

ЛИДАРНЫЙ МОНИТОРИНГ ТЕКТОНИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ В ТАМАНИ ПО ВЫБРОСАМ АЭРОЗОЛЕЙ. ОТРАБОТКА МЕТОДА

В.А. Алексеев, А.Н. Ляш**, С.М. Першин****

**ТРИНИТИ*

***Институт космических исследований РАН. E-mail: alysh@iki.rssi.ru*

****Научный центр волновых исследований Института общей физики РАН*

Изложены материалы по мониторингу аэрозольных выбросов грязевых вулканов компактным лидаром обратного рассеяния на Таманском полуострове, отличающемся сейсмической активностью и повышенной частотой небольших землетрясений с магнитудой 2–4, с одновременным измерением концентрации водорода как газа-носителя для транспорта аэрозоля из мантии Земли. Обнаружена корреляция плотности тектонического аэрозольного шлейфа и водорода из трещины/разлома в штреке старой шахты и грязевого вулкана на поверхности. Обсуждается возможность использования лидарных данных по измерению динамики аэрозольных выбросов для изучения тектонической активности мантии Земли как предвестников землетрясений и для их прогноза

Введение

Катастрофически разрушительные последствия землетрясений последних лет — таких как спитакское в Армении, турецкое и, наконец, на Алтае 20–22 октября 2003 г. еще раз показали, что развитие любых инструментальных средств мониторинга тектонической активности, с целью регистрации предвестников и прогноза землетрясений, является актуальной задачей. Известно, что предвестником сейсмической активности служит изменение (в количественном и качественном отношении) набора атомов металлов в аэрозолях при газообразных выбросах из разломов. Однако постоянный контроль, забор проб и последующий элементный анализ представляет растянутый во времени и поэтому недостаточно оперативный процесс.

Выбросы глубинных газов сопровождаются инъекцией аэрозоля, образующегося за счет вовлечения частиц породы при движении газов вверх по разлому. Обнаружение и измерение динамики концентрации такого аэрозоля можно осуществлять оперативно в реальном времени и дистанционно с помощью техники лидарного зондирования.

В данной публикации изложены результаты полевых экспериментов, в ходе которых была предпринята попытка использования портативного безопасного для глаз лидара обратного рассеяния для мониторинга аэрозоля, выносимого сопутствующими газами (водород, метан и др.) из мантии Земли в районах тектонических разломов на Таманском полуострове в октябре-ноябре 1996 г.

Как было установлено ранее [1], интенсивный аэрозольный выброс вулкана Авача на Камчатке в декабре 1990 г. был единственным предвестником последующего землетрясения и извержения вулкана 13 января 1991 г., поскольку данные геофизического мониторинга вулканической активности на основе сейсмограмм не дали достоверно различимых изменений, которые могли бы рассматриваться как предвестники. При извержении вулкана Галераф в январе 1993 г. в Колумбии, вблизи города Пасто, погибло 9 вулканологов. При этом сеть из шести автоматических сейсмостанций на кратере вулкана за 6 ч до начала извержения не передала никаких сейсмосигналов как предвестников извержения [2].

Следует отметить, что накануне последних катастрофических событий на Алтае постоянно действующая станция на основе лазерной интерферометрии на большой базе для мониторинга тектонической активности земной коры в районе озера Байкал не зарегистрировала отчетливых сигналов тектонической активности [3]. При этом в моменты последующих землетрясений деформация скального основания, на котором смонтирован лазерный интерферометр Майкельсона, была надежно зарегистрирована.

Эти и другие подобные факты еще раз показали, что сейсмография не всегда является надежным источником для прогноза извержения или землетрясения.

В этой связи изучение динамики выбросов тектонических аэрозолей может рассматриваться, наряду с другими геофизическими методами и методами лазерной интерферометрии, как перспективное направление получения информации для прогноза землетрясений и извержений вулканов. Не менее интересной является корреляция образования тектонической облачности над разломами в земной коре, установленной на основе анализа длительных 50-летних наблюдений, проведенного специалистами Московского государственного университета [4].

