые 8, 9). Отмечались слоистая структура с пиками рассеяния на высотах 11, 15 и 17 км и пик рассеяния внизу, с  $R > 2,2$  на высоте около 12 км.

Для ноября 2011 г. характерна сильная динамика аэрозольной стратификации нижней стратосферы. По-видимому, она связана с появлением разрывностей в переносимом эруптивном облаке. Так, если 22 ноября (кривая 12) отмечалось слабое аэрозольное наполнение в интервале высот 10–25 км, то 8 и 15 ноября (кривые 10, 11) произошло его резкое

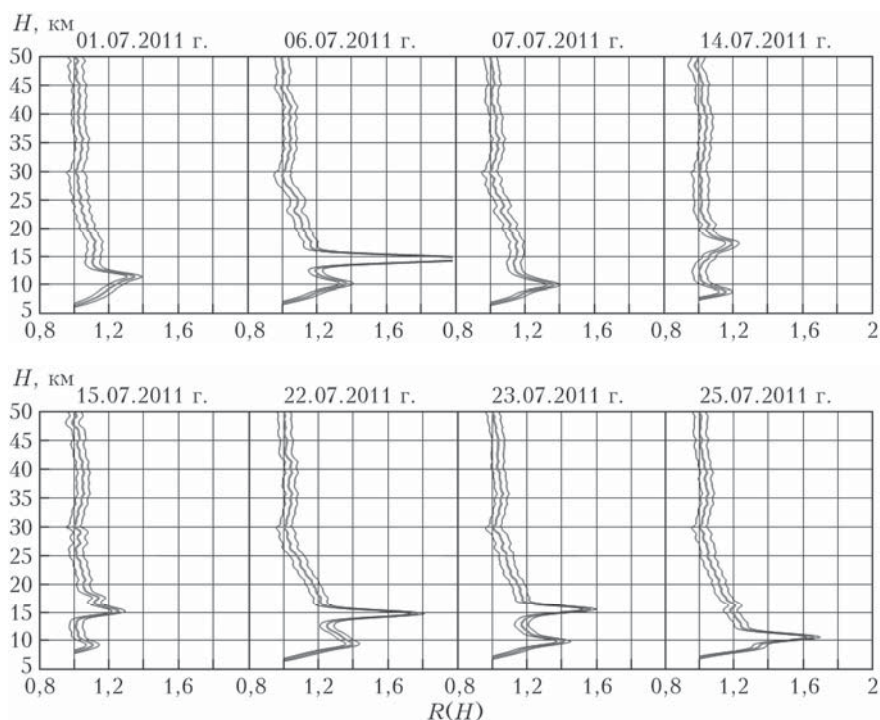


Рис. 2. Вертикальная структура аэрозоля в июле 2011 г.

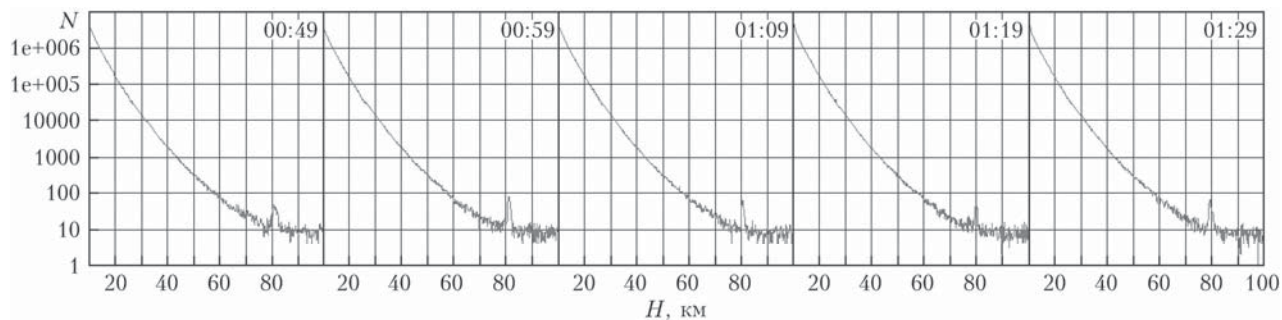


Рис. 3. Лидарные наблюдения серебристых облаков над Томском 4.07.2011 г. По оси абсцисс отложена высота, по оси ординат – лидарный сигнал  $N$  в количестве одноэлектронных импульсов. Приведено местное время наблюдений

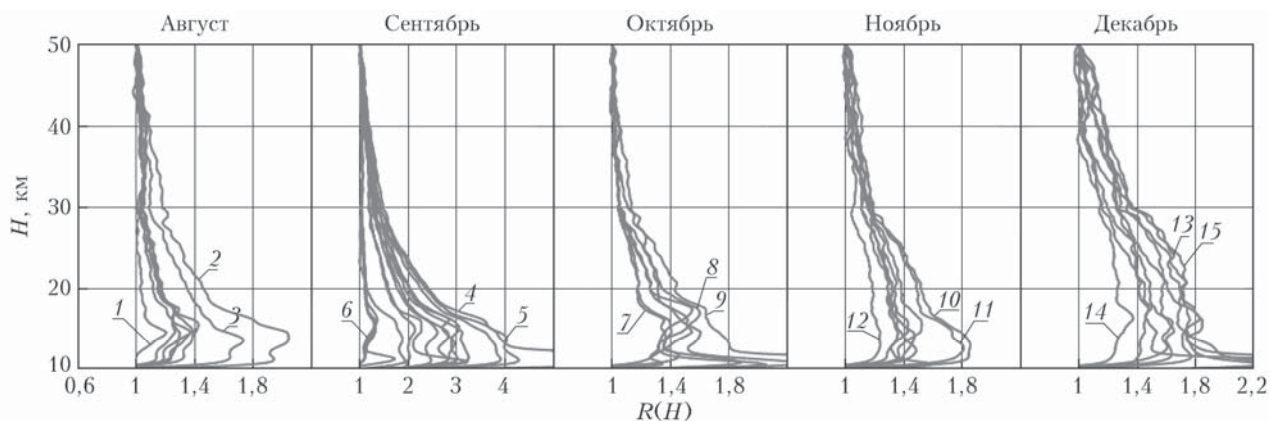


Рис. 4. Динамика вертикальной стратификации вулканического аэрозоля над Томском в августе–декабре 2011 г. На месте кривых  $R(H)$ , представленных по месяцам, цифрами обозначены кривые, соответствующие датам наблюдений с минимальным и максимальным аэрозольным наполнением стратосферы

возрастание как по величине – до  $R = 1,8$  на высоте 12,5 км, так и по протяженности – до 35 км. В 20-х числах интервал распространения аэрозольной компоненты сохраняется и даже увеличивается до высот около 40 км, а интегральное содержание аэрозоля несколько уменьшается.

