

К 20-летию доставки лидара РАН миссией НАСА к Марсу

УДК 550.34.038.4; 551.588.856

## ЛИДАРНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ МНОГОСЛОЙНЫХ ТУМАНОВ В НАКЛОННОМ ТОННЕЛЕ БАКСАНСКОЙ НЕЙТРИННОЙ ОБСЕРВАТОРИИ

С. М. Першин<sup>1</sup>, М. Я. Гришин<sup>1,2</sup>, В. А. Завозин<sup>1</sup>, В. В. Кузьминов<sup>3</sup>,  
В. Н. Леднёв<sup>1</sup>, В. С. Макаров<sup>4</sup>, А. В. Мясников<sup>5</sup>, А. В. Тюрин<sup>4</sup>,  
А. Н. Федоров<sup>1</sup>, В. Б. Петков<sup>3</sup>

*Впервые, насколько нам известно, с помощью компактного лидара обратного рассеяния зарегистрирована эволюция многослойных туманов. Зондирование аэрозолей проводили в наклонном тоннеле (трасса длиной 50 м) сцинтилляционного телескопа Баксанской нейтринной обсерватории. Лидар был собран на диодном GaAs-лазере ( $\lambda = 910$  нм) с безопасным для глаз уровнем излучения ( $< 1$  мкДж/см<sup>2</sup>) и большой частотой повторения (до 10 кГц) импульсов с рекордно короткой длительностью ( $\sim 3$  нс) при накачке импульсами тока. В качестве приёмника использовали кремниевый лавинный фотодиод, который работал в стробируемом режиме счёта фотонов.*

**Ключевые слова:** лидар нового поколения, многослойные туманы, тектонические аэрозоли в тоннеле.

*Введение.* Известно, что с помощью компактного лидара [1, 2] на диодном лазере с безопасным для глаз уровнем излучения ( $< 1$  мкДж/см<sup>2</sup>) [3] мы недавно [4] открыли новый индикатор сжатия/растяжения коры Земли – тектонический аэрозоль. Деформа-

<sup>1</sup> ИОФ РАН, 119991 Россия, Москва, ул. Вавилова, 38.

<sup>2</sup> МФТИ, 141701 Россия, Московская область, Долгопрудный, Институтский пер., 9.

<sup>3</sup> ИЯИ РАН, 117312 Россия, Москва, пр-т 60-летия Октября, 7а.

<sup>4</sup> ИКИ РАН, 117997 Россия, Москва, ул. Профсоюзная 84/32.

<sup>5</sup> Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга МГУ (ГАИШ МГУ), 119234 Россия, Москва, Университетский пр-т, д. 13.

цию коры Земли измеряли лазерным деформографом [5] с длиной плеча интерферометра 17.2 м. Впервые, насколько нам известно, была зарегистрирована сезонная вариация выхода аэрозолей на интервале январь–май 2018 г. Сжатие коры Земли до марта 2018 г. сопровождалось повышением выхода аэрозолей, а последующее расширение, напротив, снижением выхода аэрозолей.

Фурье-анализ сезонной вариации аэрозолей показал, что суточные и полусуточные частоты модуляции лидарного сигнала обратного рассеяния на аэрозолях вдоль трассы зондирования определяются с невысоким значением отношения сигнал/шум из-за малой длины тоннеля (~17 м) и большого шага (5 м) дискретизации (относительно длины трассы зондирования). Принимая во внимание способ формирования сигнала лидара, можно предположить, что повышение отношения сигнал/шум будет достигнуто при использовании данных о модуляции аэрозолей, полученных во втором канале зондирования – коэффициента пропускания трассы при полном проходе трассы в обоих направлениях. Однако для этого необходима более точная, чем 5 м, локализация стены тоннеля. Большой шаг дискретизации в работе [4] маскирует положение стены в конце тоннеля, что допускает перемешивание вклада сигнала обратного рассеяния и пропускания на полном проходе трассы. Физически ясно, что уменьшение шага дискретизации трассы одновременно с увеличением длины трассы зондирования позволят отдельно регистрировать эти сигналы и изучать вариации аэрозолей, используя оба канала, что является предметом настоящего сообщения.

