

УДК 551.508.856; 539.1.074.9

ЛИДАРНЫЙ МОНИТОРИНГ ДИНАМИКИ АЭРОЗОЛЕЙ, ИНДУЦИРОВАННЫХ АЭРОИОНАМИ

С. М. Першин¹, В. А. Завозин¹, В. Н. Леднев¹, Г. А. Болдин^{1,2},
М. Я. Гришин¹, В. С. Макаров³, Л. Б. Безруков⁴, А. К. Межох⁴,
В. В. Синев^{2,4}

Впервые обнаружена сильная корреляция между сигналом лидара обратного рассеяния на аэрозолях и концентрацией аэроионов обоих знаков в закрытом подземном помещении. Аэроионы в настоящее время считаются основным инструментом поиска предвестников землетрясений, и обнаруженная корреляция открывает заманчивые перспективы использования лидаров для поиска предвестников. Лидары зондируют динамику аэрозолей, создаваемых ионами как центрами конденсации, на протяжённых трассах в отличие от точечного измерения аэроионов соответствующим детектором.

Ключевые слова: лидар обратного рассеяния, аэроионы, аэрозольное рассеяние, поиск предвестников землетрясений.

Введение. Исследование предвестников землетрясений является активно обсуждаемой темой в научных кругах на протяжении последних ста лет. Для предотвращения гибели людей необходимо предупреждать о землетрясении хотя бы за несколько часов, однако на основе детектирования сейсмических *P*-волн можно предсказать землетрясение всего лишь за несколько секунд [1]. Разработка новых подходов для раннего обнаружения тектонической активности имеет высокое значение, несмотря на отсутствие надежных индикаторов извержений или землетрясений [2–4]. За последние 50 лет в литературе было опубликовано несколько сообщений о предвестниках, которые были зарегистрированы за время от нескольких минут до нескольких часов до сейсмиче-

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

² НИЯУ «МИФИ», 115409 Россия, Москва, Каширское ш., 31.

³ ИКИ РАН, 117133 Россия, Москва, ул. Профсоюзная, 84/32.

⁴ ИЯИ РАН, 117312 Россия, Москва, проспект 60-летия Октября, 7а.

ского события. Перечислим некоторые из них: сравнение скоростей сейсмических P - и S -волн [5]; выбросы радона [6]; аномалии в атмосфере и ионосфере [7–10]; увеличение концентрации аэрозолей [11], аэроионов [12–17] и газов (He , H , H_2O , SO_2 и CO_2) [18–23]. Недавно Гош с соавторами [13] показали, что за 3–7 дней до землетрясения вблизи эпицентров в Кумамото и Фукусиме фиксировали аномально большую концентрацию аэрозолей.

Одним из способов поиска предвестников является создание обширной сети датчиков аэроионов, чтобы получить статистически значимые результаты, как показано в работе S. Warden et al. [24]. Одним из вариантов дистанционного зондирования является лазерное дистанционное зондирование с помощью лидаров (LiDAR, Light Detection And Ranging). Так, лидары были успешно применены для дистанционного зондирования различных газов у вулкана [19, 23].

Ранее по данным длительного мониторинга была обнаружена корреляция между лидарным сигналом рассеяния на магматическом аэрозоле и деформацией земной коры, измеряемой лазерным деформографом [25–27]. Однако было обнаружено несколько значительных флуктуаций аэрозольного сигнала в условиях, когда отсутствовали изменения деформации земной коры, атмосферного давления и температуры [11]. Было высказано предположение о том, что увеличение концентрации аэроионов как центров конденсации может приводить к подобным вариациям аэрозолей [28]. Более того, недавно [24, 29] было обнаружено, что аномально большие вариации концентрации аэроионов отражают сейсмическую активность. Выделяют три основных источника поступления аэроионов в атмосферу: космические лучи (около 20%); радиоактивные минералы у поверхности Земли (около 40%), и радон (источник альфа-частиц, около 40%) [11, 24, 29, 30].

В данной работе было проведено систематическое изучение влияния аэроионов на формирование аэрозолей в изолированном подземном помещении на основе корреляции лидарного сигнала и концентрации аэроионов.

Эксперимент. Для изучения корреляции ионов и аэрозолей был выбран тоннель в подземной лаборатории НИИЯФ МГУ, расположенный на глубине 12 метров под землей ($55^\circ 41' 56.1'' N$, $37^\circ 32' 28.2'' E$). В помещении смонтирована приточная вентиляция, которую включали в соответствии с планом эксперимента.