В декабре аэрозольная компонента заполнила практически всю стратосферу, и интегральное содержание аэрозоля там заметно возросло (18, 22 и 29 декабря, кривые 13–15). Если сравнивать аэрозольное наполнение стратосферы за декабрь 2010 и 2011 гг., то заметно существенное увеличение содержания аэрозоля в 2011 г. В целом картина поведения аэрозольной компоненты в декабре напоминает заполнение стратосферы аэрозолем фоновое происхождения, т.е. можно предположить, что к концу года аэрозольное возмущение от извержений вулканов Гримсвотн и Набро закончилось. Данный факт подтверждается отсутствием слоистой структуры.

### Наблюдения за 2012 г.

Зимой 2012 г. выявлена сильная динамика в стратификации аэрозоля по сравнению с двумя предыдущими годами. Особенно неустойчивая структура наблюдалась в январе (рис. 5), когда в первой половине месяца аэрозольное наполнение распространялось до уровня 35 км (кривые 1, 2), который со вре-

менем опустился до 25 км, с общим монотонным убыванием по высоте, что в целом соответствовало наблюдениям предыдущих зим. Однако в третьей декаде января аэрозоль в нижней стратосфере неожиданно исчез и проявлялся лишь в виде слабых протяженных слоев выше 25 км (кривая 3).

В течение февраля также отмечались заметные изменения стратификации аэрозоля: в первой декаде наблюдался протяженный аэрозольный слой от 10 до 45 км, особенно заметный 16 февраля (кривая 4); период 15–17 февраля характеризовался слоем от 15 до 45 км, напоминающим аэрозольное наполнение 2010–2011 гг.; 19–23 февраля аэрозоль в стратосфере практически отсутствовал (кривая 5); в конце месяца произошел переход к двухслойной структуре с максимумами на высотах 20 и 35 км.

Обнаружено принципиальное отличие в поведении стратификации аэрозоля в стратосфере в целом зимой 2012 г., выразившееся в его сильной динамике и неустойчивости вплоть до практически полного исчезновения аэрозоля в стратосфере, что ранее (2010–2011 гг.) не наблюдалось.

В марте присутствие аэрозоля сохранялось в нижней стратосфере, до высот не более 30 км. Максимальное значение отношения рассеяния  $R$  составляло 1,2 на высотах 20–25 км (кривая 6) и в зависимости от дат наблюдений уменьшалось до 1,05.

В апреле содержание аэрозоля во всем слое стратосферы значительно сократилось и в мае–сентябре

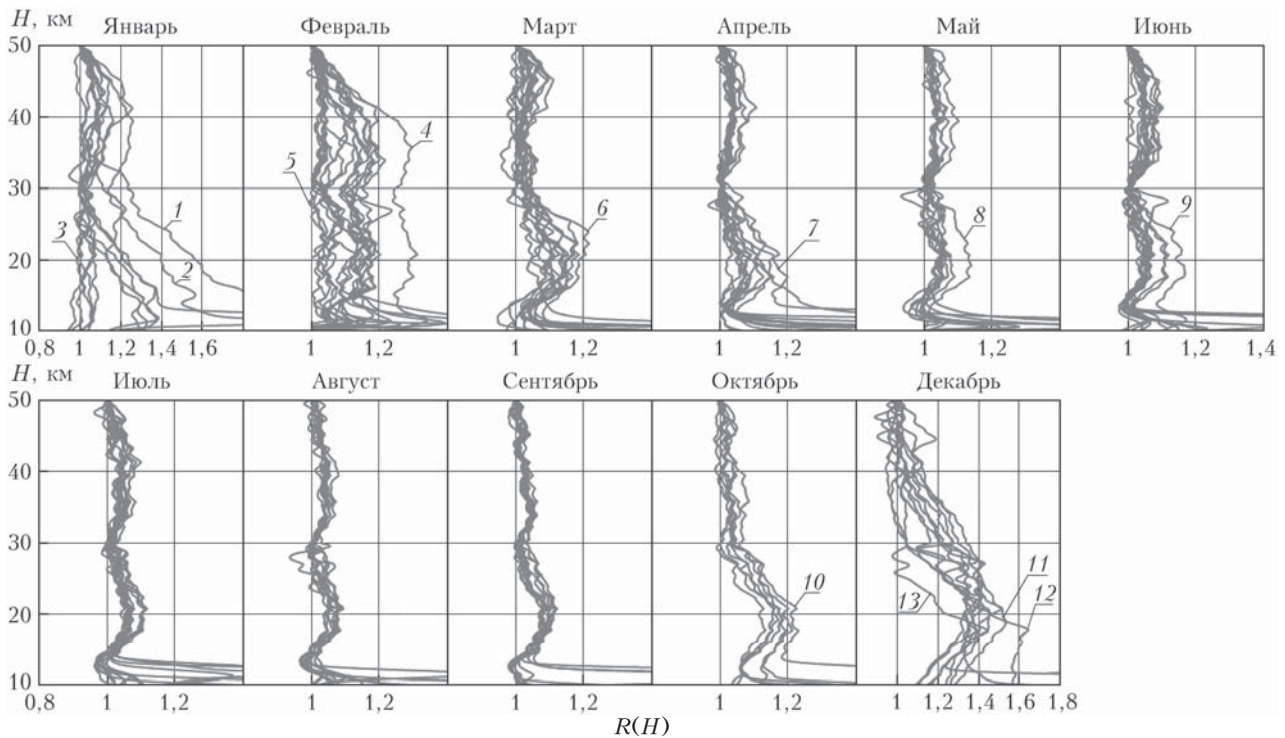


Рис. 5. Динамика вертикальной стратификации аэрозоля над Томском в 2012 г.

