

УДК 550.34.038.4; 551.508.856

РЕВЕРСИЯ КОНВЕКЦИИ ВОЗДУХА В ГОРЯЧЕМ ТОННЕЛЕ НАД ОЧАГОМ ВУЛКАНА ЭЛЬБРУС

С. М. Першин¹, Е. И. Гордеев², М. Я. Гришин¹, В. А. Завозин¹,
В. С. Макаров³, В. Н. Леднёв¹, Я. Я. Понуровский¹, А. Н. Фёдоров¹,
А. А. Ушаков¹, В. В. Казалов⁴

Впервые обнаружено уникальное геофизическое явление: реверсия конвекции воздуха из-за выхода магматических газов в тупиковом туннеле Баксанской нейтринной обсерватории ИЯИ РАН над очагом вулкана Эльбрус. Обнаруженная аномалия сопровождается инверсией вертикального профиля температуры (температура воздуха сверху на 3–5°C ниже, чем у горячего дна тоннеля) из-за поступления в туннель горячих тяжёлых магматических газов из очага вулкана. Слой этих газов стекает по наклонному основанию к выходу из туннеля с разрежением у глухой стены, которое втягивает из штольни “холодный” (~ 33 °C) воздух под сводом до стены и опускает его к дну туннеля (реверсия конвекции). Выявленная реверсия потоков запускает формирование водного аэрозоля (тумана) в месте контакта потоков тёплого и холодного воздуха из штольни. Для снижения влияния этого фактора на лидарный мониторинг магматических аэрозолей предложен и проверен способ “погружения” трассы лидара в придонный слой тяжёлых газов.

Ключевые слова: инверсия температуры, очаг вулкана Эльбрус, тяжёлые вулканические газы, реверсия конвекции, лидарный мониторинг активности вулканов.

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

² Институт вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук, 683006 Россия, Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийпа, 9.

³ Институт космических исследований РАН, 117133 Россия, Москва, ул. Профсоюзная, 84/32.

⁴ Институт ядерных исследований РАН, 117312 Россия, Москва, пр-т 60-летия Октября, 7а.

Известно [1, 2], что для поиска предвестников масштабных геофизических процессов (извержения вулканов, землетрясения и др.) требуется многостороннее исследование динамики глубинных слоисто-неоднородных структур литосферы. Особый интерес здесь вызывают процессы развития флюидно-магматических систем высокой подвижности (вода, газы) с выходом на поверхность, как индикаторов глубинных процессов, эволюцию которых доступно регистрировать современными геофизическими детекторами и лидарами [3].

Известно также [3], что применение лидаров для мониторинга активности вулканов по эманации газов из кратера ограничено вариациями метеопараметров, а также из-за опасности поражения глаз излучением лазера. Три десятилетия назад [4] нам удалось разработать новый принцип зондирования среды обитания (без необходимости защиты глаз от поражения) и создать лидары на базе диодного лазера с безопасным для глаз уровнем излучения < 1 мкДж/см² [5] и счётчика фотонов [6–8]. Принимая это во внимание, мы предложили альтернативный вариант мониторинга активности вулкана по вариациям сигнала упругого рассеяния на аэрозолях в тупиковом тоннеле Баксанской нейтринной обсерватории (БНО) ИЯИ РАН, расположенной над очагом вулкана Эльбрус [9]. Данный тоннель является лабораторией № 2 Северокавказской геофизической обсерватории Института физики Земли РАН (ИФЗ РАН), оборудованной прецизионными датчиками температуры. На рис. 1(а) показана общая схема БНО (вид сверху) и фрагмент вспомогательной штольни БНО с тупиковым тоннелем ИФЗ РАН (рис. 1(б)).

Значительное удаление тупикового тоннеля от входа в штольню (~ 3900 м), наличие глухой стены и почти постоянная температура (~ 40 °С) тоннеля (снижение на ~ 0.1 °С с августа по ноябрь [9]) давали основание допустить отсутствие влияния внешней атмосферы, которое было значимым фактором как для термометров ИФЗ РАН, так и для сигналов лидара.