Для измерения концентрации аэроионов был использован модифицированный счетчик аэроионов “Сапфир-3М” [29] с дополнительным нагревателем для осушения из-

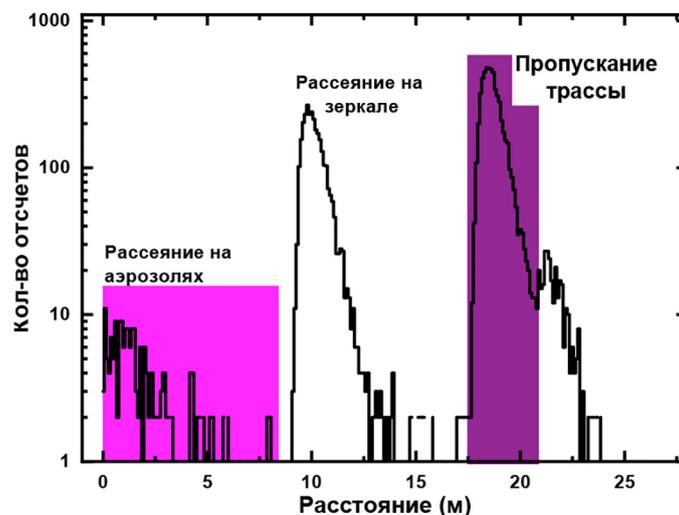


Рис. 2: Пример лидарной гистограммы распределения фотоотсчетов вдоль трассы зондирования длиной 20 метров на двойном проходе.

ния вентиляции объём туннеля наполнялся ионами до утра из-за поступления радона по трещинам и порам грунта, окружающего тоннель. Отметим, что при выключенной вентиляции уровень влажности воздуха также возрастал.

На рис. 3 представлены данные, полученные за 6 дней измерений (05–11.12.2022): концентрация аэрозолей в относительных единицах (лидар) и аэроионов (счетчик ионов “Сапфир-3М”). Периодическая модуляция сигналов обусловлена вентиляцией помещения и сильно зашумлена флуктуациями обратного рассеяния на аэрозолях (рис. 3(а)). В сигнале пропускания трассы (рис. 3(б)) отчетливо просматривается отрицательная корреляция с концентрацией ионов в воздухе (рис. 3(в)). Отметим, что концентрация положительных ионов (рис. 3(в), красная линия) систематически превышает концентрацию отрицательных (синяя линия).

Для более наглядного представления результатов сигнал пропускания трассы был отфильтрован с помощью сглаживания по методу Савицкого–Голея (рис. 4) [31, 32]. Фильтрацию данных проводили с использованием окна в 35 точек и 5-го порядка полиномиальной функции. После сглаживания корреляция между сигналами подчеркивается при визуальном сравнении. Отметим, что сигнал пропускания трассы (прозрачность воздуха) запаздывает по сравнению с началом увеличения концентрации ионов. Мы полагаем, что запаздывание доказывает, что аэрозоли образуются на ионах как центрах конденсации за время запаздывания.

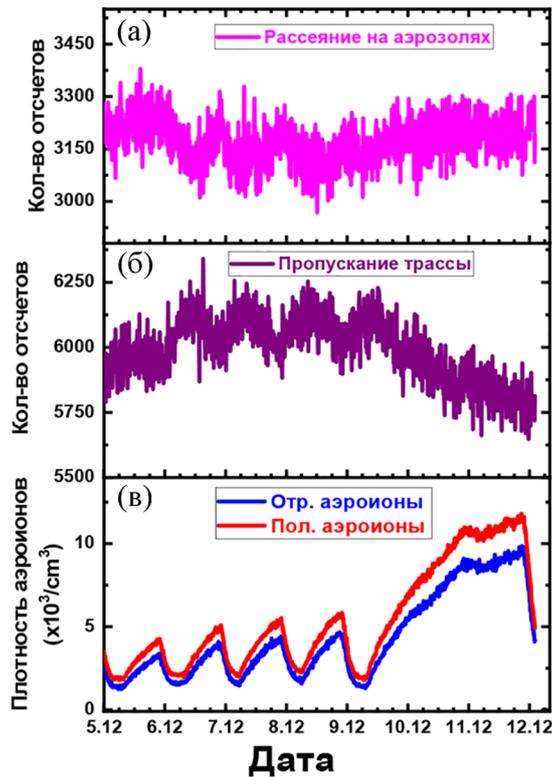


Рис. 3: (а) рассеяние на аэрозолях, (б) пропускание трассы, (в) концентрация положительных и отрицательных аэроионов в тоннеле НИИЯФ МГУ, синим цветом на графике показаны отрицательные ионы, красным – положительные.

