

УДК 551.510.532:551.501.816

## Лидарные наблюдения стратосферных аэрозольных следов от Челябинского метеорита

В.Н. Иванов<sup>1</sup>, Д.С. Зубачев<sup>1</sup>, В.А. Коршунов<sup>1</sup>, В.Б. Лапшин<sup>2</sup>,  
М.С. Иванов<sup>2</sup>, К.А. Галкин<sup>2</sup>, П.А. Губко<sup>2</sup>, Д.Л. Антонов<sup>2</sup>,  
Г.Ф. Тулинов<sup>2</sup>, А.А. Черемисин<sup>3,4</sup>, П.В. Новиков<sup>4</sup>,  
С.В. Николашкин<sup>5</sup>, С.В. Титов<sup>5</sup>, В.Н. Маричев<sup>6,7\*</sup>

<sup>1</sup>ФГБУ «НПО «Тайфун»

249038, г. Обнинск Калужской обл., ул. Победы, 4

<sup>2</sup>Институт прикладной геофизики им. Я.К. Фёдорова

129128, г. Москва, ул. Ростокинская, 9

<sup>3</sup>Сибирский федеральный университет

660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79

<sup>4</sup>Красноярский институт железнодорожного транспорта

660028, г. Красноярск, ул. Ладо Кеңховели, 89

<sup>5</sup>Институт космических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера СО РАН

677980, г. Якутск, пр. Ленина, 31

<sup>6</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН

634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

<sup>7</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет

634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

Поступила в редакцию 18.11.2013 г.

Представлены результаты лидарного зондирования аэрозольных слоев, образовавшихся в стратосфере после падения Челябинского метеорита 15 февраля 2013 г. Аэрозольные слои были зафиксированы на высотах от 34 до 42 км в Москве, Обнинске и Якутске в конце февраля – начале марта. Метеоритное происхождение слоев установлено методом траекторного анализа.

*Ключевые слова:* лидар, аэрозоль, метеорит, стратосфера; lidar, aerosol, meteorite, stratosphere.

Падение крупного метеорита, произошедшее 15 февраля 2013 г. над г. Челябинском и прилегающим регионом, имело большой общественный резонанс и вызвало естественный интерес исследователей различных специальностей. Согласно данным, полученным из различных источников [1], метеорит вошел в атмосферу под углом около 16° в направлении, близком к направлению с востока на запад. Время его полета в атмосфере составило 32 с, а пройденный путь 250–500 км, начиная с высоты 100 км до взрыва, произошедшего на высоте примерно 23 км. Масса метеорита оценивалась в 10 тыс. т, что сравнимо с общей массой метеорного вещества, входящего в земную атмосферу в течение года (16–40 тыс. т по разным

оценкам). В процессе испарения (абляции) и разрушения метеорит оставил в стратосфере мощный аэрозольный след, запечатленный на многочисленных видеозаписях и фотографиях. В дальнейшем происходили распространение первоначального аэрозольного облака в направлении преимущественного ветра и его рассеяние в стратосфере. Поскольку средняя скорость зонального ветра на высоте образования аэрозольного облака близка к 100 м/с, то аэрозольное облако быстро обогнуло земной шар. В связи с заметным падением скорости преобладающих ветров с уменьшением высоты первоначальная плотность наблюдаемого облака не сохранилась на всем протяжении следа, а отдельные более плотные участки распределились с запада на восток примерно на 10000 км. Исследование распространения этого облака представляет большой интерес в силу уникальности данного события, которое можно рассматривать как самой природой поставленный эксперимент по рассеянию примеси в верхней стратосфере. Одним из возможных методов проведения такого рода исследования является лидарное зондирование, которое ранее уже использовалось для обнаружения метеорных следов. Известен достаточно длительный цикл измерений аэрозольных метеорных следов с помощью специализированного лидара [2]. В литературе имеется также

\* Владимир Николаевич Иванов (vivinov@typhoon.obninsk.ru); Дмитрий Сергеевич Зубачев; Владимир Алексеевич Коршунов (korshunov@typhoon.obninsk.ru); Владимир Борисович Лапшин (director@ipg.geospace.ru, alissa38@list.ru); Михаил Сергеевич Иванов; Кирилл Александрович Галкин; Петр Александрович Губко; Дмитрий Леонидович Антонов; Георгий Филиппович Тулинов; Александр Алексеевич Черемисин (acheremisin@gmail.com); Павел Вадимович Новиков (novikov-pv@yandex.ru); Семен Викторович Николашкин (nikolashkin@ikfia.ysn.ru, nsvsci@rambler.ru); Семен Вячеславович Титов; Валерий Николаевич Маричев (marichev@iao.ru).