*Эксперимент.* Эксперимент проводился в июле–августе 2019 г. в наклонном тоннеле длиной 120 м и диаметром 5 м Баксанской нейтринной обсерватории ([www.inr.ru/bno](http://www.inr.ru/bno)) вблизи скантillationного телескопа. Тоннель был ограничен стенками с дверями. Тоннель был проложен на стадии монтажа телескопа и оставлен без отделки стен и основания. Из-за таяния ледника на вершине горы Андырчи в тоннель просачивалась вода, которая капала с потолка в некоторых местах, что поддерживало высокую влажность и температуру около 12 °С. Заметим, что сезонные вариации грунтовой воды в подобных условиях в нейтринной обсерватории Гран Сассо (Gran Sasso) в Италии [6] сопровождались выходом тектонического газа радона из-за его высокой растворимости в воде [7]. Мы предположили, что в нашем случае выход радона будет проявляться в вариациях аэрозолей, которые образуются на ионах как центрах конденсации из-за радиоактивного распада радона [7].

Лидар был размещён на высоте 2.5 м над полом. Выбор тоннеля в Баксанской нейтринной обсерватории был обусловлен большой длиной трассы, а также наличием ла-

зерного деформографа с длиной плеча 75 м, расположенного рядом в главной горизонтальной штольне и ориентированного одинаково с трассой лидарного зондирования (по направлению север–юг). При длительных измерениях вариаций аэрозолей лазерный деформограф является опорным и необходимым инструментом измерения величины и знака деформации коры Земли [8]. Схема эксперимента и расположения тоннелей в Баксанской нейтринной обсерватории представлены на рис. 1(а).

