

УДК 550.348; 534.18; 539.1.05
DOI: 10.23671/VNC.2017.3.9501

СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ В ВОРОТИЛОВСКОЙ ГЛУБОКОЙ СКВАЖИНЕ: МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ

© 2017 А.С. Беляков¹, к.ф.-м.н., И.Н. Диденкулов², А.Д. Жигалин¹, к.г.-м.н.,
В.С. Лавров¹, А.И. Малеханов², к.ф.-м.н., А.В. Николаев¹, д.ф.-м.н., проф.

¹ФГБУН Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Россия, 123995, г.
Москва, ул. Б. Грузинская, 10, стр. 1, e-mail: zhigalin.alek@yandex.ru;

²ФГБНУ Институт прикладной физики РАН, Россия, 603950, г. Нижний Новгород,
БОКС-120, ул. Ульянова, д. 46, e-mail: din@appl.sci-nnov.ru

Наблюдения вариаций сейсмоакустического шума Земли показали эффективность пассивного сейсмического мониторинга при изучении эндогенных геодинамических процессов и связи их с интенсивностью сейсмоакустической эмиссии. В Воротиловской глубокой скважине (Нижегородская обл., Россия) регистрируется «шум Земли» в диапазоне частот от 1 Гц до 5 кГц. Шумы такого рода обычно связываются с особенностями тектоники и петрофизическими свойствами горных пород. В середине августа 2016 г. были зарегистрированы неординарные сейсмоакустические сигналы, которые предположительно связываются с взаимодействием высокоэнергичных частиц, в частности, нейтрино, с горными породами или возможным влиянием неопознанных источников, в том числе техногенных.

Ключевые слова: сейсмический мониторинг, Воротиловская скважина, сейсмоакустическая эмиссия, нейтрино.

Предисловие

Успешное использование сверхчувствительных широкополосных сейсмометров типа МАС-ЗСМ при изучении сейсмоакустических полей Земли, отображающих протекание эндогенных геотектонических процессов, позволяет предположить хорошие возможности этих приборов для обнаружения влияния природных и техногенных геофизических полей на верхние слои литосферы. К таким полям можно отнести естественные и искусственные электромагнитные поля, проникающие излучения, потоки нейтрино и других космических частиц, обладающих высокой энергией. Указанные поля, воздействуя на горные породы в геологическом полупространстве, могут вызывать эффекты, изучение которых позволит раскрыть механизмы влияния космических факторов на процессы, происходящие в земной коре. Для выявления связи регистрируемых геоакустических шумов (сейсмоакустической эмиссии, САЭ) с процессами в недрах Земли и околоземном пространстве было принято решение создать стационарный полигон для организации постоянно действующего сейсмоакустического мониторинга в пределах территории с низкой сейсмической активностью. Выбор пал на Воротиловские скважины в Нижегородской области, пробуренные в 80-х гг. прошлого столетия, на которых эпизодически проводятся измерения уровня сейсмоакустической эмиссии для решения ряда теоретических и прикладных задач.

Общие сведения

Воротиловский наблюдательный полигон организован силами Института прикладной физики РАН (ИПФ) и Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН

(ИФЗ) в августе 2017 г. Он был создан на базе двух скважин – Воротиловской глубокой скважины (ВГС), пробуренной до глубины 5374 м, и скважины-спутника (ВГС-Сп) глубиной 1498 м.

Воротиловские скважины пробурены в центре Пучеж – Катунской импактной структуры (астроблемы), возникшей около 165-167 млн. лет назад в результате падения крупного метеорита. Авторы придерживаются этой версии, хотя есть и иные мнения по поводу происхождения структуры. Структура, обнаруженная в 1965 г., имеет диаметр 70-80 км и находится к северу от Нижнего Новгорода. Кратер перекрыт 2-х километровой толщей осадочных пород и потому в рельефе не заметен. Главная особенность структуры – локальное куполообразное поднятие пород кристаллического фундамента в её кратере до глубины 400-600 метров под земной поверхностью (Воротиловский выступ), в то время как характерная толщина чехла осадочных пород в этом регионе составляет 1,6-1,7 км. Данные бурения ВГС и ВГС-Сп показывают, что Воротиловский выступ в центре импактной структуры представляет собой брекчию, состоящую из пород, которые были метаморфизованы в результате удара при давлениях 45-50 ГПа в верхней части центрального поднятия и 10-20 ГПа на глубине 5 км и испытали постимпактные гидротермальные преобразования. Обе скважины не вышли за пределы зоны ударных преобразований, которые по некоторым оценкам проявляются до глубины 9-10 км.

