

УДК 550.34.038.4; 551.508.856

## КОРРЕЛЯЦИИ СИГНАЛОВ ЛИДАРНОГО АЭРОЗОЛЬНОГО РАССЕЯНИЯ И ЛАЗЕРНОГО ДЕФОРМОГРАФА ПРИ СЖАТИИ/РАСТЯЖЕНИИ КОРЫ ЗЕМЛИ

С. М. Першин<sup>1</sup>, Г. И. Долгих<sup>2</sup>, А. Ф. Бункин<sup>1</sup>,  
М. Я. Гришин<sup>1</sup>, В. А. Завозин<sup>1</sup>, В. К. Клинков<sup>1</sup>,  
В. Н. Леднёв<sup>1</sup>, В. С. Макаров<sup>3</sup>, А. А. Плотников<sup>2</sup>, А. В. Тюрин<sup>3</sup>

*Впервые, насколько нам известно, проведено лидарное зондирование вариации тектонического аэрозоля в тоннеле лазерного деформографа-интерферометра на протяжении полугодового временного отрезка 2017.12 – 2018.05 г. на мысе Шульца (131°9'8" ВД, 42°34'6" СШ) на Дальнем Востоке. Установлена корреляция сигналов лазерного интерферометра и лидара обратного рассеяния на аэрозолях при медленном сжатии/растяжении коры Земли.*

**Ключевые слова:** лазерный деформограф, низкочастотные деформации, лазерное дистанционное зондирование, лидар, тектонический аэрозоль.

*Введение.* Ранее [1] нами была выявлена корреляция выхода тектонического водорода и выброса аэрозоля при лидарном зондировании аэрозолей грязевых вулканов и замкнутого объёма штока шахты на коротком временном отрезке в несколько десятков минут. Было высказано предположение о том, что вариация выхода аэрозоля отражает тектонические процессы деформации земной коры и аэрозольный лидар может использоваться как недорогой, но эффективный детектор тектонической активности Земли [1]. Однако было неясно, какой знак деформации соответствует увеличению/уменьшению концентрации аэрозолей. Позднее [2] было зарегистрировано уменьшение коэффициента обратного рассеяния на аэрозолях в тоннеле Баксанской нейтринной обсерватории при разгрузке земной коры в области тени солнечного затмения 29 марта 2006 г. Эти лидарные измерения, полученные на 3-часовом отрезке времени прохождения Луны

<sup>1</sup> НЦВИ ИОФ РАН, 119991 Россия, Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: pershin@kapella.gpi.ru.

<sup>2</sup> Тихоокеанский океанологический институт (ТОИ) им. В. И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток.

<sup>3</sup> Институт космических исследований РАН, Москва.

по диску Солнца, косвенно указывали, что расширение коры Земли сопровождается снижением выхода аэрозолей.

Целью данной работы являлось экспериментальное обоснование на длительном временном отрезке знака вариации сигнала лидарного зондирования тектонических аэрозолей [1, 2] при сжатии (расширении) земной коры с использованием прямого измерения сжатия/расширения коры Земли лазерным интерферометром-деформографом [3]. Лазерные интерферометры-деформографы обладают высокой чувствительностью, что позволяет детектировать малейшие изменения расстояния между зеркалами как для низкочастотных измерений деформации земной коры, так и для регистрации гравитационных волн [4, 5].

*Эксперимент.* Эксперимент проводился на базе морской экспедиционной станции Тихоокеанского океанологического института (ТОИ) им. В. И. Ильичева ДВО РАН “Мысе Шульца” на юго-западе от Владивостока ( $131^{\circ}9'8''$  ВД,  $42^{\circ}34'60''$  СШ). Время измерений (январь–май 2018 г.) было выбрано таким образом, чтобы захватить смену сезонов и, возможно, сезонную вариацию деформации коры Земли.

Лазерный деформограф [3] был смонтирован в подземном гидро- и термоизолированном тоннеле на глубине 3 м. Деформограф был собран на скальном основании по схеме модифицированного неравноплечего интерферометра Майкельсона с гелий-неоновым лазером Melles Griot с длиной волны 632.8 нм. В длинном плече (17.2 м) пучок лазера распространяется по вакуумированной трубе из нержавеющей стали. Деформограф обеспечивал измерение вариации длины участка земной коры с погрешностью 0.1 нм и частотой дискретизации 1 Гц. Температура воздуха внутри тоннеля деформографа поддерживалась постоянной с точностью до 1 градуса Цельсия  $20 \pm 1$  °C [3].

