

УДК 550.36

ПРИЛИВНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ТОНКОЙ СТРУКТУРЕ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ НАБЛЮДЕНИЙ В ГЛУБОКОЙ ШТОЛЬНЕ СЕВЕРОКАВКАЗСКОЙ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ

© 2022 г. Д. В. Лиходеев^{1,*}, член-корреспондент РАН А. Л. Собисевич¹, В. В. Гравиров¹

Поступило 02.08.2021 г.

После доработки 15.11.2021 г.

Принято к публикации 09.12.2021 г.

Представлены первые результаты наблюдений естественных вариаций температуры с точностью до тысячной доли градуса в глубокой штольне Северокавказской геофизической обсерватории. Показано, что вызываемые приливом изменения напряженно-деформированного состояния геофизической среды приводят не только к выделению тепла вследствие сдвиговых смещений (эффект приливного трения), но и, вероятно, “модулируют” процессы выхода флюида из массива горной породы (“эффект губки”). Таким образом, наблюдаемые в микровариациях температуры суточные и полусуточные гармоники, могут быть обусловлены в том числе и конвективной составляющей тепло-массопереноса, определяемой в значительной степени изменениями режима миграции флюидов вследствие периодического силового воздействия лунно-солнечных приливов на геофизическую среду.

Ключевые слова: тепловые поля, глубинные флюиды, прецизионные температурные измерения, приливные эффекты, Эльбрусский вулканический центр, Северокавказская геофизическая обсерватория

DOI: 10.31857/S2686739722040090

Фундаментальные исследования глубинных слоисто-неоднородных структур литосферы, ответственных за формирование и развитие флюидно-магматических систем Северного Кавказа на современном этапе неразрывно связаны с необходимостью получения новой, наиболее достоверной информации обо всей совокупности геолого-геофизических процессов, проявляющихся в закономерных изменениях различных геофизических полей.

Применительно к задачам геофизики и тектоники флюиды следует рассматривать как жидкую или газовой-жидкую субстанцию, отличающуюся от минерального вещества литосферы пониженными значениями плотности, вязкости и высокой миграционной способностью. Флюидная фаза и ее характеристики в различных частях земной коры изменяются в широких пределах. В неглубоких горизонтах – это вода с более или менее значительным содержанием растворенных солей и газов [2]; для района Эльбрусского вулканического центра [1, 4] наиболее характерны источники углекислых минеральных вод.

Известные сложности, связанные с недостатком данных о физико-механических свойствах основных элементов магматической питающей системы, накладывают ограничения на возможности моделирования геодинамических процессов, преодолеть которые позволяют данные прецизионных кварцевых наклономеров [3]. Последние в силу конструктивных особенностей подвержены действию слабых тепловых помех, что и определило необходимость создания системы строгого контроля температуры в подземной лаборатории.

В качестве исходных данных использованы результаты натурных наблюдений, выполненных на базе Северокавказской геофизической обсерватории ИФЗ РАН, на заглублении 3.9 км от входа в штольню, в боковой горной вырубке не подверженной воздействию системы принудительной вентиляции и представляющей таким образом практически идеальную площадку для исследования тонкой структуры вариаций теплового поля Земли [1, 5]. Для оборудования прецизионной системы измерений температуры в противоположных стенах помещения подземной лаборатории пробурены две пары отверстий диаметром 10 см и глубиной от 4.5 до 5.8 м, располагающиеся друг над другом под углом 30° (верхние отверстия) и 5° (нижние отверстия) к горизонту (рис. 1). Такое

¹Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта
Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: dmitry@ifz.ru