Действительно, фурье-анализ результатов долгосрочного мониторинга выявил суточный и полусуточный периоды в лидарном сигнале рассеяния на аэрозоле [9], которые совпадали с данными лазерного деформографа, регистрировавшего приливные волны в земной коре [10]. В то же время, лидар часто регистрировал сигналы неясной природы с большой амплитудой рассеяния на аэрозолях (в два-три раза превышающей средний уровень), которые маскировали вынос флюидов и активность вулкана. Экспериментальное изучение механизма формирования таких флуктуаций аэрозолей и их подавления является целью данной работы.

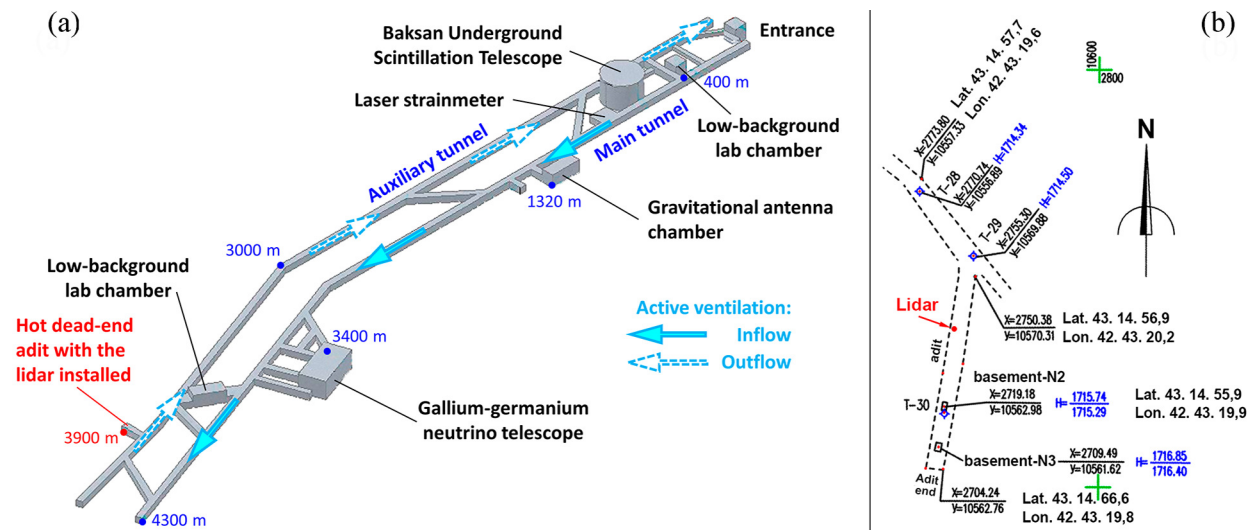


Рис. 1: (а) схема БНО с отметками расстояния от входа (синие точки) и указанием воздушных потоков активной вытяжной вентиляции (голубые стрелки), горячий тоннель отмечен красной точкой; (б) фрагмент схемы тупикового горячего тоннеля с отметками координат и расположении лидара.



Рис. 2: (а) фотография лидара; (б) фотография тупикового тоннеля, наклонная трасса зондирования отмечена пучком лазера-визира; (с) пример данных лидарного зондирования – гистограмма распределения фотоотсчётов вдоль лидарной трассы.

Эксперимент. Компактный лидар, разработанный в Институте общей физики им. А. М. Прохорова РАН основан на диодном на AlGaAs лазере и счётчике фотонов, общий вид прибора показан на рис. 2(а). Лидар (910 нм, 3 нс, 0.2 мкДж) работал с безопасным для глаз уровнем излучения (< 1 мкДж/см²) и большой частотой (10 кГц) повторения импульсов [9]. Наверху корпуса лидара установлен визир (лазерная указка с длиной волны 532 нм) для удобства контроля траектории пучка лидара (рис. 2(б)). Лидар был размещён у правой стены (см. рис. 1(б)) горячего тупикового тоннеля на удалении