Динамику выхода тектонического аэрозоля анализировали с помощью ранее созданного лидара обратного рассеяния нового поколения [1, 2, 6–8]. Лидар был разработан нами для изучения стратификации атмосферы Марса в рамках миссии НАСА “Mars Polar Lander-99” [8, 9]. В данной работе была использована усовершенствованная модель лидара. В качестве передатчика лидара использовался импульсный диодный лазер с безопасным для глаз уровнем излучения (0.5 мкДж/имп) на длине волны 884 нм с частотой повторения импульсов 2.5 кГц. Приёмный канал лидара был собран на лавинном кремниевом фотодиоде (single photon avalanche photodiode, SPAD) [10], который работал в режиме счёта фотонов (в гейгеровской моде) с длительностью строба 0.5 мкс и длиной ячейки фотоотсчётов 5 м (33 нс). Более детально лидар описан в работах [1, 2].

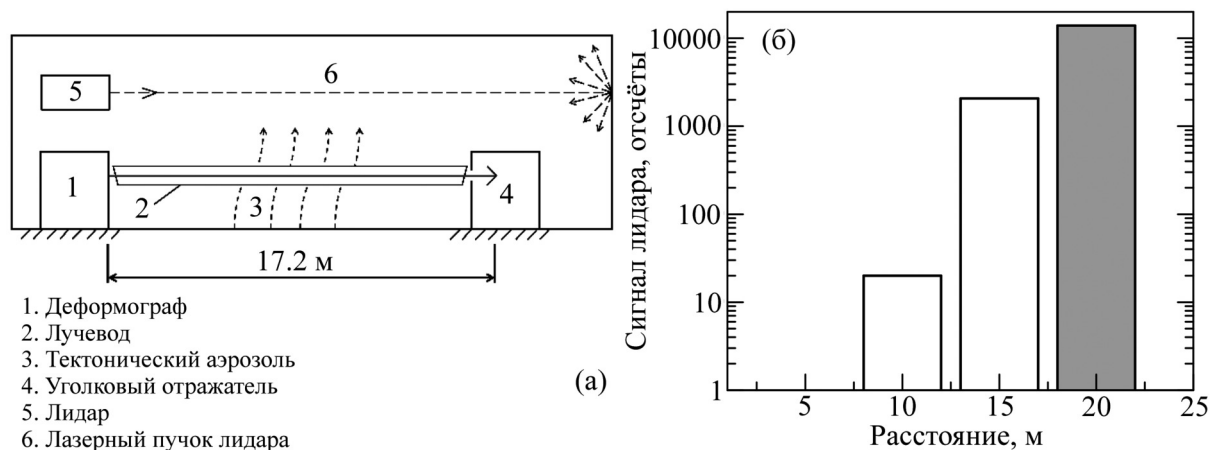


Рис. 1: (а) Схема лидарного зондирования аэрозоля в тоннеле лазерного деформографа, (б) типичный вид гистограммы фотоотсчётов фотонов, рассеянных аэрозолями (полые столбцы) и стеной в конце тоннеля (сплошной столбец).

На рис. 1 показана схема эксперимента (рис. 1(а)) и типичный вид гистограммы распределения фотоотсчётов аэрозольного лидара вдоль трассы зондирования (тоннеля) (рис. 1(б)). Лидар был установлен в тоннеле лазерного деформографа [3]. Пучок лидара был направлен на дальнюю стену тоннеля (расстояние от лидара до стены 17.5 м) вдоль длинного плеча деформографа (рис. 1(а)). Тоннель на время зондирования был закрыт для посещения, чтобы поддерживать стабильные условия для аэрозольной компоненты. Лидар работал в автономном режиме с дистанционным управлением. Каждый час лидар автоматически проводил измерение: излучал серию импульсов (16000 шт) и регистрировал фотоны, рассеянные на аэрозольных частицах в тоннеле, а также на стене в конце трассы (рис. 1(б)). Сумму фотоотсчётов сигнала обратного рассеяния на аэрозоле записывали бортовым компьютером и передавали для анализа на удалённый компьютер.

*Результаты и обсуждения.* Результаты совместных измерений подвижности земной коры и вариации аэрозоля, проведённых насколько нам известно, впервые с помощью деформографа и лидара на протяжении 4 месяцев, представлены ниже. На рис. 2(б) показана временная зависимость суммарного числа фотоотсчётов сигнала лидара обратного рассеяния (рис. 1(б), полые столбцы) на аэрозолях, которая пропорциональна концентрации аэрозоля в закрытом тоннеле деформографа. Рис. 2(а) суммирует данные сжатия (сокращение длины плеча интерферометра) от начала января до февраля и последующего расширения земной коры, измеренные деформографом.