единственный, по-видимому, пример лидарного наблюдения аэрозольного следа от крупного болида, падение которого документально зафиксировано и отслежено различными методами [3].

В настоящее время в России имеется несколько лидарных станций, проводящих регулярные измерения стратосферного аэрозоля. В статье представлены результаты лидарных наблюдений за вертикальной стратификацией аэрозоля над Москвой, Обнинском, Якутском и Томском, выполненных в конце февраля –

начале марта 2013 г. Траекторный анализ подтвердил, что наблюдавшиеся аэрозольные слои над Москвой, Обнинском, Якутском пришли из района падения Челябинского метеорита.

## Результаты измерений

Наиболее длительные наблюдения следов Челябинского метеорита удалось провести на Обнинской

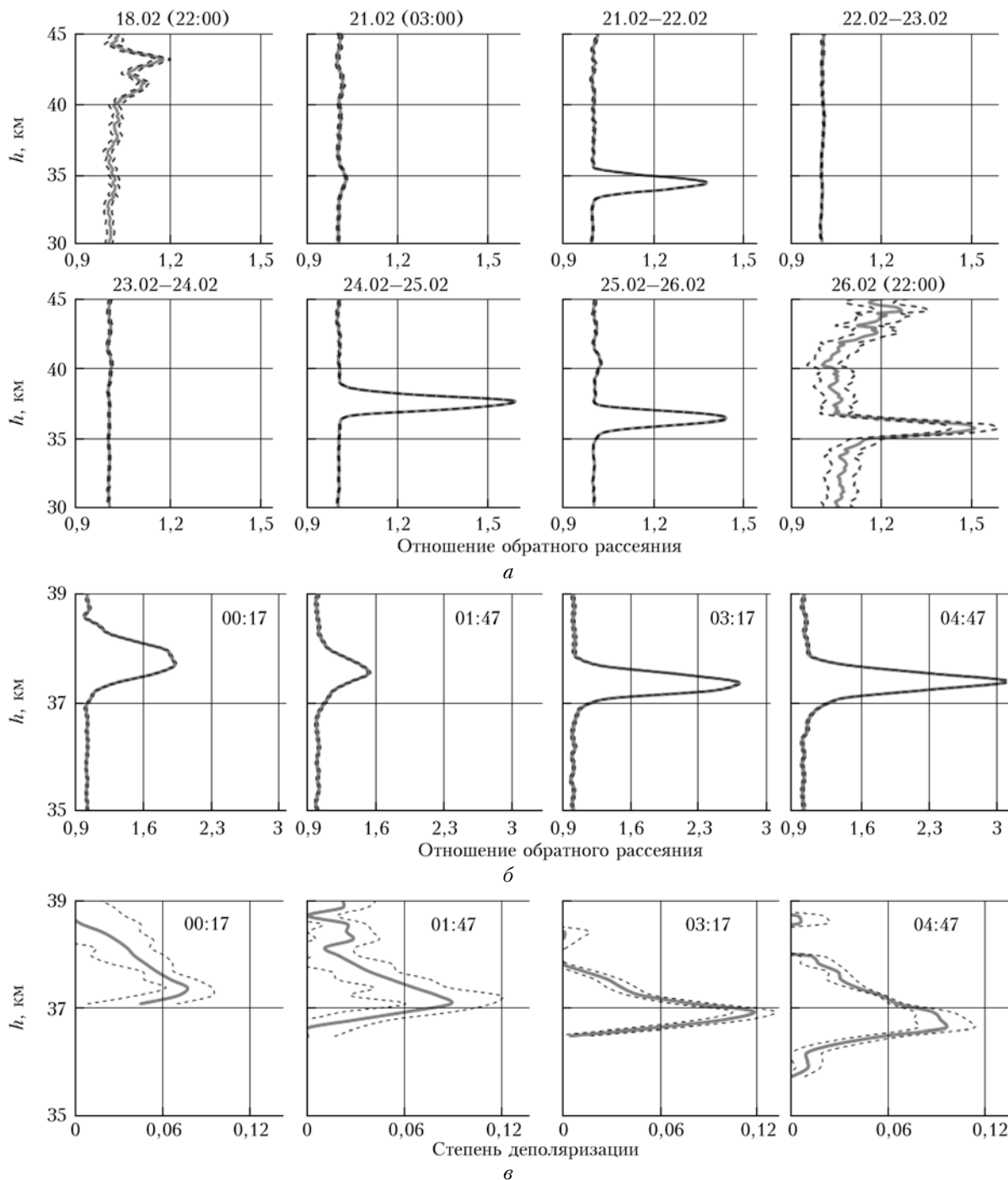


Рис. 1. Результаты измерений в Обнинске: *a* – временная картина изменения аэрозольных слоев с разрешением по высоте 1 км; *б* – динамика изменения отношения обратного рассеяния; *в* – динамика степени деполаризации в течение ночи 24–25 февраля. Разрешение по высоте 0,15 км. Пунктирные линии обозначают погрешности измерений

