

УДК 551.508.856, 535.361.22, 550.343.64

АНАЛИЗ ВАРИАЦИИ СИГНАЛА АЭРОЗОЛЬНОГО ЛИДАРА КАК ВОЗМОЖНОГО ИНДИКАТОРА ЛОКАЛЬНОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ

© 2025 г. А. В. Мясников^{а, *}, А. Л. Собисевич^б, С. М. Першин^{с, **},
М. Я. Гришин^с, В. Н. Леднёв^с, В. А. Завозин^с

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

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

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

*e-mail: andrey0405@mail.ru

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

Поступила в редакцию 24.11.2023 г.

После доработки 26.09.2024 г.

Принята к публикации 12.12.2024 г.

Проведен кросс-спектральный анализ результатов почти годового лидарного мониторинга выделения аэрозолей из коры Земли в тоннеле Баксанской нейтринной обсерватории (БНО) Института ядерных исследований РАН. Установлено, что ~40% энергии сигнала лидара определяются вариацией метеорологических факторов — атмосферного давления (эффект “барометрической откачки”) и влажности. Существенно, что в модуляции сигнала присутствуют составляющие деформации коры лунно-солнечными приливными волнами M2 и O1. Статистически обоснована перспективность лидара как нового инструмента мониторинга локальной сейсмической активности по вариациям корового аэрозоля.

Ключевые слова: лидар, коровый аэрозоль, кросс-спектральный анализ, метеорологические факторы, лунно-солнечный прилив

DOI: 10.31857/S0203030625010047, EDN: GISEPQ

ВВЕДЕНИЕ

Идея использования лидарного мониторинга активности выделения коровых флюидов Земли для прогноза сейсмической активности вполне очевидна. Согласно теории упругой отдачи, в районе формирующего сейсмического очага возникают зоны растяжения и сжатия, что вызывает напряжение и деформацию коры Земли. Это, в свою очередь, приводит к изменению выхода аэрозолей всех типов, которые выносятся газы по щелям и порам породы. Так, напряженное состояние приводит к изменению проницаемости среды, а также порового давления в результате деформации вмещающей среды. При этом активизируются процессы перехода

газа в свободное состояние, если он был связан в кристаллических решетках или растворен в жидкости [Добровольский, 2011]. Согласно работе [Добровольский, 2009], максимальный радиус регистрации возможных сейсмических событий относительно станции наблюдения при условии деформационных сдвигов определяется выражением $\lg(R) = 0.43 \cdot M$, где R — расстояние до эпицентра (км), M — магнитуда. Так, например, для землетрясения в Турции 06.02.2023 с магнитудой $M = 7.8$ радиус (R) проявления деформационных сдвигов [Добровольский, 2009] достигал величины 2512 км.

Методы измерения активности флюидов охватывают широкий диапазон от оптико-электронных

средств мониторинга вариаций содержания аэрозолей, а именно компактных лидаров нового поколения на базе диодных лазеров с безопасным уровнем излучения [Першин и др., 2021], до регистрации альфа-распада радиоактивного радона [Алексеев и др., 2009]. Но тем не менее ни один из этих методов не защищен от влияния метеорологических вариаций на результаты измерений [Myasnikov et al., 2022]. Поскольку лидар в этом ряду — сравнительно новый инструмент, который был предложен нами ранее [Першин и др., 2021] для мониторинга сейсмической активности в районе вулкана Эльбрус, оставалась неясной величина вклада вариации метеорологических факторов и деформационной составляющей в лидарный сигнал мониторинга аэрозолей в тоннеле БНО.

Цель работы — анализ лидарных данных, которые собирались на протяжении почти годового непрерывного наблюдения, а также статистическое обоснование применимости лидара в качестве мониторинга сейсмической активности по динамике выхода аэрозолей из коры Земли. Особое внимание привлекала возможность регистрации статистически значимых отклонений сигнала лидара от средних значений вариаций аэрозолей для поиска предвестников катастрофических событий.

ИНСТРУМЕНТЫ И ИЗМЕРЕНИЯ

Станция наблюдения размещена в тупиковом тоннеле во вспомогательной штольне Баксанской нейтринной обсерватории (БНО) Института ядерных исследований РАН (Кабардино-Балкарская Республика, село Нейтрино) с координатами $43^{\circ}14'57.7''$ N, $42^{\circ}43'19.5''$ E. Две параллельные штольни длиной более 4 км, разделенные 50-метровым отрезком, были вырублены в скальной породе под горой Андырчи на высоте 1715 м над уровнем моря для размещения двух нейтринных телескопов. Тупиковый тоннель длиной 50 м расположен относительно входного портала БНО на расстоянии 3800 м и в 24 км от восточной вершины вулкана Эльбрус.

