ДОКЛАДЫ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК. ФИЗИКА, ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ, 2023, том 509, с. 15–20

ФИЗИКА

УДК 550.34; 551.14

ЛИДАРНЫЙ МОНИТОРИНГ МАГМАТИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ МАЛОЙ КАМЕРЫ ЭЛЬБРУССКОГО ВУЛКАНИЧЕСКОГО ЦЕНТРА

© 2023 г. С. М. Першин[1,*], член-корреспондент РАН А. Л. Собисевич[2], В. С. Макаров[3], А. В. Мясников[4], М. Я. Гришин[1], В. А. Завозин[1], В. Н. Леднёв[1], Д. В. Лиходеев[2], В. В. Казалов[5]

Поступило 17.11.2022 г.
После доработки 17.11.2022 г.
Принято к публикации 25.11.2022 г.

Представлены результаты лидарного мониторинга вариации магматического аэрозоля. Лидар установили в горячем тоннеле-тупике в конце вспомогательной штольни Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН, которая расположена над малой магматической камерой Эльбрусского вулканического центра. Обнаружено быстрое (в течение ~30 мин) трехкратное повышение концентрации аэрозолей в горячем тоннеле (28.10.2019 22: 30 UTC). Для анализа были привлечены результаты измерений объемной активности радона, температуры и влажности воздуха. Выявлено синхронное повышение температуры, влажности и концентрации аэрозоля в тоннеле, а также их корреляция с деформацией коры Земли приливными волнами, мониторинг которой проводится в БНО лазерным деформографом. Однако в этих сигналах трехкратный скачок не проявился. Совокупность данных подтверждает существование горячей магматической камеры в основании горы Андырчи, обнаруженной ранее малоапертурной группой сейсмометров. Обсуждается предположение, что выход газов из магматической камеры мог обеспечить скачок концентрации аэрозолей без возмущения других параметров.

Ключевые слова: аэрозольный лидар, малоапертурная группа сейсмометров, сейсмический очаг, малая магматическая камера

DOI: 10.31857/S2686740023020086, **EDN:** UPIIBD

Эльбрусский вулканический центр (ЭВЦ) включает ряд крупных (вулкан Эльбрус) и более мелких магматических образований (камер) [1, 2]. Эти магматические камеры отнесены к Сылтранской магмоконтролирующей разломной зоне и расположены к западу и востоку от Эльбруса (в направлении города Тырныауз) в долинах рек Бакасан, Кыртык, Бийтик-Тебе, Уллу-Хурзук, Уллу-Кам [2].

В настоящее время при изучении вулканизма и магматических процессов применяются геолого-геофизические и сверхточные геодезические технологии, космические методы наблюдений и современные измерительные системы [3]. Изучение “тонкой” структуры ЭВЦ проводится на основе комплексного анализа различных по своей природе геофизических полей (теплового, гравитационного, сейсмического, электромагнитного) [4]. Прогнозирование возможных сейсмических или вулканических событий в регионе требует проведения широкомасштабных натурных экспериментальных исследований неоднородных структур в районе ЭВЦ [5, 6], в первую очередь, магматической структуры Эльбруса как более крупной [7, 8], но далеко не единственной [4]. Так, менее крупные магматические камеры локализованы ближе к поверхности на глубине 1–2 км, как под штольнями БНО [1], и могут проявлять себя через эманацию газов, аэрозолей, паров, что позволяет проводить мониторинг их активности лидарами.

Здесь отметим успехи лидарного мониторинга выхода газов над кратерами вулканов [9–11] с целью прогноза вулканической активности. Однако опасность поражения глаз рассеянным излучением мощных лазеров, а также изменчивость метеопараметров на протяженной трассе зондирования ограничивали их применимость. Разработка новых аэрозольных лидаров [12] с безопасным для

[1] *Федеральный исследовательский центр “Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук”, Москва, Россия*
[2] *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия*
[3] *Институт космических исследований Российской академии наук, Москва, Россия*
[4] *Государственный астрономический институт им. П.Н. Штернберга, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*
[5] *Институт ядерных исследований Российской академии наук, Москва, Россия*
*****E-mail: pershin@kapella.gpi.ru*

