

УДК 532.516:532.526

DOI: 10.32326/1814-9146-2024-86-2-129-138

**АКУСТИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ
В СТВОЛЕ ГЛУБОКОЙ СКВАЖИНЫ,
ПОРОЖДАЕМЫЕ ЕГО УПРУГИМИ ДЕФОРМАЦИЯМИ
В ПОЛЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН УДАЛЕННОГО ИСТОЧНИКА***

© 2024 г. **Диденкулов И.Н.^{1,2}, Малеханов А.И.^{1,2}, Чернов В.В.²**

¹*Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Российская Федерация*

²*Институт прикладной физики имени А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород, Российская Федерация*

diniap@mail.ru

Поступила в редакцию 18.01.2024

Анализируются возможности оригинального подхода к построению распределенной системы сейсмического мониторинга на основе стационарной сейсмоакустической трассы распространения зондирующего сигнала. Такая стационарная трасса может быть образована мощным источником низкочастотных вибрационных колебаний, расположенным на земной поверхности, и удаленным от него на десятки (или более) километров пунктом регистрации сигналов. В качестве мощного вибрационного источника предлагается использовать агрегаты гидроэлектростанции, имеющие типичную массу в несколько сотен тонн и создающие в среде земных пород вибрационные сигналы с характерными частотами от единиц до одного-двух десятков герц (включая гармоники), а в качестве пункта регистрации – глубокую скважину, оснащенную необходимыми средствами измерений. Для регистрации низкочастотных продольных волн в толще окружающих скважину земных пород предлагается достаточно простой и эффективный метод, основанный на использовании протяженного ствола скважины как распределенной сейсмической антенны и микрофона, установленного на верхнем срезе скважины. Показано, что напряжения в поле продольной сейсмической волны, воздействуя на ствол скважины, вызывают изменение его диаметра, что приводит, в свою очередь, к возникновению колебаний столба заполняющей ствол жидкости на частотах сейсмических волн, генерируемых источником. Рассмотрена конкретная схема реализации обсуждаемого подхода на примере Нижегородской гидроэлектростанции и удаленной от нее на расстояние около 40 км Воротиловской глубокой скважины. Приведены количественные оценки и экспериментальные данные, демонстрирующие возможности использования соответствующей стационарной трассы.

* Теоретическая часть исследования выполнена в рамках реализации программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030» (проект ННГУ №Н-492-99), экспериментальная – в рамках госзадания ИПФ РАН (FFUF-2024-0035, FFUF-2024-0011).

Ключевые слова: стационарная трасса, гидроагрегаты, гидроэлектростанция, продольная сейсмическая волна, глубокая скважина, деформация ствола скважины, акустические волны в скважине.

Введение

Одним из способов получения достоверных сведений о строении земных недр является бурение скважин и изучение извлеченных из них образцов. Как правило, этому предшествует сеймопрофилирование, что в совокупности позволяет составить «портрет» земных недр на достаточно обширных территориях [1]. В сейсмически активных регионах специальные приборы, опущенные в скважины, используются для мониторинга изменчивости различных физико-химических параметров [2–6]. В ряде случаев такие измерения позволяют определить наличие активной фазы подготовки очага будущего землетрясения [7, 8].

Основным параметром, который свидетельствует о подготовке сильных сейсмических событий, является деформация среды в зоне очага под действием напряжений, обусловленных тектоническими процессами. Обычно размеры очагов сильных землетрясений составляют десятки–сотни километров, и для регистрации процессов подготовки землетрясений необходимо получение усредненных данных на соответствующих пространственных масштабах. Локальные скважинные измерения с этой точки зрения не всегда являются надежными. Более достоверную картину могут дать наблюдения на масштабах в десятки километров.