По окончании бурения в скважинах эпизодически проводились наблюдения с целью изучения сейсмоакустического поля Земли, сейсмоакустического шума (САШ). Так, в конце прошлого и начале текущего веков было выполнено несколько циклов измерений сейсмоакустической эмиссии в кристаллических породах на глубинах 3200 метров и 553 метра. Были обнаружены краткосрочные интенсивные возмущения уровня эмиссии на фоне относительно спокойных периодов продолжительностью до нескольких дней. Регистрация волновых форм сигналов эмиссии в полосе частот от единиц герц до 5 кГц позволила изучить временную структуру отдельных импульсных возмущений и выделить в них фазы подготовки и развития, аналогичные фазам, характеризующим разрядку сейсмических напряжений. Также было проведено когерентное межскважинное зондирование на частоте 100 Гц. В целом полученные результаты показали возможность использования Воротиловских скважин для геодинамического мониторинга с применением современных методов и аппаратной базы геоакустики (<https://refdb.ru/look/2068005-p7.html>). Как следствие этого возникла идея создания на базе ВГС и ВГС-Сп наблюдательно-го полигона для мониторинга геодинамических процессов в пределах восточной и северо-восточной частей Русской платформы с целью решения фундаментальных и прикладных задач сейсмологии, общей и инженерной геофизики.

Организация полигона и методика измерений

Организации полигона предшествовал довольно длительный период эпизодических измерений САШ в скважинах, которые носили поисковый характер и были направлены на совершенствование измерительной аппаратуры и отработку методики. В частности, в одном из таких эпизодов в кристаллических породах открытого ствола ВГС на глубине 3200 м был установлен широкополосный высокочувствительный геофон МАС-3М (оригинальная разработка ИФЗ РАН), позволяющий измерять вертикальную составляющую вектора скорости ускорения в сейсмической волне на основе магнитоупругого эффекта. Аналогичный геофон был установлен

в открытом стволе скважины-спутника (ВГС-Сп) на глубине 553 м. Это позволило осуществить регистрацию усредненных уровней сейсмоакустической эмиссии (САЭ) в четырех 1/3 октавных полосах (центральные частоты 30, 160, 500 и 1000 Гц при длительности усреднения в 1 мин.) с дистанционной передачей данных. На базе Воротиловских скважин был выполнен эксперимент по межскважинному зондированию пород Воротиловского выступа. В ходе эксперимента в обсадную трубу ВГС на фиксированную глубину от 20 до 80 метров опускался гидроакустический излучатель электродинамического типа (разработка ИПФ РАН). В скважину-спутник опускался перемещаемый по глубине до 500 метров (с шагом 20 метров) трехкоординатный геофизический зонд. С его помощью контролировались уровни вертикальной и среднеквадратичной горизонтальной составляющих зондирующего сигнала. Реализованная методика межскважинного зондирования с использованием когерентного гидроакустического излучателя дает возможность добиться высокого пространственного разрешения [Диденкулов и др., 2008].

В процессе проведения эксперимента было установлено, что сигналы, регистрировавшиеся в обеих скважинах, практически были свободны от техногенных помех и, принципиально, позволяют регистрировать естественный сейсмоакустический фон на горизонтах залегания кристаллических пород. Были обнаружены флюктуации уровня эмиссионного фона импульсного характера в обеих скважинах, а именно, спокойные периоды, характеризующиеся отсутствием заметного уровня эмиссии на протяжении часов и до нескольких дней, сменяющиеся сильными всплесками уровня эмиссии во всех частотных полосах. Это свидетельствует о значительных вариациях в напряженно-деформированном состоянии кристаллических пород в районе Воротиловского выступа. Серия краткосрочных наблюдений полных (без усреднения) волновых форм эмиссии в полосе 5 кГц позволила детально проследить временную структуру отдельных импульсных возмущений, включая фазы подготовки и развития их на различных глубинах. Подобные данные представляют особый интерес в качестве масштабной динамической модели разрядки сейсмических напряжений при землетрясениях (<http://radilov.ru/krayrodnoy/21-vorotilovskaya-vzryvnaya-koltsevaya-struktura-iskopaemaya-astroblema.html>).

