

УДК 550.34.038.4; 551.508.856

ЛИДАРНОЕ ДЕТЕКТИРОВАНИЕ АЭРОЗОЛЕЙ В ТОННЕЛЕ НАД ОЧАГОМ ВУЛКАНА ЭЛЬБРУС

С. М. Першин¹, А. Л. Собисевич², В. А. Завозин¹, М. Я. Гришин¹,
В. Н. Леднев¹, В. С. Макаров³, В. Б. Петков⁴, Я. Я. Понуровский¹,
А. Н. Фёдоров¹, Д. Г. Артёмова¹

Обнаружено кратное (до 300%) увеличение лидарного сигнала рассеяния в виде коротких (~2 часа) выбросов на его сезонном снижении в тоннеле-тупике Баксанской Нейтринной Обсерватории (БНО) над очагом вулкана Эльбрус. Установлено совпадение короткопериодического увеличения концентрации аэрозоля с выходом радона (^{222}Rn) и повышением влажности. Измерены немонотонный нетривиальный профиль температуры с инверсией в объёме тоннеля, а также высокая концентрация тяжёлых магматических газов ($^{12}\text{CO}_2$ и $^{13}\text{CO}_2$), поступающих из очага вулкана Эльбрус. Совокупность данных указывает на импульсную генерацию туманов и увеличение коэффициента рассеяния. Продемонстрирована высокая чувствительность компактного лидара к вариациям аэрозолей над очагом вулкана.

Ключевые слова: инверсия температуры в горячем тоннеле, рост лидарного сигнала рассеяния, спектральный анализ газов из очага вулкана Эльбрус.

Введение. Недавно [1] в глухом наклонном тоннеле ($43^\circ 14' 57.7''\text{N}$, $42^\circ 43' 19.5''\text{E}$, длиной ~50 м и диаметром до 3 м) Баксанской Нейтринной Обсерватории (БНО) ИЯИ РАН под горой Андырчи на удалении 4000 м от входа было зарегистрировано сезонное (август-октябрь) двукратное снижение сигнала обратного рассеяния на аэрозолях

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

² Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, 123242 Москва, ул. Большая Грузинская, 10, с. 1.

³ Институт космических исследований РАН, 117133 Россия, Москва, Профсоюзная ул., 84.

⁴ Институт ядерных исследований РАН, 117312 Россия, Москва, проспект 60-летия Октября, 7А, с. 3.

с помощью компактного лидара. Существенно, что выявленная зависимость симбатна сокращению плеча лазерного деформографа [1, 2], используемого для измерения деформации коры Земли [3, 4], а также сезонному снижению температуры внешней атмосферы на ~ 4 °C [1]. При этом температура в горячем тоннеле уменьшилась менее чем на 0.1 °C [1] (данные прецизионного термометра с разрешением ~ 0.005 °C, разработанного в ИФЗ РАН [5]). Такое снижение указывало на стабильность подогрева основания тоннеля магматическими газами.

Особый интерес здесь вызывают короткие и интенсивные (до 300% от средних значений) импульсы лидарного сигнала рассеяния на аэрозолях (напр., 13.09, 19.09 и 21.10 см рис. 4(с) из работы [1]), физика которых остается пока неясной и является предметом изучения в данной работе.

Эксперимент. Зондирование аэрозолей проводили уникальным лидаром на диодном лазере с безопасной для глаз плотностью (< 1 мкДж/см²) энергии импульса излучения и на однофотонном лавинном фотодиоде (SPAD) в качестве приёмника, принцип работы которого, а также обработка данных зондирования аэрозолей изложены в работах [1, 6]. В качестве источника в лидаре использовался GaAlAs (910 нм) лазер с рекордно коротким для диодного лазера импульсом (3 нс) [7] и частотой повторения 10 кГц. В каждом измерении с интервалом 30 минут лидар излучал 100 000 импульсов для повышения статистической достоверности получаемых сигналов аэрозольного рассеяния. Лидар обеспечивал дискретизацию фотоотсчётов вдоль трассы зондирования с шагом 10 см. Общий вид лидара в отдельных блоках: оптический (вверху) и электронный, показан на рис. 1.