Следует ожидать, что постоянный мониторинг динамики выбросов тектонического аэрозоля в сейсмически активной зоне позволит получить массив данных и дополнительный канал информации о развитии и прогнозе землетрясений. Очевидно, что наиболее удобным инструментом для зондирования аэрозольной компоненты выбросов может рассматриваться лидар обратного рассеяния, способный работать в автономном режиме без оператора с бортовым источником питания [5, 6].

Цель настоящей работы — являлось поиск в сейсмически активной зоне грязевых или гейзерных вулканов с аэрозольными выбросами для изучения возможности обнаружения сигнала обратного рассеяния от аэрозольного шлейфа и наблюдение динамики изменения его плотности компактным лидаром на диодном лазере с безопасным уровнем излучения [7, 8].

Параметры компактного лидара и примеры зондирования атмосферы

Приведем параметры одной из первых версий компактного лидара на диодном лазере, на котором были проверены основные принципы работы, рассмотренные выше. Первоначально идея использования компактного лидара-высотомера была сформулирована нами в период подготовки аэростатной станции для миссии «Марс-94» [5]. Тогда же был разработан первый вариант компактного лидара-высотомера «Филин» (см. таблицу), который, как прототип лидара для миссии «Марс-98», прошел отборочный конкурс и был включен в состав научного комплекса модуля Mars Surveyor Lander-99 [6]. К сожалению, при посадке на поверхность Марса 3 декабря 1999 г. в районе его Южного полюса модуль потерпел аварию.

Параметры лидара «Филин»

| Передатчик | | Приемник | | |
|---------------------------|------------|--------------------------|---------------------|----|
| Тип лазера | GaAs | Тип | Лавинный Si (SPAD) | |
| Длина волны, нм | 884 | Размер, мкм | 40 | |
| Энергия импульса, мДж | 0,4 | Поле зрения, мрад | 1×1 | |
| Мощность, Вт | 4 | Темновые импульсы, кГц | 10–30 | |
| Длительность импульса, нс | 100 | Длина фокуса/диаметр, мм | 40/16 | |
| Частота повторения, кГц | 2,5 | Фильтр: | | |
| Расходимость луча, мрад | 1×13 | | • ширина полосы, нм | 3 |
| Длина фокуса/диаметр, мм | 160/40 | | • пропускание, % | 60 |
| Стабилизация температуры | ±2° | • диаметр, мм | 14 | |
| Габариты, мм | 150×120×75 | | | |
| Масса, г | 1200 | | | |
| Энергопотребление, Вт | 3–5 | | | |



Рис. 1. Общий вид лидара «Филин»

За это время было проведено несколько экспериментов по зондированию атмосферы в лабораторных и натуральных условиях с использованием макета лидара «Филин» [7, 8], общий вид которого представлен на рис. 1.

Система управления лидаром

Система управления и регистрации собрана на основе IBM совместимого компьютера. Несмотря на большую длительность импульса, шаг дискретизации по дальности был выбран 5 м, что соответствует размеру ячейки 33 нс. В зависимости от уровня фоновой засветки в диалоговом режиме устанавливается размер строка 0,5; 1; 2 и 4 мкс. Селекция области зондирования по дальности в несколько километров проводится передвижением строка по временной оси после стартового импульса лазера. Число импульсов лазера и включений приемника без лазера для измерения фона между лазерными импульсами выбиралось из условий эксперимента в пределах от 1000 до $1000 \cdot 2k$, где $k = 0, \dots, 128$.

Программа могла обеспечивать работу лидара в автономном режиме в течение нескольких суток с заданным интервалом между измерениями и чередованием положения строка на оси от первого до заданного, например 4000 м. Это удобно для исследования динамики пропускания атмосферы на фиксированной трассе с использованием топографической мишени и ее корреляции с плотностью аэрозоля.

Заметим, что, несмотря на 10-кратное ослабление энергии импульса до 40 нДж вследствие неполного перекрытия луча с полем зрения приемника, нам удалось провести зондирование атмосферы, аэрозольных слоев различного типа, дымовых шлейфов, нижней границы облачности и поверхности топографических объектов, удаленных на расстояние от нескольких сот метров при измерении днем и до 4 км ночью.