Из рис. 4(в) видно, что соотношение положительных и отрицательных ионов в воздухе не является постоянным при работающей вентиляции. Для количественного описания содержания ионов в воздухе часто используют отношение концентраций положительных и отрицательных ионов (т. н. коэффициент униполярности). Мы рассчитали коэффициент униполярности и провели фильтрацию сглаживанием (по процедуре Савицкого–Голея, рис. 4(в)). Вентиляция оказывала меньшее влияние на концентрацию положительных ионов в воздухе по сравнению с отрицательными, поэтому коэффициент униполярности увеличивался при включенной вентиляции, а при выключенной – уменьшался. Из рис. 4(а) и 4(в) видна корреляция между сигналом пропускания трассы и коэффициентом униполярности аэроионов. Поскольку при измерениях температура воздуха и атмосферное давление были практически постоянными ($\pm 0.1^\circ\text{C}$, ± 5 мм рт. ст.), то обнаруженная корреляция может быть обусловлена гидратацией аэроионов. Ионы, появляющиеся в воздухе в результате радиоактивного распада ра-

дона, становятся центрами конденсации для водяных паров и формируют взвешенные в воздухе микроскопические капли, которые и детектирует аэрозольный лидар.

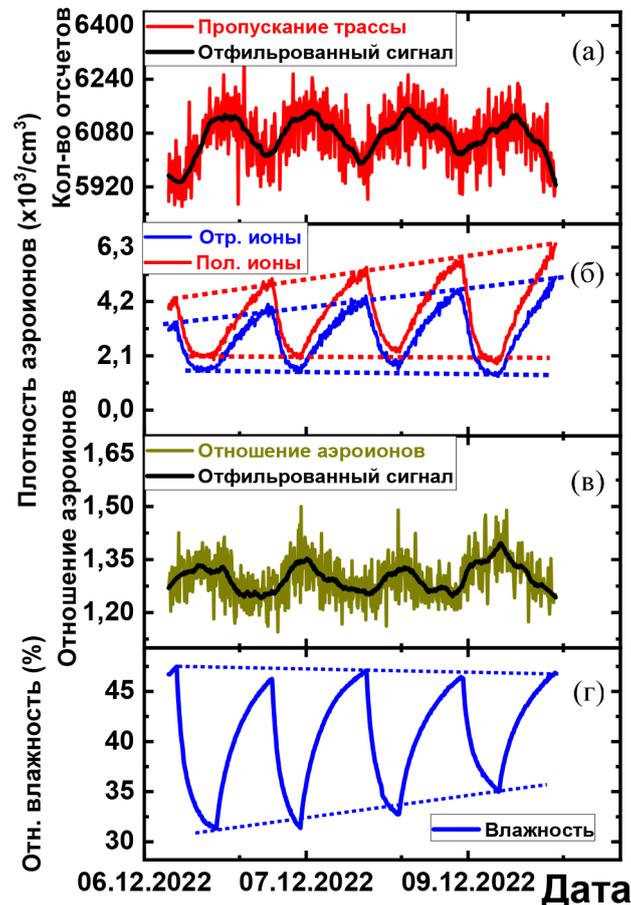


Рис. 4: Временные зависимости сигналов подчеркиваются после сглаживания по методу Савицкого–Голея (толстая линия).

Далее отметим на рис. 4(г) уменьшение глубины модуляции относительной влажности с $48-30=18\%$ до $46-35=11\%$ за 5 дней зондирования одновременно с осушением воздуха на 2% с 48% до 46% . Снижение влажности воздуха не заметно на пропускании трассы (рис. 4(а)), но сопровождается повышением концентрации и глубины модуляции ионов (рис. 4(б)), что, скорее всего, обусловлено увеличением проницаемости пор и трещин в стенах помещения–тоннеля, как следствие их осушения.

Количественный анализ корреляции сигналов пропускания трассы и концентрации аэроионов проводили по зависимости коэффициента униполярности от пропускания трассы (лидар) (рис. 5). Коэффициент корреляции Спирмена, рассчитанный для ко-

ээффициента униполярности аэроионов, составил $\rho = 0.84$. Следует отметить, что на некоторых участках графика на рис. 5 видна линейная зависимость между коэффициентом униполярности и лидарным сигналом (см. левую часть на графике с корреляцией, близкой к единице). Сильная корреляция коэффициента униполярности и прозрачности атмосферы открывает перспективы применения лидара для непрерывного мониторинга соотношения аэроионов. Особый интерес здесь представляет возможность мониторинга тектонических событий. Поскольку методы лазерного дистанционного зондирования позволяют регистрировать сигналы на длинных трассах при увеличении числа проходов с высоким пространственным и временным разрешением, то можно значительно повысить чувствительность измерений вариации аэрозолей при нарастании напряжений перед тектоническими событиями.