аэрозоль отсутствовал в подавляющем количестве наблюдений (14 апреля, кривая 7). Есть эпизодические исключения с появлением слабых аэрозольных слоев в мае и июне (3 мая, 9 июня, кривые 8, 9). В октябре содержание аэрозоля в нижней стратосфере начало расти (кривая 10). В ноябре из-за облачности измерения не проводились. В декабре проявилась сильная динамика в стратификации аэрозоля и резко возросла аэрозольная компонента (17, 25, 26 декабря, кривые 11–13).

### Наблюдения за 2013 г.

Результаты лидарных измерений вертикальной структуры стратосферного аэрозоля в 2013 г. приведены на рис. 6. Динамика вертикальной структуры аэрозольного наполнения в данный период, согласно приведенным графикам, значительно отличалась от предыдущих двух лет. Так, в первой половине ян-

варя отмечалась некая двугорбая структура вертикального распределения аэрозоля с максимумами на высотах около 15 и 35–40 км, которая к концу месяца «размывалась». В отдельных случаях наблюдалось очень высокое содержание аэрозоля в нижней стратосфере (1 января, кривая 1) и в протяженном слое от 10 до 40 км (27 января, кривая 3). Аэрозольное наполнение было минимальным 20 января (кривая 2).

В течение февраля регистрировалось высокое содержание аэрозоля в протяженном слое от 15 до 50 км с монотонным убыванием по высоте. В слое 15–20 км отношение рассеяния  $R$  достигало высоких значений 1,4. В целом аэрозольное наполнение стратосферы заметно превышало январское (кривые 4–6).

Неожиданным оказалось появление аэрозольной компоненты с сильной динамикой в нижней стратосфере в первой половине апреля (2, 4 и 26 апреля,

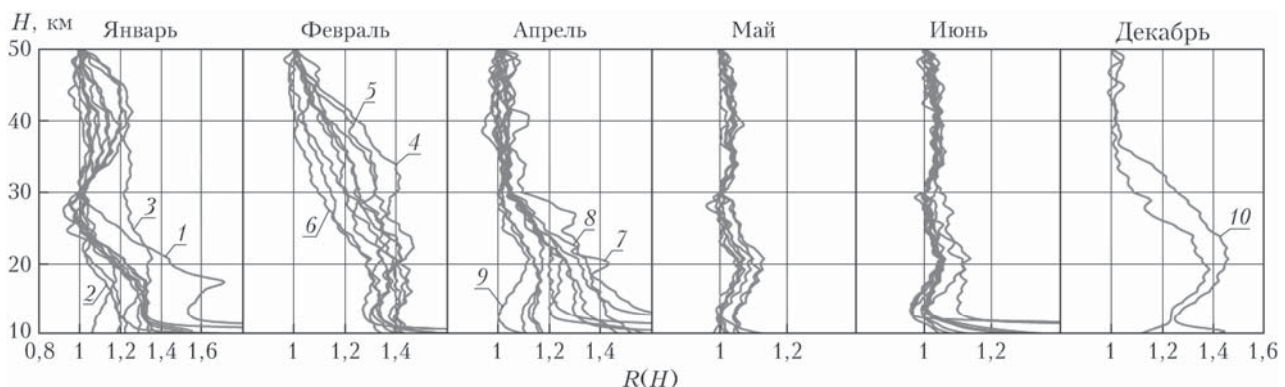


Рис. 6. Динамика вертикальной стратификации аэрозоля над Томском в 2013 г.

кривые 7–9), хотя в единичных наблюдениях за март она была не замечена.

С мая по октябрь отмечались низкие значения концентрации аэрозоля во всем слое стратосферы, которая начала возрастать только с ноября в нижней стратосфере. Отдельные измерения за январь приведены на последнем графике рис. 6.

### Наблюдения за 2014 г.

В январе и феврале 2014 г. из-за погодных условий (облачность над Томском) было проведено всего лишь пять отдельных ночных измерений – 28 января и 2, 4, 7 и 12 февраля. Поэтому проследить динамику изменений вертикальной структуры аэрозоля не удалось. Можно лишь отметить незначительное аэрозольное наполнение нижней стратосферы до 30 км с максимальным значением  $R = 1,3$  на высоте 15 км в наблюдениях за 4 февраля.

Пять результативных наблюдений было выполнено в третьей декаде марта (рис. 7). На рисунке прослеживается своеобразная двугорбая структура вертикального распределения аэрозольной компоненты, с максимумом нижнего горба на высоте около 20 км и верхнего на высоте 40–43 км, и минимумом (отсутствием аэрозоля) на высотах 27–35 км. Приведенные результаты разительно контрастируют с наблюдениями в марте 2013 г., когда во всем интервале высот 15–50 км не было зарегистрировано присутствие аэрозольной компоненты [15].

Более сильная изменчивость аэрозольного наполнения стратосферы наблюдалось в апреле. Заметные флуктуации происходили в нижней стратосфере – от незначительного содержания аэрозоля 17 апреля (кривая 3) до всплесков аэрозольного наполнения с максимумами  $R \geq 1,3$  16 апреля (кривая 2).

Для мая отмечалось более стабильная аэрозольная структура, с небольшим содержанием аэрозоля в нижней стратосфере (кривая 5). Исключением стало 20 мая, когда был зарегистрирован протяженный аэрозольный слой от 15 до 30 км с максимумом  $R = 1,4$  в нижней части слоя (кривая 4).

Достаточно стабильное вертикальное распределение аэрозоля было характерно для теплого периода 2014 г. В июне аэрозольная компонента в виде слабого протяженного слоя регистрировалась на высотах от 15 до 30 км (кривая 6). В подавляющем большинстве наблюдений за июль–октябрь отмечалось крайне низкое, практически нулевое, содержание аэрозоля в стратосфере на высотах от 30 до 50 км в виде единичных слабых слоев (4 июля, 6 августа, 16 сентября, кривые 7–9).