Калибровка лидара для измерения коэффициента обратного рассеяния проводилась по известной методике с использованием рассеивающей поверхности с известным значением альбедо [9]. В лидаре максимальная чувствительность определялась по 4-й и 5-й ячейкам в гистограмме и составила $5 \cdot 10^{-7} \text{ (см ср)}^{-1}$ при дневном освещении и наборе данных по 32 000 лазерных импульсов.

Рассмотрим здесь несколько характерных примеров зондирования атмосферы этим лидаром, помимо уже упомянутых в тексте.

Одновременное измерение вариации плотности приповерхностного аэрозоля и высоты нижней границы облачного слоя

Эксперимент по вертикальному зондированию атмосферы проводился 17 декабря 1992 г. в университете Йоенсуу на северо-востоке Финляндии в течение 5 часов с 15:00 до 20:00 [7]. На рис. 2а представлены типичный вид лидарного сигнала при активном зондировании приповерхностного аэрозоля и нижней кромки облачности. На рис. 2б показан тот же лидарный эхо-сигнал после корректировки на квадрат расстояния от лидара вдоль трассы зондирования.

Здесь цикл измерения проводился только за 32 000 лазерных импульсов и одновременно регистрировался вертикальный профиль коэффициента обратного рассеяния до высоты 600 м при длительности строба 4 мкс. Сигнал обратного рассеяния приведен без коррекции на квадрат расстояния от лидара, поэтому спад первого пика, пропорционального плотности аэрозоля в слое толщиной 70–80 м, должен убывать с квадратом расстояния. Любое отклонение значений от этой функции, превышающее величину 3σ , будет указывать на присутствие слоистой структуры в приповерхностном слое атмосферы.

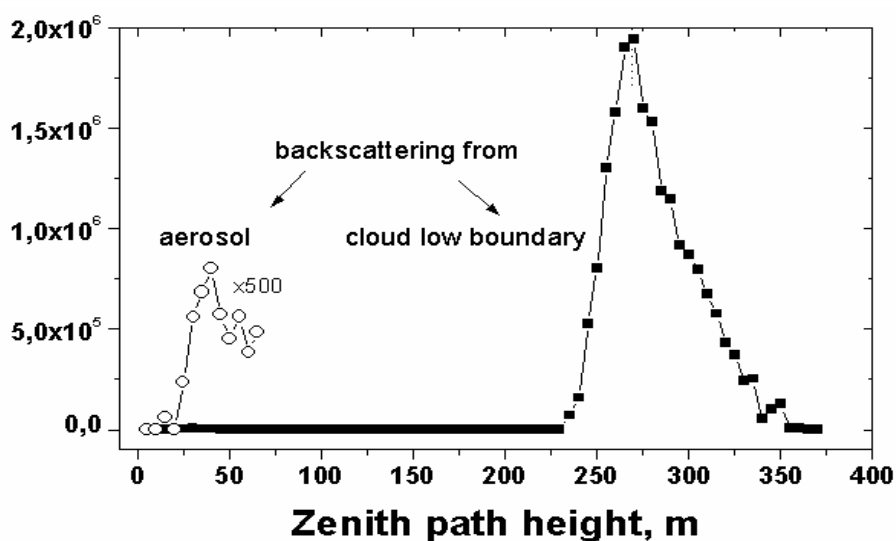
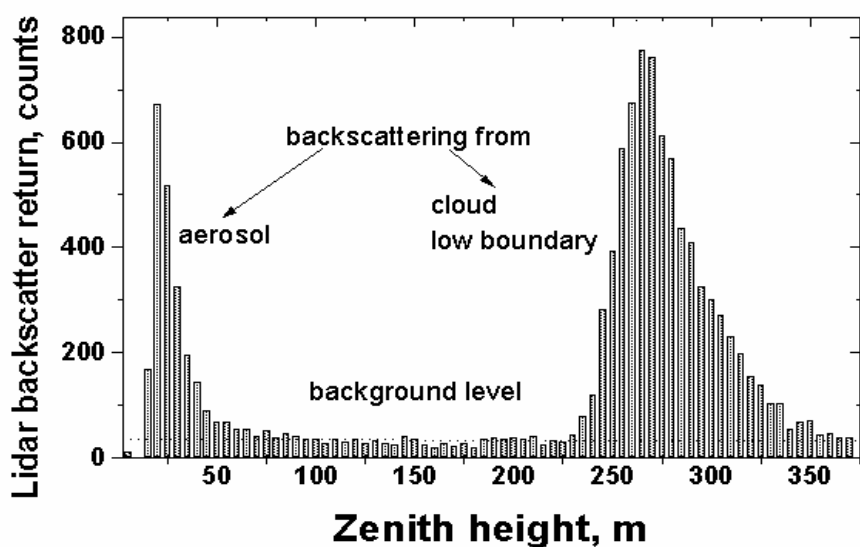