В состав приборной группы входят аэрозольный лидар на базе диодного лазера с измерительной базой 30 м [Першин и др., 2021] и метеостанция. Метеостанция содержит датчик

атмосферного давления, термометр и гигрометр для измерения влажности. Расположение станции вне контура активной вентиляции штольни обеспечивает высокую стабильность температуры (суточная вариация не превышает 0.05°C), что позволило исключить температуру из метеорологических факторов, влияющих на измерения. Большое удаление тоннеля от входа БНО снижает влияние вариации внешних условий на данные лидарного зондирования.

Уникальный лидар, не имеющий отечественных аналогов, был разработан группой исследователей [Першин и др., 2021] для зондирования среды обитания с безопасным для глаз уровнем излучения (~ 1 мкДж/см²). Лидар способен обнаруживать шлейфы выхода аэрозолей, визуально невидимых, из щелей и трещин в скалах тоннеля и одновременно измерять расстояние до них. Предполагалось, что при сейсмических событиях вдоль трассы зондирования могут появляться трещины в породе, из которых будут выходить тектонические газы, несущие аэрозоли. Для локализации их положения и последующего отбора проб для анализа необходимо измерение дальности по трассе. Другим преимуществом повышения чувствительности лидара к вариациям аэрозолей является интегрирование сигнала рассеяния вдоль трассы.

Лидар работал в автономном режиме без участия оператора с сохранением данных на удаленном компьютере в Институте общей физики им. А.М. Прохорова РАН (ИОФ РАН, Москва) в реальном времени. Для оперативного анализа данные отображались на настенном мониторе в лаборатории ИОФ РАН.

На рис. 1 (верхняя панель) представлен график вариации лидарного сигнала рассеяния на аэрозолях, взвешенных в воздухе тоннеля, и его спектр мощности (нижняя панель) на выборке, включающей данные за период с 23.08.2019 г. по 12.06.2020 г. Это непрерывный 10-месячный мониторинг аэрозоля с периодом зондирования 10 мин. Параллельно с этими измерениями были сделаны записи вариации метеорологических параметров.

Для последующего анализа динамики аэрозолей были использованы данные прецизионного 75-метрового лазерного интерферометра-деформографа [Милюков и др., 2005]