глаз уровнем излучения (менее 1 мкДж/см^2) [13] открыла новую эру лидарного мониторинга без необходимости защиты глаз от поражения, что сняло все ограничения вплоть до возможности применения в беспилотных автомобилях в городах. Так, новые условия зондирования с уменьшением влияния фактора метеопараметров в тоннеле-тупике Баксанской нейтринной обсерватории (БНО ИЯИ РАН) позволили нам зарегистрировать таким лидаром сезонное снижение концентрации аэрозолей [14, 15], которое симбатно сжатию коры Земли по данным лазерного деформографа [16, 17]. При анализе данных последующего мониторинга активности вулкана Эльбрус мы обратили внимание на резкое, в виде ступени, и большое (в 3 раза) повышение среднего значения сигнала лидарного рассеяния на магматических аэрозолях. Аэрозоли образовались и заполнили тоннель вдоль трассы лидара за 30 мин между сеансами измерений ночью 28.10.2019 г. (22:30 UTC) и оставались на этом уровне последующие дни-недели. Обнаруженные особенности сигнала могут быть следствием ряда процессов при допущении существования близко расположенной малой магматической камеры пониженной плотности, наполненной горячими газами [1, 8].

Целью данной работы был поиск механизма обнаруженного трехкратного повышения лидарного сигнала рассеяния на аэрозолях неясной природы, которое могло быть инициировано выходом газов и аэрозолей из малой магматической камеры на глубине 1.5 км под штольнями БНО [1, 8]. Особый интерес к этому скачку аэрозолей придает землетрясение на Филиппинах (29.10.2019, 01:05 UTC, в 43 километрах к юго-западу от портового города Давао).

ЛИДАР И МОНИТОРИНГ МАГМАТИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ

В 2019 г. компактный аэрозольный лидар с безопасным уровнем излучения (<1 мкДж/см^2) был установлен в конце вспомогательной штольни БНО (ширина штольни ~4.4 м, высота ~3.4 м) в тоннеле-тупике длиной 50 м и диаметром ~3 м (лаборатория № 2 Института физики Земли РАН). Лидар был собран на базе лазерного диода (SPL PL90_3, OSRAM) и однофотонного лавинного фотодиода (SPAD) (SAP 500 T6, Laser Components). Для генерации лазером коротких импульсов (~2.7 нс) с энергией ~0.2 мкДж мы разработали генератор импульсов тока [17]. Лидар был размещен в 10 м от входа и направлен в сторону глухой стены.

Принцип работы лидара в режиме формирования гистограмм фотоотсчетов с шагом дискретизации 10 см, разработанный нами ранее [18], обеспечивал лидарное зондирование динамики аэрозолей в автономном режиме с анализом данных и удаленным управлением из лаборатории ИОФ РАН в г. Москве [13, 14]. В каждом сеансе зондирования с интервалом 30 мин лазер излучал 100 000 импульсов с частотой повторения 10 кГц. Лидар суммировал фотоотсчеты от зарегистрированных фотонов, рассеянных на аэрозолях вдоль трассы и от стены в обратном направлении [13, 18, 19]. Пример вариации сигналов рассеяния на аэрозолях и пропускания трассы на круговом обходе фотонов импульса лазера до стены и обратно в окрестности скачка-ступени и большого выброса аэрозолей показан на панели (а) рис. 1 (линии *2* и *1* соответственно). Сигналы рассеяния на аэрозолях отчетливо показывают два уровня с низким, до ступени (слева), и высоким, после ступени (справа), содержанием аэрозолей в тоннеле, а также три скачка сигнала лидара с доминированием среднего из них. На панелях (б)–(г) представлены гистограммы распределения фотоотсчетов вдоль трассы в сеансах зондирования, отмеченных стрелками (б), (в) и (г) на панели (а) рис. 1.