Обсуждение результатов

Успешно проведенные ранее эксперименты с разным положением зондов при проведении измерений в двух скважинах (ВГС и ВГС-Сп) показали возможность получать качественную информацию, характеризующую напряженное состояние горных пород, анализируя уровень сейсмоакустической эмиссии и фонового сейсмоакустического шума, а также изменение этих параметров во времени и пространстве. Это послужило своего рода толчком для появления идеи создать сейсмоакустический градиентометр (фиксированное положение двух сейсмоакустических приемников, разнесенных в пространстве по вертикали и латерали), что позволит улавливать более «тонкие» изменения напряженного состояния в массиве горных пород, т. е. выявлять начало разрушения этого массива на более ранних стадиях, недоступных при традиционных сейсмологических и дефектоскопических наблюдениях. В настоящее время работы по созданию полигона, в основном, завершены. Геофизические каналы и регистрирующая аппаратура проходят технологические испытания.

Проведенные летом 2016 г. сейсмоакустические наблюдения на Воротиловском полигоне показали наличие различных сигналов в широком диапазоне частот –

от единиц герц до 50 кГц. Такая полоса перекрывает все используемые для получения информации частотные диапазоны: низкочастотный, сейсмологический (единицы герц до 50-60 Гц), среднечастотный, разведочный (60-600 Гц), высокочастотный, инженерно-геофизический (600-1500 Гц), высокочастотный (1500-5000 Гц) и ультразвуковой, дефектоскопический (5-20 кГц и выше). Наблюдается закономерное уменьшение амплитуды сигнала с повышением частоты, но, тем не менее, различимость сигнала остается достаточной для его идентификации. Регистрограммы в скважине ВГС представляют собой записи трех составляющих – двух горизонтальных X, Y и вертикальной Z. В скважине ВГС-Сп регистрировалась только вертикальная составляющая – Z. Пример «рабочей» записи в виде амплитудно-частотной развертки в диапазоне частот от десятых долей герца до 5 кГц (частотный спектр в 30-минутном интервале записи) приведен на рисунке 1.