Деформация среды под действием напряжения приводит к изменению скорости и затухания упругих волн. Для регистрации этих изменений необходимо иметь трассу распространения волн, сопоставимую с масштабом зоны подготовки землетрясений. Такой подход – создание стационарных трасс – хорошо известен в акустике океана. Он использовался для решения задач акустической томографии мезомасштабных океанических неоднородностей и термометрии климатических изменений [9–13]. В первом случае речь идет о масштабах порядка нескольких десятков километров. В случае мониторинга климатических изменений протяженность стационарных трасс составляет несколько тысяч километров [11–13].

Для создания стационарных трасс в океане используются специальные излучатели на низких частотах, для которых затухание звука мало [12, 13]. В последние годы обсуждается также использование сигналов от периодически повторяющихся в сейсмически активных зонах землетрясений, звук от которых может попадать в океан и далее распространяться в водной толще (так называемая Т-фаза) [14]. Однако наиболее точных результатов, очевидно, можно достичь, если источник зондирующей волны будет высокостабильным.

Аналогичный подход по созданию стационарных трасс может быть применен и в геофизике для регистрации геодинамических процессов. В этом случае необходимо использовать очень низкие частоты, на которых затухание волн мало: от долей Гц до ~10 Гц. Ранее делались попытки создать соответствующие стабильные излучатели сейсмических волн большой мощности, которые представляют собой вертикально колеблющийся виброисточник массой в несколько десятков тонн в диапазоне частот ~5–15 Гц [15]. Но широкого распространения этот метод не получил. Было обращено внимание на то, что в ряде случаев для возбуждения сейсмоакустических волн можно использовать гидроагрегаты гидроэлектростанций (ГЭС), которые расположены в разных регионах страны, в том числе и в тектонически активных зонах [16]. Что

касается приемных систем, то оптимальным является их размещение в глубоких скважинах.

Настоящая статья посвящена теоретическому анализу стационарной сейсмоакустической трассы и результатам экспериментальных наблюдений на примере Нижегородской ГЭС и Воротиловской глубокой скважины (ВГС).

Гидроагрегаты ГЭС как источники упругих волн

В качестве источника упругих волн рассматривается Нижегородская ГЭС. Оценим возможную величину давления, создаваемого ее гидроагрегатами, на расстоянии 40 км, где расположена ВГС. Каждая гидротурбина Нижегородской ГЭС имеет четыре лопасти диаметром 9 м, на которые попеременно попадает поток воды, имеющий напор $h \approx 16$ м. Расход воды $Q \approx 500$ м³/с [17]. Частота вращения вала около 1 Гц. Таким образом, при повороте вала турбина испытывает силовое воздействие F со стороны воды с амплитудой

$$F = \rho Q v = \rho Q \sqrt{gh}, \quad (1)$$

где g – ускорение свободного падения, v – скорость потока воды. Оценка на основе формулы (1) показывает, что переменная сила, действующая на лопасти турбины, составляет порядка 5000 кН. Эта сила распределяется на площадь бетонного основания машинного зала, имеющего длину около 260 м. Поскольку турбина имеет четыре лопасти, частота основной гармоники вибраций составляет 4 Гц. Следует отметить, что силовое воздействие со стороны потока воды на лопасти турбины вызывает как вертикальные, так и горизонтальные вибрации.

Задача о сейсмических волнах, порождаемых силовым воздействием амплитудой F на круговую площадку радиусом a , рассматривалась в литературе [18–20]. Для случая $k_s a \sim 10$, где $k_s = \omega/c_s$ – волновое число для продольных волн, ω – круговая частота, c_s – скорость продольных волн, мощность W излучаемой продольной сейсмической волны можно оценить как [20]

$$W \approx \frac{0,2F^2}{\pi a^2 \rho_s c_s}, \quad (2)$$

где ρ_s – плотность грунта.

Интенсивность продольной волны в полупространстве убывает обратно пропорционально квадрату расстояния r без учета затухания [21, 22]:

$$I = \frac{W}{2\pi r^2}. \quad (3)$$

Интенсивность продольной волны связана с акустическим давлением в точке наблюдения [21, 22]:

$$I = \frac{P^2}{\rho_1 c_1}, \quad (4)$$

где ρ_1 и c_1 – соответственно плотность и скорость звука в консолидированных кристаллических породах вокруг скважины.