Рис. 2. Типичный лидарный сигнал при зондировании вертикально вверх: а — наблюдаемый в виде гистограммы фотоотсчетов; б — скорректированный по дальности

Второй сигнальный пик дает нам информацию о высоте (около 300 м) нижней кромки облаков, об ее структуре — плотности и слоистости, а также о величине альбедо нижней границы облака, влияющего на радиационный баланс между поверхностью планеты и облачным покровом. Скорость убывания сигнала на спаде пика позволяет оценить коэффициент экстинкции внутри облака и грубо определить по этой величине класс или мощность облачного слоя. Принимая во внимание тот факт, что коэффициент обратного рассеяния обычно в 5–10 раз меньше коэффициента экстинкции, можно его оценить, рассчитав удвоенную толщину слоя облака, на которой сигнал уменьшается в e раз. В рассматриваемом случае такая оценка дает величину 16 км^{-1} . Здесь следует обратить внимание на имеющийся большой запас по обнаружительной способности лидара «Филин» при регистрации плотных аэрозольных слоев типа границы облачности, несмотря на малую мощность импульсов лазера. Так, нам удалось надежно зарегистрировать сигнал обратного рассеяния от облаков на высоте 1000–1200 м в ночное время.

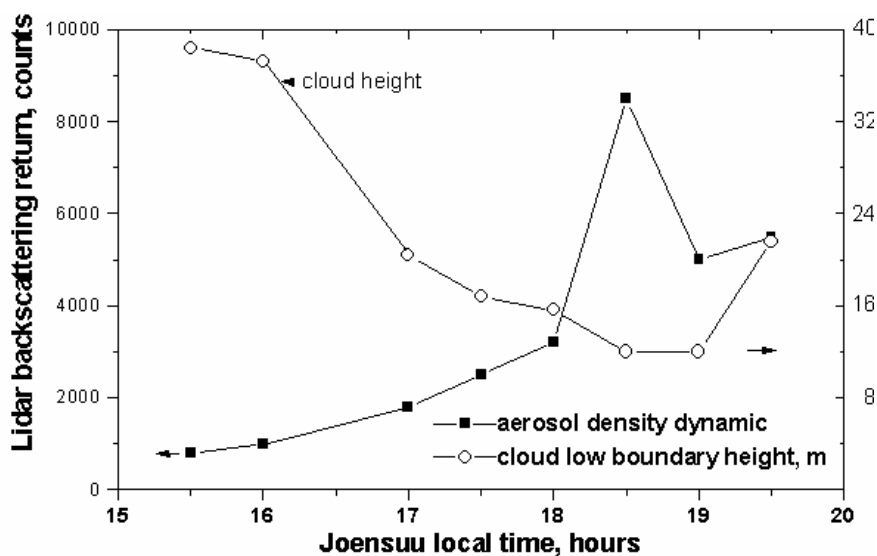


Рис. 3. Динамика изменения высоты облачного слоя и плотности аэрозоля

На рис. 3 представлена динамика изменения высоты облачности и плотности аэрозоля в течение некоторого отрезка времени с 15:30 до 19:30 местного времени. Из рисунка хорошо видно, что понижение нижней границы облачности сопровождается увеличением плотности аэрозоля. Этот пример удачно иллюстрирует возможность применения такого лидара для мониторинга облачности на автономных метеокомплексах или дымовых шлейфов в районах лесных пожаров.

