

УДК 551.2.03

КОРРЕЛЯЦИЯ СИГНАЛОВ АЭРОЗОЛЬНОГО ЛИДАРА, ЛАЗЕРНОГО ДЕФОРМОГРАФА И ТЕМПЕРАТУРЫ ГАЗА СКАЛ В БАКСАНСКОЙ НЕЙТРИННОЙ ОБСЕРВАТОРИИ ВО ВРЕМЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В ТУРЦИИ 06.02.2023

© 2025 г. С. М. Першин^{а, *}, Е. И. Гордеев^б, В. В. Гравиров^с,
М. Я. Гришин^а, В. А. Завозин^а, В. Н. Леднёв^а, Д. В. Лиходеев^с,
В. С. Макаров^д, А. В. Мясников^е, А. А. Ушаков^а

^аИнститут общей физики им. А.М. Прохорова РАН,
ул. Вавилова, 38, Москва, 119991 Россия

^бИнститут вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,
бульвар Пийпа, 9, Петропавловск-Камчатский, 683006 Россия

^сИнститут физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,
ул. Большая Грузинская, 10, стр. 1, Москва, 123242 Россия

^дИнститут космических исследований РАН,
ул. Профсоюзная, 84/32, Москва, 117133 Россия

^еГосударственный астрономический институт им. П.К. Штернберга МГУ,
Университетский просп., 13, Москва, 119234 Россия

*e-mail: pershin@kapella.gpi.ru

Поступила в редакцию 13.12.2023 г.

После доработки 24.01.2025 г.

Принята к публикации 18.02.2025 г.

Впервые, насколько нам известно, обнаружена асимметрия сигналов лазерного деформографа в Баксанской нейтринной обсерватории (БНО) в Приэльбрусье в момент первого и второго землетрясений в Турции (06.02.2023), которые имели почти одинаковые магнитуды. Выявлена корреляция сигналов лазерного деформографа и температуры внутри скального основания в тупиковом тоннеле БНО, а также сигнала аэрозольного лидара во время второго землетрясения в 10:24 UTC с магнитудой 7.7. Оценка радиуса зоны напряжения от эпицентров дает величину ~2000 км, что превышает расстояние до тоннелей БНО (~900 км) и, таким образом, допускает проявление вариации напряженно-деформированного состояния в сигналах деформографа, термометра и лидара.

Ключевые слова: лидарный мониторинг тектонической активности, смещение литосферных плит, землетрясения в Турции, напряженно-деформированное состояние коры Земли, мантийный поток

DOI: 10.31857/S0203030625030048, EDN: PZGXFA

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что наиболее разрушительные землетрясения на Земле являются следствием субдукции литосферных плит. Особенно активны в этом отношении регионы, в которых сходятся три–четыре плиты, как в Турции: Анатолийская, Аравийская, Африканская, а также Евразийская плита с Северо-Анатолийским разломом

[Свалова, 2023]. При этом установлено [Свалова, 2023], 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. Существенно отметить, что общее тело мантийного потока достигает Евразийской

плиты на севере вплоть до Казбека, Эльбруса и региона Кавказских Минеральных Вод (см. [Свалова, 2023, рис. 6, 7, 8]). Приближение этого плюма к поверхности коры Земли питает магматические камеры вулканов. Так, есть основания полагать, что подогрев и выброс ледника Колка на Казбеке в 2004 г., а также вариации мощности выхода газов, паров, аэрозолей и подогрев основания тоннелей в Баксанской нейтринной обсерватории (БНО) в Приэльбрусье являются проявлением активности этого мантийного плюма. Такие процессы могут проявляться даже в глобальном масштабе выхода радона и аэрозолей в виде снижения прозрачности атмосферы, которое наблюдают с орбитальных комплексов [Liu et al., 2020]. Поэтому мониторинг вариаций этих параметров 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, что и являлось целью данной работы. Особое внимание было уделено землетрясениям с магнитудой 7.8 и 7.7, произошедшим в Турции (в 01:17 и 10:24 UTC) 06.02.2023 г. [Свалова, 2023].