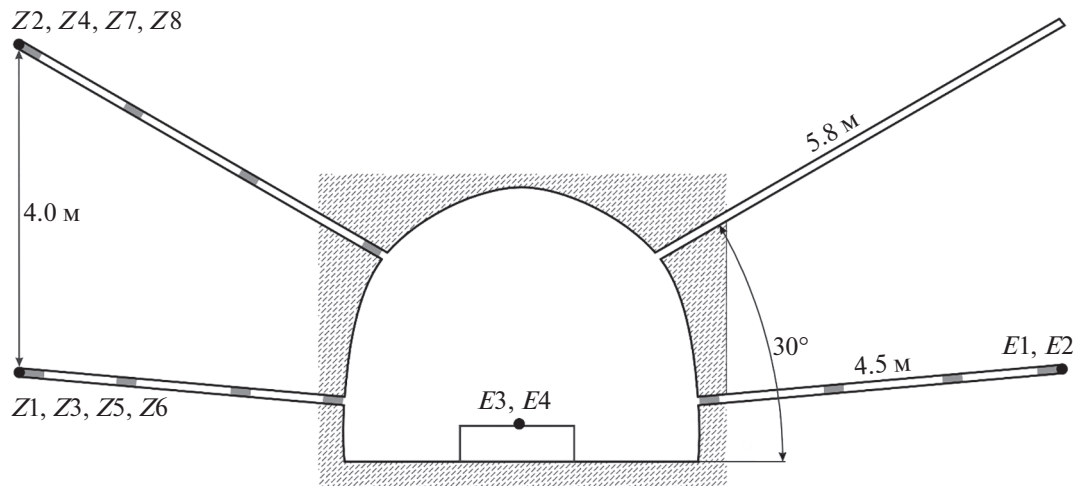


Рис. 1. Вертикальное сечение помещения подземной лаборатории в плоскости проходки боковых отверстий, предназначенных для установки основных элементов температурной информационно-измерительной системы. Условные обозначения: Z1–Z8, E1–E4 – модули прецизионных электронных термометров, подключенные к многоканальным регистраторам на основе аналого-цифровых преобразователей ZETLAB и L-CARD соответственно, серые прямоугольники – пассивные заглушки из теплоизолирующего материала для минимизации атмосферной конвекции.

конструктивное решение позволило разнести первичные преобразователи на 4 м по вертикали и исключить скопление влаги в зоне их непосредственного контакта с породным массивом. Во всех боковых отверстиях предусмотрена многоступенчатая термоизоляция для уменьшения влияния температурного режима рабочего помещения лаборатории.

Аппаратурный комплекс системы прецизионного температурного мониторинга с относительным разрешением не хуже 0.001°C построен на основе специализированных информационно-измерительных модулей, разработанных в ИФЗ РАН [6]. Сигналы с первичных преобразователей через блок аналогового усиления и фильтрации поступают на 24-разрядные АЦП, сопряженные с цифровыми регистраторами, которые одновременно реализуют функции удаленного управления и доступа к экспериментальным данным посредством сети Интернет в режиме, близком к реальному времени. Перед окончательной установкой измерительных модулей в глубь отверстий в помещении лаборатории была выполнена их сравнительная калибровка с поверенными ртутными термометрами [6].

Периодические замеры глубинных температур проводятся автоматически раз в пять минут в двух боковых отверстиях. При этом в промежутках между измерениями питание температурных датчиков отключается, что позволяет практически исключить саморазогрев датчиков и беспрепятственно регистрировать тонкие температурные вариации. Датчики аналогичной конструкции, но уже с непрерывным режимом работы установлены непосредственно в помещении лаборато-

рии, на поверхности одного из геофизических постаментов и в отверстиях, пробуренном с правой стороны штольни (рис. 1).

Данная система на качественно новом уровне обеспечивает метрологическую стабильность подземной геофизической обсерватории, значительная часть оборудования которой (прежде всего – кварцевые измерительные системы) чувствительна к незначительным изменениям температуры окружающей среды или атмосферного давления.