Лидар был размещён в горячем (~ 40 °C) тоннеле ($43^{\circ}14'57.7''N$, $42^{\circ}43'19.''E$) на высоте 1715 м над уровнем моря, который является лабораторией ИФЗ РАН. Условия горячего тоннеля БНО (высокая температура, влажность и др.) были экстремальными для лидара. Способность работы лидара в экстремальных условиях испытывали ранее при подготовке прототипа данного лидара к полёту на Марс с миссией НАСА “Mars Polar Lander-99”, как первого лидара для зондирования атмосферы [8]. На схеме вертикального разреза тоннеля (рис. 2) показано, что зондирование аэрозолей проводили на отрезке длиной ~ 32 м [1] с подъёмом трассы от 0.4 м до 1.5 м (рис. 2(b), пунктир) к глухой стене.

Рядом с лидаром на платформе (на высоте 0.4 м) был установлен коммерческий датчик влажности (НН-5031) воздуха. Вариации относительной влажности в процентах считывали через 30 минут. Датчик радона (RADEX MR107) был установлен в углуб-

лении (~ 0.5 м) основания тоннеля на расстоянии 1 м от лидара. Такой выбор был обусловлен тем, что радон, плотность которого ~ 9.4 кг/м³ (в 7.4 раза тяжелее воздуха), должен скапливаться у основания тоннеля. Заметим, что датчик радона проводил измерения только один раз в час для надежного определения сигнала согласно документации прибора.

Измерения профиля температуры воздуха в тоннеле проводили 10.09.2020 одновременно тремя полупроводниковыми датчиками температуры TMP37 – T1, T2, T3 с помощью разработанной нами метеостанции на основе микроконтроллера ATmega328 – Arduino Uno R3 в качестве аналого-цифрового преобразователя. Датчики были откалиброваны по ртутному термометру LABORTHERM-N с ценой деления 0.1 °C и диапазоном значений $-10...100$ °C. Мы закрепили датчики на переносной штанге на разной высоте: на основании тоннеля, ~ 0 м, на 1 м и 1.5 м. Выбор высоты был обусловлен углом наклона трассы лидарного зондирования аэрозолей в нижней половине объёма тоннеля (рис. 2) [1]. Данные термодатчиков записывали через 5 метров вдоль тоннеля и сохраняли в управляющем компьютере (было проведено семь параллельных измерений). После сбора данных о температуре был произведен расчет средней температуры и стандартное отклонение в каждом сечении тоннеля на трёх уровнях по высоте относительно основания тоннеля.

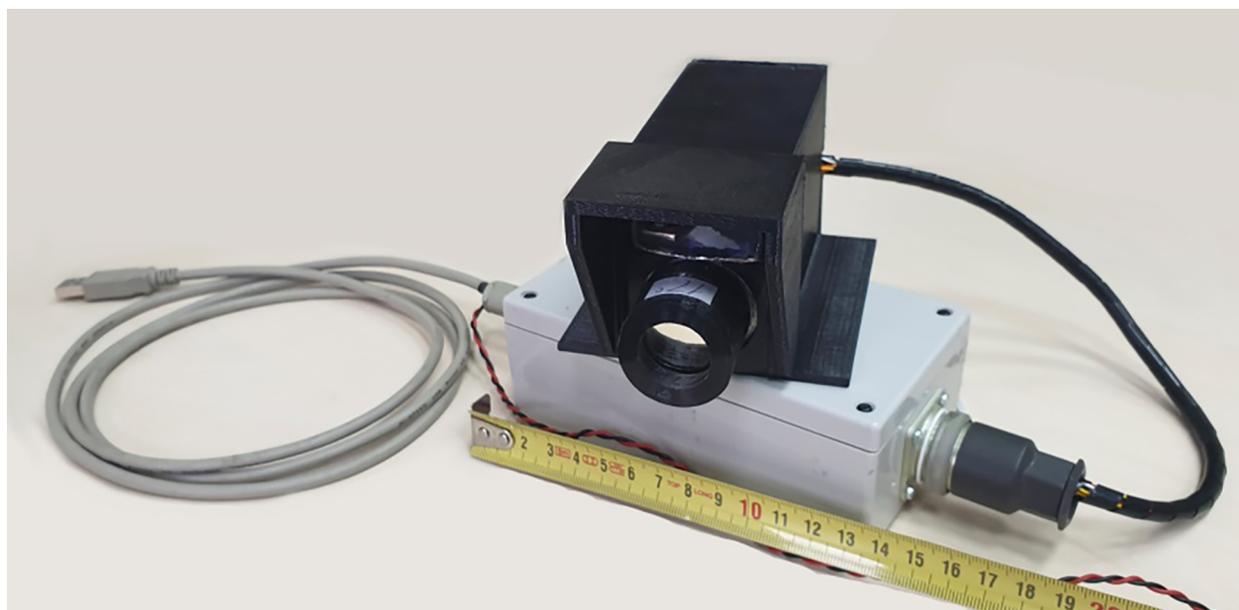


Рис. 1: Лидар на диодном лазере GaAlAs (910 нм, 3 нс): оптический блок расположен сверху (чёрный), электронный блок (светлый) расположен снизу.