32 м от его глухой стены. Из рис. 2(b) видно, что трасса зондирования (зелёная линия лазерного пучка визира) поднимается под небольшим углом к плоскости основания тоннеля до середины диаметра глухой стены. Отметим, что основание тоннеля также имеет небольшой наклон (~ 0.04 рад) от глухой стены к выходу в штольню, что отмечено на базовых точках топографической съёмки БНО на рис. 1(b). Так, высота над уровнем моря у входа в горячий туннель $H = 1714.5$ м (Т-29) ниже его основания у стены $H = 1716.4$ м (Т-30).

В измерениях, проводимых с интервалом 30 минут, лидар излучал по 100 000 лазерных импульсов для повышения статистической достоверности получаемых сигналов аэрозольного рассеяния. Пример гистограммы фотоотсчётов вдоль трассы зондирования без коррекции на квадрат расстояния от лидара показан на рис. 2(c). Обратнорассеянные (на аэрозолях) фотоны суммировали в течение одного цикла измерения. Лидарный сигнал обратного рассеяния на аэрозолях в каждом цикле измерений определяли как интеграл фотоотсчётов по всей длине трассы и сохраняли в памяти компьютера. Небольшой разброс среднего значения лидарного сигнала (15000 ± 120) позволил выявить сезонное снижение аэрозольного рассеяния, которое симбатно сжатую коры Земли, измеренному лазерным деформографом, и сопровождалось значительными отклонениями от среднего [9].

Ранее [8], в тоннеле БНО с высокой влажностью (отметка 400 м на рис. 1(a)) мы обнаружили большие флуктуации лидарного сигнала одновременно с образованием тумана. Принимая это во внимание, мы предположили, что прохладный (~ 33 °C) воздух штольни при втягивании в горячий туннель будет обеспечивать образование дымки и тумана. Однако почти постоянная на сезонном отрезке времени температура около основания тоннеля, измеренная нами ранее [9], указывала на то, что таких вторжений либо не бывает, либо основание тоннеля изолировано от контакта с ними из-за расслоения воздуха.

Для проверки этого предположения мы измерили вертикальный профиль температуры воздуха вдоль всего тоннеля в нижней половине, в которой размещена наклонная трасса лидарного зондирования (рис. 2(b), зелёный след визира). На этой трассе зондирования были обнаружены большие выбросы сигнала лидара из-за больших флуктуаций концентрации аэрозолей и коэффициента обратного рассеяния. Измерения проводили одновременно тремя низковольтными датчиками температуры TMP37 (Texas Instruments), установленными на штанге, на высоте ~ 5 , 100 и 150 см, при медленном перемещении вдоль тоннеля, чтобы минимизировать перемешивание слоев воздуха. В

каждой точке с шагом 5 м вдоль тоннеля производили 5 повторных измерений в течение 10 минут для вычисления среднего значения и снижения фактора инертности датчиков. Данные измерений температурного профиля нижней половины тоннеля представлены на рис. 3. Подъём тоннеля с углом ~ 0.04 рад не показан на рис. 3(a) для удобства сопоставления профиля температуры в условных цветах (рис. 3(b)).