Рассмотрим шестидневную запись, полученную двумя температурными датчиками Z1 и Z4 (рис. 2). Видно, что амплитуды температурных колебаний не превышают 0.005°C , при этом периодические изменения показаний в нижнем отверстии (Z1) по амплитуде значительно уступают таковым в верхнем отверстии (Z4). Таким образом, первые результаты высокоточных измерений температуры на базе Северокавказской геофизической обсерватории продемонстрировали достижение информационно-измерительной системой требуемых показателей по чувствительности и стабильности функционирования в условиях глубокой штольни.

Также в температурных данных наблюдаются достаточно выраженные суточные и полусуточные периодичности, амплитуда которых непостоянна. Переходя к анализу экспериментальных данных в спектральной области, отметим, что спектр микровариаций температуры на датчике Z4 содержит заметные суточную и, более слабые, полусуточную и восьмичасовую гармоники, что в целом соответствует периодам основных приливных волн (рис. 3).

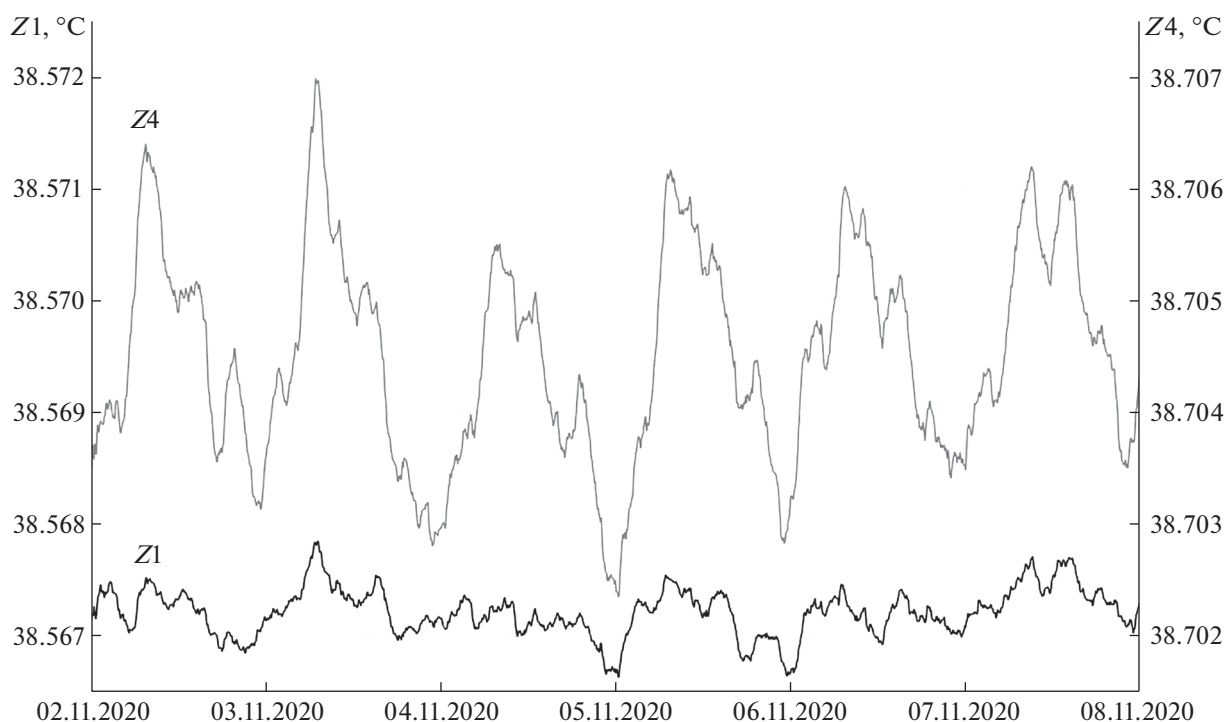


Рис. 2. Сравнение микровариаций температуры в верхнем (Z4) и нижнем (Z1) отверстиях, убран тренд, данные сглажены скользящим средним по 30 соседним измерениям.