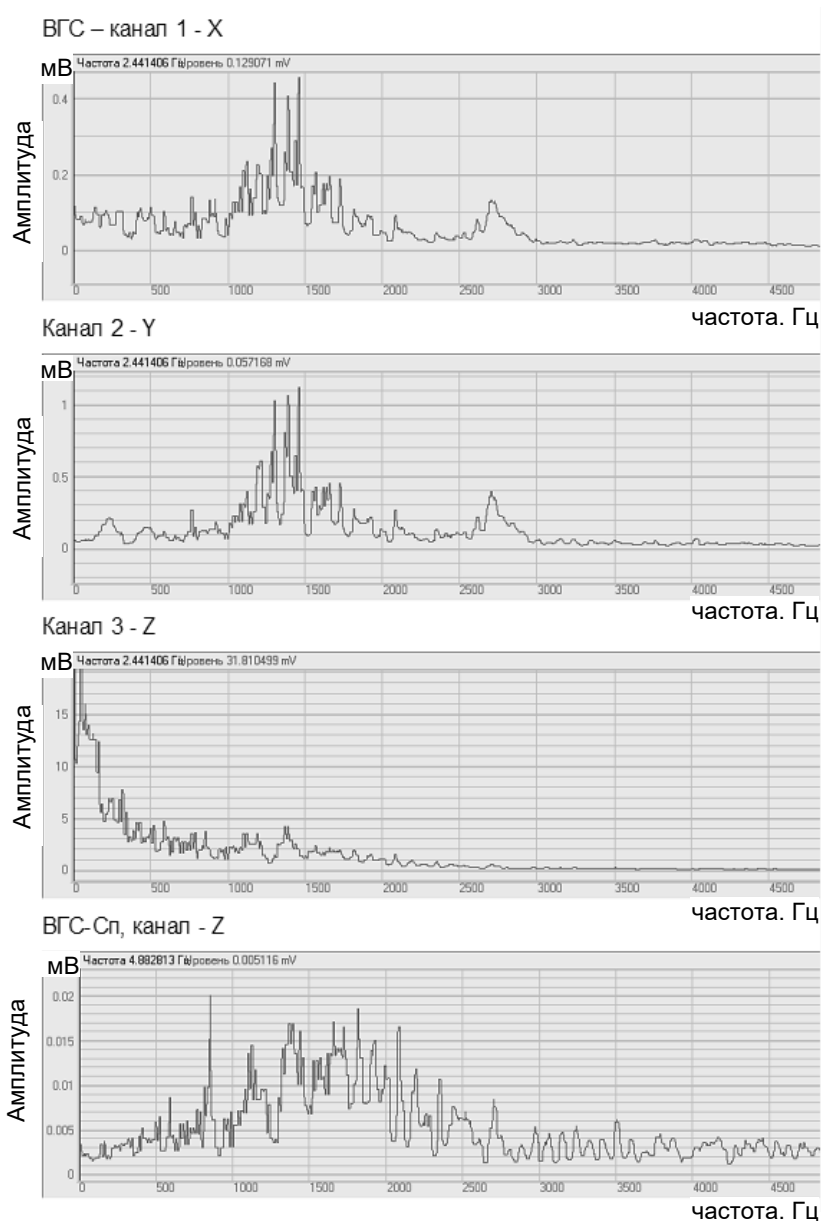


Рис. 1. Запись сейсмоакустических сигналов в Воротиловских скважинах ВГС (верхние три сейсмоакустограммы) и ВГС-Сп (нижняя сейсмоакустограмма) 15.08.2016 г., начало 10:28 МСК, $H_{ВГС} = 550 м$, $H_{ВГС-Сп} = 550 м$

На регистрограммах при тестовых испытаниях аппаратуры были обнаружены непродолжительные высокочастотные импульсы, которые ранее уже регистрировались в скважине в районе г. Уфы. Однако, если в Уфимской скважине такие импульсы регистрировались довольно редко (несколько импульсов в неделю, 1-2 в день), то в Воротиловской скважине число импульсов достигало нескольких сотен в секунду (рис. 2). Такое различие в счете может быть объяснено неодинаковостью геологических условий в обоих случаях.

Ливень кратковременных высокочастотных импульсных сигналов, зарегистрированных в скважине на Воротиловском полигоне предположительно, может быть инициирован источниками различной природы. Это могут быть внешние по отношению к Земле источники, теллурическое (земное) радиационное воздействие, высокочастотные электромагнитные поля, электрические машины. Не исключена

