

УДК 551.501

## Лидарные наблюдения оптических характеристик атмосферы во время Сычуаньского землетрясения

А.И. Гришин<sup>1</sup>, А.В. Крючков<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН  
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет  
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

Поступила в редакцию 29.01.2017 г.

Приводятся результаты лидарных наблюдений атмосферы во время Сычуаньского (КНР) землетрясения 2008 г. Показано, что параметры атмосферы существенно трансформируются во время и после землетрясения. В слое нижней тропосферы формируется профиль рассеивающих характеристик, отличающийся от исходного, что может служить одним из предикторов явления.

*Ключевые слова:* землетрясение, атмосфера, лидар, аэрозоль, концентрация, пограничный слой; earthquake, atmosphere, lidar, aerosol concentration, boundary layer.

### Введение

Землетрясения — одни из самых разрушительных природных катаклизмов. Сильные землетрясения с магнитудой  $M > 7$  обычно сопровождаются большим количеством человеческих жертв и многочисленными разрушениями даже на значительном удалении от эпицентра. Достаточно вспомнить Калифорнийское землетрясение 1906 г., Ашхабадское 1948 г., Спитакское 1988 г., Иранское 1990 г., Индонезийское 2006 г. и др. В этот ряд можно включить и землетрясение в Сычуане (КНР) 2008 г. По разным оценкам, оно унесло жизни от 70000 до 90000 чел. В год на Земле происходит более 100 опасных и потенциально опасных землетрясений.

Поэтому проблема прогнозирования места и времени разрушительного толчка не теряет своей актуальности. В настоящее время известны такие предвестники землетрясений, как увеличение флуктуаций геофизических полей различной природы (акустических, электрических, биологических и т.д.) и атмосферные явления, в т.ч. происходящие в верхних слоях атмосферы. Данные наблюдений на этих высотах в периоды землетрясений довольно многочисленны [1–5] и включают в себя спутниковые данные [4, 5, 7]. Исследования трансформации оптических характеристик тропосферы, особенно нижней ее части, во время природных катаклизмов занимают более скромное место [6, 8].

Наша работа описывает флуктуации оптических характеристик атмосферы в период Сычуаньского землетрясения 2008 г. Цель работы — демонстрация

того, что в условиях стабильной атмосферы и при отсутствии фронтов резкая изменчивость оптических характеристик атмосферы может служить предиктором предстоящего землетрясения наряду с другими геофизическими признаками.

### Обстоятельства и аппаратура измерений

В 2008 г. один из авторов настоящей работы находился в командировке в г. Лояне (КНР), где проходил испытания разработанный в ИОА СО РАН и построенный в Китае лазерный локаатор. Во время Сычуаньского землетрясения, которое началось 12 мая 2008 г. в 14:28 по Пекинскому времени, лидар располагался на испытательной площадке и был включен. Это позволило получить экспериментальные данные, которые составляют основу этой работы.

Оптические и эксплуатационные параметры лидара приведены ниже.

Длина волны лазерного излучения	915 нм
Тип излучателя	п/п лазерный диод
Тип оптической приемной и излучающей систем	линзовая асферическая
Диаметр излучающей апертуры	110 мм
Длительность импульса	100 нс
Мощность в импульсе	2,5 мкВт
Частота повторения импульсов	20 кГц
Тип фотоприемника	лавинный фотодиод
Диаметр приемной апертуры	110 мм
Полуширина интерференционного фильтра	100 нм
Время накопления сигнала (задается оператором)	1 с...10 мин
Максимальная высота зондирования	7,5 км

\* Анатолий Иванович Гришин (aig@iao.ru); Александр Владимирович Крючков (kaw@iao.ru).

Лоян расположен в 900 км к северо-востоку от Сычуани, тем не менее там отчетливо ощущались толчки с интенсивностью 3–4 балла. Качались люстры, звенела посуда, непосредственно перед подземными толчками наблюдалось anomальное поведение животных, местами были выбиты стекла. Фиксировались и другие признаки катаклизма. Землетрясение было зарегистрировано и в соседних странах: Индии, Пакистане, Таиланде, Вьетнаме, Монголии и России.

Принимаемые лидаром сигналы обратного рассеяния усреднялись за 5 мин (по 6 млн реализаций) и записывались на жесткий диск, после чего подвергались обработке, в ходе которой восстанавливались высотные профили коэффициента объемного рассеяния  $\alpha(R)$  на дистанции зондирования  $R$ .