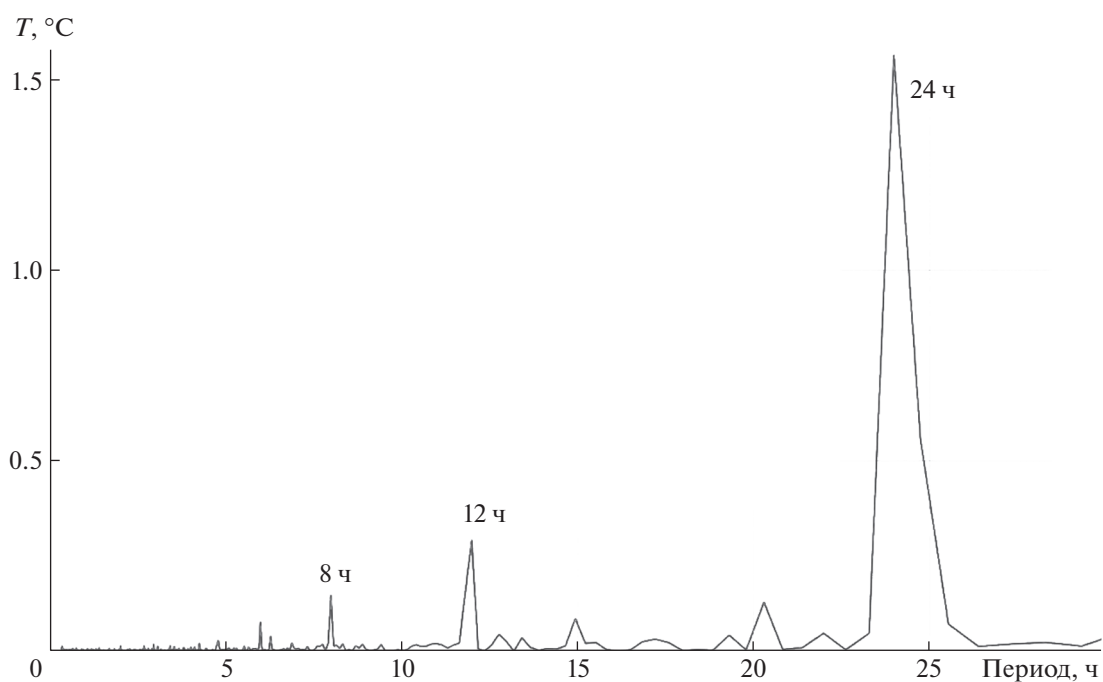


Рис. 3. Спектр температурных вариаций, зарегистрированных датчиком Z4.

На рис. 4 показаны результаты качественного сравнения наблюдаемых в глубокой штольне температурных периодичностей с теоретической

оценкой локальных значений вертикальной компоненты гравитационного потенциала, демонстрирующие в целом устойчивую корреляцию.