Из рисунков видно, что обе зависимости (деформации коры Земли и аэрозолей) имеют заметные особенности, которые коррелируют: (1) – медленную (месяцы) динамику процессов сжатия-расширения основания деформографа и выхода аэрозоля; (2) – изменение знака процессов (наклонов прямых аппроксимации) – так после января, при смене сезона от зимы к весне, основание деформографа начинает расширяться после фазы сжатия (рис. 2(а), тонкие линии), а выход аэрозолей уменьшаться (рис. 2(б)); (3) – кроме этого, обе зависимости имеют быструю модуляцию (недели, сутки), которая может отражать региональные процессы деформации коры Земли; (4) – экстремумы (напр., некоторые отмечены стрелками) также антикоррелируют.

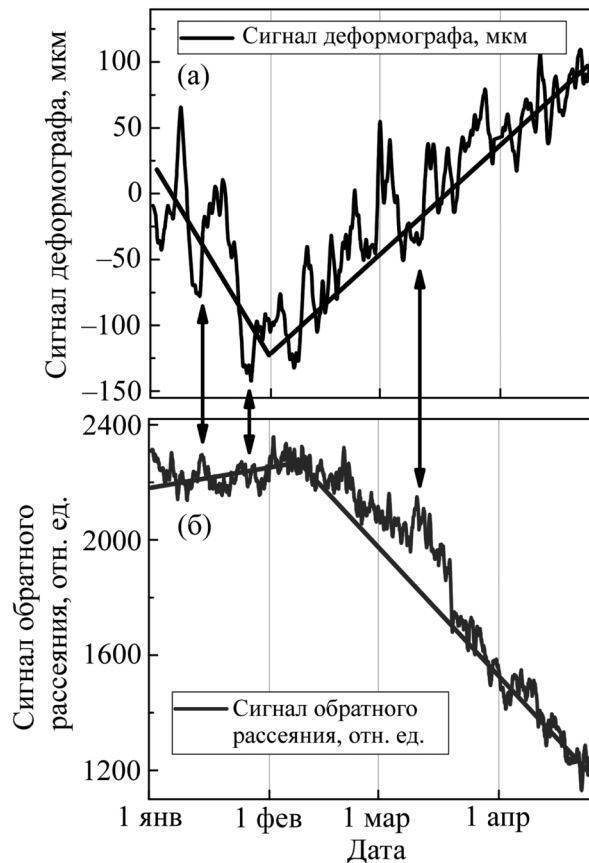


Рис. 2: (а) Эволюция сигнала сжатия/расширения скального основания деформографа (после сглаживания по 24 точкам) и визуальная аппроксимация линиями (тонкие линии), (б) лидарный сигнал обратного рассеяния на аэрозолях в тоннеле деформографа (после сглаживания по 24 точкам) и визуальная аппроксимация линиями (тонкие линии).

Важно отметить, что фаза сжатия коры Земли (рис. 2(а), январь) сопровождается повышением выхода аэрозолей (рис. 2(б)) и, напротив, при расширении земной коры (рис. 2(а), с февраля до апреля) выход аэрозолей монотонно уменьшается (рис. 2(б)). Сходное уменьшение выхода тектонического водорода и аэрозолей земной коры мы зарегистрировали ранее в зоне тени и полутени полного солнечного затмения 29 марта 2006 г. [2]. Зарегистрированная антикорреляция в данной работе на длительном временном отрезке даёт основание заключить, что прохождение тени солнечного затмения сопровождается весьма быстрым ( $\sim 3$  часа [2]) локальным расширением коры Земли в области тени. Обнаруженное снижение концентрации аэрозолей обусловлено, по нашему мнению, тем, что Луна экранирует практически все частицы солнечного ветра, кроме нейтрино, и частично галактические. Такая экранировка снижает давление на участок поверхности Земли в области тени и обеспечивает его разгрузку, что сопровождается снижением выхода аэрозолей (см. рис. 2(а) и рис. 2(б) на фазе расширения).

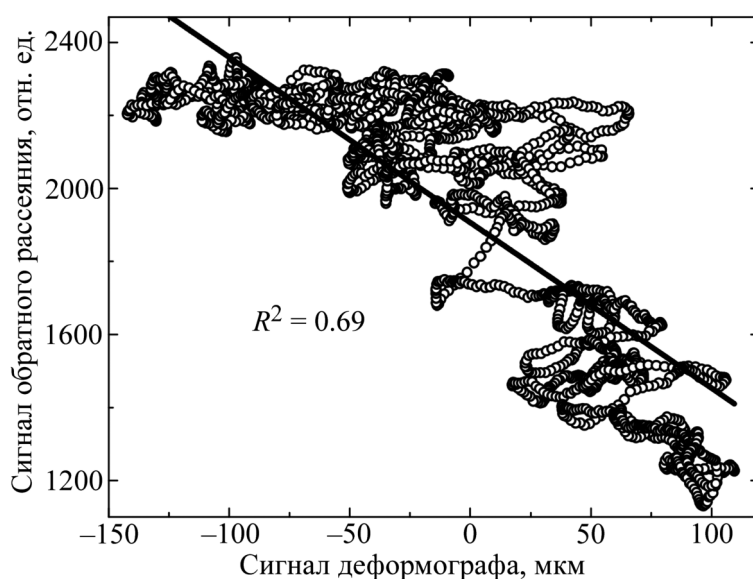


Рис. 3: Корреляция сигналов лидара и деформографа после их сглаживания временным отрезком 24 часа.