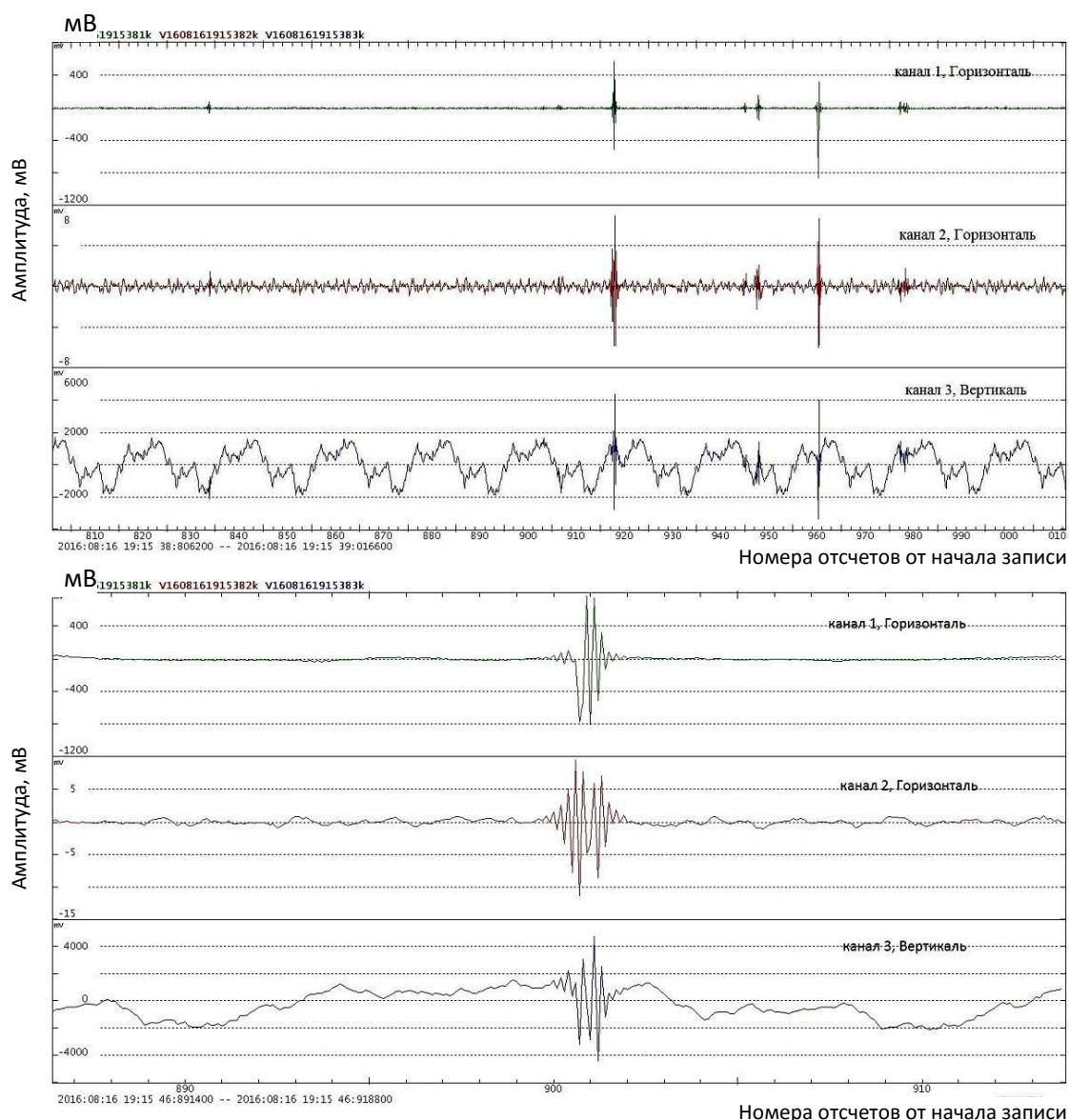


Рис. 2. Кратковременные высокочастотные импульсы, зарегистрированные в Воротиловской глубокой скважине: сверху ливневый цуг импульсов, внизу единичный импульс в увеличенном линейном масштабе

также возможность воздействия некоторых неопознанных техногенных источников («странные» источники). В пользу этого утверждения говорят следующие факты: похожие акустические импульсы (по характерной частоте и длительности) были зарегистрированы гидрофонами при погружении их на глубину более 1000 м. Зарегистрированные в воде и скважинах акустические сигналы идентифицированы как результат радиационного воздействия [Лямшев, 1992].

Высокая плотность потока импульсов, зарегистрированных в Воротиловской скважине, может быть объяснена целым рядом причин. В их числе: энергонасыщенность горных пород в окрестностях ВГС, присутствие воды, контрастность мозаичной иерархической структуры поля напряжений, существование малых концентраторов-трещин и пузырьков газа, их постоянным «дыханием», проявляющимся в сейсмоакустической и электромагнитной эмиссии. При подобных обстоятельствах чувствительность горных пород к внешним радиационным воздействиям оказывается особенно высокой. Следует отметить, что полученные результаты являются первыми в своем роде, именно потому, что наблюдения проводились в скважине, располагающейся в импактной структуре (астроблеме), характеризующейся аномально высокой сейсмоакустической активностью геологического материала, в котором скважина пройдена.

Заключение

Опыт изучения сейсмоакустических шумов в Воротиловских скважинах демонстрирует случай проведения эксперимента в особо сложных геологических условиях. В этом отношении выбор места для организации наблюдательного полигона имеет как положительные, так и отрицательные стороны. Сложность геологических условий, с которыми пришлось встретиться на Воротиловском выступе, может рассматриваться и как отрицательный фактор, поскольку геофизическая интерпретация в подобных условиях часто бывает неоднозначной. С другой стороны, и это можно считать своего рода плюсом, неоднородность, мозаичность и другие, указанные выше, особенности геологического строения Пучеж – Катунского кратера определяют высокую чувствительность геологической среды в данном месте к внешним и иным воздействиям, приводящим к изменению напряженного состояния горных пород. В этой связи следует сделать акцент и на том, что существует принципиальная возможность использования высокоточной и широкодиапазонной сейсмоакустической измерительной аппаратуры при решении инженерно-геофизических задач при строительстве и эксплуатации промышленных и энергетических объектов особой важности, а также при изучении не только эндогенных, но и экзогенных природных и техногенных геологических процессов.

Проникающее излучение разного происхождения: природное, связанное с ближним и дальним Космосом, электрическими процессами, происходящими в средней и верхней атмосфере, а также теллурическими процессами; техногенное, возникающее при работе радиотехнических систем, электрических агрегатов и др., может оказывать специфическое воздействие на горные породы, вызывая в них отклик в виде различающихся по амплитуде и частотам сейсмоакустических импульсов, что, как показывает опыт, зависит от метастабильного состояния геологической среды.