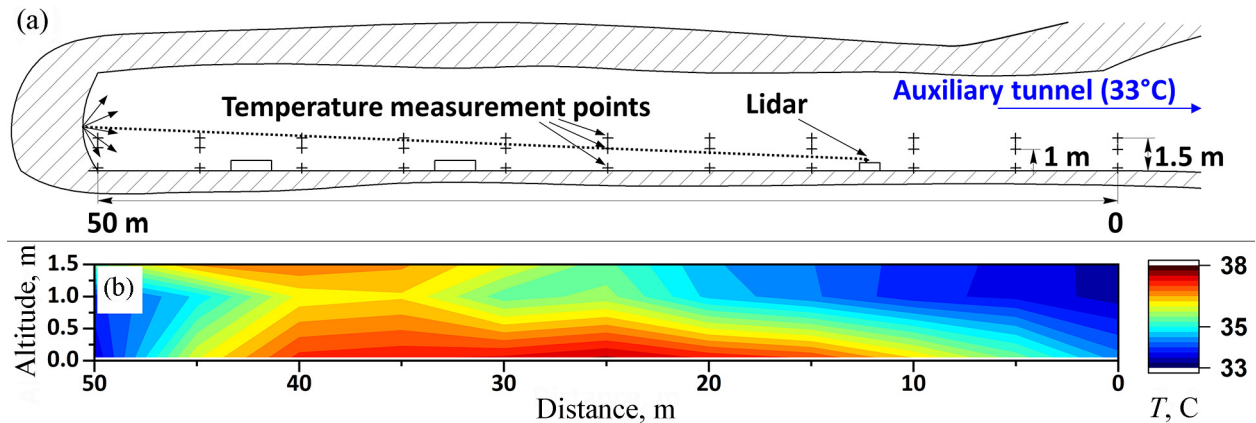


Рис. 3: (a) схема лидарного зондирования вариаций аэрозолей на наклонной трассе (линия точек) в горячем тупиковом тоннеле. Кресты отмечают траектории измерения профиля температуры термометром у основания, на высоте ~ 100 см и на высоте 150 см; (b) профиль температуры воздуха в нижней половине тоннеля в условных цветах: коричневый (~ 38 °C), жёлтый (~ 36 °C) и синий (~ 33 °C).

Как видно из рис. 3, распределение температуры в тоннеле имеет немонотонный и нетривиальный профиль. Так скальное основание тоннеля (рис. 3(b)) имеет наиболее высокую температуру (до 38 °C) в середине тоннеля, но уменьшается у входа и, неожиданно, около глухой стены в зоне ожидаемого большего нагрева очагом вулкана. Нагрев этой области тоннеля обеспечивается и теплопроводностью скал и магматическими газами, которые проникают в тоннель через трещины основания и в стенах. Отсюда следует, что температура воздуха в объеме около глухой стены должна быть наиболее высокой из-за теплого основания и стен, что создавало бы условия для формирования восходящего потока нормальной конвекции в соответствии с законом Архимеда. Однако в нашем случае эта область тоннеля оказалась парадоксально охлаждённой на 3–5 °C относительно температуры основания в середине тоннеля (рис. 3(b)). Обнаруженная инверсия температуры в тоннеле-тупике с горячим основанием и холодным воздухом наверху указывает процесс взаимодействия с внешним резервуаром холодного воздуха. В нашем случае таким резервуаром, несомненно, является вспомогательная штольня.

Об этом свидетельствует большой объём холодного воздуха с минимальной температурой наверху у входа в тоннель (рис. 3(b)).

Далее, измеренный профиль (рис. 3(b)) указывает на отсутствие стационарного всплывания нагретого воздуха по всей длине основания тоннеля в соответствии с законом Архимеда. Отсюда следует, что обнаруженное отступление от закона Архимеда с инверсией температуры и эффективным охлаждением глухой стены и основания тоннеля около стены является отражением нового динамического явления втягивания под сводом тоннеля холодного воздуха из штольни и принудительное его снижение у глухой стены “насосом” неизвестной природы. Наличие холодного слоя сверху с инверсией температуры (до $\Delta \leq 5$ °C) над горячим основанием тоннеля указывает на формирование неустойчивости Релея–Тейлора, когда слой холодного воздуха находится выше теплого слоя.

Несомненно, что отклонение от закона Архимеда и наблюдаемые аномалии могут формироваться только при условии нарушения однородности и расслоения воздуха, когда внизу находится слой теплых и, одновременно, более тяжёлых газов, чем воздух в холодном слое сверху. Тогда следует допустить, что горячие магматические газы, которые поступают в тоннель через трещины из очага вулкана, содержат компоненты, объёмная плотность которых превышает плотность воздуха 1.27 кг/м³.