Особый интерес вызывает не только визуальное, но и количественное обоснование наблюдаемого совпадения процессов расширения коры и снижения концентрации аэрозолей, а также сжатия коры и выброса аэрозолей. Мы сгладили высокочастотный (двухсуточный) фон в сигналах лидара и деформографа и построили корреляцию данных сигналов, представленную на рис. 3. Корреляционный анализ подтверждает, что, дей-

ствительно, сжатие коры Земли сопровождается выбросом тектонических аэрозолей, а расширение коры – снижением выхода аэрозолей. Физика наблюдаемой динамики тектонической активности коры Земли и вариации тектонического аэрозоля обусловлена тем, что в процессе сжатия коры уменьшается объём внутренних полостей и трещин, что приводит к выносу тектонических газов из породы наружу. Напротив, расширение коры сопровождается увеличением объёма этих полостей и трещин. Тогда следует ожидать захват газов и снижения их концентрации и, соответственно, выносимых газами аэрозолей (в тоннеле деформографа в нашем случае).

Таким образом, впервые проведены систематические и длительные эксперименты по лидарному мониторингу тектонического аэрозоля в тоннеле лазерного деформографа. Впервые обнаружена низкочастотная вариация лидарного сигнала рассеяния на тектоническом аэрозоле при медленных (микроГц) деформациях коры Земли. Так, сжатие коры сопровождается выносом тектонических аэрозолей, а расширение коры (увеличение длины плеча интерферометра) – снижением выхода аэрозолей. Установленная антикорреляция даёт основание рассматривать аэрозольный лидар обратного рассеяния как самостоятельный детектор тектонических процессов [11]. Особый интерес здесь представляет возможность регистрировать медленные (месяцы) процессы деформации земной коры и, соответственно, тектоническую активность, которые не могут быть зарегистрированы инерционными сейсмографами.

Работа была выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 17–35–50045 мол\_нр.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] В. А. Алексеев, А. Н. Ляш, С. М. Першин, Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса **1**(1), 356 (2004). <http://www.iki.rssi.ru/earth/trudi/v-06.pdf>
- [2] S. M. Pershin, V. A. Alekseev, N. G. Alekseeva, and A. D. Zhigalin, Physics of Wave Phenomena **16**(3), 159 (2008).
- [3] Г. И. Долгих, Сейсмические приборы. Вып. 39, 13 (2003).
- [4] М. Е. Герценштейн, В. И. Пустовойт, ЖЭТФ **43**(2), 605 (1962).
- [5] B. P. Abbott, R. Abbott, T. D. Abbott, et al., Physical Review Letters **116**(6), 061102 (2016).

- [6] S. M. Pershin, V. M. Linkin, V. S. Makarov, et al., “Spaceborne laser altimeter based on the SPAD receiver and semiconductor laser transmitter” in Conference on Lasers and Electro-Optics, J. Bufton, A. Glass, T. Hsu, and W. Krupke, eds., Vol. 10 of OSA Technical Digest (Optical Society of America, 1991), paper CF11.1991. <https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=CLEO-1991-CF111>.
- [7] S. M. Pershin, “New generation of the portable backscatter Lidar with eye-safe energy level for environmental sensing”, Proc. SPIE 2222, Atmospheric Propagation and Remote Sensing III, (29 June 1994); doi: 10.1117/12.178007; <https://doi.org/10.1117/12.178007>.
- [8] A. V. Bukharin, V. M. Linkin, A. N. Lipatov, et al., Proc. 19th ILRC, 241 (1998); <http://ntrs.nasa.gov/>
- [9] <https://mars.nasa.gov/programmissions/missions/past/polarlander/>
- [10] I. Prochazka, J. Kodet, and J. Blasej, Review of Scientific Instruments **87**, 056102 (2016).
- [11] T. R. Watters, Katie Daud, Maria E. Banks, et al., Nature Geoscience **9**, 743 (2016), DOI: 10.1038/ngeo2814

Поступила в редакцию 13 июня 2018 г.