ЭКСПЕРИМЕНТ

Мониторинг вариаций аэрозолей, температуры и деформации коры Земли проводили в тоннелях (рис. 1) БНО с помощью уникальных

инструментов, разработанных авторами настоящей статьи. Так, вариации аэрозолей измеряли с помощью лидара, разработанного в Институте общей физики им. А.М. Прохорова РАН (ИОФ РАН) на базе диодного лазера с безопасным для глаз уровнем излучения. Лидар был установлен в “горячем” тупиковом тоннеле (см. рис. 1, отмечено кругом) в конце вспомогательной штольни БНО (3900 м по горизонтали от входного портала), где расположена Лаборатория № 2 Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (ИФЗ РАН). Описание и принцип работы лидара представлены в ряде работ, опубликованных нами ранее [Першин и др., 2019; Pershin et al., 2020; Першин и др., 2022; Zavozin et al., 2022].

Эволюцию температуры измеряли в этом же “горячем” тоннеле уникальным термометром с чувствительностью ~ 0.001 °C, который был разработан специалистами ИФЗ РАН для мониторинга приливных волн [Лиходеев и др., 2022] и потока магматического или мантийного тепла, переносимого мантийным потоком [Свалова, 2023] и газами, выходящими сквозь поры и трещины и скальной породы. Для надежной экранировки высокочувствительного прецизионного термометра измерение температуры проводили в наклонном канале диаметром 6 см и длиной 4.5 м с закрытым входным отверстием, который просверлили в скальной стене “горячего” тоннеля.

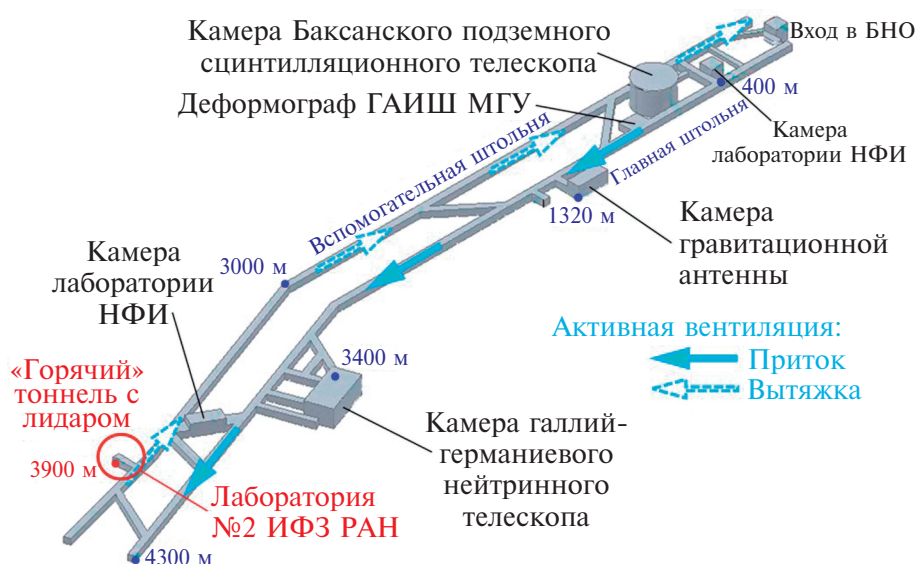


Рис. 1. Схема тоннелей БНО, расположенных под горой Андырчи на высоте 1700 м над уровнем моря.

Лазерный деформограф ГАИШ МГУ с измерительным плечом интерферометра Майкельсона длиной 75 м [Милюков и др., 2005; Мясников, 2019] размещен на скальном основании в главной штольне на расстоянии ~600 м от входного портала. Отметим, что деформограф здесь является основным детектором землетрясений, поскольку измеряет абсолютное расширение или сжатие коры Земли приливными волнами, как было зарегистрировано за прошедшие десятилетия [Першин и др., 2019; Мясников, 2019], а также регистрирует волны Лява и Релея [Мясников,

2019]. На рис. 2 приведен фрагмент сигнала деформографа за 6 февраля 2023 г.

Данные непрерывного мониторинга записывали на компьютеры приборов. Эти результаты были доступны из институтских лабораторий в г. Москва для анализа или управления режимом мониторинга. На рис. 3 представлена эволюция сигналов в день разрушительного землетрясения в Турции 06.02.2023 г.