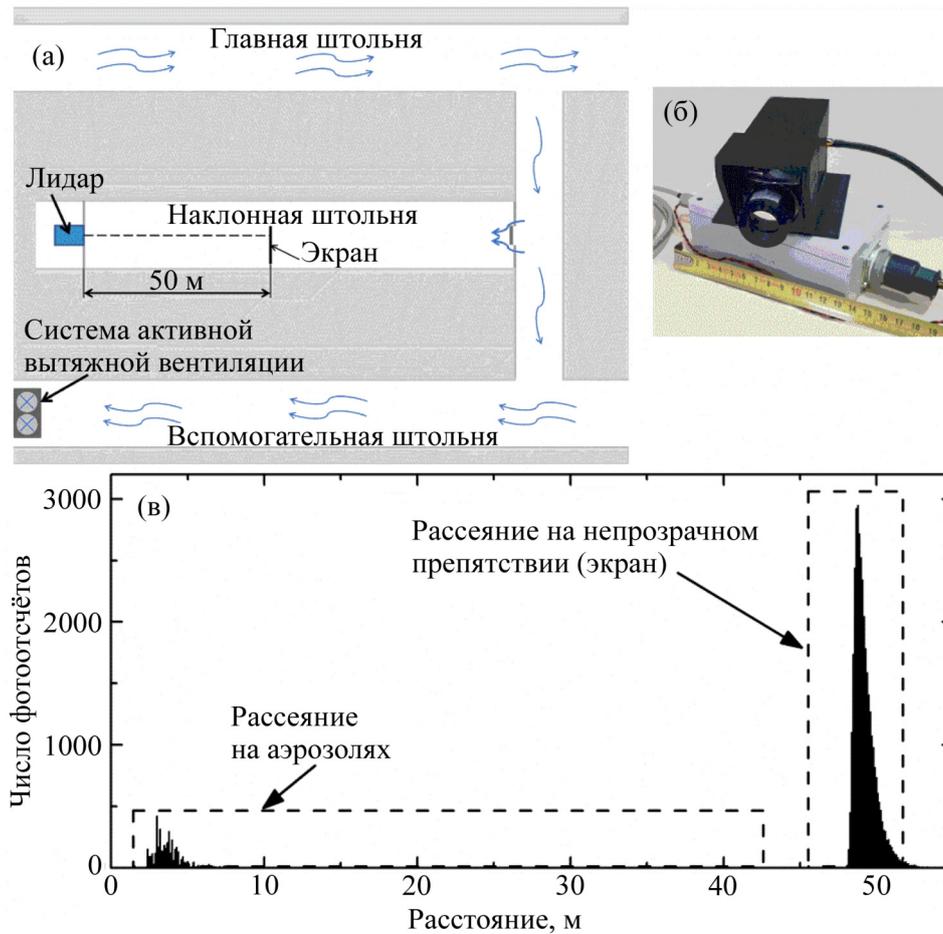


Рис. 1: (а) схема тоннелей на участке Баксанской нейтринной обсерватории вблизи сцинтилляционного телескопа; (б) фото приёмо-передающего блока (черного цвета) лидара и интерфейсный блок (серого цвета); (в) типичный профиль обратного рассеяния в атмосфере, прилегающей к лидару, и сигнал от мишени на расстоянии 47 м.

Для сокращения шага дискретизации вдоль трассы мы разработали новую версию лидара на импульсном диодном GaAs-лазере ( $\lambda = 910$  нм) с накачкой импульсом тока и лавинном фотодиоде [1–3, 9]. Температура фотодиода стабилизировалась встроен-

ным элементом Пельтье с отклонением  $\pm 0.05$  °С. Температура лазера поддерживалась с отклонением не более  $\pm 0.5$  °С для согласования длины волны с полосой пропускания интерференционного фильтра перед приёмным каналом. Для питания лазера был разработан генератор импульсов тока с управляемой частотой повторения. Нам удалось получить генерацию импульсов с рекордно короткой, насколько нам известно, длительностью ( $\sim 3$  нс) и большой ( $\sim 10$  кГц) частотой повторения импульсов с энергией  $\sim 0.3$  мкДж. Такая протяжённость импульса в пространстве ( $\sim 90$  см) допускала сокращение шага дискретизации трассы до 10 см и ограничение длины трассы до 240 м длительностью строка 1.6 мкс, который подавался на фотодиод синхронно с импульсом лазера. Масса лидара не превышала 400 грамм: 100 г – приёмно-передающий блок и 300 г – интерфейсный блок (см. рис. 1(б)). Стабильность работы лидара контролировали по уровню шумовых отсчётов приёмника. В случае фоновой засветки при несанкционированном посещении уровень шума повышался. Управление работой лидара проводили с персонального компьютера, установленного в непосредственной близости. Данный компьютер имел доступ в сеть Интернет, поэтому контроль и управление работой лидара проводили дистанционно (из лаборатории ИОФ РАН, г. Москва). Каждое измерение суммировали по 100 000 лазерным импульсам (одно измерение – 10 секунд) с интервалом 30 мин между сеансами.

На рис. 1(в) показан пример типичного [1, 2] профиля обратного рассеяния вдоль трассы зондирования без коррекции на квадрат расстояния от лидара. Первый пик фотоотсчётов (2–5 м на рис. 1(в)) пропорционален коэффициенту обратного рассеяния на аэрозолях, поэтому сигналом обратного рассеяния выбрали интеграл фотоотсчётов на расстоянии от 0 до 40 м. Интеграл второго пика фотоотсчётов показывает рассеяние на экране – сигнал пропускания на полном проходе трассы. При этом лидар измеряет длину трассы (47 м), как лазерный дальномер, и амплитуду сигнала рассеяния на экране (число фотоотсчётов), которая пропорциональна коэффициенту пропускания и обратно пропорциональна вариации аэрозолей на трассе. Заметим, что полуширина второго пика ( $\sim 1$  м) равна длительности импульса ( $\sim 3$  нс) лазера на полувысоте.