Из рис. 1а (кривая *2*) видно, что в 22: 30 UTC началось быстрое (30 мин) наполнение тоннеля аэрозолями с последующим замедлением. Через 2 ч концентрация аэрозолей увеличилась втрое и осталась на этом уровне без следов релаксации. Сигнал пропускания трассы (рис. 1, верхняя кривая *1*) имеет зависимость, зеркальную к сигналу вариации аэрозолей. Антикорреляция сигнала пропускания лидара подтверждает, что лидар работает в линейном режиме регистрации фотоотсчетов, и показывает, что трасса заполнилась аэрозолями, которые увеличили потери фотонов на круговом обходе. Кроме того, после резкого роста концентрации аэрозолей был зарегистрирован импульс сигнала лидара с двукратным увеличением амплитуды фотоотсчетов относительно среднего уровня, но с быстрой (~30 мин) релаксацией. Дополнительно были детально проанализированы гистограммы фотоотсчетов, соответствующие характерным уровням сигналов аэрозольного рассеяния (рис. 2): при низкой концентрации аэрозолей 28.10 (рис. 1а, стрелка слева), в максимуме второго скачка (29.10) и на высоком (30.10) уровне концентрации (рис. 1б, стрелка справа).

Таким образом, из рис. 1, 2 следует, что обнаруженный скачок концентрации аэрозолей может быть вызван геофизическими процессами, которые индуцировали повышение концентрации аэрозоля в окрестности тоннеля-тупика БНО. Вполне вероятно ожидать, что эти процессы должны отразиться на измерениях лазерного деформографа (расширение-сжатие коры Земли) [16, 17], а также температуры внутри тоннеля из-за поступления горячих газов и вариации объемной активности радона и уровня влажности воз-

духа, датчики которых были установлены ранее [14]. Температуру воздуха в тоннеле измеряли разработанными специалистами ИФЗ РАН [18, 20] прецизионными ($\Delta t = \pm 0.005$°C) датчиками, которые позволили зарегистрировать приливные волны [20]. Для удобства анализа эти данные сведены вместе с кривой сигнала лидара на рис. 2, 3. На рисунках используется шкала времени UTC.

Анализ зависимостей показывает, что приливные вариации (рис. 2, толстая линия) коррелируют с вариациями температуры (тонкая линия) и увеличением сигнала лидара (полые круги) 28–30 октября. Отметим, что скачок концентрации аэрозоля (увеличение сигнала лидара) синхронизован с ростом температуры. Наблюдаемая динамика, скорее всего, является следствием расширения трещин/пор породы и наполнения тоннеля горячими магматическими газами из неглубокой (1.5 км, [1]) локальной камеры, которые повышают температуру в тоннеле и транспортируют аэрозоли (см. карту на рис. 4). Однако развитие скачка лидарного сигнала (трехкратный рост аэрозольного рассеяния) не соответствует этому механизму, поскольку происходит на фазе снижения приливных изменений напряженно-деформированного состояния геофизической среды (рис. 2, толстая линия).

Другим механизмом “скачка” концентрации аэрозолей может быть доставка магматическими газами радиоактивного радона (^{222}Rn) и продуктов его распада, которые индуцируют формирование ионов и рост аэрозолей на них [21]. Из рис. 3 видно, что вариации объемной активности радона (квадраты) в окрестности “скачка” и большого сигнала лидара незначительны, что может быть обусловлено большим временем усреднения измерений (4 ч) датчиком радона (RADEX MR107). Напротив, вариации влажности (сплошные круги) коррелируют с сигналом лидара, но не отражают его “скачка”. Так, динамики образования аэрозолей в окрестности большого импульса сигнала лидара и влажности практически совпадают. Это совпадение указывает на процесс конденсации паров H_2O с образованием аэрозолей, а также на корреляцию с приливными изменениями напряженно-деформированного состояния геофизической среды и повышением температуры (рис. 2). Однако нет никаких заметных изменений сигналов в окрестности “скачка”. Поэтому вопрос объяснения процесса трехкратного скачкообразного увеличения (за 30 мин) концентрации аэрозолей в тоннеле остается пока открытым.