Из рис. 3 видно, что первое и второе землетрясения отразились на сигнале деформографа

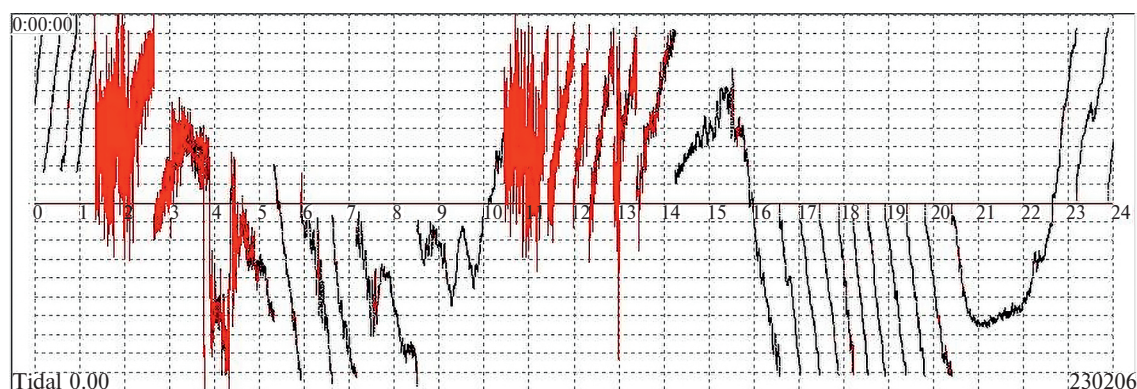


Рис. 2. Фрагмент сигнала деформографа от 0:00:00 до 24:00:00 UTC 6 февраля 2023 г.

По горизонтальной оси отложено время в часах, по вертикальной — деформация скального основания в относительных единицах. Частота дискретизации данных деформографа составляет 0.5 Гц. Красным выделены отрезки во время главного удара и последующих афтершоков после первого и второго землетрясений в Турции (01:17 и 10:24 UTC).

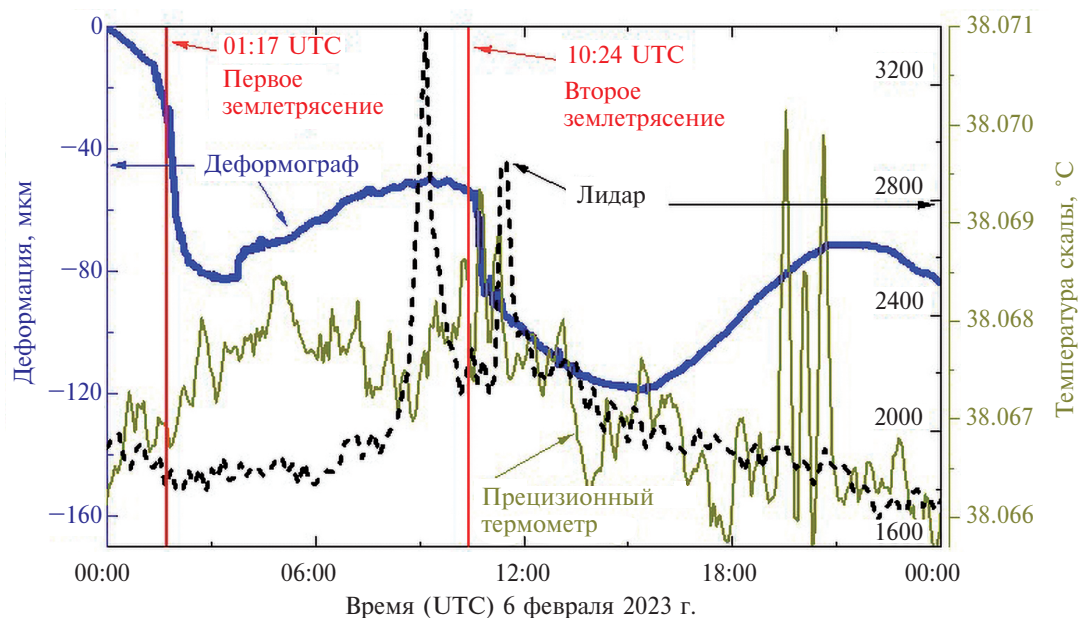


Рис. 3. Вариации сигналов деформографа (синяя толстая линия), лидара (пунктир) и температуры скалы (тонкая линия) во время землетрясений в Турции 06.02.2023.

Вертикальные линии отмечают моменты 1-го и 2-го землетрясения 01:17 и 10:24 UTC.