В октябре по причине постоянной облачности было проведено всего два отдельных ночных измерения, результаты которых не показали аэрозольной компоненты во всем наблюдаемом слое стратосферы.

Возмущения вертикальной структуры аэрозоля начали проявляться в ноябре. Из рис. 7 видно, что наибольшие изменения в виде флуктуирующих профилей отношения рассеяния коснулись нижней стра-

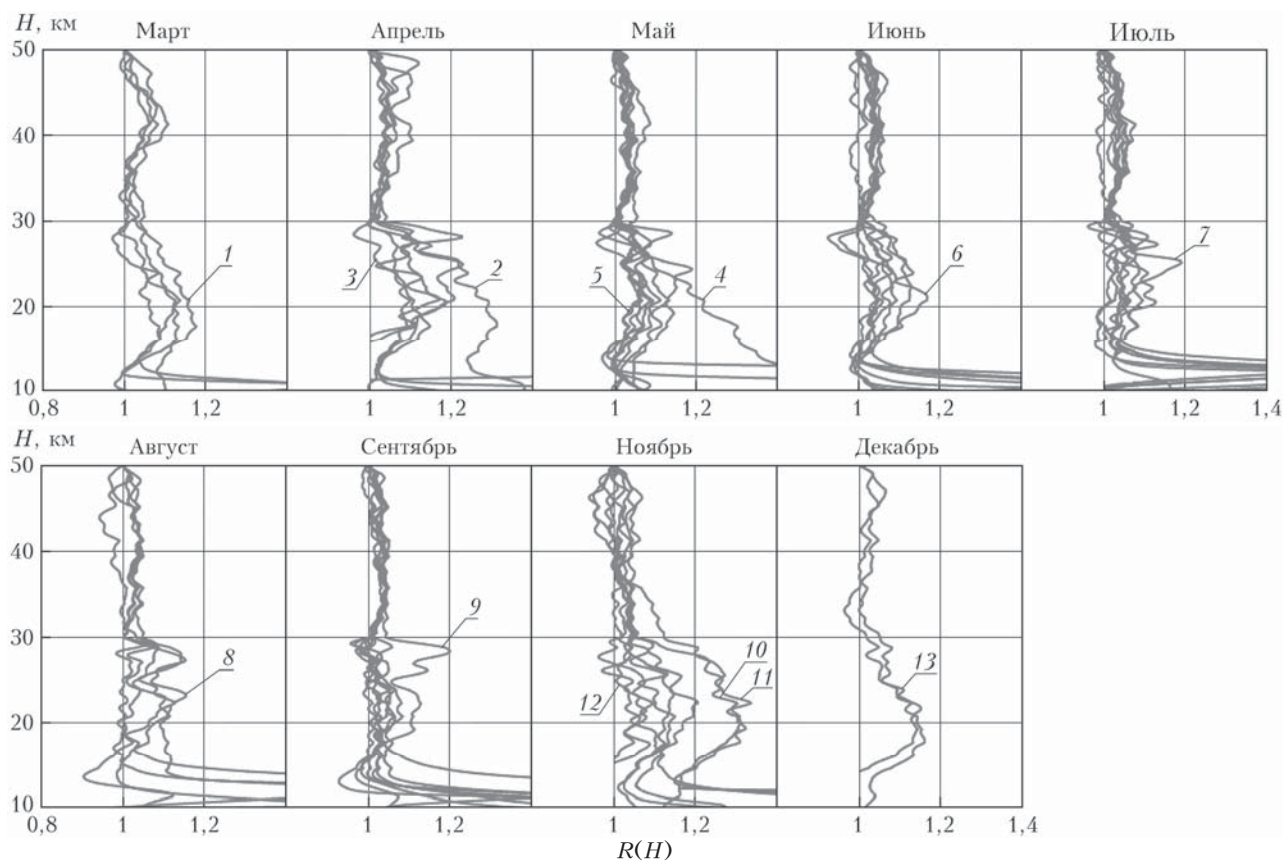


Рис. 7. Динамика вертикальной стратификации аэрозоля над Томском в 2014 г.

тосферы (кривые 10–12). В верхней стратосфере поведение профилей отношения рассеяние остается плавным, что свидетельствует о большей устойчивости состояния верхней стратосферы к возмущению аэрозольной компоненты.

В декабре, также из-за облачности, удалось провести только два измерения. Было отмечено появление слабого аэрозольного наполнения на высотах 15–30 км 24 декабря (кривая 13).

### Наблюдения за 2015 г.

Внутримесячные вариации аэрозольного наполнения стратосферы показаны на рис. 8.

В течение всего января отмечались сильная флуктуация аэрозольной компоненты нижней стратосферы, от  $R \approx 1,05$ –1,1 до  $\approx 1,3$  и ее монотонно убывающая протяженность до высот 50 км (кривые 1–3).

Похожая динамика стратификации аэрозоля наблюдалась в феврале в нижней стратосфере (кривые 4–6), отличием было отсутствие аэрозоля в верхней стратосфере.

В первой декаде марта аэрозольная компонента распространилась до высот 40–43 км (7 марта, кривая 7). При этом аэрозольное наполнение нижней стратосферы, в отличие от большинства предыдущих лет наблюдений, близко к уровню января–февраля. Минимальное аэрозольное наполнение регистрировалось в конце месяца, 28 марта (кривая 8).

В апреле аэрозоль регистрировался лишь в начале месяца в нижней стратосфере, его содержание быстро убывает за первую неделю (1 апреля, кривая 9).

В последующий период (конец весны, лето и начало осени) во всем слое стратосферы аэрозольная компонента практически отсутствует. Указанная особенность, выявленная по крайней мере для Томского региона, подтверждается многолетними наблюдениями.

Незначительный рост аэрозольного наполнения начался в октябре в области нижней стратосферы (28 октября, кривая 11). Наконец, в отличие от наблюдений за прошлые годы, аномально высокое содержание аэрозоля в нижней стратосфере было зафиксировано в ноябре (9, 17 и 18 ноября, кривые 12–14) и особенно в декабре (3, 13 и 18 декабря, кривые 15–17).