Одним из таких газов является радон [9, 11], плотность которого (9.73 кг/м³) в 7.6 раза выше воздуха. Другими компонентами могут быть изотопы углерода $^{12}\text{CO}_2$ и $^{13}\text{CO}_2$, которые выделяются из очага вулкана и поступают в тоннель, подогревая его [11, 12]. С целью обнаружения этих изотопов в тоннелях БНО мы отобрали пробы газов из трещины в основании штольни, покрытой слоем воды с выходом газовых пузырей. Пробы брали недалеко от горячего тоннеля по ранее разработанной методике [11] наполнения стеклянной ёмкости (бутылки) без контакта с воздухом. Анализ состава пробы газов был проведен в Институте общей физики РАН на специально разработанном спектрометре ДЛС-А3-05 высокого разрешения на диодных лазерах, который подробно описан в работе [13]. Газы с помощью прокачки принудительно подавали в многоходовую кювету Эррио ДЛС-А3-05. Результаты анализа состава газов пробы из тоннеля БНО показали избыточное присутствие $^{12}\text{CO}_2$ (~ 9600 ppm), $^{13}\text{CO}_2$ (~ 1360 ppm) и метана (40 ppm) с ~ 20 -кратным превышением ПДК. Предварительные результаты анализа состава магматических газов вулкана Эльбрус представлены в работе [14].

Из анализа видно, что в тоннели БНО из трещин в скалах поступают газы, состав которых указывает на их вулканическую природу [11]. Существенным здесь является

их высокая концентрация и большая молекулярная масса (кроме метана). Естественно ожидать, что эти газы поступают по трещинам и в горячий тупиковый тоннель, поскольку размеры очага вулкана Эльбрус составляют десятки километров [12]. Тяжёлые газы (^{222}Rn , CO_2) выходят в объём тоннеля и подогревают его, тонут в воздухе и формируют слой у основания.

Принимая во внимание, что наклон тупикового тоннеля составляет 0.04 рад с подъёмом на 2 м у глухой стены относительно входа, естественно ожидать сток тяжёлых газов вниз по основанию от глухой стены в штольню. Здесь стекающие газы увлекаются вентиляционным потоком по принципу струйного насоса Бернулли. Отсюда следует, что струйный насос усиливает процесс стока тяжёлых газов в тупиковом туннеле и работу всасывающего насоса у глухой стены, который втягивает “холодный” (~ 33 °С) воздух из штольни под сводом тоннеля и опускает его по стене до основания. Здесь он перемешивается, подогревается и частично всплывает в зоне максимального нагрева основания до 38 °С в середине тоннеля (рис. 3(b)). Аномальное перемещение холодного воздуха из штольни под сводом вверху против потока струйного насоса с последующим принудительным снижением у глухой стены запускает и поддерживает реверсию конвекции по траектории, схема которой представлена на сечении тоннеля на рис. 4. Физически ясно, что обнаружено новое геофизическое явление: реверсия конвекции в горячем тоннеле над очагом вулкана.

Из рис. 4 видно, что реверсия конвекции транспортирует в тоннеле холодный воздух над горячим. В зоне их контакта, координаты которого непрерывно флуктуируют, создаются условия для образования дымки и тумана. Ранее [9] подобные процессы мы