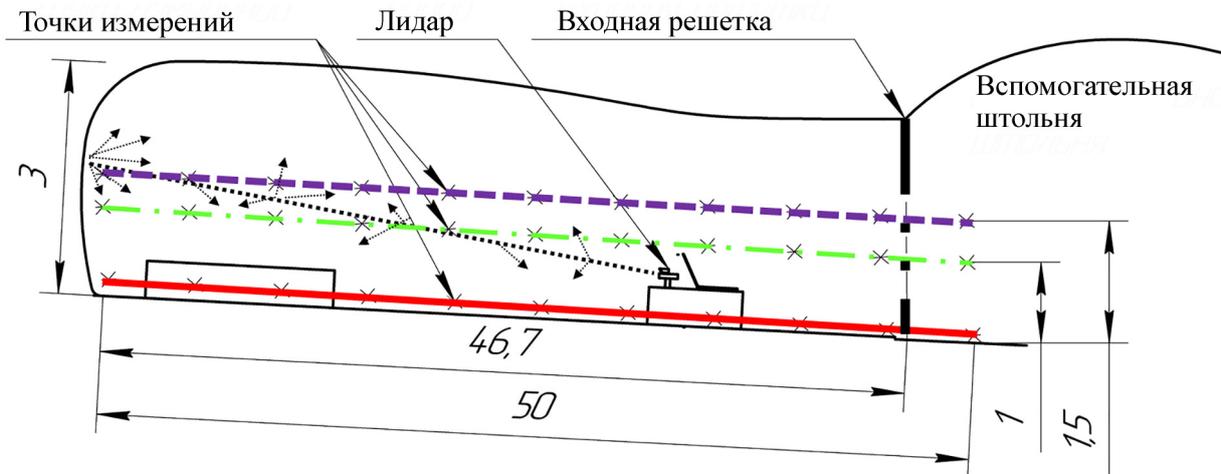


Рис. 2: Схема горячего тоннеля БНО, вид сбоку, с траекториями наклонной трассы лидарного зондирования аэрозолей (пунктир) и измерения профиля температуры на разной высоте: у основания (толстая линия), 1 м (штрихпунктир), 1.5 м (штриховая прямая).

Результаты и обсуждение. Для удобства анализа динамики импульсных бросков (до 300% от средних значений) лидарного сигнала рассеяния на аэрозолях в тоннеле было выбрано два фрагмента из данных мониторинга сезонного снижения лидарного сигнала при деформации коры Земли [1], которые были сопоставлены с данными вариации влажности и радона (рис. 3). Отметим короткую (2–3 часа) длительность выбросов сигнала рассеяния и влажности с высокой скоростью нарастания на фронте выброса по сравнению со сглаженными и продолжительными (~сутки) импульсами выхода радона. Отметим, что влажность возрастала до 4% относительно среднего значения, тогда как импульсы лидарного сигнала увеличивались на 200–300% (см. рис. 3, данные за 19.09 и 22.10). Более того в некоторые моменты (рис. 3(a), 19.09 в 10:20 и 14:00; и рис. 3(b), 08.10 в 13:20, 21.10 в 17:44) фронт нарастания влажности совпадал с фронтом импульса сигнала рассеяния, а также с увеличением выхода радона, который хорошо растворяется в воде, как показали многолетние измерения в тоннелях нейтринной обсерватории Гран Сассо (Италия) [9]. Отметим, что иногда импульсы аэрозолей (17.09 в 11:00 и 18.09 в 10:00) наблюдались в периоды увеличения выхода радона, но без повышения влажности.