### Заключение

Анализ лидарных данных, представленных в графическом виде за пятилетний период наблюдений, как и за предыдущие годы, показывает динамику аэрозольного наполнения стратосферы с максимумом в холодный период года, в декабре–январе, и минимумом в теплый период года, вплоть до его полного исчезновения в июне–августе. Для выявления тенденций внутригодовой изменчивости наполнения стратосферы фоновым аэрозодем мы рассчитали среднemesячные профили отношения аэрозольного рассеяния  $R(H)$  по годам, исключив наблюдения со случаями аэрозольных возмущений стратосферы. Полученные данные о вертикальной стратификации аэрозоля с усреднением по отдельным месяцам года приведены на рис. 9.

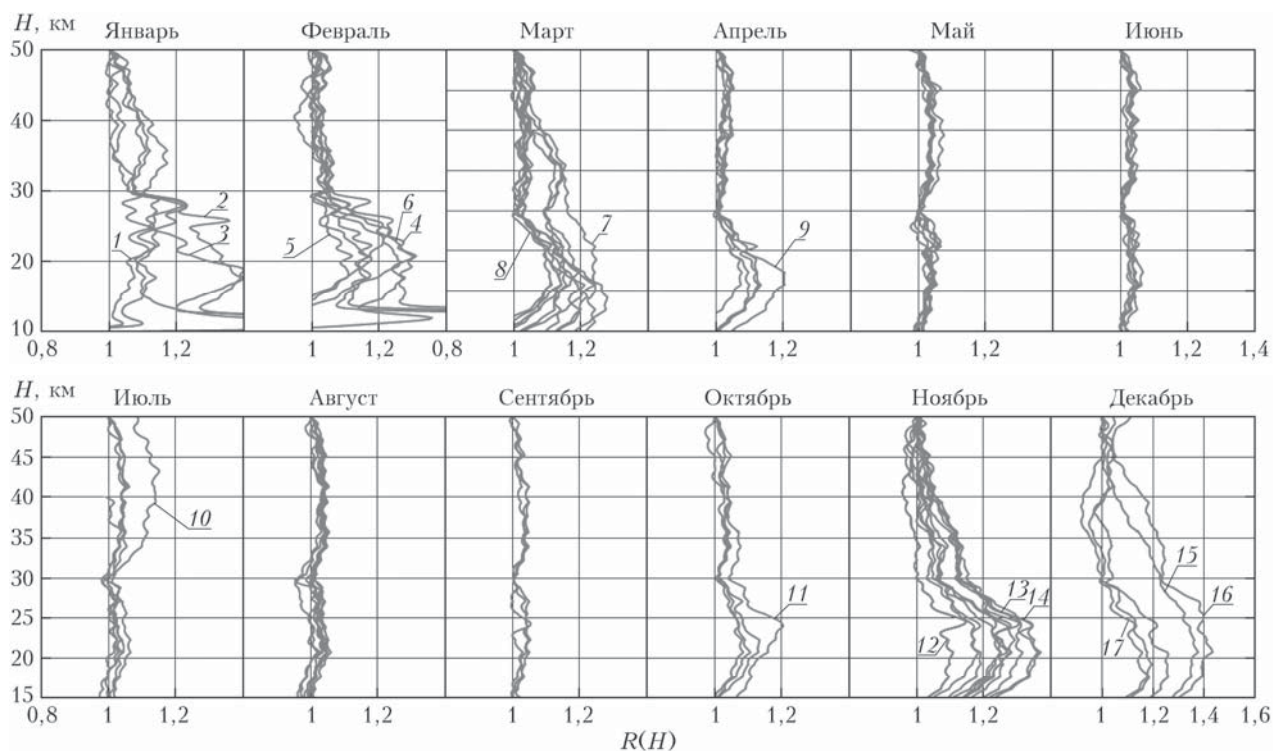


Рис. 8. Динамика вертикальной стратификации аэрозоля над Томском в 2015 г.