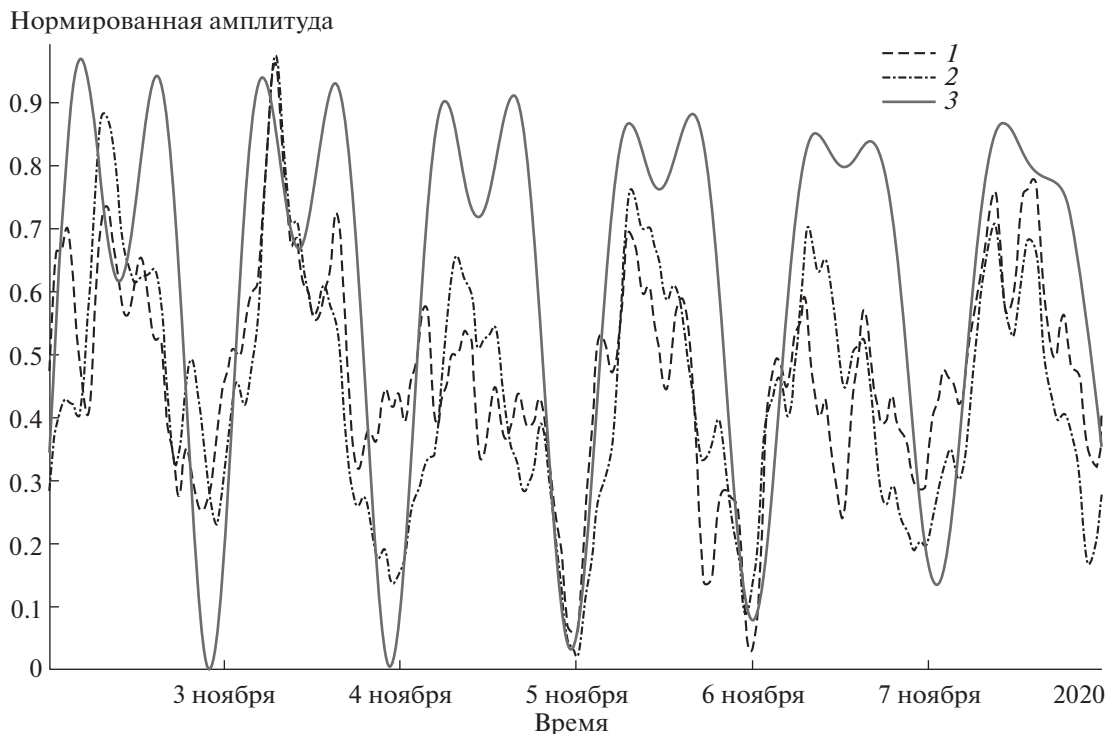


Рис. 4. Качественное сравнение нормированных значений вариаций температуры в глубокой штольне (точки измерений Z1 (1) и Z4 (2)) с нормированной теоретической оценкой локальных значений вертикальной компоненты гравитационного потенциала (3).

Первые результаты наблюдений микровариаций температуры в глубокой штольне демонстрируют выраженные 12-ти и 24-часовые периодичности, что позволяет предположить их непосредственную связь с лунно-солнечными приливами. Действительно, гравитационное взаимодействие вследствие орбитального движения системы Земля–Луна вокруг Солнца представляет собой заметный вклад в ежегодный энергетический баланс Земли: тепловыделение в недрах за счет приливного трения оценивается величиной порядка $\sim 10^{20}$ Дж/год. Не менее значимым следствием приливного воздействия является миграция флюидов в связи с периодическим уплотнением и разуплотнением трещиноватых структур земной коры.

Известно, что интенсивность релаксационных процессов в земной коре характеризуется около-суточной периодичностью, а в спектрах вариаций уровня подземных вод и объемной активности подпочвенного радона хорошо выделяются приливные волны [7]. Воздействие лунно-солнечных приливов приводит к закономерным изменениям режима подземных вод, в том числе проявляющегося в соответствующих колебаниях температур в обводненной скважине [8]. Экспериментально были обнаружены суточные и полусуточные периодичности в изменениях электропроводности

в интервале глубин 3–7 км, при этом спектр колебаний кажущегося сопротивления хорошо совпал со спектром вертикальной компоненты приливообразующих сил, что позволило авторам связать наблюдаемый эффект с земноприливными изменениями флюидного режима [9]. Отмечено влияние лунно-солнечных приливов на объемы выбросов метана из флюидонасыщенных слоистых структур морского дна [10].