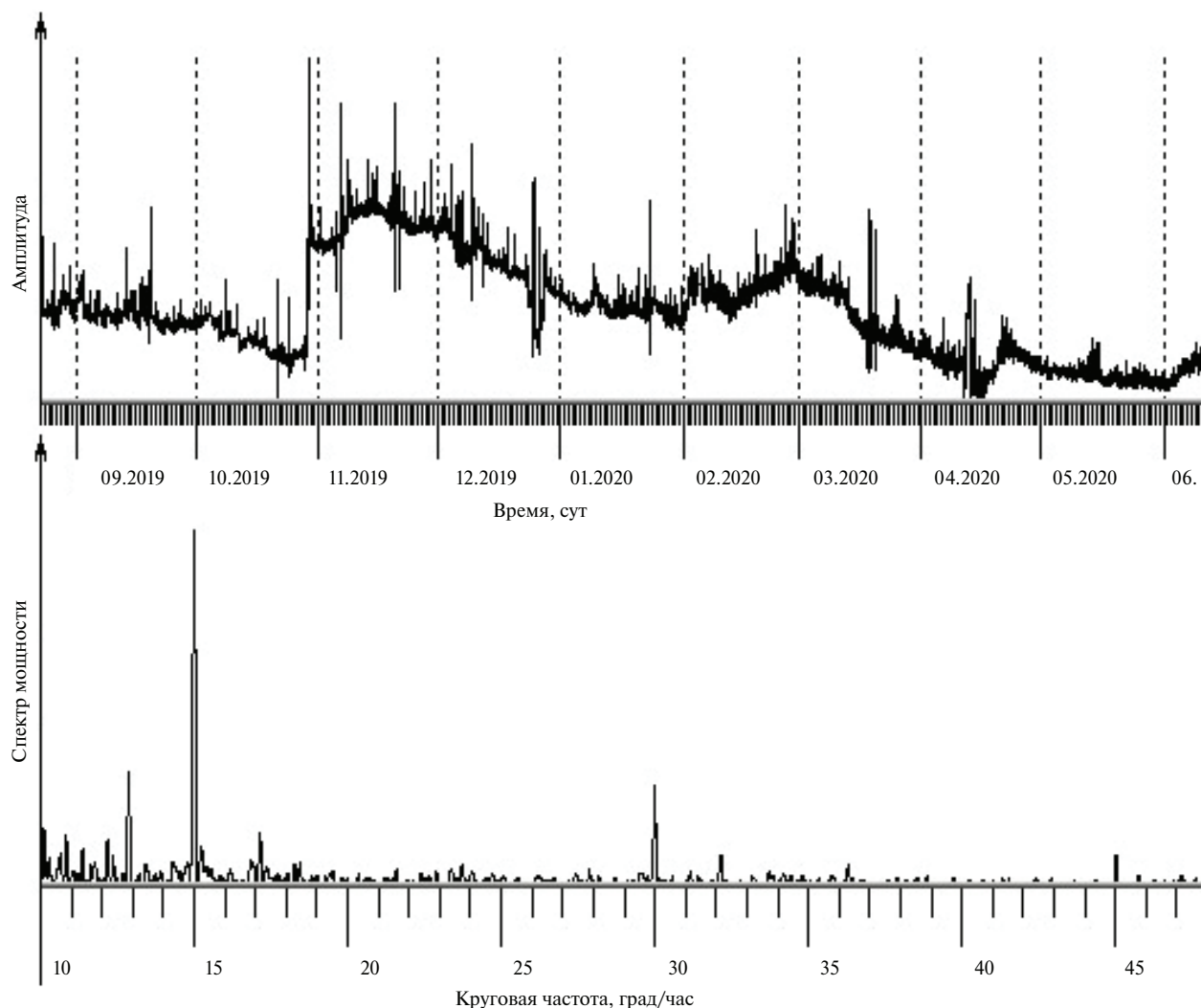


Рис. 1. Вариации сигнала аэрозольного лидара в период 23.08.2019–12.06.2020 (верхняя панель) и спектр мощности лидарного сигнала (нижняя панель) в частотном диапазоне, соответствующем периоду 36–7.5 ч.

Государственного астрономического института им. П.К. Штернберга (ГАИШ МГУ). Деформограф был собран по схеме интерферометра Майкельсона и размещен в главной штольне БНО (700 м от входного портала). Деформограф регистрировал приливные волны [Мясников, 2021; Мясников и др., 2022] и волны Лява и Релея после землетрясения, а также ряд других процессов по сжатию – растяжению коры Земли в абсолютных единицах, что было весьма важным фактором сравнения (репером) с данными лидара при анализе.

Здесь следует отметить, что недавно специалисты Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН впервые с помощью уникального прецизионного термометра собственной разработки

зарегистрировали приливные волны земной коры в тупиковом тоннеле БНО [Лиходеев и др., 2022]. В этой работе была измерена модуляция конвекционных тепловых потоков в скальной породе, что указывает на наличие мощного источника тепла под тоннелем. Кроме того, эти данные были подтверждены благодаря развитию систем прецизионных наклономерных наблюдений [Гравиров и др., 2022]. Таким источником может быть очаг вулкана Эльбрус [Уткин и др., 2009], расположенный с небольшим смещением от кратера в сторону БНО.

КРОСС-СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

В настоящей работе проведен спектральный и кросс-спектральный анализ данных сигнала аэрозольного лидара, атмосферного давления,

влажности и деформации коры Земли в частотном диапазоне, соответствующем периодам 36–7.5 ч. Данный частотный диапазон включает все основные природные циклические изменения метеорологических параметров, а также суточные и полусуточные диапазоны лунно-солнечного прилива. Из графика спектра мощности (см. рис. 1, нижняя панель) видно, что в узких частотных диапазонах существуют весьма заметные выбросы над уровнем средней амплитуды мощности сигнала.

На рис. 2 показан результат кросс-спектрального анализа (кросс-амплитуда) сигнала лидара с метеорологическими параметрами. На панели А показан график спектральной плотности вариаций сигнала лидара. Цифрами пронумерованы наиболее интенсивные моды в спектре. Периоды и фазовые сдвиги на соответствующих периодах этих мод сведены в табл. 1. На панели В1 показан соответствующий спектр атмосферного давления, на панели В2 — результат кросс-спектрального анализа давления с вариацией аэрозоля. Как видно из графика В2 (см. рис. 2), вариация давления сказывается на суточном, полусуточном и третьсуточном циклах сигнала лидара. Основная суточная волна давления, как показал кросс-спектральный анализ, находится в противофазе с сигналом лидара (см. табл. 1, третья строка). При этом минимум давления наступает на раньше максимума интенсивности выделения аэрозоля на 37.1 мин ($682.9 - 720 = 37.1$ мин, где 720 мин — разница между максимумом и минимумом для суточного цикла). Влияние атмосферного давления на активность выделения коровых газов хорошо известно (эффект “барометрической откачки” [Edwards, Bates, 1980; Стенькин и др., 2017]). Природа циклов атмосферного давления очевидна: основной суточный цикл 24 ч связан с Солнцем, отсюда появление кратных волн с периодами 12 и 8 ч.