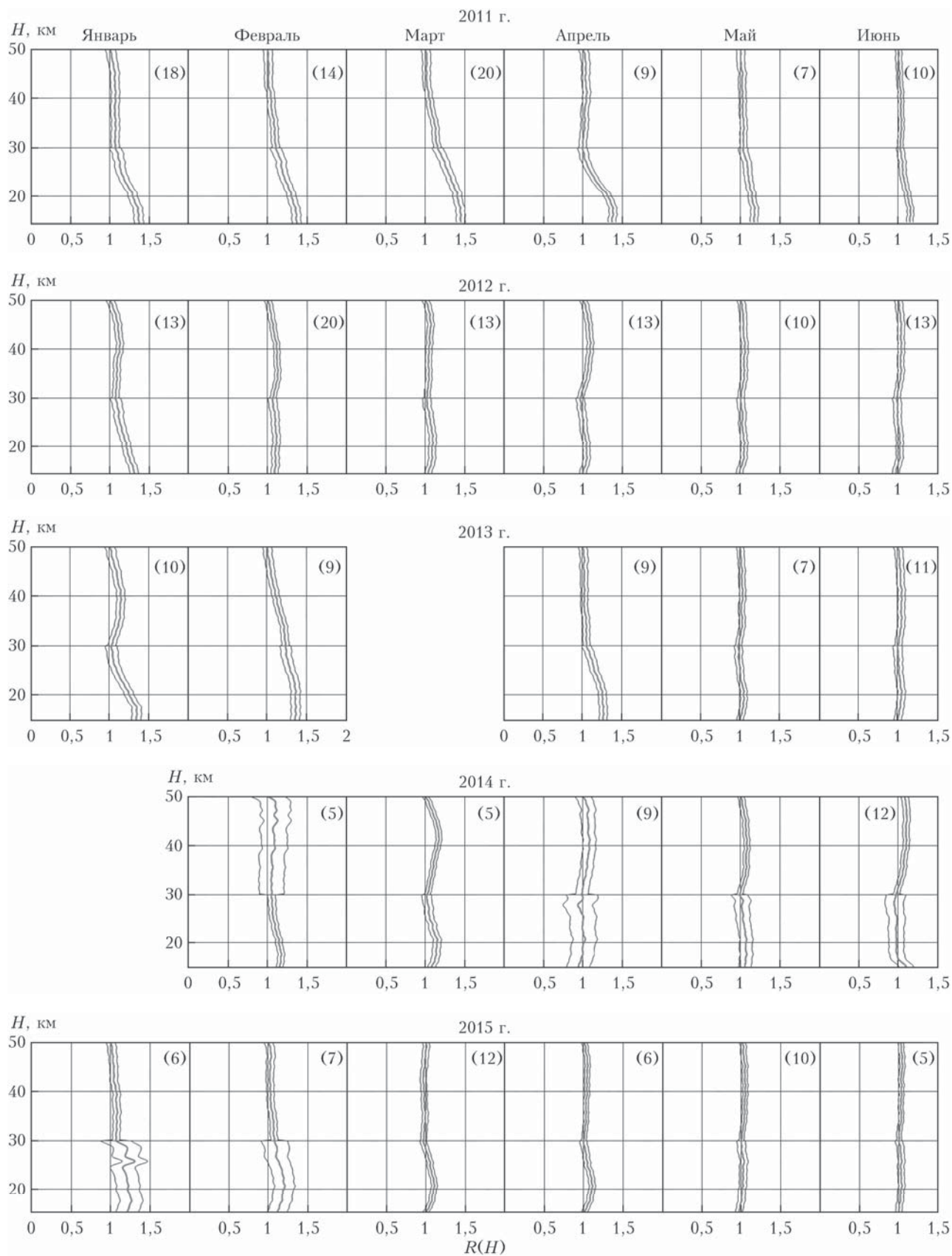


Рис. 9. Среднемесячные профили стратификации стратосферы за 2011–2015 гг. На каждом графике указано количество отдельных ночных измерений (начало)



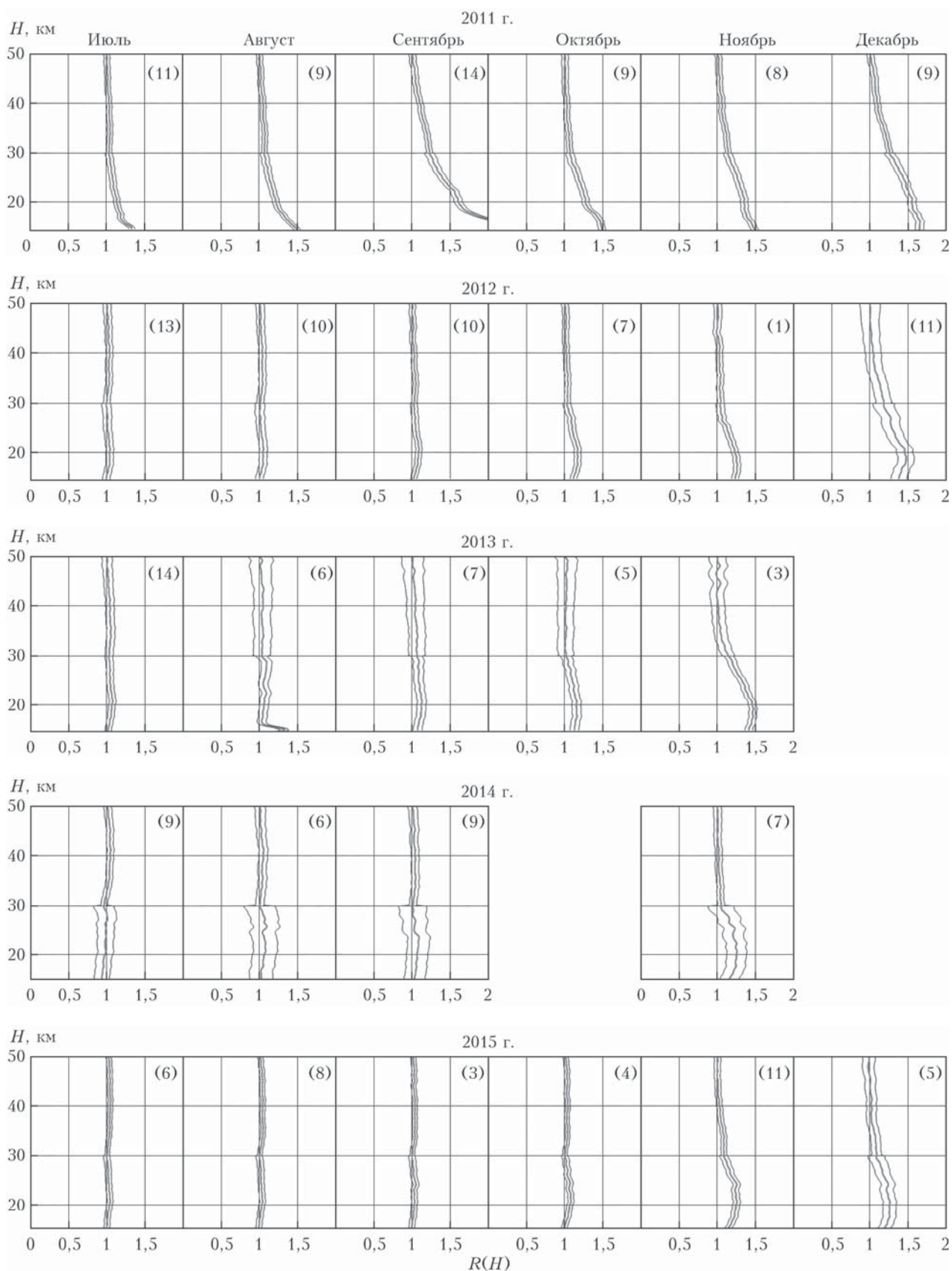


Рис. 9. Окончание

Полностью представлены данные за 2011, 2012 и 2015 гг. В 2013 г. выпадают профили за март и декабрь, а в 2014 г. — за январь, октябрь и декабрь из-за отсутствия измерений или их ограниченного количества (менее трех). В 2012–2015 гг. отмечается устойчивое отсутствие аэрозоля в стратосфере в мае–сентябре. Из рассмотрения исключается 2011 г. по причине аэрозольного возмущения вулканом Гримсвотн (на рис. 9 графики заключены в рамку). Кроме того, низкое содержание аэрозоля характерно для марта, апреля и октября.