*Результаты и обсуждение.* На рис. 2 представлены результаты мониторинга вариаций аэрозолей в тоннеле в течение трёх дней (с 0:00 понедельника до среды), которые отражают некоторые особенности состояния атмосферы в тоннеле, повторяющиеся с недельным периодом. Эти особенности указывают на процессы образования и распада плотных аэрозольных облаков в тоннеле с многократным изменением коэффициентов рассеяния и пропускания. Из рис. 2(а) видно, что прозрачная атмосфера (минимум

аэрозолей, толстая линия, и максимум пропускания, серая линия) рано утром в понедельник (~8 часов с начала измерений) быстро становится сильно рассеивающей. Это состояние атмосферы сохраняется с некоторыми вариациями до конца недели. При этом число шумовых отсчётов (рис. 2(а), тонкая линия, увеличение в 50 раз) фотоприёмника не изменяется, что свидетельствует о стабильной работе лидара.

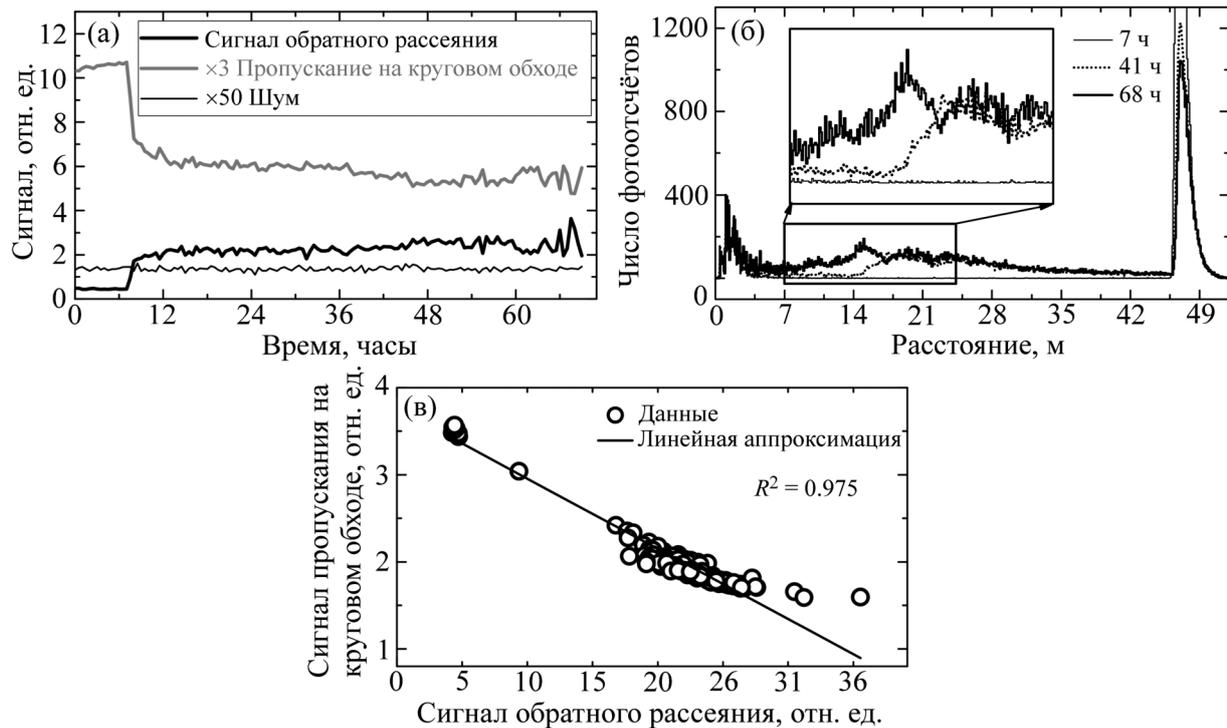


Рис. 2: (а) вариации сигнала обратного рассеяния (толстая линия), сигнала пропускания трассы на полном проходе (серая линия) и шумовые отсчёты в отсутствие лазерных импульсов (тонкая линия,  $\times 50$  для визуализации). Начало измерений 20 июля 2019 г. 0:00, окончание измерений 23 июля 2019 г. в 20:59; (б) три профиля сигнала обратного рассеяния вдоль трассы на 7, 41 и 68 часах измерений, соответственно; (в) корреляция сигналов обратного рассеяния и пропускания трассы на полном проходе туда и обратно.