Вариация влажности, как показал кросс-спектральный анализ, имеет 6 общих циклов с вариацией уровня аэрозоля (см. рис. 2). Причем все фазы этих мод влажности отстают примерно на 2 ч от соответствующих циклов аэрозоля. Здесь природа циклов влажности сложнее, чем для давления. Кроме суточной волны вариации влажности и кратных ей периодов существуют моды с периодами 28, 21 и

11, 2 мин, которые на частотной оси (град/час) расположены симметрично относительно этих основных волн. Природа этих циклов такова, что амплитуды вариации суточной и полусуточной волны влажности модулированы семисуточным циклом. Действительно, в случае суточной волны получаем для правой боковой линии спектра $28 \cdot 24 / (28 - 24) = 168$ ч; такой же результат получаем для левой линии: $21 \cdot 21 / (24 - 21) = 168$ ч. Или для полусуточной волны имеем $12 \cdot 11.2 / (12 - 11.2) = 168$ ч. Отсюда можно предположить, что для полусуточного цикла должна существовать и левая боковая мода с периодом 12.92 ч.

Особый интерес вызывает тектоническая составляющая вариации аэрозолей, которые выносят газы по трещинам коры. Как уже указывалось выше, объемная активность выделения флюидов должна коррелировать с деформацией коры Земли. Наиболее простой и надежный способ проверить данный факт — это сопоставить сигнал лидара и деформацию коры в приливном диапазоне по данным деформографа. Это тот же самый диапазон 36–7.5 ч, в который попадают все основные волны суточного и полусуточного периодов лунно-солнечного прилива [Мельхиор, 1968].

Согласно работе [Мельхиор, 1968], максимальное выделение флюидов будет происходить в момент наименьшего прилива — в процессе сжатия коры, и наоборот, минимум уровня флюидов будет приходиться на максимальный прилив. Деформационные данные, которые были использованы при обработке, получены с помощью большебазового лазерного интерферометра-деформографа ГАИШ МГУ [Милюков и др., 2005].

На рис. 3 приведены результаты спектрального и кросс-спектрального анализов сигнала лидара с приливной деформацией земной коры. На графике спектральной плотности сигнала лидара (см. рис. 3, верхняя панель), как уже отмечалось выше, присутствуют суточные и полусуточные циклы. Формально в частотном диапазоне эти циклы полностью совпадают с суточной и полусуточной солнечными волнами. Поэтому эти циклы на графике условно обозначены символами S1 (24 ч) и S2 (12 ч), принятыми в теории земных приливов. При этом солнечная приливная волна S1

