

**Результаты подземного мониторинга вариаций аэрозолей, температуры и деформации коры Земли в окрестностях вулкана Эльбрус**

*Гравиров В.В.<sup>1</sup>, Першин С.М.<sup>2</sup>, Собисевич А.Л.<sup>1</sup>, Гришин М.Я.<sup>2</sup>, Лиходеев Д.В.<sup>1</sup>, Мясников А.В.<sup>3</sup>*

**Results of underground monitoring of variations in aerosols, temperature and deformation of the Earth's crust near the Elbrus volcano**

*Gravirov V.V., Pershin S.M., Sobisevich A.L., Grishin M.Ya., Likhodeev D.V., Myasnikov A.V.*

<sup>1</sup> *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва;*

*e-mail: gravirov@mail.ru*

<sup>2</sup> *Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, г. Москва*

<sup>3</sup> *Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга МГУ, г. Москва*

Нами была обнаружена корреляция сигналов лазерного деформографа, лазерного лидара, измеряющего плотность вариаций аэрозолей, и значений температуры внутри скального основания в тупиковом тоннеле Баксанской нейтринной обсерватории (БНО), в момент первого и второго сильных землетрясений в Турции (06.02.2023), имевших почти одинаковые магнитуды 7.8 и 7.7. Оценка радиуса зоны напряжения от эпицентров дает величину порядка 2000 км, что превышает расстояние до тоннелей БНО (около 900 км) и, таким образом, допускает проявление вариации напряженно-деформированного состояния в сигналах деформографа, термометра и лидара.

### **Введение**

Известно, что субдукции литосферных плит вызывают на Земле наиболее разрушительные землетрясения. Особо активны в этом отношении регионы, в которых сходятся три-четыре плиты, например, как в Турции: Анатолийская, Аравийская, Африканская, а также Евразийская плита с Северо-Анатолийским разломом [8]. При этом установлено [8], что активность Кавказско-Анатолийско-Аравийского региона определяется мантийным потоком (т.н. плюмом), который поднимается с поверхности ядра Земли и распространяется под литосферой, создавая сложные поверхностные сдвиги и выход горячих газов по трещинам коры. Общее тело мантийного потока достигает Евразийской плиты на севере вплоть до Казбека, Эльбруса и региона Кавказских Минеральных Вод [8]. Приближение этого плюма к поверхности коры Земли питает магматические камеры вулканов. Так, есть веские основания полагать, что подогрев и выброс ледника Колка на Казбеке в 2004 г., а также известные вариации мощности выхода газов, паров, аэрозолей и подогрев основания тоннелей Баксанской нейтринной обсерватории (БНО) в Приэльбрусье являются проявлением активности этого мантийного плюма. Таким образом, подземный мониторинг вариаций аэрозолей, температуры и деформации коры Земли, осуществляемый в тоннелях БНО, которые экранируют и существенно снижают влияние внешних факторов, обеспечивает возможность раннего обнаружения напряженного состояния литосферных плит в зоне разломов на основе корреляционного анализа инструментальных данных. Особое внимание нами было уделено двум уникальным землетрясениям с магнитудой 7.8 и 7.7, произошедшим в Турции 06.02.2023 г. [8].

### **Эксперимент**

Мониторинг вариаций аэрозолей, температуры и деформации коры Земли проводился с помощью уникальных инструментов, разработанных авторами настоящей публикации. Так, вариации аэрозолей измеряли с помощью лидара (Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН) [5, 7, 10, 12], построенного на базе диодного лазера с безопасным для глаз уровнем излучения.

Эволюцию температуры горных пород в туннеле измеряли прецизионным электронным термометром (ИФЗ РАН) с разрешающей способностью порядка 0.001 °С

[1, 2]. Данный термометр был разработан для непрерывного мониторинга приливных волн [3] и потока магматического или мантийного тепла, переносимого мантийным потоком [8].