Регистрация аэрозольного слоя как пример аэрозольных выбросов из тектонических разломов

В течение октября 1996 г. нами были проведены полевые работы по изучению аэрозольных выбросов тектонического происхождения и сопутствующих им потоков водорода. Источниками локальных выбросов аэрозоля были выбраны разломы с грязевыми вулканами и штольня на Таманском полуострове.

Полученные данные показывают перспективность использования лидара для исследования потоков тектонических аэрозолей и, прежде всего, для выявления мест наибольшей аэрозольной активности. Анализ данных задерживался по причине позднего поступления в наше распоряжение данных об измерении водорода, которые проводились параллельно с работой лидара.

Место проведения измерений

Работы проводились в Краснодарском крае в районах с сетью развитых тектонических разломов, на которых расположены грязевые вулканы.

В ходе экспедиции было сделано несколько экспериментов в закрытых шахтах и около грязевых вулканов:

- а) в вентиляционном штреке ртутной шахты «Сахалин» (поселок Ново-Ахтырский);
- б) грязевый вулкан Шапсугский;
- в) грязевые вулканы около поселка Янтарь (побережье Черного моря);
- г) грязевые вулканы около Фанагорийского раскопа;
- д) грязевые вулканы в районе города Темрюк.

Результаты зондирования

А. Шахта «Сахалин». Работы проводились 27–28 октября.

С точки зрения лидарного зондирования аэрозоля наиболее удачными были условия обнаружения локальных выбросов аэрозоля из разлома именно в вентиляционном штреке шахты. Штрек не освещен, поэтому внешние засветки минимальны и более стабильны по уровню фоновому сигнала. Это позволяет работать в режиме с повышенной обнаружительной способностью лидара.

Лидар устанавливался на расстоянии 50 м от входа в горизонтальный штрек и юстировался таким образом, чтобы зондирующий пучок лазера не касался стенок штрека. Схема эксперимента представлена на рис. 4. Длина трассы ограничивалась изгибом штрека на удалении 250 м от лидара. Таким образом, была реализована схема измерений с закрытой трассой. Эта схема позволяет одновременно регистрировать лидарный сигнал рассеяния на аэрозолях в области трассы, прилежащей к лидару. Далее регистрировался аэрозоль выброса на средней части трассы и сигнал импульса фотонов, рассеянных стенкой штрека. Последний сигнал проходил дважды по трассе «туда – обратно» через аэрозольный шлейф, что повышало надежность измерений.

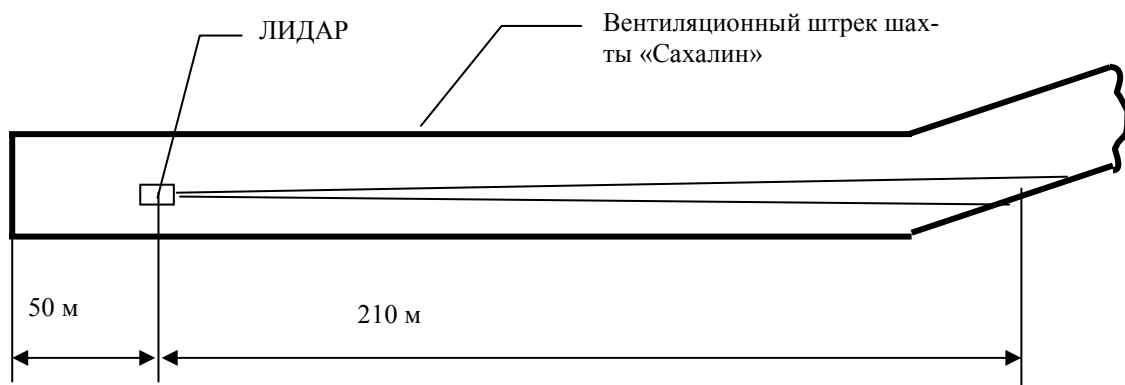


Рис. 4. Схема эксперимента в вентиляционном штреке шахты «Сахалин» 28 октября 1996 г.