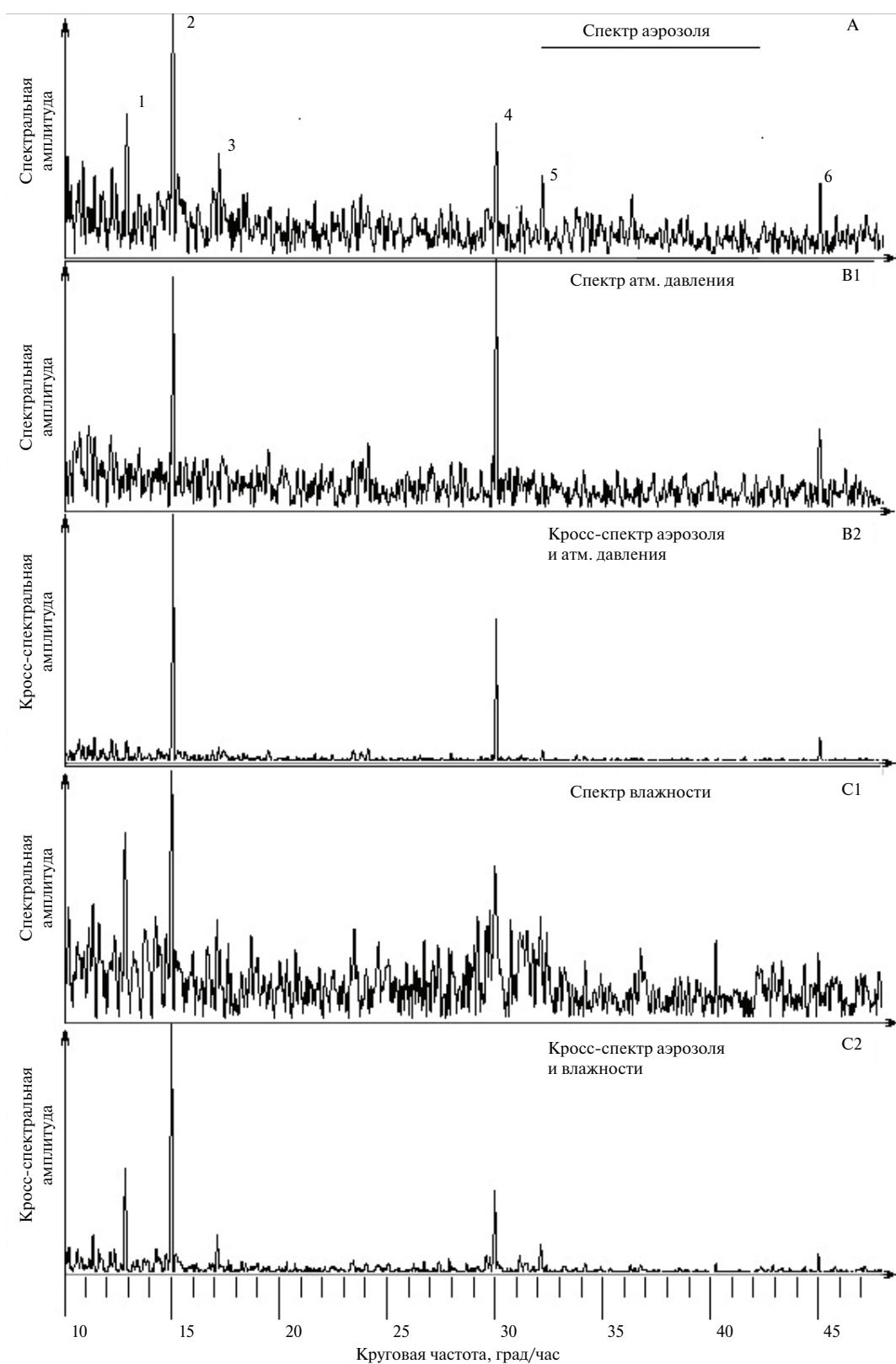


Рис. 2. Спектральная плотность вариации сигнала аэрозольного лидара, цифрами 1–6 маркированы основные моды спектра (панель А); спектральная плотность вариации атмосферного давления и кросс-спектр аэрозолей и давления соответственно (панели В1 и В2); спектральная плотность вариации влажности и кросс-спектр аэрозолей и влажности соответственно (панели С1 и С2).

Таблица 1. Основные моды вариации активности выделения аэрозоля и фазовый сдвиг с вариацией метеорологических параметров

№ моды (см. рис. 2, панель А)	1	2	3	4	5	6
Период, ч	28.0	24.0	21.0	12.0	11.2	8.0
Круговая частота, град. час	12.857	15	17.142	30	32.143	45
Атмосферное давление (инверсия), фазовый сдвиг, мин	Нет влияния	682.9 (–37.1)	Нет влияния	496.2 (+136.3)	Нет влияния	–97.8 (+142.2)
Влажность, фазовый сдвиг, мин	+132.0	+126.5	+143.4	+95.9	+123.0	+25.8

Примечание. Вторая строка показывает период и соответствующую круговую частоту. В скобках для давления показан фазовый сдвиг между минимумом давления и максимумом уровня аэрозоля.

является практически полностью вырожденной и на спектре деформации видна в результате влияния на лазерный интерферометр суточной температуры [Мясников, 2019]. Таким образом, эти волны, совпадающие с основными циклами вариации метеорологических параметров, не имеют отношения к приливной деформации. Но результат кросс-спектрального анализа показал наличие в сигнале вариации аэрозолей лунных компонент прилива — это волны Q1 (26.8683 ч), O1 (25.8193 ч), M2 (12.4106 ч), которые не совпадают в частотном диапазоне ни с какими циклами колебаний метеопараметров и отражают только деформацию коры Земли.

Отметим, что среди вариаций лидарного сигнала (см. рис. 1, верхняя панель) отдельный интерес вызывают две сингулярности: трехкратное скачкообразное увеличение выхода аэрозолей 28.10.2019 г. в 23:19 UTC (02:19 по московскому времени), а также аномально большой (по сравнению с другими) выход аэрозолей 29.10.2019 г. в 08:33 UTC (11:33 по московскому времени). Недавно было выявлено, что большой выход аэрозолей 29.10.2023 г. синхронизован с расширением коры Земли по данным деформографа, повышением температуры и влажности внутри тупикового туннеля, а также с увеличением наклона наклономера [Першин и др., 2023]. Корреляция набора сигналов разных инструментов и датчиков указывает на сейсмическую природу сигнала лидара. Напротив, природа скачкообразного увеличения выхода аэрозолей до конца остается неясной, поскольку в данных

других приборов не было зарегистрировано подобных скачков.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для решения вопроса о влиянии метеорологических факторов на сигнал лидара был выбран узкий частотный диапазон, соответствующий периоду 36–7.5 ч. Этот диапазон содержит различные периоды вариаций атмосферного давления, влажности и температуры на фоне лунно-солнечного прилива, в том числе основной для нас — суточный диапазон. Для этой работы были использованы записи непосредственных измерений всех этих параметров. Высокая стабильность суточной температуры (что было достигнуто за счет удаленности установки от активного контура вентиляции), позволила исключить этот параметр (суточная вариация не превышает 0.05°C).