на фазе сжатия коры в 01:17 и 10:24 UTC. Отметим сильные искажения кривой деформации после первого удара в виде резкого сжатия плеча интерферометра и “отскока” с расширением (~04:00–10:00). При этом расширение ограничено напряженным состоянием породы (см. рис. 2, интерференционные полосы) в отличие от плавного расширения, например, в интервале 16:00–22:00. При этом заметно, что скачок сжатия от второго землетрясения (10:24 UTC) заметно короче, чем от первого, несмотря на то что мощность первого землетрясения была выше (M 7.8). Скорее всего, данное отличие обусловлено ориентацией линий разломов первого (под углом к меридиану) и второго землетрясения (под 90° к меридиану), а также и волн деформации (рис. 4). Так, волны деформации от первого землетрясения направлены в сторону Румынии, тогда как от второго удара – в сторону Эльбруса и БНО, как это видно по стрелкам на рис. 4а и 4б. Обнаруженная асимметрия проявляется также в том, что в момент первого землетрясения нет повышения температуры внутри канала в скальных породах

БНО, а также выхода аэрозолей и сигнала лидара, соответственно, которые отчетливо проявились в окрестности второго землетрясения.

Далее, сравнение сигналов лидара, термометров и деформографа на рис. 3 показывает, что в день землетрясения отчетливо наблюдаются повышение температуры внутри скал и выход аэрозолей с экстремумом в середине дня с некоторой модуляцией в течение нескольких часов. Механизм такой быстрой модуляции не может быть диффузионным, а только в результате транспорта горячих газов из-за повышения давления по трещинам и порам, которые пересекают закрытые каналы внутри скальной стены тоннеля, где размещены термометры [Лиходеев и др., 2022]. Источником тепла здесь, скорее всего, следует считать магматическую камеру Эльбруса и текущий на север под литосферными плитами магматический плюм (поток) [Свалова, 2023], который индуцировал два мощных землетрясения в Турции. Подобный небольшой прирост наблюдается в лидарном сигнале рассеяния на аэрозолях, кроме