лидарной станции с помощью лидара, разработанного в НПО «Тайфун» для зондирования средней атмосферы. Максимальная энергия излучения передатчика лидара при одновременной работе на длинах волн 355 и 532 нм составляет 110 и 280 мДж при частоте повторения 10 Гц. При зондировании стратосферного аэрозоля в диапазоне высот 10–40 км передатчик работает в режиме пониженной энергии излучения. В приемной части лидара используется параболическое зеркало диаметром 635 мм. Лидар снабжен устройством механической отсечки ближней зоны. Регистрация сигналов производится четырехканальной системой регистрации в режиме счета фотонов.

Зондирование проводилось одновременно на длинах волн 355 и 532 нм в диапазоне высот 30–70 км, причем на 532 нм проводились также поляризационные измерения. Дополнительно выполнялись контрольные измерения в диапазоне высот 10–40 км.

Погодные условия позволили выполнить ежесуточное зондирование с 18 по 26 февраля в ночное время. По результатам измерений определялись температура атмосферы  $T(h)$  в диапазоне высот  $h = 26 \div 70$  км, отношения обратного рассеяния  $R(h)$  на длинах волн 355 и 532 нм и степень деполяризации аэрозольного рассеяния  $d_a(h)$  на длине волны 532 нм.

На рис. 1, *a* представлены результаты определения  $R(h)$  в высотном диапазоне 30–45 км с разрешением по высоте 1 км, где наблюдались аэрозольные метеорные слои.

Для 18, 21 и 26 февраля продолжительность измерения составляла 1,5 ч (местное время окончания измерений указано в скобках), в остальные дни измерения проводились в течение ночи и результаты усреднены за ночь. Как показано на рис. 1, *a*, первые следы метеорного происхождения были зафиксированы в г. Обнинске 18 февраля на высоте около 42 км.