Важно отметить, что пространственный профиль коэффициента обратного рассеяния (рис. 2(б)) существенно изменяется при образовании аэрозолей в тоннеле. Так, на профиле прозрачной атмосферы (7 часов, тонкая линия) появляется аэрозольное рассеивающее облако (41 час, точки) с отчётливым фронтом на удалении 14 м от лидара (см. вставку на рис. 2(б)). На третий день (68 часов) облако распространилось почти

до лидара с аэрозольным уплотнением в окрестности 14 м (локальный экстремум). Отметим, что коэффициент пропускания (полный проход туда и обратно) уменьшается при увеличении плотности аэрозолей в тоннеле, о чём свидетельствует уменьшение амплитуды сигнала от экрана (второй пик, рис. 2(б)) в указанные часы (7 часов – 2960 отсчётов, 41 час – 1220, 68 часов – 1040).

Выявленная антикорреляция сигналов двух каналов, рассеяния и пропускания, указывает на то, что мы зондируем динамику реального процесса – вариацию концентрации аэрозолей на заданном интервале. Результат корреляционного анализа представлен на рис. 2(в). Здесь по оси абсцисс отложены величины сигнала обратного рассеяния на отрезке трассы от лидара (0 м) до экрана (47 м), при этом по оси ординат отложены величины сигнала пропускания. Из рис. 2(в) видно, что лидарные сигналы рассеяния на аэрозолях и пропускания трассы сильно коррелированы с коэффициентом корреляции 0.975.

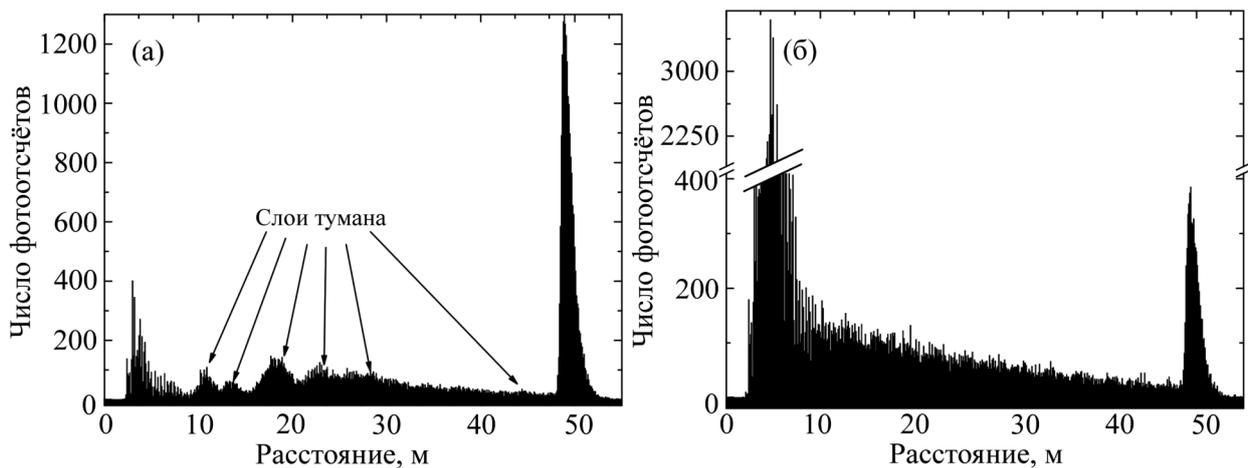


Рис. 3: (а) пространственная модуляция сигнала обратного рассеяния при образовании многослойного (5–6 слоев) тумана (15.07.2019, 11:24) с 3-кратным снижением коэффициента пропускания трассы (второй пик); (б) зондирование экрана сквозь плотный туман с ~10-кратным увеличением коэффициента обратного рассеяния (первый пик).