Исследование влияния различных факторов на сигнал проводилось с помощью кросс-спектрального анализа, основные результаты которого приведены в табл. 1. Так, было выявлено, наряду с суточной вариацией, шесть основных циклов вариации лидарного сигнала аэрозолей в диапазоне 36–7.5 ч. Оценка показала, что около 41% мощности вариации экспериментального ряда сигнала лидара в этом диапазоне приходится на эти циклы, суммарная ширина которых составляет менее 5% общего частотного диапазона.

Атмосферное давление. Влияние вариации атмосферного давления на выход аэрозолей из коры — вполне ожидаемый результат. Амплитудный кросс-спектральный анализ показал

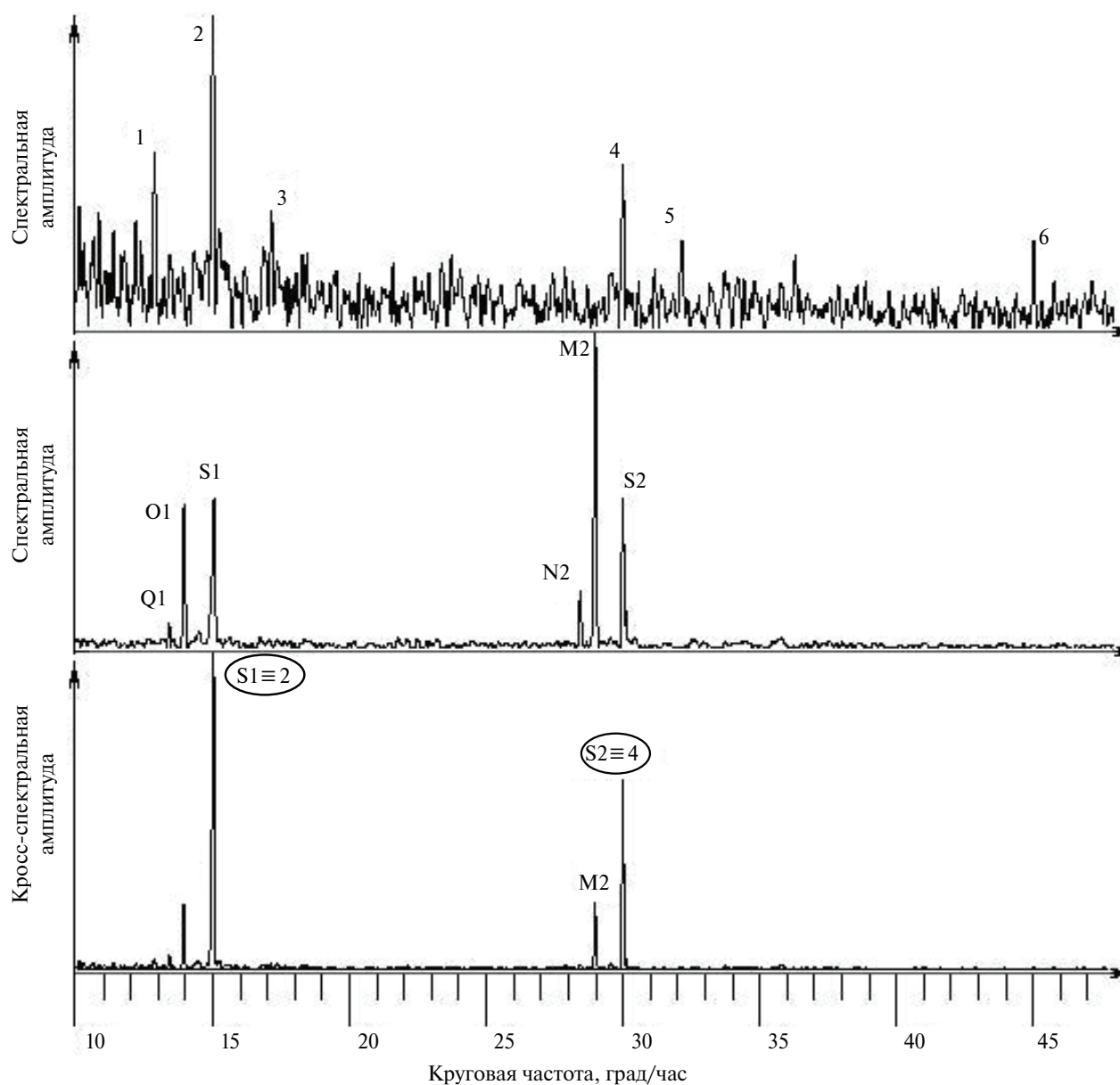


Рис. 3. Спектральная плотность вариации сигнала аэрозольного лидара (верхняя панель); спектральная плотность деформации коры Земли (средняя панель); кросс-спектральный анализ сигнала лидара и приливной деформации коры (нижняя панель). Вертикальными линиями с обозначениями нанесены лунные и солнечные составляющие прилива согласно работе [Мельхиор, 1968].