Используя выражения (2)–(4) при $c_s = 200$ м/с, $\rho_s = 2000$ кг/м³, $a \approx 30$ м, $c_1 = 5000$ м/с, $\rho_1 = 3000$ кг/м³ [1, 20], получим оценку величины амплитуды давления сейсмической волны на расстоянии $r \approx 36$ км от источника: $P \sim 3$ Па. Это достаточно

большая величина, которую можно зарегистрировать разными способами. С учетом диаграммы направленности, вытянутой в направлении на север, интенсивность излучения увеличивается кратно в отношении коэффициента концентрации B [21]:

$$B = \left(\frac{2\pi a}{\lambda} \right)^2,$$

где $\lambda = c_s/f$ – длина волны, f – частота волны. Для частоты основной гармоники вибраций $f = 4$ Гц амплитуда поля давления на скважине от одного гидроагрегата становится равной $P \sim 10$ Па, а с учетом некогерентного суммирования поля от 8 гидроагрегатов ГЭС $P \sim 30$ Па. На частоте четвертой гармоники лопастной частоты ($f = 16$ Гц) амплитуда поля составляет, соответственно, 40 и 120 Па.

Регистрация сигналов в скважине

ВГС глубиной 5374 м пробурена в конце 1980-х годов в центре Пучеж-Катунской импактной геологической структуры, представляющей собой локальное куполообразное поднятие коренных пород кристаллического фундамента Русской плиты, образовавшееся в результате падения крупного метеорита около 165 млн лет назад [1]. Высота центрального поднятия составляет около 1,6 км, а его основание имеет диаметр около 10 км. В результате глубина залегания кристаллических пород в месте расположения ВГС составляет около 400 м от поверхности, в отличие от остальной территории Русской плиты, где кристаллический фундамент начинается с глубины около 2 км [1]. ВГС является единственной на Русской плите скважиной, вскрывшей кристаллический фундамент по вертикали на глубину около 5 км [1].

В силу того, что ВГС обеспечивает доступ к кристаллическим породам, значительный интерес представляет изучение сигналов акустической эмиссии (САЭ), возникающих в результате различных процессов, в том числе и тектонических. На протяжении нескольких лет в ВГС проводилась регистрация САЭ с помощью уникальных широкополосных (полоса 2 кГц) скважинных геофонов [6] вплоть до глубин 3200 м [2]. Интерес к таким наблюдениям в значительной степени стимулировался аналогичными исследованиями на Камчатке, где были получены интересные результаты о связи изменчивости САЭ с развитием тектонических процессов перед сильными сейсмическими событиями [8].

Во время измерений САЭ в ВГС было обращено внимание на появление в спектрах сигналов слабых линий на характерных частотах, отвечающих лопастной и более высоким гармоникам вибраций плотины Нижегородской ГЭС [16]. Эти линии находились в полосе низкой чувствительности геофона, поэтому нами был предложен и апробирован альтернативный метод регистрации сейсмических волн, использующий глубокую скважину как распределенную антенну. В отличие от метода измерений с помощью геофона, установленного на определенной глубине, этот метод основан на преобразовании сейсмических волн, приходящих на скважину, в колебания водно-воздушного столба.

Заполненную водой скважину можно рассматривать как распределенную сейсмоакустическую приемную систему с мягкой границей сверху. Поскольку частоты сейсмических волн составляют не более двух десятков Гц, то соответствующие длины волн акустических колебаний в водной и в воздушной частях трубы-скважины много больше диаметра скважины. Кроме того, импеданс кристаллических пород вокруг скважин значительно больше импеданса воды. В первом приближении такую

систему можно рассматривать как трубу с жесткими боковыми стенками, в которой может распространяться только поршневая мода акустического поля [22]. В этом случае в верхней части трубы-волновода на границе вода–воздух реализуется минимум акустического давления и, соответственно, максимум амплитуды колебательной скорости. Акустические колебания водного столба могут генерироваться продольными сейсмическими волнами (P -волнами), вызывающими деформацию скважины.