При анализе данных зондирования на рис. 2(б) (см. вставку) мы обратили внимание на модуляцию профиля коэффициента рассеяния вдоль трассы в тумане, что указывает на слоистость или чередование плотности аэрозоля. Было высказано предположение о возможности поиска сеанса измерений с более глубокой модуляцией коэффициента рассеяния вплоть до разделения аэрозольных слоёв. Такая структура многослойного тумана была обнаружена в базе данных (15.07.2019, в 11:54) (см. рис. 3(а)), фронт тумана

остановился на отметке 7–8 м до лидара. Зондирование 5–6 слоев тумана указывает на новые возможности и области применимости лидара – обнаружение подобных многослойных аэрозольных структур, измерение дистанции и скорости движения фронта тумана–облака или вулканического шлейфа при интенсивном извержении.

Более того, анализ данных выявил ситуацию (см. рис. 3(б)), когда туман (аэрозольное облако) заполнил весь объём тоннеля вплоть до лидара (15.08.2019, в 9:29). Из рис. 3(б) видно, что плотность тумана многократно (почти в 10 раз, до 2900 отсчётов) возросла (ср. амплитуду (300 отсчётов) первого пика на рис. 1(в) или рис. 2(б)) и, напротив, амплитуда второго пика существенно упала (с  $\sim 3000$  до  $\sim 350$  отсчётов). Это весьма важный результат, поскольку он показывает возможность зондирования сквозь рассеивающие препятствия (например, кроны деревьев [10]), а также плотный туман или облако, находясь внутри облака или тумана, например, в вертолёте при посадке в горах, или при маневрировании и причаливании судов в порту.

Совокупность обнаруженных лидаром специфических особенностей периодической генерации аэрозолей и слоистых туманов (с  $\sim 8$  часов утра после нерабочих дней) в наклонном тоннеле Баксанской нейтринной обсерватории указывает на возможность управления параметрами процесса. Так, в момент открытия наружных ворот обсерватории тёплый воздух ( $16\text{--}20\text{ }^\circ\text{C}$ ) извне поступает из-за принудительной вентиляции в наклонный тоннель, который наполнен влажным воздухом пониженной температуры ( $10\text{--}12\text{ }^\circ\text{C}$ ). При взаимодействии этих воздушных масс происходит конденсация паров воды (аналогично туманам над рекой в утренние часы). Фронт паров перемещается вверх по потоку приточной вентиляции с разной скоростью и прерываниями в разные дни в зависимости от режима поступления тёплого воздуха. В нерабочие дни недели ворота закрыты, температура в наклонном тоннеле стабилизируется в отсутствие поступления тёплого воздуха, и атмосфера просветляется (см. рис. 1(б), от 0 до 7 часов).

*Выводы.* Обнаружены сильные флуктуации плотности аэрозолей и туманов в наклонном тоннеле Баксанской нейтринной обсерватории из-за высокой влажности и наличия потоков приточной вентиляции. Величина флуктуаций маскирует вариации аэрозолей, выносимых тектоническими газами (водород, гелий, радон и др.). Заметим, что за месяц измерений (июль–август) деформограф Баксанской нейтринной обсерватории [8] зарегистрировал расширение горной породы на  $\sim 25$  мкм длины плеча (75 м) интерферометра, которое, однако, не проявилось как ожидаемое [4] снижение выхода аэрозолей в нашем случае. Скорее всего, это обусловлено небольшими вариациями аэрозолей за месяц. Известно, что сезонные вариации радона (и аэрозолей, который

образуются при распаде радона) в подобной ситуации в нейтринной обсерватории в Гран Сассо (Италия) не превышают 4% [6]. Отсюда следует, что вклад радона в вариации аэрозолей за месяц будет заметно меньше. Согласовано решение о продолжении зондирования аэрозолей в сухом горячем тоннеле БНО с глухой стеной и стабильной температурой ( $\sim 40$  °С) без принудительной циркуляции воздуха.