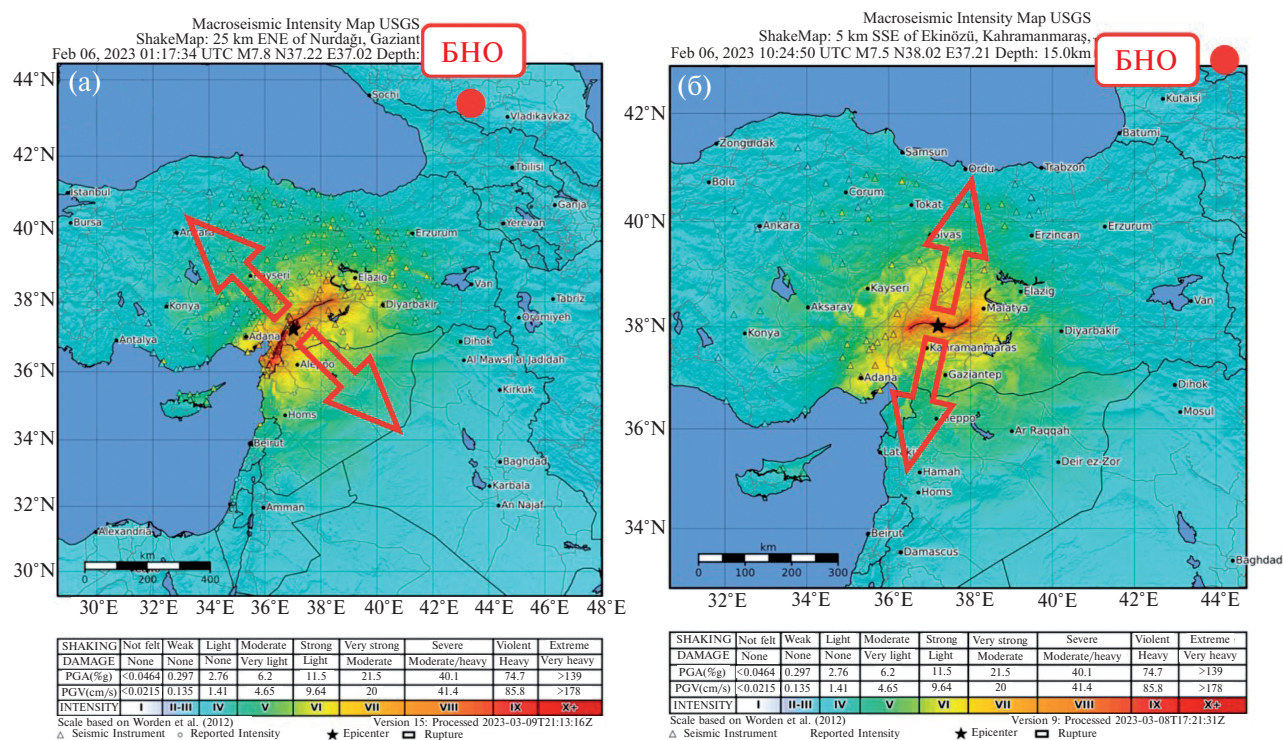


Рис. 4. Схема разломов в момент землетрясений в Турции 06.02.2023. Изображения получены с веб-сайта сервиса мониторинга землетрясений Геологической службы США (<https://earthquake.usgs.gov/>). (а) – первое землетрясение в 01:17 UTC и (б) – второе землетрясение в 10:24 UTC, которые заметно отличаются ориентаций линии разлома.

двух выбросов, которые коррелируют с выбросом-поступлением “горячих” газов в каналы термометров. Заметим, что максимальный выброс газов в каналы с термометром и повышение температуры внутри скальной стены тоннеля практически совпадают с волной сжатия деформографа после землетрясения в 10:24 (см. рис. 3, правая вертикальная красная линия). Это, скорее всего, обусловлено перемещением теплых газов вверх при сжатии скальной породы вниз. Напротив, один импульс повышения температуры, а также сигнал лидара опережают момент землетрясения, а другой запаздывает. Природа такого отличия пока до конца не ясна и может быть обусловлена выходом радона и аэроионов как центров образования аэрозолей [Першин и др., 2023], которые иногда опережают землетрясения [Warden et al., 2019]. Отметим небольшие возмущения на сигнале деформографа, когда сигнал лидарного рассеяния на аэрозолях достигает экстремума, и наблюдаются скачки повышения температуры газов в закрытом канале термометра. Отметим медленное снижение температуры с 12:00 до 24:00 (фактически уменьшение притока нагретых газов из камеры вулкана), которое проявляется уменьшением сигнала лидара рассеяния на аэрозолях, которые выносят эти газы по трещинам и порам. Выявленная корреляция, несомненно, повышает надежность наблюдаемых и измеренных особенностей эволюции инструментальных сигналов во время землетрясений вдали от эпицентра, но в зоне Добровольского [Добровольский, 1991].

ВЫВОДЫ

Таким образом, впервые, насколько нам известно, проведен комплексный анализ эволюции сигналов лазерного деформографа, аэрозольного лидара и прецизионного термометра, размещенных в тоннелях Баксанской нейтринной обсерватории в день землетрясений в Турции 06.02.2023. Анализ выявил асимметрию сигналов деформографа в моменты первого и второго землетрясения, несмотря на почти одинаковую магнитуду 7.8 и 7.7, соответственно. Отметим здесь остаточное напряженное состояние скальной породы до второго удара, которое проявилось в искажении интерференционных полос (см. рис. 2). При этом, во время

первого землетрясения не было зарегистрировано сигналов лидара и термодатчика. Напротив, во время второго землетрясения было обнаружено совпадение быстрого сжатия коры Земли (сигнал деформографа) с повышением температуры внутри скальной стены тоннеля. Кроме того, лидаром было зарегистрировано два коротких импульса выхода аэрозолей, до и после момента второго землетрясения. Природа такого смещения пока до конца не ясна и требует отдельного изучения.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят С.П. Якименко за помощь в измерениях.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-19-00712, а также в рамках госзадания ИФЗ РАН.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Добровольский И.П. Теория подготовки тектонического землетрясения. М.: ИФЗ АН СССР, 1991. 224 с.
- 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.
- Милуков В.К., Клячко Б.С., Мясников А.В., Стриганов П.С., Янин А.Ф., Власов А.Н. Лазерный интерферометр для мониторинга движений земной коры // Приборы и техника эксперимента. 2005. № 6. С. 87–103.
- 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>
- Першин С.М., Гришин М.Я., Завозин В.А., Кузьминов В.В., Леднёв В.Н., Макаров В.С., Мясников А.В., Тюрин А.В., Федоров А.Н., Петков В.Б. Лидарное зондирование эволюции многослойных туманов в наклонном тоннеле Баксанской нейтринной

обсерватории // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2019. Т. 46. № 10. С. 46–54.