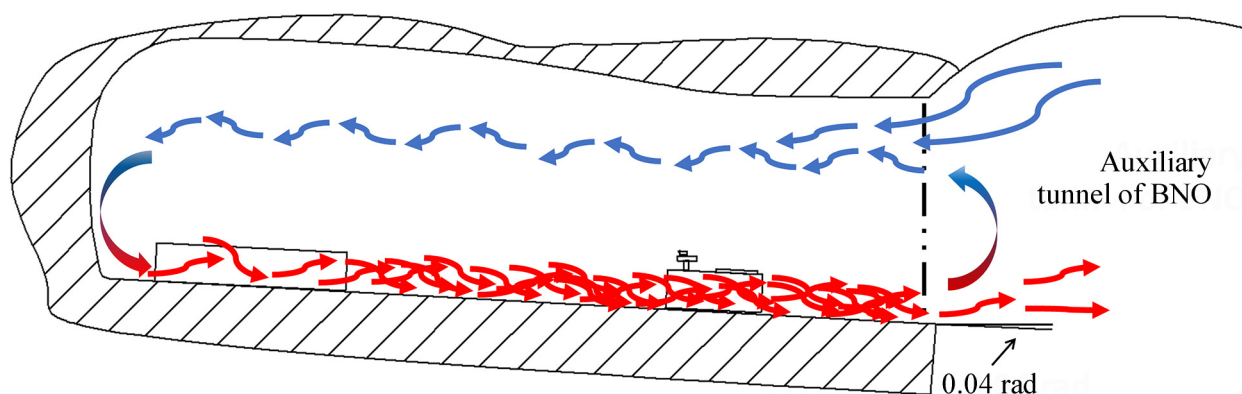


Рис. 4: Схема реверсии конвекции при стоке тяжёлых магматических газов по основанию тоннеля.

наблюдали в мокром тоннеле БНО. Действительно, короткие (30–60 минут) импульсы сигнала лидара [9] при рассеянии на аэрозолях тумана на наклонной трассе (см. рис. 5, верхняя кривая (1)) в горячем тоннеле указывают на динамический характер вариации аэрозолей (влажности и температуры) на границе контакта теплого и прохладного воздуха.

Установленная физика больших флуктуаций сигнала лидара на индуцированных аэрозолях тумана показывает, что эти флуктуации всегда будут мешающим фактором, который маскирует активность вулкана и затрудняет его мониторинг лидаром. Так, ранее [9] мы зарегистрировали в горячем тоннеле совпадение аэрозольных сигналов лидара со скачками температуры, которую измеряли прецизионным термометром ИФЗ РАН. Выявленная корреляция, помимо флуктуации дымки, могла быть результатом вулканической активности в виде аэрозольных микрофонтанов, индуцированных горячими газами очага вулкана и пылью тоннеля. Заметим, что изоляция термометров ИФЗ РАН от контакта с атмосферой тоннеля при их размещении в шурфах длиной 6 м в боковых стенах тоннеля позволила кардинально снизить число скачков температуры и выявить их корреляцию с лунными приливами [15]. Полученный результат указывал на необходимость фильтрации сигнала лидара от спорадических флуктуаций дымки и туманов на контактной границе слоев как фактора шума.

Обнаруженное геофизическое явление реверсии конвекции указало на изящный способ подавления больших флуктуаций аэрозолей и, одновременно, проверки механизма их образования. Мы предположили, что обнаруженный нами слой тяжелых газов вдоль основания тоннеля будет выполнять роль подобного фильтра-изолятора, если трассу зондирования погрузить внутрь этого слоя. Данные предварительных сеансов лидарного зондирования аэрозолей на трассе вдоль основания тоннеля при сохранении всех остальных параметров подтвердили наши предположения и представлены на рис. 5 (кривая (2)).

Из рис. 5 отчетливо видно, что среднее число фотоотсчетов уменьшилось более чем в 3 раза. Этот результат коррелирует с физикой вытеснения (снижением растворимости) плотными газами CO_2 (плотность $\sim 1.977 \text{ кг/м}^3$) менее плотных паров воды и снижением вероятности образования дымки-туманов в слое горячих ($38 \text{ }^\circ\text{C}$) газов. Отметим, что изоляция трассы в слое тяжёлых газов уменьшила (как и в случае изоляции термометров [15]) также и число флуктуационных скачков лидарного сигнала. Зарегистрированные импульсы сигнала лидара (рис. 5 (2)) в ноябре 2021 г. могут отражать повышение концентрации аэрозолей из-за газопылевых микрофонтанов как индикаторов активно-