Заметное наполнение стратосферы фоновым аэрозолем начинается в ноябре, растет в декабре–январе, убывает в феврале и практически исчезает в марте. Однако и здесь есть исключения, касающиеся случаев в марте–апреле 2011 г., апреле 2013 г. и марте 2014 г.

Наконец, на рис. 10 представлены среднемесячные профили вертикальной стратификации аэрозоля, усредненные по всем измерениям за период 2011–2015 гг. Здесь жирными линиями нанесены средние профили за весь период измерений, а тонкими кривыми наложены ансамбли среднемесячных профилей, полученных по итогам каждого года.

На рис. 10 просматривается устойчивое вертикальное распределение отношения рассеяния  $R(H)$ , близкое к единице, с минимальным разбросом в мае–августе. Наибольшая нестабильность в распределении отношения рассеяния характерна для февраля, а также апреля, ноября и декабря в нижней стратосфере до высот 30 км. В марте из общей картины выпадают наблюдения 2011 г., когда в стратосфере

регистрировались сравнимые с зимними месяцами профили  $R(H)$ . Отношения рассеяния с максимальным значением  $R$  до 1,5 на уровне 15 км наблюдаются в декабре и январе.

Согласно результатам обобщения наблюдений, приведенных на рис. 10, можно сделать следующий основной вывод.

Возмущения стратосферы фоновым аэрозолем начинаются в октябре, усиливаются в ноябре, достигают максимума в декабре–январе, спадают в феврале–марте и заканчиваются в апреле. Данный вывод касается нижней стратосферы (высота до 30 км). Для верхней стратосферы выше 30 км аэрозольная компонента, за исключением зимнего периода, отсутствует в течение всего года.

Вероятной причиной аэрозольного наполнения стратосферы в холодный период года могут быть следующие факторы:

- усиление меридионального переноса за счет увеличения разницы температур между экватором и полюсом и доставкой воздушных масс из экваториальной зоны, богатых содержанием аэрозоля, в средние широты;
- образование в зимний период сильных струйных течений, способствующих глобальному переносу воздушных масс;
- случаи прорыва тропопаузы, приводящие к усилению тропосферно-стратосферного обмена.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ НШ-8199.2016.5 и гранта РФФИ № 16-05-00901.

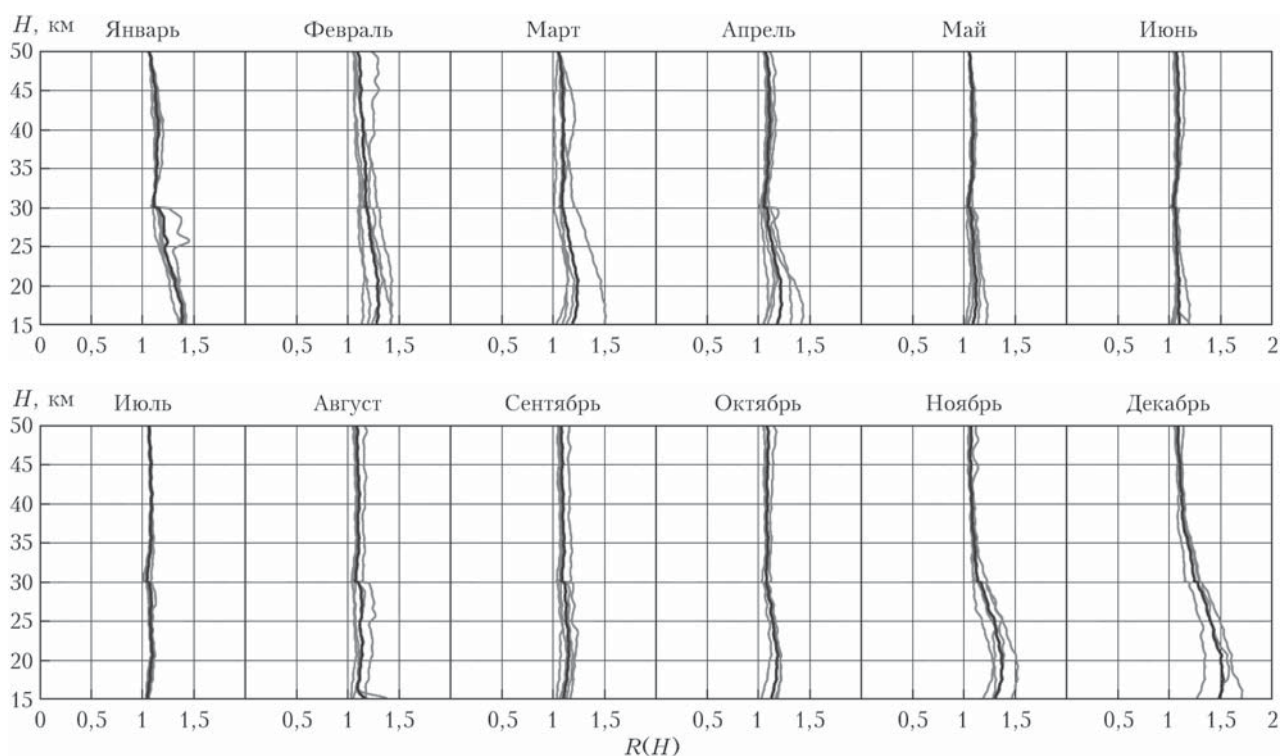


Рис. 10. Усредненные по пяти годам измерений среднемесячные профили вертикальной стратификации аэрозоля над Томском