Обработанные данные представлены на рис. 5 совместно с данными водородного датчика, который был установлен вблизи выхода аэрозоля из разлома. Из рисунка хорошо видно, что содержание водорода удовлетворительно коррелирует с концентрацией аэрозоля.

Таким образом, после подобной калибровки лидара его можно устанавливать в таком штреке для автономного зондирования аэрозоля без оператора по заданной программе и циклограмме. Данные могут быть передаваться по радиорелейной линии связи в центр обработки данных с нескольких детекторов одновременно.

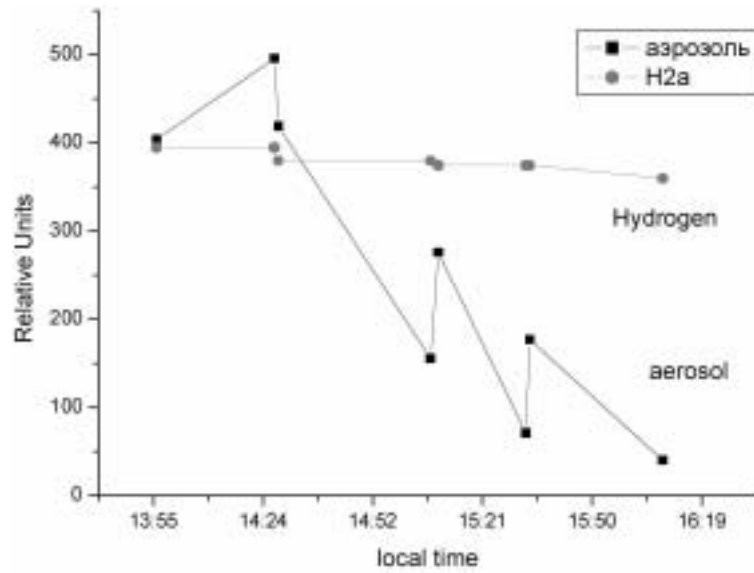


Рис. 5. Результаты измерений аэрозольного сигнала и водорода в вентиляционном штреке шахты «Сахалин»