Першин С.М., Собисевич А.Л., Завозин В.А., Гришин М.Я., Леднев В.Н., Макаров В.С., Петков В.Б., По-
нуровский Я.Я. Лидарное детектирование аэрозолей
в тоннеле над очагом вулкана Эльбрус // Краткие со-
общения по физике ФИАН. 2022. Т. 49. № 2. С. 10–19.

Першин С.М., Завозин В.А., Леднев В.Н., Болдин Г.А.,
Гришин М.Я., Макаров В.С., Безруков Л.Б., Межох А.К.,
Синев В.В. Лидарный мониторинг динамики аэрозо-
лей, индуцированных аэроионами // Краткие сооб-
щения по физике ФИАН. 2023. Т. 50. № 12. С. 69–78.

Свалова В.Б. Землетрясения в Турции и Сирии 2023
года и геодинамика Кавказско-Анатолийского регио-
на // Известия высших учебных заведений. Геология и
разведка. 2023. Т. 65. № 3. С. 28–41.

<https://doi.org/10.32454/0016-7762-2023-65-3-28-41>

Liu Q., Shen X., Zhang J., Cui J., Tan Q., Zhao S., Li M.
Aerosol anomalies associated with occurrence of recent
strong earthquakes ($> M 8.0$) // Terr. Atmos. Ocean. Sci.
2020. V. 31. № 6. P. 677–689.

<https://doi.org/10.3319/TAO.2020.05.22.01>

Pershin S.M., Sobisevich A.L., Grishin M.Ya., Gravurov V.V.,
Zavozin V.A., Kuzminov V.V., Likhodeev D.V., Lednev V.N.,
Makarov V.S., Myasnikov A.V., Fedorov A.N. Volcanic
activity monitoring by unique LIDAR based on
a diode laser // Laser Phys. Lett. 2020. V. 17. № 11.
P. 115607. <https://doi.org/10.1088/1612-202X/abbedc>

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>

Zavozin V.A., Grishin M.Ya., Lednev V.N., Makarov V.S.,
Pershin S.M. Eye-safe photon counting LIDAR for
magmatic aerosol detection // Laser Phys. 2022. V. 32.
№ 12. P. 125601. <https://doi.org/10.1088/1555-6611/aca15d>

CORRELATION OF THE AEROSOL LIDAR SIGNAL, LASER STRAINMETER SIGNAL AND ROCK TEMPERATURE IN BAKSAN NEUTRINO OBSERVATORY DURING EARTHQUAKES IN TURKEY ON FEBRUARY 6, 2023

S. M. Pershin^{1, *}, E. I. Gordeev², V. V. Gravurov³, M. Ya. Grishin¹, V. A. Zavozin¹,
V. N. Lednev¹, D. V. Likhodeev³, V. S. Makarov⁴, A. V. Myasnikov⁵, A. A. Ushakov¹

¹Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences,
Vavilova str., 38, Moscow, 119991 Russia

²Institute of Volcanology and Seismology Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences,
bulvar Piipa, 9, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006 Russia

³Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences,
Bolshaya Gruzinskaya str., 10, bld. 1, Moscow, 123242 Russia

⁴Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences,
Profsoyuznaya str., 84/32, Moscow, 117133 Russia

⁵Sternberg Astronomical Institute of Moscow State University,
Universitetsky ave., 13, Moscow, 119234 Russia

*e-mail: pershin@kapella.gpi.ru

We report for the first time the observation of an asymmetrical behavior of the laser strainmeter signals in Baksan Neutrino Observatory (BNO, located in the Elbrus region) during two earthquakes of similar magnitude in Turkey on February 6, 2023. We have revealed a correlation between the signals of laser strainmeter, rock basement temperature in the dead-ended BNO tunnel, and the aerosol lidar signal during the second M_w 7.7 earthquake at 10:24 UTC, Feb 6, 2023. The estimated crustal stress area radius is ~ 2000 km which is larger than the distance between the earthquake epicenter and BNO (~ 900 km), thus the signals of the strainmeter, thermometer and lidar can reflect stress-deformed state variations.

Keywords: lidar monitoring of tectonic activity, tectonic plates movement, earthquakes in Turkey, stress-deformed state of the Earth's crust, mantle plume