Заметим, что даже небольшое повышение температуры воздуха в относительно горячем (36–40°C) тоннеле через трещины при расширении коры Земли указывает на неглубокое залегание локального источника горячих газов и паров H_2O. Таким источником под штольнями БНО могут

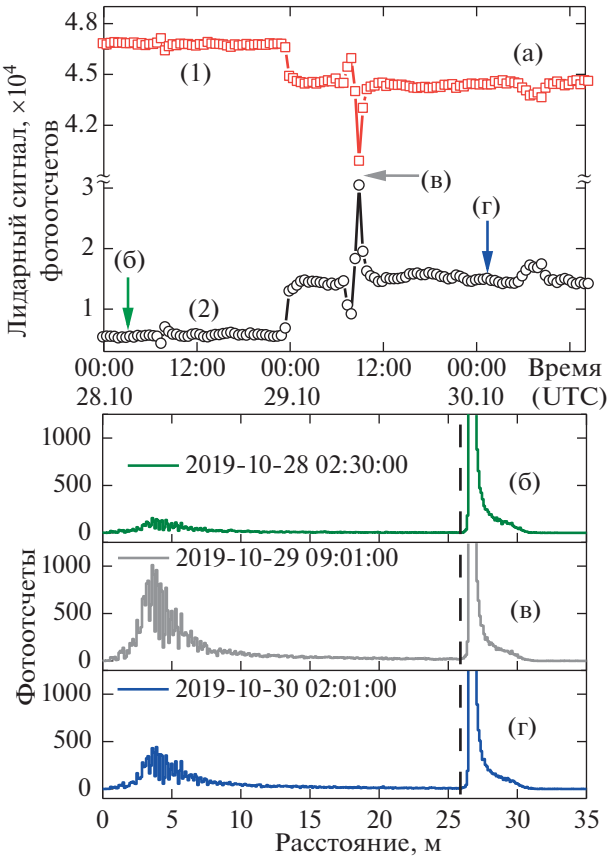

Рис. 1. а – Фрагмент (28.10–30.10.2019) временного ряда лидарного сигнала рассеяния на круговом обходе до стены и обратно (пропускание трассы) (линия *1*) и на аэрозолях (линия *2*). Стрелки отмечают сеансы измерений при низкой (б) и высокой (в) концентрации аэрозолей, а также в максимуме скачка сигнала лидара (г). Пунктиром отмечена граница трассы 0–26 м, на которой суммировали фототсчеты сигнала рассеяния на аэрозолях. Амплитуда рассеяния от стены (пик на 27–28 м) показана не полностью. Время на оси абсциссы на панеле (а) дано по шкале “всемирного координированного времени” (UTC).

являться магматические структуры, существование которых объясняет локальную сейсмическую активность в окрестности горы Андырчи [1]. Небольшая глубина залегания магматических очагов относительно штолен БНО дает основание ожидать диффузионный нагрев скальной породы в туннелях БНО благодаря теплопроводности, а также нагрев горячими магматическими газами, которые поднимаются по трещинам и порам.

Таким образом, с помощью аэрозольного лидара на диодном лазере, нового инструмента мониторинга магматической активности, размещенном в горячем тоннеле-тупике в конце штольни БНО, был зарегистрирован трехкратный “скачок” концентрации аэрозолей 28.10.2019 в 22:30 (UTC). Кроме того, были зарегистрированы большие кратковременные выбросы аэрозо-