Выявленные особенности дают основание полагать, что повышение влажности на 1–2% отражает небольшой выход паров H_2O (рис. 3), а значительное увеличение рассе-

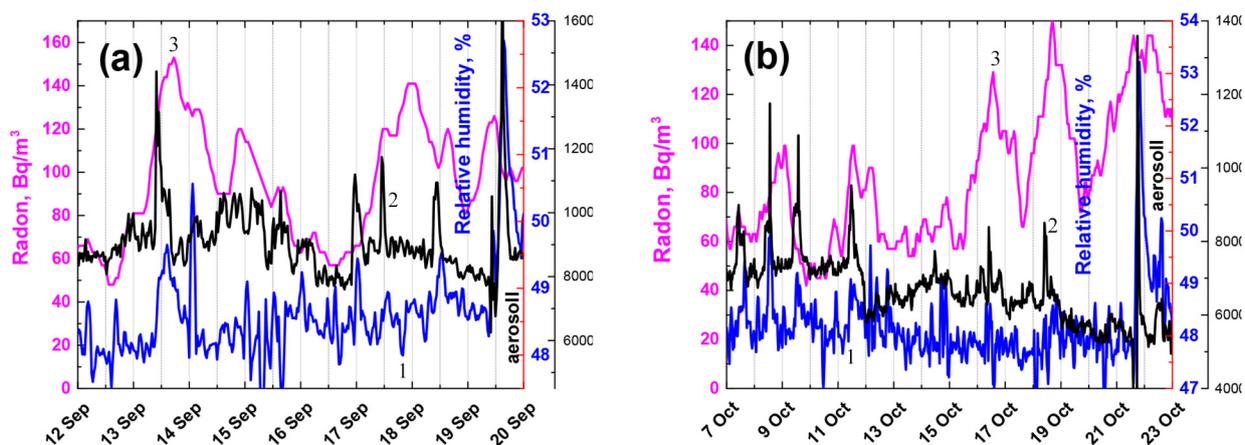


Рис. 3: Фрагменты (12–20 сентября и 7–23 октября 2019 года) данных мониторинга сезонного снижения лидарного сигнала рассеяния на аэрозолях (чёрная линия, 2), относительной влажности (синяя линия, 1) и радона (розовая линия, 3) в горячем тоннеле БНО в августе-ноябре 2019 г.

нения на аэрозоле вызвано генерацией тумана при адиабатическом охлаждении шлейфа, а также на пылевых частицах в шлейфе – центрах конденсации Айткена [10]. При этом скачок аэрозольного рассеяния (рис. 3(a), 17.09) в отсутствие заметного повышения влажности, но с увеличением выхода радона может быть вызван конденсацией паров H_2O на α -частицах спонтанного распада ядра радона (^{222}Rn) с выделением энергии 5.5903 (3) МэВ [11].

Подобное явление – конденсация паров H_2O при атмосферном давлении, наблюдается при образовании утренних туманов испарения на границе контакта «холодного» воздуха с «теплым» над водоёмом. В нашем случае наличие слоя тёплого и влажного (рис. 3) воздуха над горячим основанием тоннеля допускает формирование туманов испарения при снижении температуры воздуха в верхней половине тоннеля, например, из-за просачивания талой воды ледника, по аналогии с подобным процессом в тоннеле нейтринной обсерватории Гран Сассо (Италия) [9]. На основании этого предположения в тоннеле было проведено измерение продольного и поперечного профиля температуры воздуха, который показан на рис. 4.

Из рис. 4 видно, что распределение температуры по объёму тоннеля имеет немонотонный и нетривиальный профиль. Так скальное основание тоннеля (рис. 4, толстая линия) имеет локальный источник подогрева (до 38 °С) в середине тоннеля с уменьшением в начале тоннеля (до 34.5 °С) и у глухой стены (до 33.5 °С). Таким источником