В свою очередь, воздушную часть скважины от поверхности воды до среза трубы скважины можно рассматривать как трубу с жесткой нижней и почти свободной верхней границами. Акустические колебания воздушного столба могут генерироваться колебаниями границы раздела вода–воздух. Таким образом, помещая в водную часть скважины гидрофон или в воздушную часть скважины микрофон, можно зарегистрировать колебания давления, вызванные проходящими через ствол скважины сейсмическими P -волнами.

Рассмотрим этот метод подробнее. Если через ствол скважины проходит продольная сейсмическая волна, создающая напряжение (давление) P , то под действием этого дополнительного давления в квазистатическом приближении, когда длина волны λ и диаметр скважины d связаны соотношением $\lambda \gg d$, изменение диаметра скважины Δd имеет вид [23]:

$$\Delta d = -d \frac{1+\sigma}{E} P, \quad (5)$$

где σ – коэффициент Пуассона, E – модуль Юнга. В заполненной водой скважине изменение ее диаметра приведет к перемещению (вытеснению) столба воды. Рассмотрим отрезок скважины длиной l . При изменении ее диаметра на малую величину Δd изменение высоты Δl столба воды в этом отрезке составит

$$\delta = \frac{\Delta l}{l} = 2 \frac{\Delta d}{d} = 2 \frac{1+\sigma}{E} P. \quad (6)$$

Колебательное смещение столба воды в каждом сечении скважины под действием сейсмической волны приведет к возбуждению двух плоских акустических волн в скважине, уходящих вверх и вниз. Давление Δp в акустической волне связано с колебательной скоростью частиц u [22]:

$$\Delta p = \frac{1}{2} \rho c u, \quad (7)$$

где ρ – плотность воды, c – скорость звука в воде. Колебательная скорость частиц, порожденная отрезком скважины длиной l , связана со смещением Δl :

$$u = \frac{d(\Delta l)}{dt} = l \frac{d\delta}{dt}. \quad (8)$$

Волна, уходящая вверх, на границе раздела вода–воздух будет испытывать отражение. Волну, уходящую вниз, как правило, можно считать уходящей на бесконечность, так как в глубоких и сверхглубоких скважинах трение о неровности стенок приводит к сильному ослаблению волны. Полное акустическое поле p сформируется как интеграл по длине скважины L . Используя (6)–(8), получим:

$$p = \frac{1}{2} \rho c \int_0^L \left[\frac{d\delta(z)}{dt} \right] dz = \rho c \frac{1+\sigma}{E} \int_0^L \left[\frac{dP(z)}{dt} \right] dz. \quad (9)$$

Колебания границы раздела вода–воздух, которая обычно находится на глубине 10–20 м от поверхности земли, будет генерировать переменное давление в воздушной части скважины. Акустическое поле в водной или воздушной части скважины может быть зарегистрировано с помощью, соответственно, гидрофона или микрофона.

С учетом сделанной выше оценки для давления в продольной сейсмической волне в районе скважины ($P \sim 10$ Па для основной гармоники) и характерной длины скважины $L \approx 1000$ м, $\sigma \approx 0,2$, $E \approx 0,5 \cdot 10^{11}$ Па из выражения (9) получим оценку для амплитуды давления в плоской волне водяного столба скважины: $p \sim 10$ Па. Давление в воздушном слое определяется как давление в воде, умноженное на отношение акустических импедансов воздуха и воды, которое составляет $\approx 2 \cdot 10^{-4}$, что дает амплитуду давления порядка нескольких мПа. Для четвертой лопастной гармоники эти величины примерно в 16 раз больше. Такие величины давления могут быть надежно зарегистрированы современными гидрофонами и микрофонами.