Лазерный деформограф (ГАИШ МГУ) с измерительным плечом интерферометра Майкельсона длиной 75 м [4] размещен на скальном основании в Главной штольне на расстоянии около 600 м от входного портала.

Данные непрерывного мониторинга записывали на локальные системы сбора информации. На рисунке представлена эволюция сигналов в день разрушительного землетрясения в Турции 06.02.2023 г.

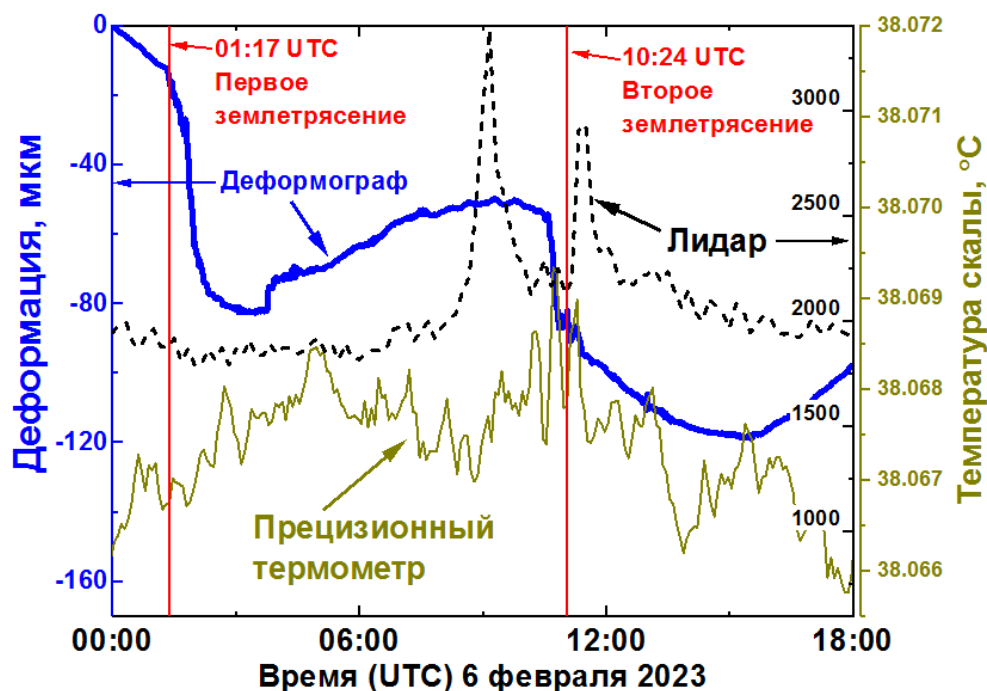


Рисунок. Вариации сигналов деформографа (синяя толстая линия), лидара (пунктир) и температуры скалы (тонкая линия) во время землетрясений в Турции 06.02.2023 г. Вертикальные линии отмечают моменты 1-го и 2-го землетрясений 01:17 и 10:24 UTC.

Из рисунка видно, что первое и второе землетрясения отразились на сигнале деформографа на фазе сжатия коры в 01:17 и 10:24 UTC в виде резкого сжатия в отличие от плавного сокращения, например, ночью 00:00–03:00. При этом, волна сжатия от второго землетрясения (10:24 UTC) заметно короче, чем от первого, несмотря на то, что мощность первого землетрясения была выше. Возможно, данное отличие обусловлено ориентацией линий разломов первого (под углом к меридиану) и второго землетрясения (под  $90^\circ$  к меридиану) и волн деформации. Так, волны деформации от первого землетрясения направлены в сторону Румынии, тогда как от второго – в сторону Эльбруса и БНО. Обнаруженная асимметрия проявляется также в том, что в момент первого землетрясения не были отмечены повышение температуры внутри скальных пород БНО и выход аэрозолей.