Восстановление профилей  $\alpha(R)$  проводилось на основе метода Клетта [9]:

$$\alpha(R) = \frac{S(R)}{\frac{S(R_{\max})}{\alpha(R_{\max})} + 2 \int_R^{R_{\max}} S(R) dR}. \quad (1)$$

Здесь  $S(R) = \frac{U(R)R^2}{kG(R)}$ ,  $U(R)$  – сигнал на фотоприемнике с расстояния  $R$ ,  $k$  – аппаратная константа,  $G(R)$  – геометрическая функция лидара;  $R_{\max}$  – максимальная дальность зондирования (конец зондируемой трассы). Значение  $\alpha(R_{\max})$  выбиралось на основе континентальной модели В.Е. Зуева и Г.М. Крекова [14]. Выражение (1) – это решение обыкновенного дифференциального уравнения Бернулли [7, 13]; оно хорошо зарекомендовало себя в условиях шумов. Для вычисления использовался нижний строб измерителя высоты нижней границы облачности, располагавшийся на высоте 19 м над земной поверхностью.

Перед началом землетрясения стояла стабильная антициклональная погода. В оптическом плане началу измерений сопутствовала плотная дымка с приземной дальностью видимости ~3–4 км. Лидар был включен 11 мая и находился в режиме рутинных измерений, когда произошло землетрясение в Сычуане. Так как скорость сейсмических волн, как поперечных, так и продольных, зависит в основном от плотности земных пород и составляет 8–10 км/с [10], то сейсмической волне понадобилось немного больше минуты, чтобы дойти до Лояна. По субъективным оценкам, довольно резко уменьшилась прозрачность приземного слоя атмосферы, появилась сильная дымка.

На рис. 1 (цветная вкладка) представлен график лидарных измерений за 11–13 мая 2008 г. Цветная шкала справа представляет объемный коэффициент рассеяния  $\alpha(R)$  в  $\text{км}^{-1}$ . Вертикальная линия желтого цвета показывает момент первого подземного толчка. Световые столбы, которые присутствуют на графике в дневное время – это фон неба (рассеянный в атмосфере солнечный свет), который не удалось полностью устранить по причине довольно широкой полосы пропускания интерференционного светофильтра (100 нм).

Из рис. 1 видно, что атмосферные оптические параметры сильно отличаются до и после начала землетрясения. Если перед началом подземных толчков (слева от желтой линии) почти весь аэрозоль был сосредоточен в слое атмосферы от 0 до 0,5...1,0 км, то за несколько десятков минут до начала землетрясения наблюдается уменьшение толщины приземного слоя и вынос рассеивающих частиц в более высокие слои атмосферы, до высот 2,0–2,5 км. Это подтверждается рис. 2.

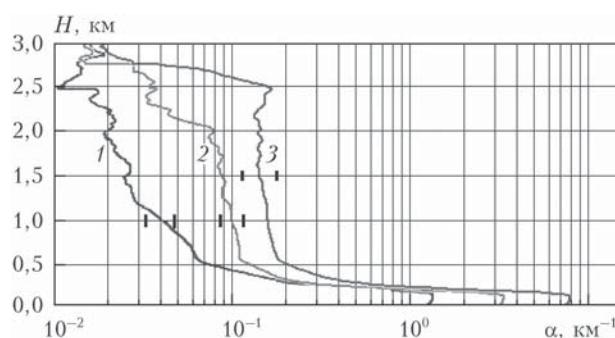


Рис. 2. Высотные профили коэффициента объемного рассеяния за 2 ч (1), за 1 ч до начала землетрясения (2) и во время начала катаклизма (3)

На рис. 2 приведены три кривые, показывающие высотный ход коэффициента рассеяния  $\alpha(R)$  за 2 ч до начала землетрясения (1), за 1 ч до катаклизма (2) и во время начала подземных толчков (3). Доверительные интервалы для кривых 1–3 рассчитаны для доверительной вероятности 0,9. Анализ кривой 1 показывает, что приземный слой располагается до высоты около 0,5 км, а профиль в целом носит гладкий характер. На высотах 2,5 км и более коэффициент рассеяния стремится к величине  $10^{-2}$ , что соответствует рассеянию практически «закругленность» профиля в самых нижних слоях атмосферы (0...0,2 км) объясняется неточным заданием геометрической функции лидара  $G(R)$ , которая рассчитывается каждый час, чтобы компенсировать изменчивость  $G(R)$  при термических деформациях корпуса лидара за счет солнечного излучения. Влияние геометрической функции в данном эксперименте заметно до высот 0,2 км.

Профиль 2 коэффициента рассеяния за 1 ч до начала землетрясения существенно отличается от профиля 1. Прежде всего, появилась характерная ступенька, которая говорит о формировании пограничного слоя, причем верхняя граница этого слоя располагалась на высотах 2,0...2,7 км.