В выполненных экспериментах измерительный микрофон типа МК 102 RFT устанавливался в верхней части воздушного столба скважины. После усиления сигналы вводились в компьютер с помощью звуковой карты. На рис. 1 приведен спектр вибраций плотины ГЭС на расстоянии 300 метров от машинного зала, в котором присутствуют дискретные компоненты на частотах, кратных основной лопастной частоте, самые сильные на частотах около 12 и 16 Гц.

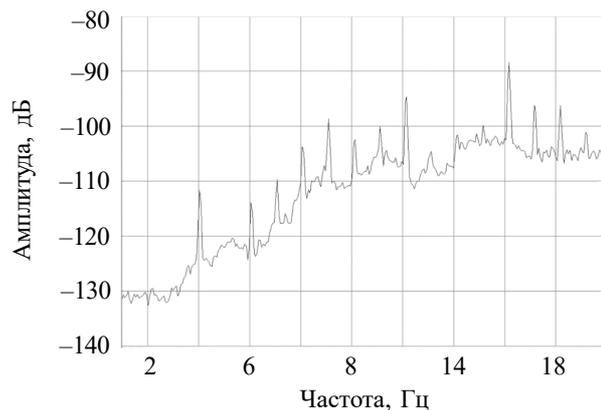


Рис. 1. Спектр вертикальной компоненты колебательной скорости вибраций плотины ГЭС

На рис. 2 показан спектр сигнала с микрофона, помещенного в воздушную часть скважины. Хорошо видна частотная компонента на частоте, чуть превышающей 16 Гц, точно совпадающая с одной из характерных частот спектра вибраций плотины. Хорошо видна также гармоника спектра на резонансной частоте воздушного столба 12 Гц (она может возбуждаться внешними воздушными источниками), которая «поглотила» полезную сейсмическую гармонику на частоте чуть выше 12 Гц. Появление гармоники на частоте около 2 Гц, скорее всего, обусловлено ветровым воздействием. Отсутствие в спектре других гармоник, зарегистрированных на теле плотины ГЭС, может быть связано с определенной пространственной фазировкой сейсмических волн, формируемых вибрационной «антенной», состоящей из 8 агрегатов ГЭС.

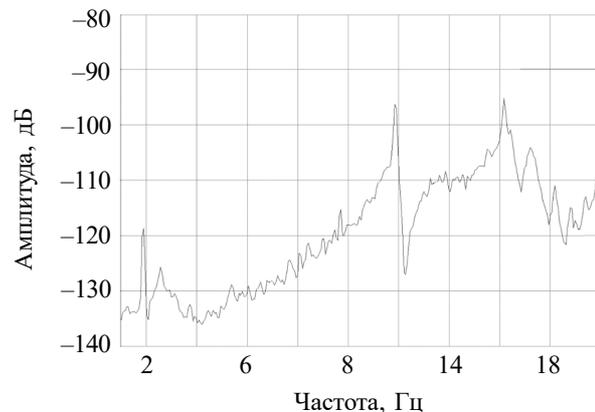


Рис. 2. Спектр сигнала, зарегистрированного в воздушном столбе ВГС

Заключение

Проведенный теоретический анализ и количественные оценки показали, что сейсмические волны от работы гидроагрегатов ГЭС могут регистрироваться в скважинах на значительных расстояниях, достигающих нескольких десятков километров. Этот вывод подтвержден экспериментально на примере стационарной трассы Нижегородская ГЭС–Воротилловская глубокая скважина. Предложен и теоретически обоснован метод регистрации сейсмических *P*-волн, основанный на генерации поршневой акустической моды в водном столбе скважины как распределенной сейсмической антенны.

Рассмотренный подход к созданию стационарных сейсмических трасс значительных размеров может быть реализован в сейсмоактивных районах, где работают мощные ГЭС. Регистрация сигналов может осуществляться как традиционным способом с помощью специализированных скважинных геофонов, так и более простыми инструментальными средствами на основе предложенного метода – с помощью гидрофонов и микрофонов.