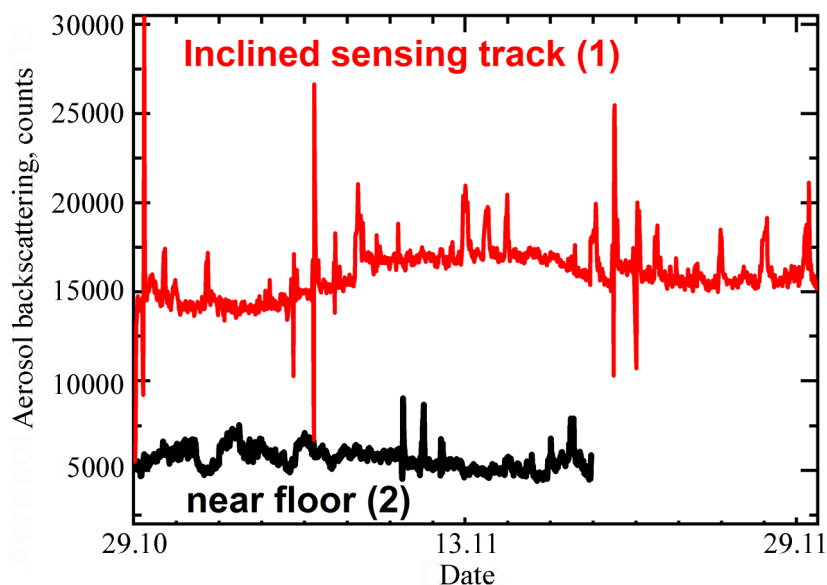


Рис. 5: Временная зависимость лидарного сигнала рассеяния на аэрозолях при мониторинге в горячем тоннеле-тупике над очагом вулкана Эльбрус в 2019 г. по наклонной трассе (кривая 1) и в 2021 г. при зондировании по трассе вдоль основания тоннеля внутри слоя тяжёлых газов (кривая 2).

сти вулкана. Для идентификации таких газопылевых фонтанов надо доработать лидар дополнительным приёмным каналом с целью измерения коэффициента деполяризации в сигнале обратного рассеяния [16].

Выводы. Таким образом, впервые, насколько нам известно, обнаружено новое уникальное геофизическое явление: реверсия конвекции воздуха в тупиковом тоннеле Баксанской нейтринной обсерватории (БНО) ИЯИ РАН, наклонное основание которого нагрето до ~ 40 °С очагом вулкана Эльбрус. В рассматриваемом случае тоннеля с подогревом магматическими газами обнаруженная аномалия сопровождается инверсией вертикального профиля температуры, когда температура верхнего слоя воздуха меньше на 3–5 °С, чем у основания тоннеля.

Установлено, что выявленные отклонения от закона Архимеда обусловлены расслоением воздуха из-за поступления в тоннель горячих, но тяжёлых газов (радон, углекислый газ) из очага вулкана. Эти газы тонут в воздухе, блокируют восходящие потоки и нормальную конвекцию. Напротив, скатывающая сила запускает реверсивную конвекцию, поскольку обеспечивает сток тяжёлых газов по наклонному основанию от глухой стены к выходу в штольню БНО. Одновременно включается поступление холодного

воздуха к глухой стене из штольни под сводом тоннеля, нижняя часть которого оккупирована тяжёлыми газами. Стекающие в штольню тяжёлые газы эвакуирует поток вентиляции с “включением” струйного насоса Бернулли, который поддерживает реверсию конвекции.

Особый интерес здесь вызывает то, что слой тяжёлых и горячих магматических газов на основании тоннеля-тупика выполняет роль эффективного фильтра сигналов вулканической активности при зондировании лидаром магматических аэрозолей. Слой газов обеспечивает изоляцию трассы зондирования при её погружении внутрь слоя от зоны генерации (образования) шума: аэрозолей дымки и туманов при контакте тёплого слоя снизу с влажным и холодным воздухом из штольни. Предварительный эксперимент показал 3-кратное снижение среднего значения сигнала обратного рассеяния и многократное снижение частоты спорадических импульсов лидарного сигнала при рассеянии на флуктуирующих аэрозолях дымки-тумана вдоль наклонной трассы зондирования. Несомненно, такая фильтрация шума значительно повышает вероятность мониторинга вулканической активности. Дополнительную селекцию магматических аэрозольных фонтанов позволит получить коэффициент деполяризации лидарного сигнала рассеяния, как было показано при зондировании эманации газов из кратера вулкана Этна в Италии [17].