С другой стороны, предварительные эксперименты показали, что новая версия лидара с шагом дискретизации 10 см обеспечивает высокую чувствительность к вариациям рассеивающих свойств аэрозолей в тоннеле и специфические возможности зондирования сквозь многослойные туманы с перемещающимся фронтом. Несомненно, что уникальный процесс генерации подобных динамических структур на большой длине в тоннеле Баксанской нейтринной обсерватории требует отдельного изучения, чтобы сделать его управляемым. Тогда такой генератор туманов будет востребован для калибровки лидаров метеорологов, систем навигации для обеспечения безопасности в портах, а также для оснащения вертолётов и самолётов, как пилотируемых, так и беспилотных.

Авторы выражают благодарность РФФИ за финансовую поддержку гранта № 19-19-00712. Авторы также признательны академику РАН А. Д. Гвишиани за плодотворную дискуссию по тектоническим аэрозолям на сессии ОНЗ РАН 25.09.2019.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] S. Pershin, V. Linkin, V. Makarov, et al., “Spaceborn laser altimeter based on the single photon diode receiver and semiconductor laser transmitter”, in: Conf. Lasers Electro-Optics, Optical Society of America, Baltimore, Maryland, 1991: p. CFI1. <http://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=CLEO-1991-CFI1>.
- [2] S. M. Pershin, “New generation of the portable backscatter lidar with eye-safe energy level for environmental sensing,” in *SPIE Atmospheric Propagation and Remote Sensing III*, **2222**, 392 (1994); <http://dx.doi.org/10.1117/12.178007>.
- [3] D. H. Sliney and J. Mellerio, *Safety with Lasers and Other Optical Sources: a Comprehensive Handbook* (Springer Science & Business Media, 2013).
- [4] С. М. Першин, Г. И. Долгих, А. Ф. Бункин и др., Краткие сообщения по физике ФИАН **45**(7), 32 (2018) [Bulletin of the Lebedev Physics Institute **45**, 214 (2018); doi:10.3103/S1068335618070059].
- [5] Г. И. Долгих, Сейсмические приборы **39**, 13 (2003).

- [6] Н. Ю. Агафонова, В. В. Ашихмин, Е. А. Добрынина и др., Известия Российской Академии Наук. Серия Физическая **83**(5), 673 (2019) [Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. **83**, 614 (2019); doi:10.3103/S1062873819050046].
- [7] D. Ouzounov, S. Pulinets, J. Liu, et al., Multiparameter Assessment of Pre-Earthquake Atmospheric Signals, in: Pre-Earthquake Process. A Multidisciplinary Approach to Earthquake Prediction Studies (American Geophysical Union and John Wiley & Sons, Inc., 2018), pp. 339–359.
- [8] V. K. Milyukov and A. V. Myasnikov, Meas. Tech. **48**(12), 1183 (2005); doi:10.1007/s11018-006-0042-7.
- [9] S. Pershin, A. Bunkin, R. Nunes, et al., WIT Trans. Ecol. Environ. **63**, 241 (2003).
- [10] M. A. Canuto, F. Estrada-Belli, T. G. Garrison, et al., Science **80**, 361 (2018); doi:10.1126/science.aau0137.

Поступила в редакцию 9 октября 2019 г.

После доработки 18 октября 2019 г.

Принята к публикации 21 октября 2019 г.