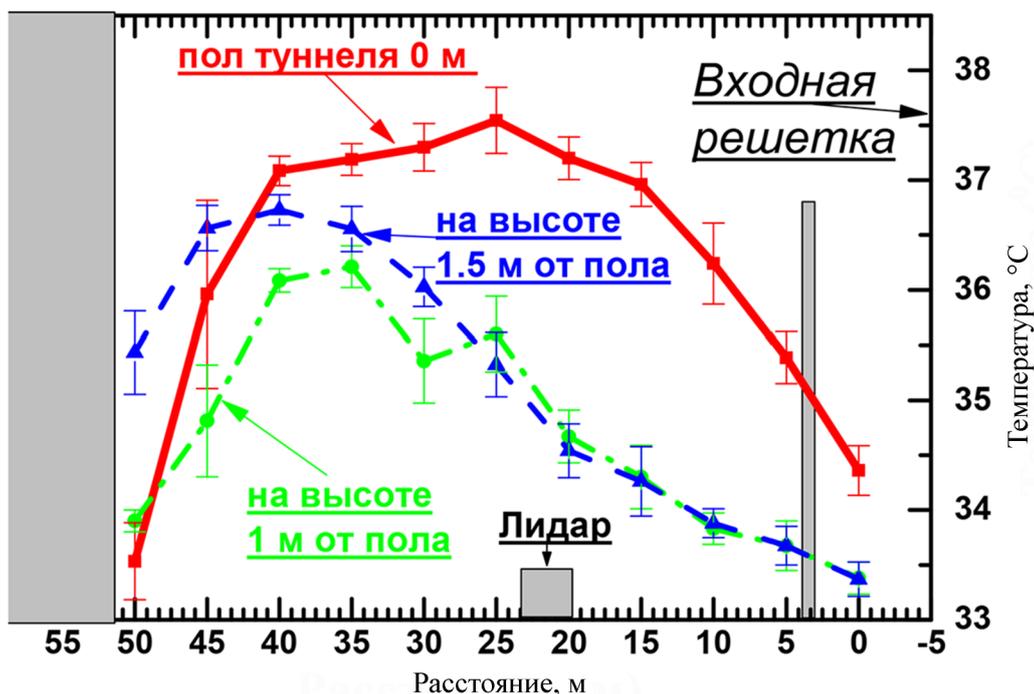


Рис. 4: Профиль температуры в глухом туннеле (см. рис. 1) от вспомогательной штольни до стены на разных уровнях от основания: ~ 0 м; ~ 1 м и ~ 1.5 м с инверсией температуры в начале туннеля.

являются горячие магматические газы очага вулкана, которые выходят в туннель из трещин основания. Профиль температуры на высоте 1–1.5 м кардинально отличается от профиля нагрева основания, что указывает на отсутствие вертикального перемешивания. В первой половине туннеля на этой высоте формируется слой “холодного” ($33\text{--}35$ °C) воздуха относительно “теплого” ($34\text{--}38$ °C) основания. Далее этот слой подогревается до 36.5 °C и снижается у глухой стены до $34\text{--}35$ °C. Наличие слоев с инверсией (до $\Delta \leq 4$ °C) температуры над горячим основанием туннеля указывает на нарушение закона Архимеда и формирование неустойчивости Релея–Тейлора [12], когда слой холодного плотного воздуха находится выше теплого слоя. Это можно объяснить тем, что при условии расслоения воздуха и отсутствия перемешивания, когда внизу находится слой теплого и, одновременно, более плотного воздуха, чем вверху, в холодном слое. Тогда следует допустить, что магматические газы, которые поступают в туннель через трещины из очага вулкана, содержат компоненты, объёмная плотность которых выше плотности воздуха, 1.27 кг/м³.

Одним из таких газов является радон, плотность которого в 7.4 раза выше воздуха. Другими компонентами могут быть $^{12}\text{CO}_2$ и $^{13}\text{CO}_2$, которые выделяются из очага вулкана и диффундируют сквозь массив скалы [13, 14]. С целью обнаружения этих газов в тоннелях БНО были отобраны пробы газов из трещины, покрытой слоем воды, по ранее разработанной методике наполнения стеклянной ёмкости (бутылки) [13]. Пробу брали недалеко от горячего тоннеля, в штольне с непрерывным выделением пузырьков газа через слой воды. Через сутки проба была доставлена в Институт общей физики РАН, где был проведен анализ состава пробы газов на специально разработанном спектрометре высокого разрешения на диодных лазерах ДЛС-А3-05 (рис. 5), который подробно описан в работах [15, 16].