### Выводы

Таким образом, впервые, насколько нам известно, проведен анализ эволюции сигналов лазерного деформографа, аэрозольного лидара и прецизионного термометра, размещенных в тоннелях Баксанской нейтринной обсерватории в день землетрясений в Турции 06.02.2023 г. Анализ выявил асимметрию сигналов деформографа в моменты первого и второго землетрясения, несмотря на почти одинаковую магнитуду: 7.8 и 7.7, соответственно. При этом не были отмечены изменения сигналов лидара и термометра во время первого землетрясения. Напротив, во время второго землетрясения было

обнаружено совпадение быстрого сжатия коры Земли (деформограф) с повышением температуры внутри скальной стены тоннеля. Кроме того, лидаром были зарегистрированы два выхода аэрозолей до и после момента второго землетрясения. Природа такого отличия пока до конца не ясна и может быть обусловлена выходом ионов как центров образования аэрозолей [6], которые иногда опережают землетрясения [9, 11].

Работа выполнена в рамках государственных заданий Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН и Государственного астрономического института им. П.К. Штернберга МГУ.

### Список литературы

1. *Лиходеев Д.В., Гравиров В.В., Кислов К.В.* Прецизионные дифференциальные термометры для исследования тепловых процессов на базе Северокавказской геофизической обсерватории // Наука и технологические разработки. 2018. Т. 97. № 1. С. 15-25.
2. *Лиходеев Д.В., Гравиров В.В., Кислов К.В., Долов С.М.* Прецизионные узкодиапазонные дифференциальные температурные датчики // Научное приборостроение. 2019. Т. 29. № 1. С. 11-16. <https://doi.org/10.18358/NP-29-1-P1116>
3. *Лиходеев Д.В., Собисевич А.Л., Гравиров В.В.* Приливные эффекты в тонкой структуре тепловых полей по результатам наблюдений в глубокой штольне северокавказской геофизической обсерватории // Доклады Российской Академии Наук. Науки о Земле. 2022. Т. 503. № 2. С. 148-153.
4. *Мясников А.В.* О проблеме учета влияния метеорологических факторов на большие прецизионные системы на примере Баксанского большебазового лазерного интерферометра // Сейсмические приборы. 2019. Т. 55. № 2. С. 27-38. <https://doi.org/10.21455/si2019.2-2>
5. *Першин С.М., Гришин М.Я., Завозин В.А. и др.* Лидарное зондирование эволюции многослойных туманов в наклонном тоннеле Баксанской нейтринной обсерватории // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2019. Т. 46. № 10. С. 46-54.
6. *Першин С.М., Завозин В.А., Леднев В.Н. и др.* Лидарный мониторинг динамики аэрозолей, индуцированных аэроионами // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2023. № 12. С. 69-78.
7. *Першин С.М., Собисевич А.Л., Завозин В.А. и др.* Лидарное детектирование аэрозолей в тоннеле над очагом вулкана Эльбрус // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2022. № 2. С. 10-19.
8. *Свалова В.Б.* Землетрясения в Турции и Сирии 2023 года и геодинамика Кавказско-Анатолийского региона // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2023. № 3. С. 28-41. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2023-65-3-28-41>
9. *Liu Q., Shen X., Zhang J. et al.* Aerosol anomalies associated with occurrence of recent strong earthquakes ( $> M 8.0$ ) // *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*. 2020. V. 31. № 6. P. 677-689. <https://doi.org/10.3319/TAO.2020.05.22.01>
10. *Pershin S.M., Sobisevich A.L., Grishin M.Ya. et al.* Volcanic activity monitoring by unique LIDAR based on a diode laser // *Laser Physics Letters*. 2020. V. 17. № 11. Art. 115607.
11. *Warden S., Bleier T., Kappler K.* Long term air ion monitoring in search of pre-earthquake signals // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2019. V. 186. P. 47-60. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2019.01.009>
12. *Zavozin V.A., Grishin M.Ya., Lednev V.N. et al.* Eye-safe photon counting LIDAR for magmatic aerosol detection // *Laser Physics*. 2022. V. 32. Art. 125601. <https://doi.org/10.1088/1555-6611/aca15d>