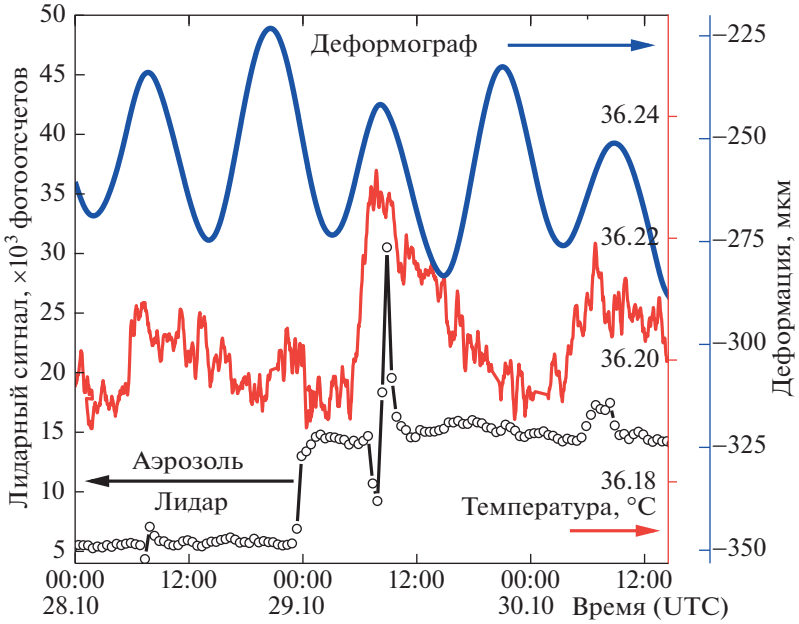

Рис. 2. Фрагменты временных рядов сигналов лидара (полые круги, левая ось ординат), температуры (тонкая линия, правая красная ось ординат) и лазерного деформографа (толстая линия, правая синяя ось ординат) в период от 28 до 31 октября 2019 г. Время на оси абсциссы приведено по шкале UTC.

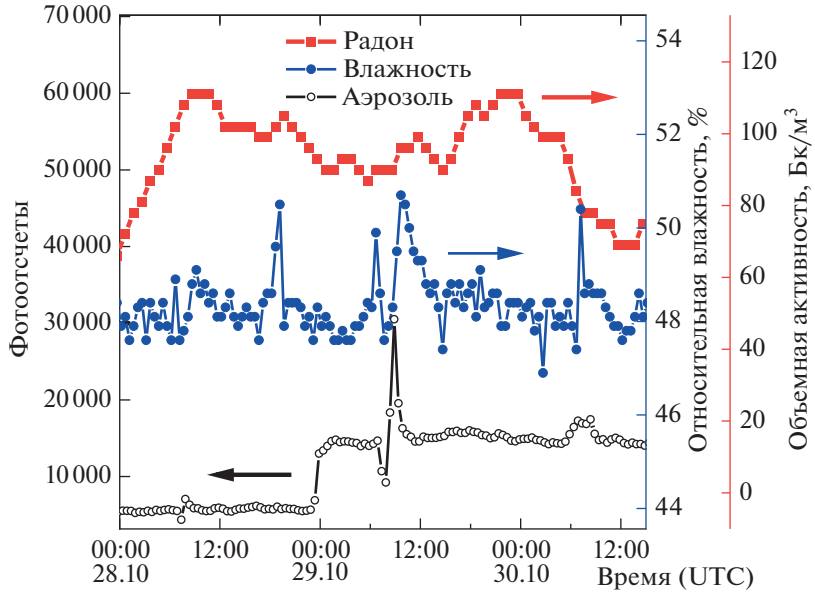

Рис. 3. Вариация сигналов влажности (сплошные круги, правая синяя ось ординат) и объемной активности радона (сплошные квадраты, правая красная ось ординат) и сигнала лидара (полые круги, левая ось ординат) на временном отрезке 28–30 октября 2019 г. Время на оси абсциссы приведено по шкале UTC.

лей, синхронно с повышением температуры, влажности и расширением коры Земли (данные лазерного деформографа), что указывает на близко-расположенную магматическую камеру неглубокого залегания. При этом в вариациях радиоактивности радона следов синхронизации с сигналами лидара обнаружено не было, что снижает его вклад в формирование аэрозолей на ионах [21]. Существенно заметить, что только лидар обнаружил трехкратный скачок концентрации аэрозолей, а другие датчики не “заметили” этого события. Такой сценарий возможен при поступлении в штольни БНО и в тупиковый тоннель ионов (или радиоактивных аэрозолей), на кото-