Результаты, полученные на Воротиловском полигоне, можно распространить на зоны геологических разломов, в пределах которых наблюдается развитая неоднородность, высокая проницаемость, геологическая активность и другие спец-

ифические особенности. Геологические и тектонические процессы в разломных зонах протекают значительно интенсивнее, чем в сравнительно однородных блоках земной коры. Сложность геологической среды, в свою очередь, определяет сложность происходящих в ней геофизических процессов. Поэтому возможно лишь грубое количественное описание геофизических процессов, корректирующее описание качественное. Что касается качественного описания геофизических процессов, происходящих в недрах планеты, а также процессов, определяемых космическим радиационным влиянием, здесь, несмотря на очевидный прогресс, мы находимся едва ли не в самом начале пути. Многие из наших представлений, в том числе касающиеся проникающих излучений и космических частиц, нуждаются в пересмотре и переосмыслении на основе достижений естественных наук в последние десятилетия. Достижения физики и химии, например, подтверждают основное положение физики Н. А. Козырева, свидетельствующее о том, что существует феномен «... дистанционного воздействия внешних необратимых процессов на состояние вещества сложных систем, вплоть до изменений свойств вещества и протекающих в нем явлений». Признание этого в определенной мере снимает многие «запреты» в естественных науках и открывает новые возможности развития фундаментальных и прикладных исследований.

Работа была выполнена в рамках программы РФФИ № 16-05-00276 «Исследование проявления теллурических и планетарных процессов в структуре высокочастотных микросейсм для задач мониторинга и прогноза опасных сейсмических событий».

Литература

1. Диденкулов И. Н., Малеханов А. И., Марышев А. П., Стромков А. А., Чернов В. В., Беляков А. С., Лавров В. С., Власов Ю. А., Гаврилов В. А. Сейсмоакустический мониторинг в Воротиловской глубокой скважине: Первые результаты и перспективы // Акустика неоднородных сред: Ежегодник РАО. Труды научной школы проф. С. А. Рыбака. Вып. 9. – Троицк: Изд. «Тривант», 2008. – С. 82-91.
2. Лямшев Л. Н. Радиационная акустика. УФН. – 1992. – Вып. 4. Т. 162. – С. 43-94.

DOI: 10.23671/VNC.2017.3.9501

SEISMIC AND ACOUSTIC MONITORING IN VOROTILOVSKAYA DEEP WELL: TECHNIQUE AND RESULTS

© 2017 A.S. Belyakov¹, Sc. Candidate (Phys.-Math.), I.N. Didenkulov², A.D. Zhigalin¹, Sc. Candidate (Geol.-Min.), V.S. Lavrov¹, A.I. Malekhanov², Sc. Candidate (Phys.-Math.), A.V. Nikolaev¹, Sc. Doctor (Phys.-Math.), prof.

¹Schmidt Institute of Physics of the Earth of the RAS, Russia, 123995, Moscow, Bolshaya Gruzinskaya Str., 10/1, e-mail: zhigalin.alek@yandex.ru;

²Institute of Applied Physics of the RAS, Russia, 603950, Nizhny Novgorod, Ul'yanov Str., 46, e-mail: din@appl.sci-nnov.ru

Observations of variations in seismic and acoustic noise of the Earth has shown the effectiveness of passive seismic monitoring in the study of endogenous geodynamic processes and their connection with the intensity of acoustic emission. In Vorotilovskaya deep well (Nizhny Novgorod region, Russia) recorded the «earth noise» in the frequency range from 1 Hz to 5 kHz. The noise of this kind is usually associated with the features of tectonics and petrophysical properties of rocks. In mid-August, 2017 extraordinary seismoacoustical signals were registered that are presumably associated with the interaction of highly energetic particles, in particular, neutrinos with the rocks or the possible influence of unidentified sources, including technogenic.

Keywords: seismic monitoring, Vorotilovskaya well, seismoacoustical emission, neutrino.

References

1. Didenkulov I.N., Malekhanov A.I., Maryshev A.P., Stromkov A.A., Chernov V.V., Belyakov A.S., Lavrov V.S., Vlasov Yu.A., Gavrilov V.A. Seismoakusticheskij monitoring v Vorotilovskoj glubokoj skvazhine: Pervye rezul'taty i perspektivy [Seismoacoustic monitoring in Vorotilovskaya deep drillhole: first results and perspectives]. *Akustika neodnorodnyh sred: Ezhegodnik Rossiyskogo akusticheskogo obshchestva*, 2008, Issue 9, pp. 82–91. (in Russian).
2. Lyamshev L.N. Radiacionnaya akustika [Radiation acoustics]. *Uspehi fizicheskikh nauk*, 1992, Issue 4, Vol. 162, pp. 43–94. (in Russian).