Причиной возникновения суточных микровариаций температуры в штольне может быть и атмосферный прилив, обусловленный не только гравитационным воздействием Луны и Солнца, но и прогревом атмосферы на обращенной к Солнцу стороне Земли [7]. В этой связи представляют интерес результаты исследований влияния атмосферных приливов на температуру окружающей среды в пещерах естественного происхождения. Так, в работе [11] изучались сезонные колебания температуры, контролируемые процессы вентиляции пещер с учетом вариаций плотности и влажности воздуха, и было показано, что атмосферный прилив проявляется в измерениях концентрации радона в приземном слое. При этом на расстояниях более 240 м от входа в пещеру выраженной температурной изменчивости обнаружено не было. Другой группе ученых удалось выделить 12-ти часовые колебания температуры воз-

духа с амплитудами порядка нескольких тысячных градуса, которые могли возникнуть под влиянием полусуточных приливных компонент Солнца (S2) или Луны (M2). Дальнейшее исследование вариаций атмосферного давления в глубине пещеры не выявило в них суточной периодичности, что, по мнению авторов, позволяет рассматривать пещеры в качестве естественных обсерваторий для изучения атмосферных приливов [12].

С учетом особенностей рельефа Баксанского ущелья и высоты горы Андырчи, мощность гранитоидного массива непосредственно над помещениями подземной лаборатории составляет около полутора километров, что позволяет вплоть до вековых вариаций полностью исключить кондуктивный механизм переноса тепла с дневной поверхности, характерный для естественных пещер неглубокого заложения [13].

Температура в каждой конкретной точке геологической среды зависит как от теплового потока продуцируемого различными источниками тепла, так и от теплопроводности пород, которая в свою очередь зависит от флюидонасыщенности и может варьироваться. Важную роль играет и перенос тепла конвекцией флюидов, которая вносит существенный вклад в тепломассоперенос в вулканически активных районах [14].

Таким образом, наблюдаемые вариации температуры могут быть связаны в том числе и с конвективной составляющей тепломассопереноса в результате периодического силового воздействия лунно-солнечных приливов на геофизическую среду.

В пользу данного предположения свидетельствует более активный выход флюидов в верхнем измерительном отверстии (см. рис. 2), что отчетливо подтверждается следами коррозии на креплениях датчиков Z2 и Z4, обнаруженными в ходе калибровки в августе 2019 г. При этом коррозия практически полностью отсутствовала на аналогичных креплениях датчиков Z1 и Z3 в нижнем измерительном отверстии. Кроме того, применение технологии лидарного зондирования воздуха в помещении лаборатории позволило установить взаимосвязь между концентрациями аэрозолей и изменениями температуры окружающей среды [5]. Дальнейшие исследования предполагают, в том числе, установку в обсерватории кварцевого микробарографа для совместной интерпретации геофизических данных и установления истинной природы наблюдаемых периодичностей в микровариациях подземных температур.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность А.В. Мясникову за плодотворное обсуждение первых результатов гео-