1. Ельников А.В., Зуев В.В., Маричев В.Н. Результаты лазерного зондирования вертикальной стратификации аэрозоля над Западной Сибирью (1986–1989 гг.) // Оптика атмосф. 1991. Т. 4, № 6. С. 631–637.
2. Ельников А.В., Зуев В.В., Копысова Т.С., Маричев В.Н. Особенности корреляционных связей стратосферного аэрозоля // Оптика атмосф. и океана. 1992. Т. 5, № 2. С. 193–197.
3. Маричев В.Н., Богданов В.В., Живетьев И.В., Шевцов Б.М. Влияние геомагнитных возмущений на образование аэрозольных слоев в стратосфере // Геомагнетизм и аэрономия. 2004. № 6. С. 1–8.
4. Зуев В.В., Ельников А.В., Бурлаков В.Д. Лазерное зондирование средней атмосферы. Томск: Раско, 2002. 352 с.
5. Бурлаков В.Д., Ельников А.В., Зуев В.В., Маричев В.Н., Правдин В.Л., Смирнов С.В., Столярова Н.А. Результаты лидарных наблюдений аэрозоля и озона стратосферы после извержения вулкана Пинатубо // Оптика атмосф. и океана. 1993. Т. 6, № 10. С. 1224–1233.
6. Бурлаков В.Д., Ельников А.В., Зуев В.В., Маричев В.Н., Правдин В.Л. Следы извержения вулкана Пинатубо в стратосфере над Западной Сибирью (Томск, 56° с.ш.) // Оптика атмосф. и океана. 1992. Т. 5, № 6. С. 602–604.
7. Крученицкий Г.М., Маричев В.Н. Влияние глобальных геофизических процессов на изменчивость вертикального распределения озона, температуры и аэрозоля над Западной Сибирью // Оптика атмосф. и океана. 2008. Т. 21, № 4. С. 294–298.
8. Маричев В.Н., Самохвалов И.В. Лидарные наблюдения аэрозольных вулканических слоев в стратосфере Западной Сибири в 2008–2010 гг. // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 3. С. 224–231.
9. Бурлаков В.Д., Долгий С.И., Невзоров А.В., Самохвалов И.В., Насонов С.В., Животенюк И.В., Ельников А.В., Назаров Е.В., Плюснин И.И., Шиханцов А.М. Следы извержения вулкана Эйяфьятлайокудль по данным лидарных наблюдений в Томске и Сургуте // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 10. С. 872–879; Burlakov V.D., Dolgii S.I., Nevzorov A.V., Samokhvalov I.V., Nasonov S.V., Zhivotenyuk I.V., El'nikov A.V., Nazarov E.V., Plusnin I.I., Shikhantsov A.M. Traces of eruption of Eyjafjallajökull Volcank According to Data of Lidar Observations in Tomsk and Surgut // Atmos. Ocean. Opt. 2012. V. 25, N 2. P. 110–117.
10. Бурлаков В.Д., Долгий С.И., Невзоров А.В. Лидарные наблюдения аэрозольных возмущений стратосферы над Томском (56,5° с.ш.; 85,0° в.д.) в период вулканической активности 2006–2010 гг. // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 12. С. 1031–1040.
11. Долгий С.И., Бурлаков В.Д., Макеев А.П., Невзоров А.В., Шмирко К.А., Павлов А.Н., Столярчук С.Ю., Букин О.А., Чайковский А.П., Осипенко Ф.П., Трифонов Д.А. Аэрозольные возмущения стратосферы после извержения вулкана Гримсвотн (Исландия, май 2011 г.) по данным наблюдений станций лидарной сети стран СНГ CIS-LiNet в Минске, Томске и Владивостоке // Оптика атмосф. и океана. 2013. Т. 26, № 7. С. 547–552.
12. Иванов В.Н., Зубачев Д.С., Коршунов В.А., Лапшин В.Б., Иванов М.С., Галкин К.А., Губко П.А., Антонов Д.Л., Тулинов Г.Ф., Черемисин А.А., Новиков П.В., Николашкин С.В., Маричев В.Н. Лидарные наблюдения стратосферных аэрозольных слоев от Челябинского метеорита // Оптика атмосф. и океана. 2014. Т. 27, № 2. С. 117–122.
13. Баженов О.Е., Бурлаков В.Д., Гришаев М.В., Гринев Ю.В., Долгий С.И., Макеев А.П., Невзоров А.В., Сальникова Н.С., Трифонов Д.А., Аршинов М.Ю., Ивлев Г.А. Сравнение результатов дистанционных спектрофотометрических и лидарных измерений О<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, температуры и стратосферного аэрозоля с данными спутниковых и радиозондовых измерений // Оптика атмосф. и океана. 2016. Т. 29, № 3. С. 216–223.
14. Trickl T., Giehl H., Jäger H., Vogelmann H. 35 year of stratospheric aerosol measurements at Garmisch-Partenkirchen: From Fuego to Eyjafjallajökull, and beyond // Atmos. Chem. Phys. 2013. V. 13. P. 5205–5225. DOI: 10.5194/acp-13-5205-2013.
15. Маричев В.Н. Лидарные исследования годовой изменчивости наполнения стратосферы фоновым аэрозолем над Томском в период 2011–2013 гг. // Сб. докл. 20-го Междунар. симпоз. «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы». Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2014. С. D62–D66.

**V.N. Marichev, D.A. Bochkovsky. Results of the study of intra-annual variability of the stratospheric background aerosol content over Tomsk from lidar measurement data for 2011–2015.**

Data on the variability of vertical and temporal aerosol structures in the stratosphere over Tomsk received during experiments at the lidar station for high-altitude atmosphere sounding of Institute of Atmospheric Optics SB RAS carried out in 2011–2015 are described. As in the previous studies, the emphasis is placed on disturbances of the aerosol components in the stratosphere due to volcanic eruptions and on identification of peculiarities in the intra-annual variability of the stratospheric aerosol content. A feature of that period, except for the second half of 2011 (the appearance of eruptive layers from the Grimsvotn volcano eruption over Tomsk), was near absence of volcanic activity, which leads to the formation of stratospheric aerosol and its transfer toward Tomsk; this allows the study of the behavior of the vertical structure of the background aerosol in the stratosphere during the five years. The analysis of the lidar data shows a steady trend of aerosol filling of the lower stratosphere during cold seasons, with the aerosol content maximum in December–January, and near absence in warm seasons throughout the stratosphere.