Вынос аэрозоля в верхние слои атмосферы осуществлялся за счет запасов приземного слоя, что видно из уменьшения толщины последнего. Перенос аэрозоля может происходить благодаря атмосферным конвективным ячейкам, появляющимся при термическом нагреве почвы [11, 12] и не имеющим отношения к землетрясению. Другой причиной может быть образование микротрещин на поверхности земли, через которые в атмосферу поступают газы, обычно находящиеся глубоко под землей (водород, метан,

углекислый газ и т.д.). Увеличение их концентрации в атмосфере служит предвестником землетрясений [10]. Микротрещины могут быть образованы при напряжениях и сдвигах, возникающих в земной коре перед землетрясением [10].

Одновременно можно заметить увеличение значения коэффициента рассеяния в приповерхностном слое атмосферы до величин 2,0...2,5 км<sup>-1</sup>. Состояние атмосферы в момент первого подземного толчка показано на рис. 2 кривой 3: верхняя граница пограничного слоя перемешивания имеет более четкие очертания до высоты 2,5...3,0 км, величина коэффициента рассеяния в приземном слое увеличилась до 7...8 км<sup>-1</sup>, при этом толщина слоя осталась практически неизменной (0,25 км). Следовательно, оптическая толща в приземном слое атмосферы увеличилась благодаря поступлению дополнительной массы аэрозоля. Значение коэффициента рассеяния выше 3 км практически не изменилось, поэтому на рис. 2 эти слои не показаны.

Землетрясение продолжалось несколько минут, после чего сила подземных толчков стала ослабевать. На рис. 1 видно, что толщина приземного слоя правее желтой вертикальной линии (т.е. после землетрясения) постепенно возвратилась к уровню до его начала. На восстановление атмосферной ситуации потребовалось несколько часов.

То, что причиной изменчивости коэффициента рассеяния является именно землетрясение, доказывает тот факт, что за сутки до начала толчков в примерно тех же погодных условиях суточные флуктуации  $\alpha(R)$  носили совершенно другой характер.

### Заключение

— За 2 ч до начала землетрясения атмосфера находилась в спокойном состоянии; профиль коэффициента рассеяния был сравнительно гладким, что подтверждается рис. 2.

— Приблизительно за 1 ч до начала землетрясения профиль коэффициента рассеяния начал видоизменяться, на нем появилась характерная ступенька, которая определяла верхнюю границу пограничного слоя перемешивания.

— К моменту первого подземного толчка в атмосфере отмечалось большое количество аэрозоля, который поднялся до высот 2,5...3,0 км, при этом коэффициент рассеяния в приповерхностном слое атмосферы увеличился до 7...8 км<sup>-1</sup>.

— В условиях стабильной атмосферы и отсутствии фронтов резкая изменчивость атмосферных оптических характеристик может служить предиктором землетрясения наряду с другими геофизическими признаками.

— После окончания землетрясения параметры атмосферы восстановились в течение нескольких часов.

1. Leonard R.S., Barnes R.A. Observations of ionospheric disturbance following the Alaskan earthquake // J. Geophys. Res. 1965. V. 70, N 9. P. 1250–1253.
2. Литеровский В.А., Похотелов О.А., Шалимов С.А. Ионосферные предвестники землетрясений. М.: Наука, 1992. 304 с.
3. Davies E., Baker D.M. Ionospheric effect observed around the time of the Alaskan earthquake of March 28, 1964 // J. Geophys. Res. 1965. V. 70, N 9. P. 2251–2253.
4. Краткосрочный прогноз катастрофических землетрясений с помощью радиофизических наземно-космических методов / под ред. В.Н. Страхова. М.: ОИФЗ РАН, 1999. 176 с.
5. Chmyrev V.V., Isaev N.S., Bilichenko S.V. Observation by space borne detectors waves in the ionosphere over the earthquake centre // Phys. Earth Planet Inter. 1989. V. 57. P. 110–114.
6. Ивлев Л.С., Давыдова-Мартинес В.И., Варгас О.А., Мартинес А. Изменчивость характеристик аэрозоля, озона и сернистого газа в приземном слое при землетрясении в Западной Мексике // Оптика атмосф. и океана. 1998. Т. 11, № 5. С. 490–494.
7. Tronin A.A. Thermal IR satellite sensor data application for earthquake research in China // Int. J. Remote Sens. 2000. V. 21, N 6. P. 3169–3177.
8. Матвиенко Г.Г., Алексеев В.А., Гришин А.И., Креков Г.М., Крекова М.М. Исследование флуктуаций электрических и аэрозольных характеристик атмосферы как предвестника тектонической активности // Оптика атмосф. и океана. 2007. Т. 8, № 8. С. 691–700.
9. Klett J.D. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns // Appl. Opt. 1981. V. 20, N 2. P. 211–220.
10. Рихтер Ч.Ф. Элементарная сейсмология. М.: Изд-во иностр. литер., 1963. 671 с.
11. Гилл А. Динамика атмосферы и океана. М.: Мир, 1986. Т. 1. 399 с.; Т. 2. 416 с.
12. Обухов А.М. Турбулентность и динамика атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1988. 178 с.
13. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. М.: Наука, 1977. 831 с.
14. Зуев В.Е., Креков Г.М. Современные проблемы атмосферной оптики. Т. 2. Оптические модели атмосферы. Л.: Гидрометиздат, 1986. 256 с.