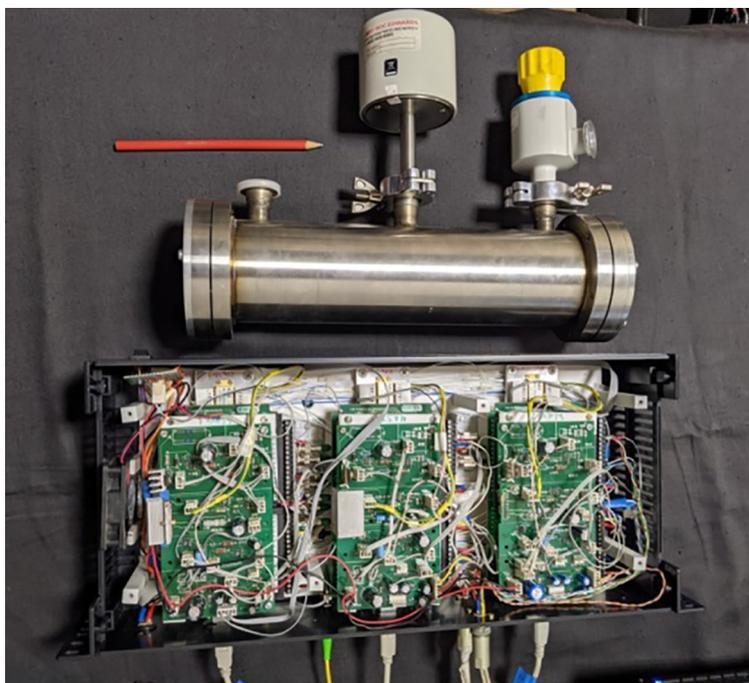


Рис. 5: Общий вид диодного лазерного спектрометра высокого разрешения ДЛС-А3-05, разработанного в ИОФ РАН (вверху – многопроходная кювета, снизу – блок лазерного спектрометра с тремя перестраиваемыми диодными лазерами).

Перед измерениями мы провели калибровку спектрометра-анализатора по составу специально подготовленной смеси газов (Предприятие ООО “Фёссен”, г. Москва). Газы с помощью прокачки принудительно подавали в многоходовую кювету Эррио ДЛС-А3-05 (рис. 5). Результаты анализа состава газов пробы из тоннеля БНО, а также измерения их концентраций сведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Содержание пробы газов, собранной под поверхностью воды в штольне БНО (10.09.2020 г.). Объем пробы воздуха 500 мл. Температура пробы 23 °С

№ п/п	Газы	Измеренная концентрация	Фон /ПДК
1	$^{12}\text{CO}_2$	12%	400 ppm / 0.5% ⁽¹⁾
2	$^{13}\text{CO}_2$	1350 ppm	4.5 / 56 ppm
3	CH_4	40 ppm	2 ppm / 1.05%
4	H_2S	2.4 ppm	0.03 ppb / 5 ppm
5	H_2O	Насыщенные пары	
6	NH_3		0.05 / 2 ppm

Из таблицы 1 видно, что из основания тоннеля поступают газы, состав которых указывает на их вулканическую природу [13]. Существенным здесь являются их высокая концентрация (в 10–20 раз превышающая ПДК [17, 18]) и отличия молекулярной массы. Естественно ожидать, что подобные газы поступают по трещинам и в горячий тоннель, поскольку размеры очага вулкана составляют десятки километров от его кратера [13, 14]. Эти газы выходят в объём и подогревают основание тоннеля. Наличие тяжёлых (радон, CO_2) и лёгких (H_2O , CH_4) газов позволяет учитывать их влияние на формирование температурных полей в горячем тоннеле в соответствии с рассмотренным выше механизмом.

Существенным фактором здесь является расслоение газов по плотности и сток тяжёлых газов по тёплому и наклонному основанию вниз, в штольню БНО. Медленный сток этих газов запускает втягивание “холодного” (рис. 4, ~ 33 °С) воздуха из вспомогательной штольни в горячий тоннель. Генеральное снижение температуры основания и воздуха у глухой стены тоннеля (рис. 4) указывает на возможное охлаждение стены и свода парами H_2O талых вод ледника [9]. Тогда профиль температуры (рис. 4) с границами контакта “холодного”/“тёплого” воздуха, которые пересекают шлейфы горячих газов очага вулкана и трассу лидарного зондирования, допускает флуктуации параметров на границе с образованием туманов.

Таким образом, полученные данные позволяют заключить, что 300% увеличение импульсов сигнала лидара индуцировано визуально незаметными шлейфами тяжёлых газов и паров H_2O из очага вулкана Эльбрус. Тяжёлые газы (радон, $^{12}\text{CO}_2$ и $^{13}\text{CO}_2$) обеспечивают расслоение воздуха и сток вниз по горячему основанию тоннеля, блокируют архимедову конвекцию и формируют над горячим основанием слой с инверсией

температуры. Флуктуации холодного воздуха при контакте с теплыми шлейфами газов и паров H_2O , пыли и α -частиц радона создают условия для генерации туманов. В этих условиях аэрозольный лидар является чувствительным индикатором выхода шлейфов магматических газов в тоннеле, которые отражают активность вулкана Эльбрус.