Список литературы

1. Сазонова Л.В., Носова А.А. *Глубокое бурение в Пучеж-Катунской импактной структуре*. Под ред. В.Л. Масайтиса и Л.А. Певзнера. СПб.: ВСЕГЕИ, 1999. 392 с.
2. Belyakov A. Acoustic traces in the upper part of the Earth's crust. *International Journal of Geophysics and Geochemistry*. 2017. Vol. 4. No 5. P. 39–50.
3. Duma G., Ruzhin Y. Diurnal changes of earthquake activity and geomagnetic Sq-variations. *Natural Hazards and Earth System Science*. 2003. Vol. 3. Iss. 3-4. P. 171–177. DOI: 10.5194/nhess-3-171-2003.
4. Ulbrich U., Ahorner L., Ebel A. Statistical investigations on diurnal and annual periodicity and on tidal triggering of local earthquakes in Central Europe. *Journal of Geophysics*. 1987. Vol. 61. No 1. P. 150–157.
5. Nikolaev A.V., Belyakov A.S., Lavrov V.S., Zhigalin A.D. Geoacoustic monitoring as a means for investigating the state of the lithosphere and for earthquake forecasting. *Acoustical Physics*. 2005. Vol. 51. P. S122–S130. DOI: 10.1134/1.2133960.
6. Беляков А.С. Магнитоупругие сенсоры и геофоны для векторных измерений в геоакустике. *Акустический журнал*. 2005. Т. 51. №7. С. 53–65.
7. Utsu T. Statistical features of seismicity. In: *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology*. Eds. W.H.K. Lee, H. Kanamory, P. Jennings, C. Kisslinger. 2002. Vol. 81. Part A. Amsterdam: Elsevier, 2002. P. 719–732.

8. Гаврилов В.А., Дещеревский А.В., Власов Ю.А. и др. Сеть комплексных скважинных измерений Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона. *Сейсмические приборы*. 2021. Т. 57. №3. С. 52–78. DOI: 10.21455/si2021.3-5.
9. Munk W., Wunsch C. Ocean acoustic tomography: a scheme for large scale monitoring. *Deep Sea Research. Part A. Oceanographic Research Papers*. 1979. Vol. 26. Iss. 2. P. 123–161. DOI: 10.1016/0198-0149(79)90073-6.
10. Munk W.H. Acoustic thermometry of ocean climate. *Journal of the Acoustical Society of America*. 1996. Vol. 100. Iss. 4. P. 2564–2854. DOI: 10.1121/1.417516.
11. Mikhalevsky P.N., Gavrilov A.N., Baggeroer A.B. The transarctic acoustic propagation experiment and climate monitoring in the Arctic. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 1999. Vol. 24. Iss. 2. P. 183–201. DOI: 10.1109/48.757270.
12. Dushaw B.D., Howe B.M., Mercer J.A., Spindel R.C. et al. Multimegameter-range acoustic data obtained by bottom-mounted hydrophone arrays for measurement of ocean temperature. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 1999. Vol. 24. Iss. 2. P. 202–214. DOI: 10.1109/48.757271.
13. Mercer J.A., Colosi J.A., Howe B.M., Dzieciuch M.A., Stephen R., Worcester P.F. LOAPEX: The long-range ocean acoustic propagation experiment. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 2009. Vol. 34. Iss. 1. P. 1–11. DOI: 10.1109/JOE.2008.2010656.
14. Wenbo Wu, Zhongwen Zhan, Shirui Peng, Sidao Ni, Jörn Callies. Seismic ocean thermometry. *Science*. 2020. Vol. 369. Iss. 6510. P. 1510–1515. DOI: 10.1126/science.abb9519.
15. Соловьев В.М., Еманов А.Ф., Селезнев В.С., Еманов А.А., Корабельщиков Д.Г. Быстровский вибросейсмический полигон ФИЦ ЕГС РАН как уникальный объект для разработки и экспериментального опробования новых геофизических технологий. *Геодинамика и тектонофизика*. 2022. Т. 13. №2. С. 1–6. <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2-0592>.
16. Диденкулов И.Н., Малеханов А.И., Чернов В.В. О возможности геодинамического мониторинга на стационарной сейсмоакустической трассе с использованием сверхнизкочастотного вибрационного источника и скважинных измерений. *Сб. трудов XXXV сессии Российского акустического общества*, Москва, 13–17 фев. 2023 г. С. 85–90. DOI: 10.34756/GEOS.2023.17.38433.
17. Нижегородская ГЭС. <https://nizhges.rushydro.ru>.
18. Lerwill W.E. The amplitude and phase response of a seismic vibrator. *Geophysical Prospecting*. 1981. Vol. 29. Iss. 4. P. 503–528. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1981.tb00691.x>.
19. Sallas J.J. Seismic vibrator control and downgoing *P*-wave. *Geophysics*. 1984. Vol. 49. Iss. 6. P. 732–740. DOI: 10.1190/1.1441701.
20. Заславский Ю.М. *Излучение сейсмических волн вибрационными источниками*. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2007. 198 с.
21. Urlick R.J. *Principles of Underwater Sound*. New York: McGraw-Hill, 1975. 384 p.
22. Skudrzyk E. *The Foundation of Acoustics*. New York: Springer-Verlag, 1971. 790 p.
23. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. *Теория упругости*. М.: Наука, 1975. 576 с.