#### *A.I. Grishin, A.V. Kryuchkov. Lidar observations of optical parameters of the atmosphere during the Sichuan earthquake.*

The results of lidar atmospheric observations during the Sichuan (China) earthquake of 2008 are presented. It is shown that the parameters of the atmosphere substantially transformed during and after the earthquake. The profile of scattering characteristics formed in the lower troposphere differs from the original one, which can serve as one of predictors of the phenomenon.

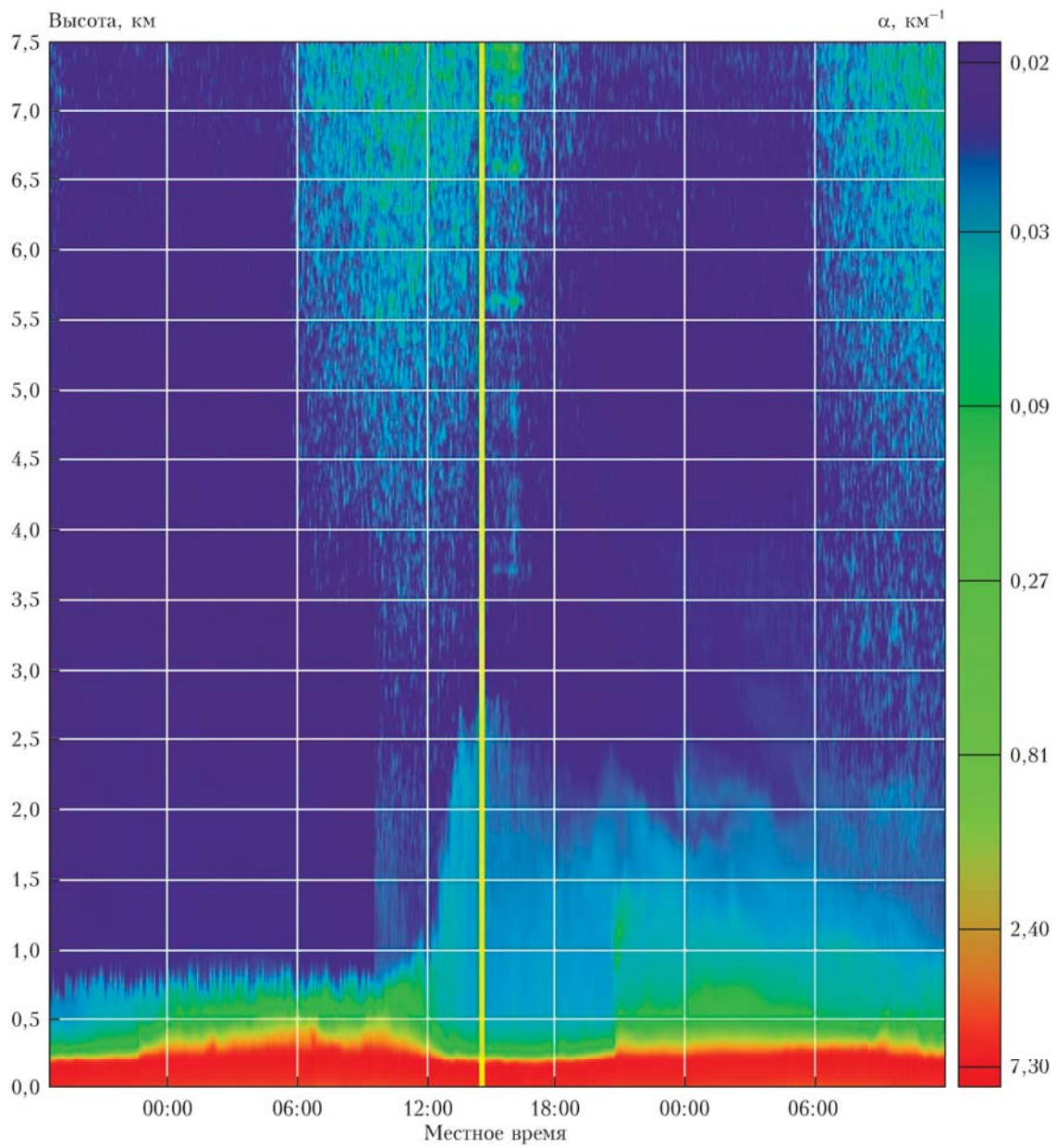


Рис. 1. График временного хода профиля коэффициента рассеяния в период 11–13 мая 2008 г.