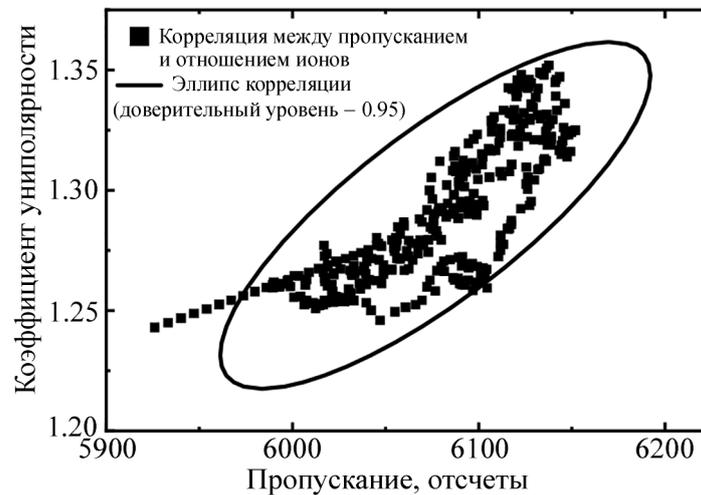


Рис. 5: Корреляция пропускания трассы (сигнал лидара) и коэффициента униполярности аэроионов. Линия эллипса отмечает область доверительного интервала $= 0.95$.

Выводы. Впервые проведено систематическое исследование зависимости сигнала лидарного рассеяния на аэрозолях от концентрации аэроионов в подземной лаборатории. Мы выявили сильную корреляцию между сигналом лидара и коэффициентом униполярности аэроионов. Аэрозоли зондировали компактным лидаром на базе диодного лазера с безопасной для глаз плотностью энергии (1 мкДж/см^2), а концентрацию ионов в воздухе – с помощью счетчика ионов “Сапфир-3М”. Обнаруженную корреляцию объяснили генерацией водного аэрозоля при гидратации аэроионов как центров конденсации, о чём свидетельствует выявленная нами задержка роста концентрации аэрозолей (минимум прозрачности) от концентрации ионов. Принимая во внимание установленную

нами корреляцию и тот факт, что датчики аэроионов считают в настоящее время основными инструментами поиска землетрясений, лидары, способные автономно измерять пропускание атмосферы на протяжённых трассах в изолированных тоннелях, можно также считать перспективными инструментами для поиска предвестников.

Авторы выражают признательность Российскому научному фонду за финансовую поддержку исследования (проект № 19-19-00712).

Авторы благодарят Ю. В. Стенькина и Л. А. Кузьмичева за помощь в проведении экспериментов в подземной лаборатории НИИЯФ МГУ.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] D. Given, R. M. Allen, A. S. Baltay, et al., Revised technical implementation plan for the ShakeAlert system—An earthquake early warning system for the West Coast of the United States. U.S. Geological Survey Open-File Report 2018-1155, (Reston, Virginia, 2018), 42 p. <https://pubs.usgs.gov/of/2018/1155/ofr20181155.pdf>.
- [2] P. Gasparini, G. Manfredi, J. Zschau, *Earthquake early warning systems* (Springer, 2007).
- [3] R. W. Decker, *Bulletin Volcanologique* **37**(3), 372 (1973). DOI: 10.1007/BF02597635.
- [4] R. S. J. Sparks, *Earth and Planetary Science Letters* **210**(1), 1 (2003). DOI: 10.1016/S0012-821X(03)00124-9.
- [5] F. Niu, P. G. Silver, T. M. Daley, et al., *Nature* **454**(7201), 204 (2008). DOI: 10.1038/nature07111.
- [6] S. A. Pulinets, V. A. Alekseev, A. D. Legen'ka, V. V. Khagai, *Advances in Space Research* **20**(11), 2173 (1997). DOI: 10.1016/S0273-1177(97)00666-2.
- [7] Y. Zhou, J. Yang, F. Zhu, et al., *Geodesy and Geodynamics* **8**(4), 221 (2017). DOI: 10.1016/j.geog.2017.04.004.
- [8] M. A. Adil, E. Sentürk, S. A. Pulinets, C. Amory-Mazaudier, *Pure and Applied Geophysics* **178**(10), 3869 (2021). DOI: 10.1007/s00024-021-02867-z.
- [9] D. Ouzounov, S. Pulinets, D. Davidenko, et al., *Frontiers in Earth Science* **9**, 757358 (2021). DOI: 10.3389/feart.2021.757358.
- [10] A. Namgaladze, M. Karpov, M. Knyazeva, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* **171**, 83 (2018). DOI: 10.1016/j.jastp.2018.01.014.