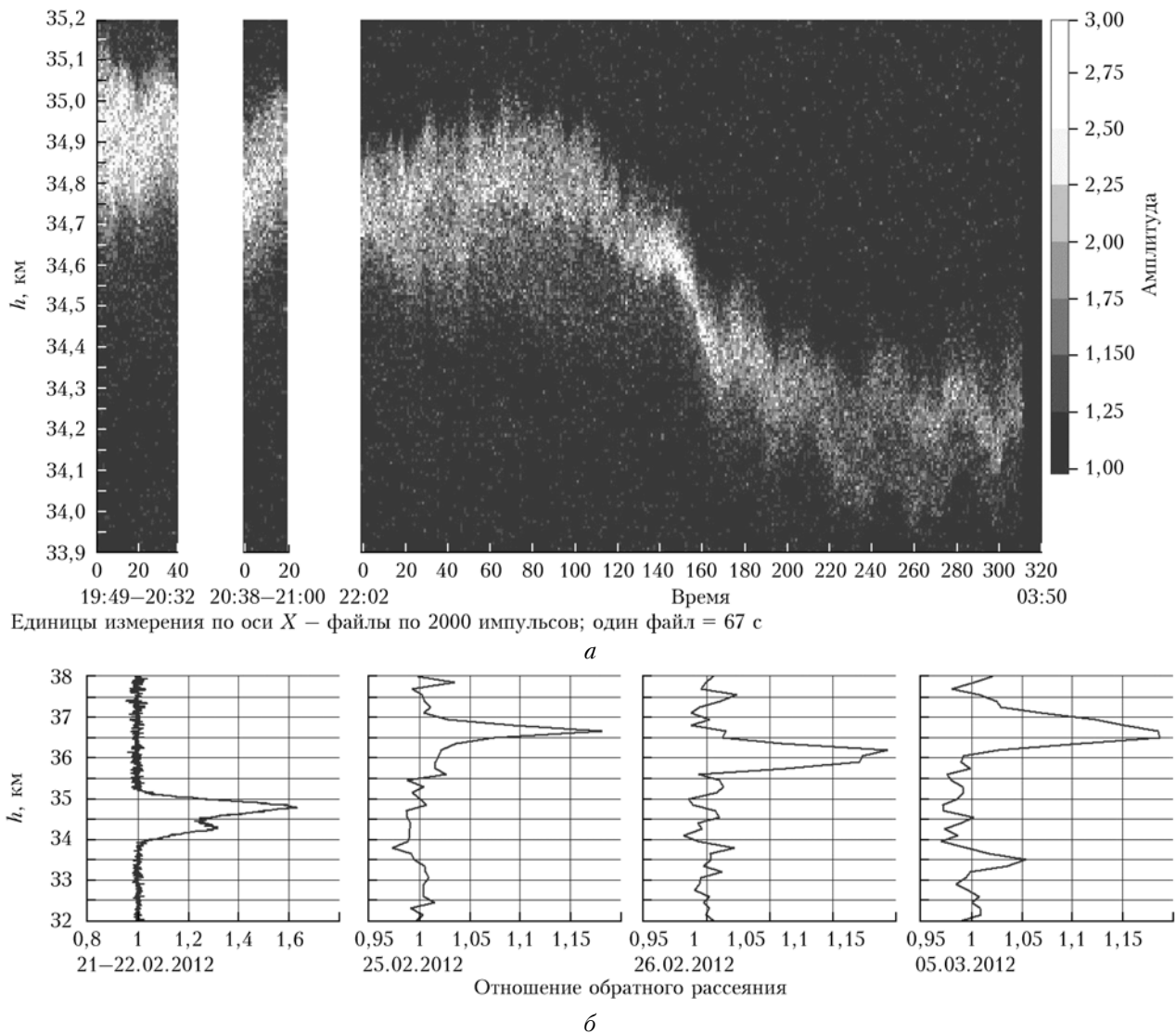


Рис. 2. Результаты измерений в Москве: *a* – динамика изменения аэрозольного слоя в течение ночи 21–22 февраля. Ось абсцисс – местное время, ось ординат – высота. Относительная величина сигнала отображается градациями серого тона; *b* – отношение обратного рассеяния для аэрозольных слоев. 21–22 февраля показаны данные, усредненные за ночь. Измерения 25, 26 февраля и 5 марта проведены в интервале 20:00–21:00 московского времени

Начиная с 21 февраля примерно с 03:00 московского времени слои периодически появлялись на высотах от 34 до 38 км. Наиболее сильные слои наблюдались с 21–22 по 26–27 февраля, а в марте они значительно ослабли.

На рис. 1, б и в показана динамика изменения параметров слоя в течение ночи 24–25 февраля с разрешением по высоте 0,15 км. В среднем толщина слоев на уровне 0,5 от максимума составляла 0,3–0,5 км. Максимальная величина  $R(h)$  достигала 3. Степень деполяризации аэрозольного обратного рассеяния менялась по высоте и своего максимального уровня  $\sim 0,1$  достигала в нижней части слоя. В максимуме же слоя величина  $d_a(h)$  была не более 0,05. Среднее отношение коэффициентов обратного аэрозольного рассеяния на длинах волн 355 и 532 нм составило  $1,0 \pm 0,1$ .

В Москве в течение ночи 21–22 февраля проводилось 8-часовое непрерывное зондирование с разрешением 67 с по времени и 7,5 м по высоте. Максимальное  $R(h)$  достигало 3,2. При этом наблюдался аэрозольный слой (рис. 2, а) примерно такой же толщины как в Обнинске, постепенно опускающийся по высоте от 35 до 34 км.

Расстояние между пунктами лидарного зондирования в Москве и Обнинске равно 110 км в направлении на юго-запад. Поскольку слои одновременно