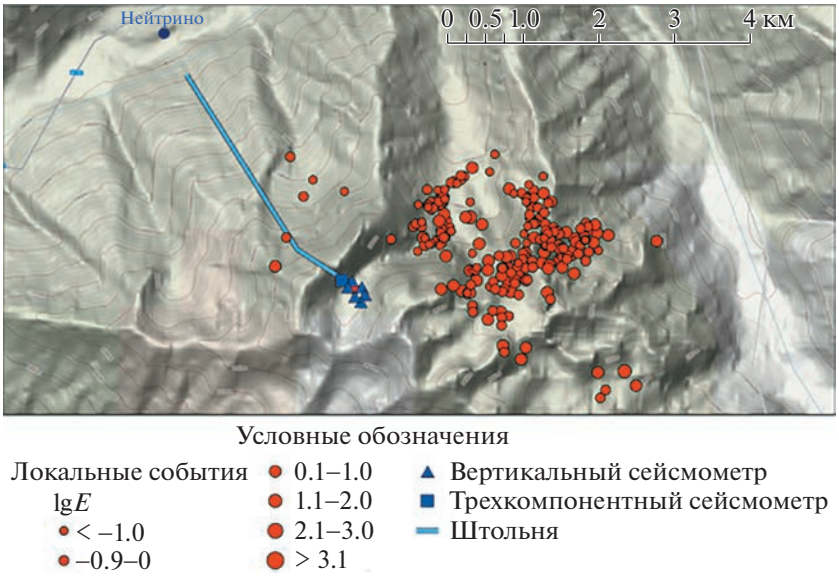

Рис. 4. Поселок Нейтрино, главная штольня БНО и эпицентры локальных сейсмических очагов (кружки) показаны на карте рельефа. Места размещения в зале в конце штольни БНО одного трехкомпонентного и шести вертикальных сейсмометров отмечены квадратом и треугольниками. Диаметр кругов, отмечающих локальные сейсмические очаги, увеличивается пропорционально энергии возмущения коры Земли. Рисунок воспроизведен из работы [1].

рый указывает регистрация 4-кратного увеличения потока гамма-квантов в зале Подземного сцинтилляционного телескопа БНО [22] в период обнаружения лидаром “скачка” концентрации аэрозолей. Отметим также, что механизм просветления атмосферы в тоннеле (снижение лидарного сигнала 28 и 29 октября и его биполярная форма, см. рис. 3) синхронно, но не всегда (30.10.2019), с уменьшением влажности остается пока неясным и требует отдельного изучения.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 19-19-00712-П.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Маловичко А.А., Бутырин П.Г., Верхоланцева Т.В., Верхоланцев Ф.Г., Шулаков Д.Ю.* Результаты микросейсмических наблюдений на территории Баксанской Нейтринной Обсерватории // В сб.: Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Седьмой Международной сейсмологической школы. 2015. С. 169–174.
2. *Авдулов М.В.* О геологической природе гравитационной аномалии Эльбруса // Известия АН СССР. Серия Геологическая. 1962. № 9. С. 67–74.
3. *Нечаев Ю.В.* Космические технологии в задачах изучения локальных неоднородностей земной коры // Избранные труды ученых ОИФЗ РАН “Геофизика на рубеже веков”. М.: ОИФЗ РАН, 1999. С. 276–290.
4. *Богатиков О.А., Гурбанов А.Г.* Комплексные исследования Эльбрусского и Казбекского вулканических центров: мониторинг и прогноз // Вестник Владикавказского научного центра. 2003. Т. 3. № 2. С. 15–28.
5. *Копаев А.В., Гурбанов А.Г.* Гравиметрические исследования в Геналдонском ущелье: первые результаты // Вестник Владикавказского научного центра. 2004. Т. 4. № 3. С. 9–12.
6. *Нечаев Ю.В., Собисевич А.Л.* Космические технологии в задачах механико-математического моделирования внутреннего строения геофизической среды // Третий Международный аэрокосмический конгресс IAC’2000: Тезисы докладов. Москва, 23-27 авг. 2000. М., 2000. С. 38–42.
7. *Рогожин Е.А., Горбатиков А.В., Андреева Н.В., Степанова М.Ю.* Предварительные данные о глубинном строении южного склона горы Эльбрус по результатам изучения комплексом геолого-геофизических методов // Геология и геофизика Юга России. 2015. № 3. С. 75–83.
8. *Milyukov V., Rogozhin E., Gorbatikov A., Mironov A., Myasnikov A., Stepanova M.* Contemporary State of the Elbrus Volcanic Center (The Northern Caucasus) // Pure and Applied Geophysics. 2018. V. 175. № 5. P. 1889–1907.
9. *Fiorani L., Colao F., Palucci A.* Measurement of Mount Etna plume by CO2-laser-based lidar // Optics Letters. 2009. V. 34. № 6. P. 800–802.
10. *Pisani G., Boselli A., Coltelli M., Leto G., Pica G., Scollo S., Spinelli N., Wang X.* Lidar depolarization measurement of fresh volcanic ash from Mt. Etna, Italy // Atmospheric Environment. 2012. V. 62. P. 34–40.