Физически ясно, что для изучения динамики формирования аэрозольных шлейфов необходимо повысить частоту опроса данных лидара и установить дополнительные детекторы двуокиси углерода и метана, а также влажности от свода до основания тоннеля с термодатчиками через 0.5 м на входе тоннеля и около лидара. Отметим, что мониторинг вариации состава газов непосредственно по длине горячего тоннеля с помощью газового анализатора ДЛС-А3-05 в реальном времени позволит выявить и измерить распределение шлейфов газов вдоль основания, из стен и свода тоннеля.

Работа была выполнена при финансовой поддержке РФФ, соглашение № 19-19-00712.

Авторы выражают благодарность академику Е. И. Гордееву за плодотворное обсуждение полученных результатов.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] S. M. Pershin, A. L. Sobisevich, M. Ya. Grishin, et al., *Laser Phys. Lett.* **17**(11), 115607 (7pp) (2020).
- [2] V. K. Milyukov, A. V. Myasnikov, V. V. Kuzminov, et al., *Proc. of 8th Int. Conf. on Adv. Optoelectr. & Lasers, COAL*2019, Sept 06-08, Sozopol, Bulgaria (IEEE Xplore Digital Library)*. DOI: 10.1109/CAOL46282.2019.9019472.
- [3] V. K. Milyukov and A. V. Myasnikov, *Measurement Techniques, Instrument Society of America* **48**(12), 1183 (2012).
- [4] P. J. Melchior, 1983, *The Tides of the Planet Earth*, Oxford: Pergamon Press; Melchior Paul J., "The Earth Tides", Pergamon Press, Oxford, 458 pages, 1966.
- [5] D. V. Likhodeev, V. V. Gravirov and K. V. Kislov, *Seism. Instrum.* **54**, 673 (2018).
- [6] S. M. Pershin, M. Y. Grishin, V. A. Zavozin, et al., *Laser Phys. Lett.* **17**(2), 026003 (2020).
- [7] С. М. Першин, М. Я. Гришин, В. А. Завозин и др., *Квантовая электроника* **51**(5), 423 (2021). <https://DOI.org/10.1070/QEL17544>.
- [8] https://mars.nasa.gov/internal_resources/818/.
- [9] N. Yu. Agafonova, V. V. Ashikhmin, E. A. Dobrynina, et al., *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, **83**(5), 614 (2019). *Известия РАН, серия физическая*: 201983 (5), 673-675.

- [10] H. Peter McMurry, *Aerosol Science and Technology* **33**(4), 297 (2000).
- [11] G. Audi, O. Bersillon, J. Blachot, and A. H. Wapstra, *Nuclear Physics A* **729**, 3 (2003). DOI: 10.1016/j.nuclphysa.2003.11.001.
- [12] Д. А. Лабунцов, В. В. Ягов, *Механика двухфазных систем* (М., Изд-во МЭИ, 2000) с. 143.
- [13] В. Ю. Лаврушин, *Подземные флюиды Большого Кавказа и его обрамления* (М., ГЕОС, 2012).
- [14] А. Г. Гурбанов, О. А. Богатиков, Б. С. Карамурзов и др., *Вулканология и сейсмология* **4**, 3 (2011).
- [15] V. V. Liger, Yu. A. Kuritsyn, V. R. Mironenko, et al., *High Temperature* **56**(1), 98 (2018). DOI: 10.1134/S0018151X18010108.
- [16] A. I. Nadezhdinskii and Ya. Ya. Ponurovskii, *Quantum Electronics* **49**(7), 613 (2019). DOI: <http://DOI.org/10.1070/QEL16776>.
- [17] Стандарт EN 13779:2004. Ventilation for non-residential buildings – Performance Ventilation requirements for ventilation and room-conditioning systems.
- [18] <https://docs.cntd.ru/document/557235236>.

Поступила в редакцию 2 декабря 2021 г.

После доработки 17 декабря 2021 г.

Принята к публикации 20 декабря 2021 г.