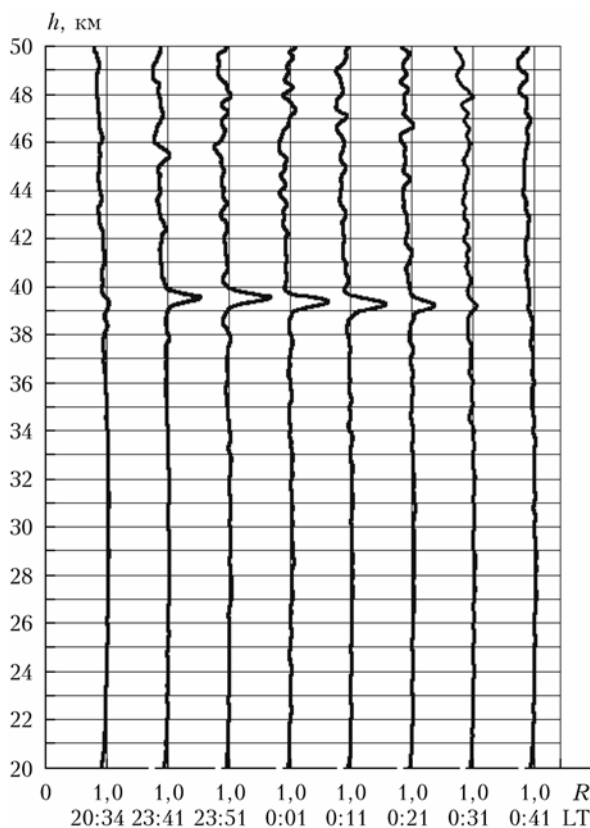


Рис. 3. Результаты измерений в Якутске 20–21 февраля. Ось абсцисс — отношение обратного рассеяния  $R$ , ось ординат — высота  $h$ . Показана временная последовательность зарегистрированных аэрозольных слоев (время местное). Начало отсчета по оси абсцисс для каждого графика сдвинуто на единицу

наблюдался в обоих пунктах, то его размер в широтном направлении составлял не менее 80 км. Динамика изменения слоя в последующие дни показана на рис. 2, б. Последний раз в Москве след наблюдали 5 марта, он еще оставался достаточно интенсивным.

В Якутске появление слоев было кратковременным (рис. 3), они наблюдались в течение 40 мин около 23:00–24:00 местного времени 20.02 на высоте около 39,5 км. Толщина слоя составляла около 0,5 км, максимальное отношение обратного рассеяния равнялось 1,3–1,7.

В Томске лидарные измерения проводились 16, 20 и 21 февраля. Наблюдалась достаточно сложная и изменчивая картина фонового аэрозоля на высотах 15–45 км, однако выраженных аэрозольных слоев на этом фоне зафиксировано не было.

## Траекторный анализ

Для анализа происхождения зарегистрированного стратосферного аэрозоля были проведены расчеты изоэнтропийных траекторий воздушных масс по методике, описанной в [4]. Траектории начинались от координат метеорного следа, рассчитанных чешскими учеными по видеозаписям падения метеорита [5]. Начальные точки обратных траекторий располагались на высотах от 15 км ( $60,6^\circ$  в.д.,  $54,9^\circ$  с.ш.) до 42 км ( $61,9^\circ$  в.д.,  $54,8^\circ$  с.ш.) с шагом 0,25 км по высоте. Перемещение воздушных масс происходило в восточном направлении, в соответствии с вращением циркумполярного вихря в зимний сезон. Наибольшую скорость имели воздушные массы на высотах 42–44 км, к 18–19 февраля они дошли до Обнинска и Москвы на высотах наблюдения аэрозоля, обогнув Северный полюс (рис. 4, а). Воздушные массы, содержащие аэрозоль от метеорного следа, достигли Обнинска 22 февраля на высотах 33–34 км, а 25–27 февраля они проходили над Обнинском на высотах 36–38 км, сделав второй оборот вокруг Северного полюса. Якутска эти воздушные массы достигли 20 февраля на высоте наблюдения аэрозоля.

На рис. 4, б приведена высотно-временная развертка рассчитанных траекторий. По оси абсцисс отложены даты февраля, по оси ординат — высота траекторий. Метки дат соответствуют 00:00 всемирного координированного времени (UTC). На траекториях градиентами серого цвета показано расстояние до Обнинска: чем темнее, тем ближе прошла траектория. Кружками в соответствующие дни отмечены высоты наблюдения пиков аэрозольного рассеяния. Следует отметить достаточно хорошее согласие между высотами прохождения траекторий вблизи Обнинска и высотами наблюдения аэрозоля.

Аналогичное совпадение характерно и для Якутска: 20 февраля траектории, содержащие аэрозоль метеорного происхождения, прошли наиболее близко к Якутску на высоте около 39,5 км.