- [11] С. М. Першин, А. Л. Собисевич, В. С. Макаров и др., Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки **509**(1), 15 (2023). DOI: 10.31857/S2686740023020086.
- [12] K. Hattori, K. Wadatsumi, R. Furuya, et al., In: AGU Fall Meeting Abstracts, (San Francisco, 2008), **2008**, S52A-03. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2008AGUFM.S52A.03H/abstract>.
- [13] F. T. Freund, I. G. Kulachi, G. Cyr, et al., Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics **71**(17), 1824 (2009). DOI: 10.1016/j.jastp.2009.07.013.
- [14] H. Salh, A. Muhammad, M. M. Ghafar, F. Külahci, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics **237**, 105927 (2022). DOI: 10.1016/j.jastp.2022.105927.
- [15] V. A. Liperovsky, C.-V. Meister, E. V. Liperovskaya, et al., Natural Hazards and Earth System Science **5**(6), 783 (2005). DOI: 10.5194/nhess-5-783-2005.
- [16] F. T. Freund, A. Takeuchi, B. W. S. Lau, Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C **31**(4), 389 (2006). DOI: 10.1016/j.pce.2006.02.027.
- [17] S. Pulinets, D. Davidenko, Advances in Space Research **53**(5), 709 (2014). DOI: 10.1016/j.asr.2013.12.035.
- [18] C.-Y. King, Journal of Geophysical Research: Solid Earth **91**(B12), 12269 (1986). DOI: 10.1029/JB091iB12p12269.
- [19] M. QueiBer, M. Burton, R. Kazahaya, Earth-Science Reviews **188**, 389 (2019). DOI: 10.1016/j.earscirev.2018.11.016.
- [20] P. J. Wallace, Journal of Volcanology and Geothermal Research **108**(1–4), 85 (2001). DOI: 10.1016/S0377-0273(00)00279-1.
- [21] A. Aiuppa, C. Federico, G. Giudice et al., Journal of Volcanology and Geothermal Research **182**(3–4), 221 (2009). DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2008.09.013.
- [22] M. Edmonds, E. J. Liu, K. V. Cashman, Bulletin of Volcanology **84**(3), 28 (2022). DOI: 10.1007/s00445-021-01522-8.
- [23] L. Fiorani, F. Colao, A. Palucci, Optics Letters **34**(6), 800 (2009). DOI: 10.1364/OL.34.000800.
- [24] S. Warden, T. Bleier, K. Kappler, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics **186**, 47 (2019). DOI: 10.1016/j.jastp.2019.01.009.
- [25] С. М. Першин, Г. И. Долгих, А. Ф. Бункин и др., Краткие сообщения по физике ФИАН **45**(7), 32 (2018). DOI: 10.3103/S1068335618070059.
- [26] S. M. Pershin, A. L. Sobisevich, M. Ya. Grishin, et al., Laser Physics Letters **17**(11), 115607 (2020). DOI: 10.1088/1612-202X/abbedc.

- [27] V. A. Zavozin, M. Ya. Grishin, V. N. Lednev, et al., *Laser Physics* **32**(12), 125601 (2022). DOI: 10.1088/1555-6611/aca15d.
- [28] С. М. Першин, А. Л. Собисевич, В. А. Завозин и др., *Краткие сообщения по физике ФИАН* **49**(2), 10 (2022). DOI: 10.3103/S1068335622020063.
- [29] Л. Б. Безруков, А. Ф. Громцева, В. П. Заварзина и др., *Геомагнетизм и аэрономия* **62**(6), 755 (2022). DOI: 10.1134/S0016793222060020.
- [30] A. V. Myasnikov, S. M. Pershin, M. Ya. Grishin, et al., *Physics of Wave Phenomena* **30**(2), 119 (2022). DOI: 10.3103/S1541308X22020054.
- [31] A. Savitzky, M. J. E. Golay, *Analytical Chemistry* **36**(8), 1627 (1964). DOI: 10.1021/ac60214a0.
- [32] A. Othmane, L. Kiltz, J. Rudolph, *International Journal of Systems Science* **53**(9), 1848 (2022). DOI: 10.1080/00207721.2022.2025948.
- [33] S. M. Pershin, M. Ya. Grishin, V. A. Zavozin, et al., *Laser Physics Letters* **17**(2), 026003 (2020). DOI: 10.1088/1612-202X/ab66c4.

Поступила в редакцию 29 июня 2023 г.

После доработки 30 октября 2023 г.

Принята к публикации 31 октября 2023 г.