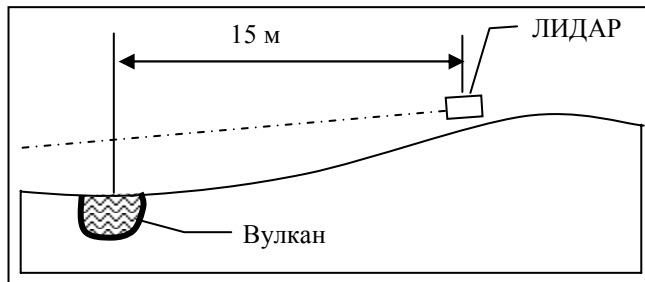


Рис. 6. Схема и фотография зондирования аэрозоля грязевого вулкана

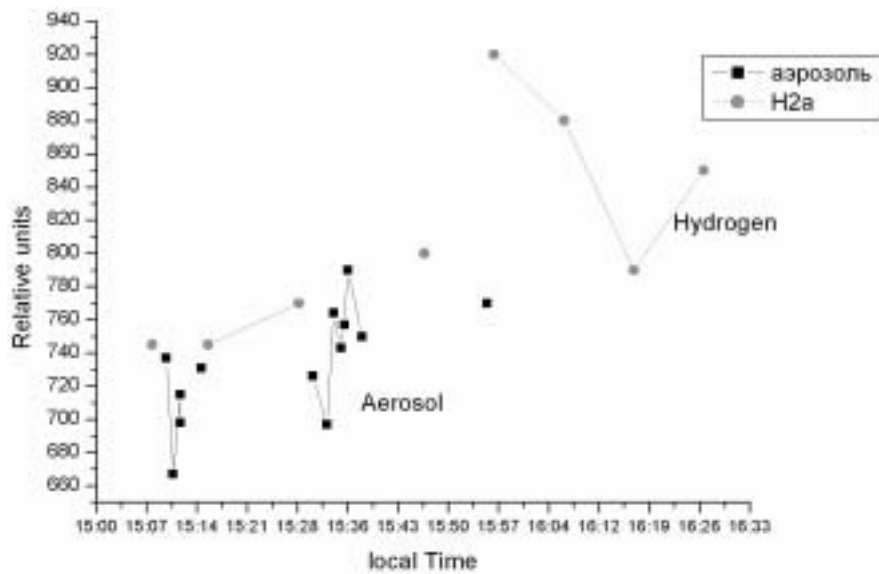


Рис. 7. Данные аэрозольного зондирования грязевого вулкана Шапсугский

Б. Грязевый вулкан «Шапсугский». Работы проводились 29 октября.

Лидар устанавливался на расстоянии 15–20 м от горловины вулкана, схема зондирования приведена на рис. 6, результаты зондирования — на рис. 7.

Здесь отчетливо прослеживается тренд уменьшения концентрации водорода. При этом сигнал обратного рассеяния от аэрозоля изменялся быстрее. Это может быть обусловлено взаимодействием тектонического аэрозоля с атмосферой (конденсация атмосферной влаги и пр.).

Выводы

Установлена корреляция динамики концентрации тектонических газов, в нашем случае водорода, с сигналом зондирования аэрозоля компактным лидаром обратного рассеяния.

Эта корреляция позволяет рассматривать возможность применения техники дистанционного зондирования аэрозольных выбросов из тектонических разломов в автономном режиме без участия оператора как перспективное направление мониторинга сейсмической активности для прогноза тектонической активности и землетрясений при сопоставлении этих данных с показаниями других детекторов.

Полученные первые положительные результаты требуют продолжения совместных измерений с датчиками водорода и метана в течение длительного периода с использованием надежных сообщений о сейсмической активности за период мониторинга.

Литература

1. Алексеев В.А., Алексеева Н.Г., Муравьев Я.Д., Бирюкова Т.П., Кузнецов И.П. Аэрозольный предвестник извержения Авачинского вулкана в январе 1991 г. // ДАН. Геофизика. 1995. Т. 345. № 5. С. 667.
2. Французский бюллетень вулканологических станций. 1993. Т. 8. С. 2.
3. Итоговый отчет по теме «Разработка методов измерения координат для повышения точности и надежности прогнозирования природных и техногенных процессов на Земле и в космосе». М.: М-во науки РФ, 2003.
4. Matveenko G.G., Grishin A.I., Alekseev V.A. // Proc. SPIE. 2001. V. 4167. P. 281–288.
5. Pershin S., Lyash A., Nunes R., Shellard R., Tabares R. Aerosol Dynamics Monitoring For Cosmic Ray Observatories by a Micro Pulse Lidar // Advanced of Space Research. 2002. V. 29. N 11. P. 1787–1792.
6. Arumov G.P., Bukharin A.V., Linkin V.M., Lipatov A.N., Lyash A.N., Makarov V.S., Pershin S.M., Tiurin A.V. Compact aerosol Lidar for Mars atmosphere monitoring according to NASA “Mars Surveyor Program’98” // Proc. SPIE’s Symp. Laser Application’98. 1998. P. 3688.
7. Pershin S., Linkin V., Bukharin A., Makarov V., Kouki T., Prochazka I. Backscatter Lidar-ceilometer: instrument for atmospheric aerosol and cloud sounding // Proc. of XIII Intern. Symp. IGARSS’93. Tokyo, Aug. 20, 1993. V. II. P. 462–464.
8. Pershin S. A new generation of the portable backscatter Lidar with eye-safe energy level for environmental sensing // Proc. of Intern. Symp. “Aerospace Sensing”. SPIE’s. Orlando, Apr. 4, 1994. P. 2222.
9. Pershin S., Linkin V.M., Bukharin A.V., Makarov V.S. Calibration of an aerosol lidar with quantum counter for detection of atmospheric impurities // Optics of atmosphere and ocean. Russian, 1994. V. 7. N 4. P. 538–547.