Оценка влияния погрешностей используемых данных на результаты моделирования траекторий, проведенная методом Монте-Карло в соответствии с [4], показала, что на высотах 30–40 км случайный разброс траекторий через 5 дней составил около 300 км,

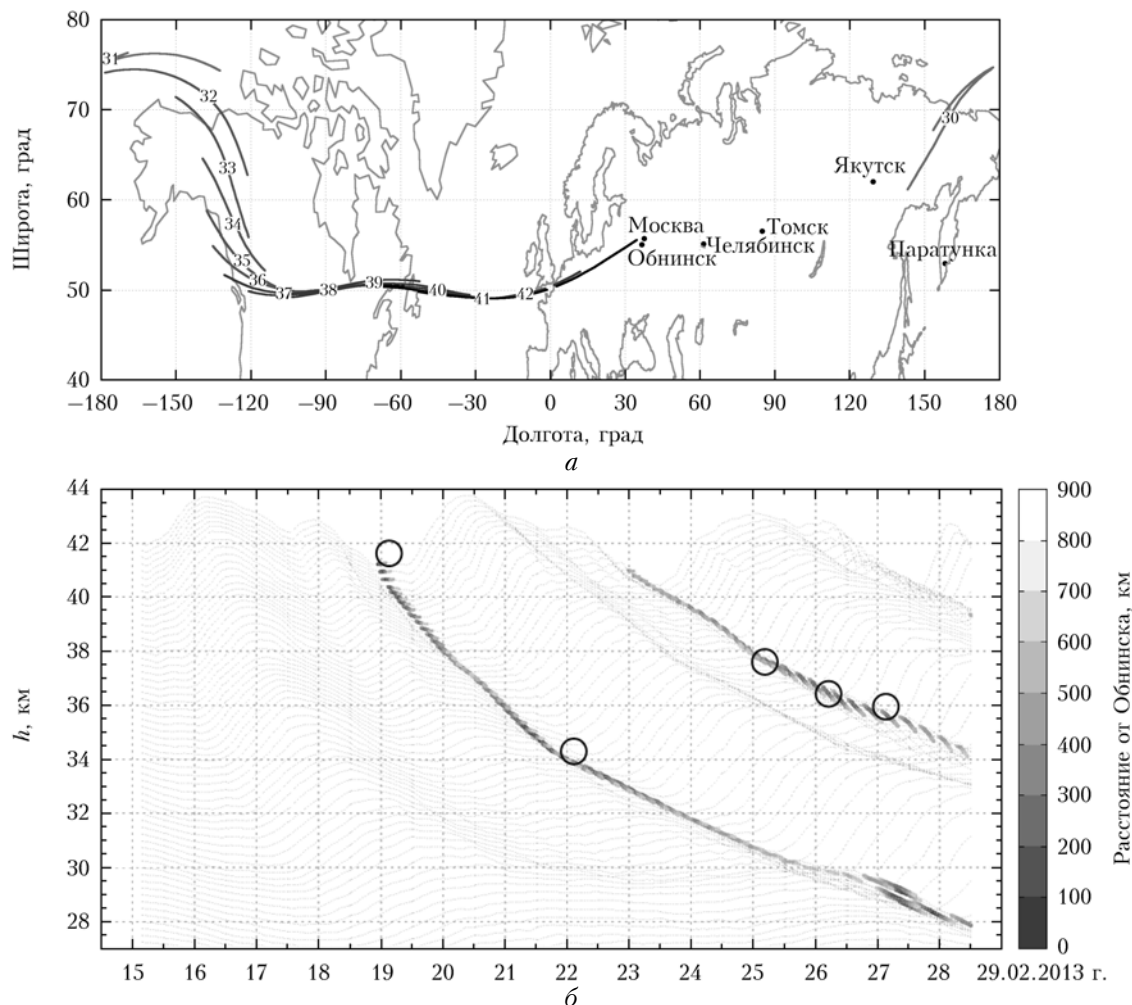


Рис. 4. Данные траекторного анализа: *a* – картина траекторий на 18 февраля на плоскости долгота – широта, высота начальной точки траектории в районе Челябинска подписана в середине каждой траектории; *б* – картина траекторий на плоскости дата – высота. Расстояние траектории от Обнинска представлено в градациях серого (темнее – ближе к Обнинску). Кружками отмечены высоты наблюдения слоя в Обнинске

а через 10 дней 300–800 км. Ближайшие расстояния от точек наблюдений до траекторий имеют тот же порядок и, следовательно, могут служить показателем того, что траектории достигли точки наблюдения.

Таким образом, анализ расчетных траекторий воздушных масс показал, что стратосферный аэрозоль, наблюдавшийся с 18 февраля 2013 г. сетью лидарных станций на широтах 55–65° с.ш., имеет метеорное происхождение.