References

1. Sazonova L.V., Nosova A.A. *Glubokoe burenie v Puchezh-Katunskoy impaktnoy strukture [Deep Drilling in the Puchezh-Katunki Impact Structure]*. Eds. V.L. Masaytis and L.A. Pevzner. Saint Petersburg. VSEGEI Publ. 1999. 392 p. (In Russian).
2. Belyakov A. Acoustic traces in the upper part of the Earth's crust. *International Journal of Geophysics and Geochemistry*. 2017. Vol. 4. No 5. P. 39–50.
3. Duma G., Ruzhin Y. Diurnal changes of earthquake activity and geomagnetic Sq-variations. *Natural Hazards and Earth System Science*. 2003. Vol. 3. Iss. 3-4. P. 171–177. DOI: 10.5194/nhess-3-171-2003.
4. Ulbrich U., Ahorner L., Ebel A. Statistical investigations on diurnal and annual periodicity and on tidal triggering of local earthquakes in Central Europe. *Journal of Geophysics*. 1987. Vol. 61. No 1. P. 150–157.
5. Nikolaev A.V., Belyakov A.S., Lavrov V.S., Zhigalin A.D. Geoacoustic monitoring as a means for investigating the state of the lithosphere and for earthquake forecasting. *Acoustical Physics*. 2005. Vol. 51. P. S122–S130. DOI: 10.1134/1.2133960.