полное совпадение на суточном, полусуточном и третьсуточном диапазонах вариации давления и аэрозолей. Показано (см. рис. 2, панели B1, B2), что суточный цикл является основным циклом вариации, остальные моды в спектре — это кратные моды в спектральном разложении, что указывает на непериодический характер суточной вариации. Фазовый кросс-спектральный анализ позволил определить отставание максимальной активности выделения радона от минимума атмосферного давления для

суточного хода волны на 31 мин. То есть максимальный уровень выделения радона приходится на минимальный уровень атмосферного давления и наоборот. Это известный, так называемый запирающий эффект влияния атмосферного давления на уровень коровых газов [Edwards, Bates, 1980; Стенькин и др., 2017].

Влажность. Неожиданным оказался результат кросс-спектрального анализа вариации влажности и сигнала аэрозоля (см. рис. 2, панели C1, C2). Все шесть циклов в спектральной

плотности сигнала лидара в данном частотном диапазоне однозначно определяются вариацией уровня влажности в месте установки. Моды 1, 3 и 5 являются боковыми модами (деклинационные волны, согласно терминологии, принятой в теории лунно-солнечных приливов [Мельхиор, 1968]) и характеризуют модуляцию основных волн (суточной и полусуточной) с периодом ровно 168 часов (см. выше) или 7 суток. Природных циклов с таким периодом не существует, близко только продолжительность одной фазы луны — 7.38 суток. С другой стороны, 7 суток — это продолжительность цикла производственной недели. Скорее всего, этот цикл связан с тем, что в течение рабочей недели дважды в день происходит заезд/выезд электровоза в главный тоннель БНО для смены дежурных сотрудников обсерватории, что сопровождается открыванием входных ворот, тогда как по воскресным дням заезд/выезд электровоза происходит однократно. Возможно также влияние различных режимов работы активной вентиляции в будни и выходные дни.

Лунно-солнечный прилив. Важным также является результат кросс-спектрального анализа вариации сигнала лидара и приливной деформационной составляющей. Особый интерес представляют именно лунные составляющие прилива. Так, были выделены две лунные приливные волны M2 и Q1, которые, в отличие от солнечных, не имеют общих периодов с вариацией метеорологических параметров. Наличие этих составляющих показывает, что уровень сигнала лидара может иметь и “тектоническую” составляющую, т.е. нести информацию о напряженно-деформированном состоянии коры Земли.

ВЫВОДЫ

Фазовый анализ показал, что соответствующие циклы колебаний сигнала аэрозольного лидара и влажности сдвинуты примерно на 2 часа. То есть сигнал лидара опережает по фазе влажность для этих периодов. Следовательно, лидар регистрирует изменение влажности по аэрозолям (появление тумана). Другими словами, вариация влажности не влияет на уровень выхода корового аэрозоля.

Статистически обосновано наличие тектонической составляющей в лидарном сигнале, что подтверждает гипотезу зависимости вариаций лидарного сигнала от интенсивности выделения объемного флюида при деформационных подвижках коры Земли. Отсюда следует, что подобный подход может оказаться более чувствительным к уровню напряжения коры в период подготовки сейсмического события, чем деформационные методы.

Особый интерес здесь вызывают вариации концентрации аэроионов (выход заряженных частиц из коры Земли) как центров конденсации паров воды (формирование аэрозолей). Известно [Warden et al., 2019], что мониторинг концентрации аэроионов является новым направлением поиска предвестников землетрясений при условии размещения большого количества датчиков в регионах тектонических разломов. Здесь лидар имеет важное преимущество — интегрирование сигнала рассеяния на трассах зондирования большой длины по сравнению с точечным детектированием ионов в месте размещения датчика.

Таким образом, проведенный анализ показал, что компактный аэрозольный лидар на базе диодного лазера с безопасным для глаз уровнем излучения (~ 1 мкДж/см²) может быть рассмотрен как новый инструмент для мониторинга сейсмических процессов. Размещение такого прибора в инструментальном комплексе по мониторингу сейсмической активности, несомненно, повысит вероятность регистрации событий различной природы.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Авторы выражают благодарность Российскому научному фонду за финансовую поддержку исследований (проект РНФ № 19-19-00712).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алексеев В.В., Гаврилюк Ю.М., Громушкин Д.М. и др. Связь вариаций потока тепловых нейтронов из