11. *Cigna F., Tapete D., Lu Z.* Remote Sensing of Volcanic Processes and Risk // Remote Sensing. 2020. V. 12. № 16. P. 2567.

12. *Першин С.М.* Лидар // Большая Российская знциклопедия. 2011. Т. 17. С. 451–452.

13. *Sliney D.H., Mellerio J.* Safety with lasers and other optical sources: a comprehensive handbook // Springer Science & Business Media, 2013.

14. *Pershin S.M., Sobisevich A.L., Grishin M.Ya., Gravirov 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 Physics Letters. 2020. V. 17. № 11. P. 115607.

15. *Першин С.М., Собисевич А.Л., Гришин М.Я., Завозин В.А., Макаров В.С., Леднёв В.Н., Фёдоров А.Н., Мясников А.В., Артёмова Д.Г.* Разнонаправленная модуляция сезонного сжатия коры Земли и сигнала аэрозольного лидара в тоннеле над очагом вулкана Эльбрус // Доклады РАН. Физика, технические науки. 2021. Т. 501. С. 14–18.

16. *Милюков 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.

17. *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.

18. *Першин С.М., Гришин М.Я., Завозин В.А., Макаров В.С., Леднёв В.Н., Фёдоров А.Н., Мясников А.В., Тюрин А.В.* Диодный лазер, генерирующий импульсы 3 нс, для лидара с высоким пространственным разрешением // Квантовая электроника. 2021. Т. 51. № 5. С. 423–426.

19. *Бухарин А.В., Першин С.М.* Теоретическое рассмотрение лидара обратного рассеяния с безопасным для глаз уровнем излучения // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. № 4. С. 521–537.

20. *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 РАН. Науки о Земле. 2022. Т. 503. № 2. С. 148–153.

21. *Pulinets S., Ouzounov D.* The Possibility of Earthquake Forecasting // IOP Publishing Ltd, 2018.

22. *Stenkin Yu.V., Alekseenko V.V., Dzhappuev D.D., Kuleshov D.A., Kudjaev A.U., Levochkin K.R., Mikhailova O.I., Shchegolev O.B., Stepanov V.I.* Sporadic increases of radioactive aerosols as a possible reason for heavy nuclides enhancements recorded with the en-detectors // Journal of Environmental Radioactivity. 2020. V. 222. P. 106335.

MONITORING MAGMATIC ACTIVITY OF THE ELBRUS VOLCANIC CENTER'S SMALL CHAMBER UTILIZING AN AEROSOL LIDAR

S. M. Pershin[a], Corresponding Member of RAS A. L. Sobisevich[b], V. S. Makarov[c], A. V. Myasnikov[d], M. Ya. Grishin[a], V. A. Zavozin[a], V. N. Lednev[b], D. V. Likhodeev[b], and V. V. Kazalov[e]

[a] *Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

[b] *Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

[c] *Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

[d] *Sternberg State Astronomical Institute of the Moscow State University, Moscow, Russia*

[e] *Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

We present the results of magmatic aerosol concentration monitoring carried out utilizing an aerosol lidar. The monitoring was performed in a hot dead-end tunnel of the Baksan Neutrino Observatory (BNO) of the Institute for Nuclear Research located above the Elbrus volcanic center's small magma chamber. An abrupt 3-fold increase of the aerosol concentration was detected by the lidar on October 28, 2019, 22: 30 UTC in the hot tunnel of BNO. The lidar data were analyzed along with the data of radon volume radioactivity, air temperature and relative humidity sensors. Synchronous changes in the air temperature, relative humidity and aerosol concentration have been observed, as well as the correlation of these signals with Earth's crust deformation measured by a strainmeter installed in BNO. However, neither one of these signals reflected the detected 3-fold aerosol concentration growth. The acquired data confirms the existence of a hot magma chamber found earlier under the Andyrchi mountain by the small-aperture seismometer group. A possible explanation of the 3-fold aerosol concentration growth is discussed: emanation of gases from the magma chamber could trigger this growth without influencing other measured parameters.

Keywords: aerosol lidar, small-aperture seismometer group, local seismic events, small magma chamber