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

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] S. A. Miller, *Advances in geophysics* **54**, 1 (2013). DOI: 10.1016/B978-0-12-380940-7.00001-9.
- [2] B. Jamtveit, A. Petley-Ragan, S. Incel, et al., *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* **124**(8), 7725 (2019). DOI: 10.1029/2018JB016461.
- [3] L. Fiorani, F. Colao, A. Palucci, *Optics letters* **34**(6), 800 (2009). DOI: 10.1364/ol.34.000800.
- [4] S. Pershin, V. Linkin, V. Makarov, et al., Spaceborn laser altimeter based on the single photon diode receiver and semiconductor laser transmitter. In: *Conference on Lasers and Electro-Optics. CFI1* (1991). <http://www.osapublishing.org/abstract.cfm?URI=CLEO-1991-CFI1>.
- [5] D. H. Sliney, M. Wolbarsht, *Safety with Lasers and Other Optical Sources: A Comprehensive Handbook* (New York, Springer Science & Business Media, 2013). DOI: 10.1007/978-1-4899-3596-0.

- [6] National Aeronautics and Space Administration (NASA). Mars Polar Lander/Deep Space 2: 1998 Press Kit. 1998. <https://mars.nasa.gov/mars-exploration/missions/polar-lander/>.
- [7] S. M. Pershin, M. Ya. Grishin, V. A. Zavozin, et al., *Laser Physics Letters* **17**(2), 026003 (2020). DOI: 10.1088/1612-202X/ab66c4.
- [8] С. М. Першин, М. Я. Гришин, В. А. Завозин и др., *Краткие сообщения по физике ФИАН* **46**(10), 46 (2019). DOI: 10.3103/S1068335619100075.
- [9] S. M. Pershin, A. L. Sobisevich, M. Ya. Grishin, et al., *Laser Physics Letters* **17**(11), 115607 (2020). DOI: 10.1088/1612-202X/abbedc.
- [10] В. К. Милуков, А. В. Мясников, *Измерительная техника* **48**(12), 26 (2005). DOI: 10.1007/s11018-006-0042-7.
- [11] В. Ю. Лаврушин, *Подземные флюиды Большого Кавказа и его обрамления* (М., ГЕОС, 2012), 348 с. https://www.researchgate.net/profile/Vassily-Lavrushin/publication/268445266_Podzemnye_fluidy_Bolsogo_Kavkaza_i_ego-obramlenia/links/546b58730cf20dedafd52c48/Podzemnye-fluidy-Bolsogo-Kavkaza-i-ego-obramlenia.pdf.
- [12] А. Г. Гурбанов, О. А. Богатиков, Б. С. Карамурзов и др., *Вулканонология и сейсмология* **5**(4), 3 (2011). DOI: 10.1134/S0742046311030031.
- [13] А. И. Надеждинский, Я. Я. Понуровский, *Квантовая электроника* **49**(7), 613 (2019). DOI: 10.1070/QEL16776.
- [14] С. М. Першин, А. Л. Собисевич, В. А. Завозин и др., *Краткие сообщения по физике ФИАН* **49**(2), 10 (2022). DOI: 10.3103/S1068335622020063.
- [15] Д. В. Лиходеев, А. Л. Собисевич, В. В. Гравиров, *Доклады Российской академии наук Науки о Земле* **503**(2), 148 (2022). DOI: 10.31857/S2686739722040090.
- [16] G. Pisani, A. Boselli, M. Coltelli, et al., *Atmospheric Environment* **62**, 34 (2012). DOI: 10.1016/j.atmosenv.2012.08.015.

Поступила в редакцию 3 ноября 2022 г.

После доработки 23 января 2023 г.

Принята к публикации 25 января 2023 г.