## Обсуждение результатов

По результатам лидарных измерений проведена оценка микрофизических параметров метеорного слоя. Для этого были выполнены расчеты оптических и микрофизических параметров метеорного аэрозоля. Поскольку степень депolarизации обратного рассеяния невелика, то использовалось приближение сферических частиц и расчеты выполнялись по формулам теории Ми. По данным Института геологии и минералогии имени Соболева СО РАН, где был проведен анализ метеоритных осколков, достигших поверхно-

сти земли [1], Челябинский метеорит относится к классу каменных метеоритов-хондритов и состоит, в основном, из оливинов  $Mg_{2x}Fe_{2-2x}SiO_4$  и ортопироксенов  $Mg_xFe_{1-x}Si_2O_6$ . Аналогичный по составу хондрит типа LL был подробно исследован в работе [6], данные которой далее используются для выбора оптических параметров вещества метеорита. Критическое значение для задания мнимой части показателя преломления, отвечающей за поглощение, имеет относительное содержание Mg и Fe в составе метеорита. Результаты анализа, проведенного в [6], показали, что содержание Fe в хондритах относительно невелико и соответствует параметру  $x = 0,75$  для оливина и  $x = 0,7$  для ортопироксена. Показатели преломления оливина и ортопироксена с такими значениями  $x$  в литературе найти не удалось, поэтому для оценки был взят показатель преломления для близкого по составу вещества  $Mg_xFe_{1-x}SiO_3$  (пироксена) с величиной  $x = 0,7$ :  $m = 1,670 - 0,039i$  для  $\lambda = 355$  нм и  $m = 1,635 - 0,005i$  для  $\lambda = 532$  нм [7]. Были проведены расчеты аэрозольных параметров для логарифмически нормального распределения при различных значениях эффективного радиуса  $r_{32}$ . Оказалось, что

полученному в эксперименте отношению коэффициентов обратного рассеяния на длинах волн 355 и 532 нм  $1,0 \pm 0,1$  соответствует величина эффективного радиуса частиц  $r_{32} = 0,15$  мкм. При этом коэффициент связи  $K_v$  между объемной концентрацией  $V$  и коэффициентом обратного аэрозольного рассеяния  $\beta_a(532)$  составил  $3,8 \cdot 10^3$  ( $V$  [мкм<sup>3</sup> · см<sup>-3</sup>] =  $K_v \beta_a(532)$  [км<sup>-1</sup> · ср<sup>-1</sup>]), а лидарное отношение — 33 ср. Полагая далее среднее значение отношения обратного рассеяния  $R = 2$  на высоте 36 км, получаем оценки характерных значений коэффициента обратного рассеяния  $\beta_a(532) = 9,3 \cdot 10^{-6}$  км<sup>-1</sup> · ср<sup>-1</sup>, коэффициента ослабления  $\sigma_a(532) = 3,1 \cdot 10^{-4}$  км<sup>-1</sup> и массовой концентрации (при плотности  $3,6$  г · см<sup>-3</sup>)  $M = 0,13$  мкг/м<sup>3</sup>.

Оценим общую массу метеорного вещества. Из измерений известна толщина слоя, которую для оценок примем равной 0,5 км. Траекторный анализ показал, что аэрозольный слой через 10 дней после его образования опоясал практически весь земной шар в долготном направлении, поэтому длину его возьмем равной  $2 \cdot 10^4$  км. Поскольку слой наблюдался не на всех лидарных станциях и не каждый день на отдельной станции, то его протяженность в широтном направлении вряд ли превышала несколько сот километров — для оценок примем ее равной 500 км. При этих допущениях получаем величину общей массы метеорного вещества в наблюдавшемся слое 650 т. Таким образом, согласно проведенным оценкам в наблюдаемом аэрозольном шлейфе, опоясавшем земной шар в стратосфере, сосредоточилась лишь небольшая часть исходной метеоритной массы. Контрольные расчеты, проведенные для других вариантов выбора состава аэрозоля с варьированием содержания Fe, показали, что коэффициент  $K_v$  может меняться в пределах фактора 2, что не изменяет порядок оценки массовой концентрации.

По оценкам сотрудников Института астрономии РАН конечная фрагментация метеорита произошла на высоте около 23 км [1]. Образовавшиеся фрагменты выпали на землю в окрестности Челябинска. Наблюдавшийся на высоте около 34–42 км аэрозольный след, по-видимому, образовался в результате абляции и реконденсации метеорного вещества еще до полного разрушения болида. Отличительной особенностью наблюдавшегося слоя является его сравнительно небольшая толщина в вертикальном направлении. По-видимому, это объясняется тем, что первоначальное облако было вытянуто в направлении зонального ветра и в силу малого угла наклона траектории метеорита к поверхности Земли было сосредоточено в достаточно узком диапазоне высот. Следует также учитывать большой высотный градиент зонального ветра и повышенную устойчивость атмосферы на высотах наблюдения слоя.