физического эксперимента и содействие в оценке локальных вариаций гравитационного потенциала.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИФЗ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Собисевич А.Л.* Избранные задачи математической геофизики, вулканологии и геоэкологии. Т. 2. Северокавказская геофизическая обсерватория. Создание, анализ результатов наблюдений. М.: ИФЗ РАН. 2013. 512 с.
2. *Киссин И.Г.* Флюиды в земной коре: геофизические и тектонические аспекты. М.: Наука, 2015. 327 с.
3. *Молоденский С.М., Молоденская М.С., Собисевич А.Л.* О влиянии регионального рельефа на приливные деформации (на примере Эльбрусского вулканического центра) / Сейсмические процессы и катастрофы. М.: ИФЗ РАН. 2008. С. 255–261.
4. *Лиходеев Д.В., Дударов З.И., Жостков Р.А., Преснов Д.А., Долов С.М., Данилов К.Б.* Исследование глубинного строения вулкана Эльбрус методом микросейсмического зондирования // Вулканология и сейсмология. 2017. № 6. С. 28–32.
5. *Pershin S.M., Sobisevich A.L., Grishin M.Y., Gravirov V.V., Zavozin V.A., Kuzminov V.V., Lednev V.N., Likhodeev D.V., Makarov V.S., Myasnikov A.V., Fedorov A.N.* Volcanic Activity Monitoring by Unique Lidar Based on a Diode Laser // Laser Phys. Lett. 2020. 17 (11): 115607–115613.
<https://doi.org/10.1088/1612-202x/abbedc>
6. *Лиходеев Д.В., Гравиров В.В., Кислов К.В.* Прецизионные дифференциальные термометры для исследования тепловых процессов на базе Северокавказской геофизической обсерватории // Наука и технологические разработки. 2018. Т. 97. № 1. С. 15–24.
<https://doi.org/10.21455/std2018.1-2>
7. *Адушкин В.В., Рябова С.А., Спивак А.А.* Эффекты лунно-солнечного прилива в земной коре и атмосфере Земли // Физика Земли. 2017. № 4. С. 76–92.
<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29404875>
8. *Демежко Д.Ю., Юрков А.К., Уткин В.И., Климишин А.В.* О природе температурных вариаций в скважине kun-1 (о. Кунашир) // Геология и геофизика. 2012. Т. 53. № 3. С. 406–414.
<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17561478>
9. *Жамалетдинов А.А., Митрофанов Ф.П., Токарев А.Д., Шевцов А.Н.* Влияние лунно-солнечных приливных деформаций на электропроводность и флюидный режим земной коры // ДАН. 2000. Т. 371. № 2. С. 235–239.
10. *Rochelleau J.* The Influence of Tidal Forces Extends to the Arctic's Deep Sea // Eos. 2021. 102.
<https://doi.org/10.1029/2021EO153556>
11. *Vieten R., Winter A., Warken S.F., Schröder-Ritzrau A., Miller T.E., Scholz D.* Seasonal Temperature Variations Controlling Cave Ventilation Processes in Cueva Larga, Puerto Rico // Int. J. of Speleology. 2016. 45 (3).

- P. 259–273.
<https://doi.org/10.5038/1827-806X.45.3.1983>
12. *Drăgusin V., Tîrlă L., Cadicheanu N., Ersek V., Mirea I.-C.* Caves as Observatories for Atmospheric Thermal Tides: An Example from Ascunsă Cave, Romania // *Int. J. of Speleology*. 2018. 47 (1). P. 113–117.
13. *Dominguez-Villar D., Lojen S., Krklec K., Baker A., Fairchild I.J.* Is Global Warming Affecting Cave Temperatures? Experimental and Model Data from a Paradigmatic Case Study // *Clim. Dyn.* 2015. 45. P. 569–581.
<https://doi.org/10.1007/s00382-014-2226-1>
14. *Мальковский В.И., Пэк А.А.* Влияние разрывных нарушений на процессы флюидного теплопереноса в земной коре. М.: ИФЗ РАН. 2014. 120 с.

TIDAL EFFECTS IN THE TINY TEMPERATURE VARIATIONS MEASURED IN A THE DEEP UNDERGROUND TUNNEL OF THE GEOPHYSICAL OBSERVATORY IN NORTHERN CAUCASUS

D. V. Likhodeev^{a,#}, Corresponding Member of the RAS A. L. Sobisevich^a, and V. V. Gravirov^a

^a*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

[#]*E-mail: dmitry@ifz.ru*

The initial results of observations of natural temperature variations with an accuracy of up to one thousandth of a degree in the deep underground tunnel of the Geophysical Observatory in Northern Caucasus are presented. It has been shown that tidal-driven changes in the stress-strain state of the geophysical medium lead not only to heat release due to shear displacements (the effect of tidal friction), but are also responsible for observed “modulation” of the processes of volatile fluids release from the underground rocks (so-called “sponge effect”). Thus, the diurnal and semidiurnal harmonics observed in microvariations of underground temperature may be associated with the convective component of heat and mass transfer, which is basically determined by the corresponding changes in the regular fluid migration behavior due to the periodic influence of the combined lunar-solar tide effects on the geophysical medium in the deep underground tunnel.

Keywords: thermal fields, underground fluids, high-precision temperature measurements, tidal effects, El-brus volcanic center, underground Geophysical Observatory in Northern Caucasus