- земной коры с лунными периодами и сейсмической активностью // *Физика Земли*. 2009. № 8. С. 91–100.
- Гравиров В.В., Дещеревский А.В., Кузьмин Ю.О., Лиходеев Д.В., Собисевич А.Л., Широков И.А.* Развитие систем прецизионных наклономерных наблюдений в условиях подземной обсерватории // *Сейсмические приборы*. 2022. Т. 58. № 1. С. 29–52.
- Добровольский И.П.* Математическая теория подготовки и прогноза тектонического землетрясения. М.: Физматлит, 2009. 236 с.
- Добровольский И.П.* Возмущения флюидного потока земли при подготовке тектонического землетрясения // *Геофизические исследования*. 2011. Т. 12. № 2. С. 33–47.
- 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.
- Мельхиор П.* Земные приливы. М.: Мир, 1968. 482 с.
- Милуков В.К., Клячко Б.С., Мясников А.В., Стриганов П.С., Янин А.Ф., Власов А.Н.* Лазерный интерферометр-деформограф 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.
- Мясников А.В.* Приливной отклик геофизической среды как индикатор уровня сейсмического напряжения земной коры // *Сейсмические приборы*. 2021. Т. 57. № 4. С. 51–65.
- Мясников А.В., Собисевич А.Л., Лиходеев Д.В.* Региональный отклик геофизической среды на приливное воздействие // *Доклады Российской Академии наук. Науки о Земле*. 2022. Т. 503. № 2. С. 154–160.
- Першин С.М., Гришин М.Я., Завозин В.А. и др.* Диодный лазер, генерирующий импульсы длительностью 3 нс, для лидара с высоким пространственным разрешением // *Квантовая электроника*. 2021. Т. 51. № 5. С. 423–426.
- Першин С.М., Гришин М.Я., Завозин В.А. и др.* Лидарный мониторинг магматической активности малой камеры эльбрусского вулканического центра // *Доклады Российской Академии наук. Физика, технические науки*. 2023. Т. 509. С. 15–20.
- Собисевич А.Л., Гриднев Д.Г., Собисевич Л.Е., Канониди К.Х.* Аппаратурный комплекс Северокавказской геофизической обсерватории // *Сейсмические приборы*. 2008. Т. 14. № 1. С. 21–42.
- Стенькин Ю.В., Алексеенко В.В., Громушкин Д.М., Сулаков В.П., Щеголев О.Б.* Подземная физика и эффект влияния барометрического давления на подземный фоновый поток тепловых нейтронов // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. 2017. Т. 151. № 5. С. 845–849.
- Уткин И.С., Федотов С.А., Уткина Л.И.* Оценка тепла, накопленного магматическим очагом вулкана Эльбрус во вмещающих его породах, и возможности его извлечения // *Вулканология и сейсмология*. 2009. № 5. С. 3–23.
- Edwards J.C., Bates R.C.* Theoretical evaluation of radon emanation under a variety of conditions // *Health Phys.* 1980. V. 39. № 2. P. 263–274.
- Myasnikov A.V., Pershin S.M., Grishin M.Ya., Zavozin V.A., Makarov V.S., Ushakov A.A.* Estimation of the Influence of Meteorological Factors on the Aerosol Lidar Signal in Tunnels above the Elbrus Volcano Chamber // *Phys. Wave Phenom.* 2022. V. 30. № 2. P. 119–127.
- Warden S., Bleier T., Kappler K.* Long term air ion monitoring in search of pre-earthquake signals // *J. Atmos. Solar-Terrestrial Phys.* 2019. V. 186. P. 47–60.

ANALYZING AEROSOL LIDAR SIGNAL VARIATION AS A POSSIBLE LOCAL SEISMIC ACTIVITY INDICATOR

**A. V. Myasnikov^{1, *}, A. L. Sobisevich², S. M. Pershin^{3, **},
M. Ya. Grishin³, V. N. Lednev³, V. A. Zavozin³**

*¹Sternberg Astronomical Institute of Moscow State University,
Universitetsky prosp., 13, Moscow, 119234 Russia*

*²Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences,
Bolshaya Gruzinskaya str., 10, bld. 1, Moscow, 123242 Russia*

*³Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences,
Vavilova str., 38, Moscow, 119991 Russia*

**e-mail: andrey0405@mail.ru*

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

We report the results of an almost year-long lidar monitoring of crustal aerosol emanation in a tunnel of the Baksan Neutrino Observatory of the Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences (BNO INR) located in the Neutrino village in Kabardino-Balkaria. Cross-spectra analysis has demonstrated that at least 40% of the lidar signal energy is defined by meteorological parameter variations, namely, atmospheric pressure (represented in the barometric pumping effect) and air humidity. We demonstrate that lunar components of lunar-solar tides are present in the lidar signal (M2 and O1 waves) and these components do not coincide with meteorological parameter variation periods. This fact signifies that there is a tectonic component in the lidar-measured crustal aerosol variation signal. The totality of data shows the prospects of using lidar crustal aerosol monitoring for assessing local seismic activity level.

Keywords: lidar, crustal aerosol, cross-spectrum, meteorological parameters, lunar-solar tides