Представляет интерес сопоставление параметров метеорного слоя в [2] и в данной работе. Аэрозольное

облако в [2] наблюдалось на более низких высотах в интервале от 28 до 31,5 км. При этом сообщается только об однократном прохождении облака в течение 1 ч через 15 ч после падения болида. Степень деполяризации обратного рассеяния менялась в различных частях слоя от 0 до 0,1, что в среднем соответствует результатам наших измерений. В облаке было выделено два подслоя с характерной величиной  $\beta_a(532) = 2,3 \cdot 10^{-4}$  и  $4,3 \cdot 10^{-5}$  км<sup>-1</sup> · ср<sup>-1</sup>. Размер частиц оценивался в [2] по степени деполяризации путем сравнения с расчетами по модели хаотически ориентированных сфероидов. Соответственно для указанных подслоев были даны оценки эффективного радиуса 0,41 и 0,92 мкм. Следует отметить, что достоверность подобных оценок требует дополнительного анализа, поскольку степень деполяризации сильно зависит от формы частиц. Оценка общей массы метеорного вещества составила 1100 т. При этом объем облака в [2] был в 10–100 раз меньше, зато массовая концентрация примерно в такое же число раз больше. Последнее, по-видимому, объясняется наблюдением метеорного облака на более ранней стадии его эволюции.

Авторы благодарны Метеорологической службе Великобритании (UK Meteorological Office) за предоставленные данные.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 13-05-01036а), программы Президиума РАН № 16, Минобрнауки РФ (ГК № 14.518.11.7053, соглашение № 14.B37.21.0612), интеграционного проекта СО РАН № 106 и гранта № 12-05-98547 р\_восток\_a.

1. URL: [http://ru.wikipedia.org/wiki/Падение\\_метеорита\\_Челябинск](http://ru.wikipedia.org/wiki/Падение_метеорита_Челябинск)
2. Омаров Т.Б., Филиппов В.А., Филиппов Р.В. Лазерно-локационные исследования метеорных следов в стратосфере и мезосфере // XVI Междунар. симпоз. «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы». Иркутск, 2009. С. 391–393.
3. Klekociuk A.R., Brown P.G., Pack D.W., Revelle D.O., Edwards W.N., Spalding R.E., Tagliaferri E., Yoo B.B., Zagari J. Meteoritic dust from the atmospheric disintegration of a large meteoroid // Nature (Gr. Brit.). 2005. V. 436, N 7054. P. 1132–1135.
4. Черемисин А.А., Маричев В.Н., Новиков П.В. Лидарные наблюдения вулканического аэрозоля в атмосфере над Томском // Метеорол. и гидрол. 2011. № 9. С. 46–56.
5. Borovicka J., Spurny P., Shrubny L. Trajectory and orbit of the Chelyabinsk superbolide [Electronic resource] // Central Bureau for Astronomical Telegrams. IAU. 2013. N 3423. URL: <http://www.icq.eps.harvard.edu/CBET3423.html>
6. Vandeginste V., Goethals H., de Vos W., Hertogen J., Lagrou D. The Hautes Fagnes meteorite find: A new LL5 (S1) chondrite from Belgium // Geologica Belgica. 2012. V. 15, N 1–2. P. 96–104.
7. Dorschner J., Begemann B., Henning Th., Jäger C., Mutschke H. Steps toward interstellar silicate mineralogy // Astron. Astrophys. 1995. V. 300. P. 503–520.

V.N. Ivanov, D.S. Zubachev, V.A. Korshunov, V.B. Lapshin, M.S. Ivanov, K.A. Galkin, P.A. Gubko, D.L. Antonov, G.F. Tulinov, A.A. Cheremisin, P.V. Novikov, S.V. Nikolashkin, S.V. Titov, V.N. Marichev. **Lidar observations of stratospheric aerosol traces of Chelyabinsk meteorite.**

The results of lidar sounding of aerosol layers formed in stratosphere after Chebarcul meteorite fall on 15 February 2013 are presented. Aerosol layers were observed at altitudes of 34–42 km in Moscow, Obninsk, and Yakutsk at the end of February – beginning of March. The meteoritic origin of observed layers was confirmed by analysis of air mass trajectories.