6. Belyakov A.S. Magnetoelastic sensors and geophones for vector measurements in geoacoustics. *Acoustical Physics*. 2005. Vol. 51. P. S43–S53.
7. Utsu T. Statistical features of seismicity. In: *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology*. Eds. W.H.K. Lee, H. Kanamory, P. Jennings, C. Kisslinger. Vol. 81. Part A. Amsterdam. Elsevier. 2002. P. 719–732.
8. Gavrilov V.A., Deshcherevskii A.V., Vlasov Y.A. et al. Network of multidisciplinary borehole measurements at the Petropavlovsk-Kamchatsky geodynamic testing area. *Seismic Instruments*. 2022. Vol. 58. No 2. P. 121–143. DOI: 10.3103/S0747923922020050.
9. Munk W., Wunsch C. Ocean acoustic tomography: a scheme for large scale monitoring. *Deep Sea Research. Part A. Oceanographic Research Papers*. 1979. Vol. 26. Iss. 2. P. 123–161. DOI: 10.1016/0198-0149(79)90073-6.
10. Munk W.H. Acoustic thermometry of ocean climate. *Journal of the Acoustical Society of America*. 1996. Vol. 100. Iss. 4. P. 2564–2854. DOI: 10.1121/1.417516.
11. Mikhalevsky P.N., Gavrilov A.N., Baggeroer A.B. The transarctic acoustic propagation experiment and climate monitoring in the Arctic. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 1999. Vol. 24. Iss. 2. P. 183–201. DOI: 10.1109/48.757270.
12. Dushaw B.D., Howe B.M., Mercer J.A., Spindel R.C. et al. Multimegahertz-range acoustic data obtained by bottom-mounted hydrophone arrays for measurement of ocean temperature. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 1999. Vol. 24. Iss. 2. P. 202–214. DOI: 10.1109/48.757271.
13. Mercer J.A., Colosi J.A., Howe B.M., Dzieciuch M.A., Stephen R., Worcester P.F. LOAPEX: The long-range ocean acoustic propagation experiment. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 2009. Vol. 34. Iss. 1. P. 1–11. DOI: 10.1109/JOE.2008.2010656.
14. Wenbo Wu, Zhongwen Zhan, Shirui Peng, Sidao Ni, Jörn Callies. Seismic ocean thermometry. *Science*. 2020. Vol. 369. Iss. 6510. P. 1510–1515. DOI: 10.1126/science.abb9519.
15. Solovyev V.M., Emanov A.F., Seleznev V.S., Emanov A.A., Korabelschikov D.G. Bystrovskiy vibroseismicheskiy poligon FITs EGS RAN kak unikalnyy obekt dlya razrabotki i eksperimentalnogo oprobvaniya novykh geofizicheskikh tekhnologiy [Bystrov vibroseismic landfill of the geophysical survey Federal Research Centre RAS as a unique facility for the development and experimental testing of new geophysical technologies]. *Geodinamika i tektonofizika [Geodynamics & Tektonophysics]*. 2022. Vol. 13. No 2. P. 1–6 (In Russian).
16. Didenkulov I.N., Malekhanov A.I., Chernov V.V. O vozmozhnosti geodinamicheskogo monitoringa na stacionarnoy seismoakusticheskoy trasse s ispolzovaniem sverkhnikochastotnogo vibratsionnogo istochnika i skvazhinnykh izmereniy [On the possibility of geodynamic monitoring on a stationary seismoacoustic path using an ultra-low-frequency vibration source and borehole measurements]. *Sbornik trudov XXXV sessii Rossiyskogo Akusticheskogo Obshchestva [Collection of Proceedings of the XXXV Session of the Russian Acoustical Society]*. Moscow, 13–17 Feb. 2023. P. 85–90 (In Russian).
17. *Nizhegorodskaya gidroelektrostantsiya [Nizhny Novgorod Hydroelectric Power Plant]* (In Russian).
18. Lerwill W.E. The amplitude and phase response of a seismic vibrator. *Geophysical Prospecting*. 1981. Vol. 29. Iss. 4. P. 503–528. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1981.tb00691.x>.
19. Sallas J.J. Seismic vibrator control and downgoing *P*-wave. *Geophysics*. 1984. Vol. 49. Iss. 6. P. 732–740. DOI: 10.1190/1.1441701.
20. Zaslavskiy Yu.M. *Izlučenje seismicheskikh voln vibratsionnymi istochnikami [Radiation of Seismic Waves by Vibration Sources]*. Nizhniy Novgorod. IPF RAN Publ. 2007. 198 p. (In Russian).
21. Urlick R.J. *Principles of Underwater Sound*. New York. McGraw-Hill. 1975. 384 p.
22. Skudrzyk E. *The Foundation of Acoustics*. New York. Springer-Verlag. 1971. 790 p.
23. Timoshenko S.P., Goodier J.N. *Theory of Elasticity*. New York. McGraw-Hill. 1970. 608 p.

**ACOUSTIC OSCILLATIONS IN A DEEP WELLBORE GENERATED
BY ITS ELASTIC DEFORMATIONS IN THE FIELD OF SEISMIC WAVES
FROM A REMOTE SOURCE***

Didenkulov I.N.^{1,2}, Malekhanov A.I.^{1,2}, Chernov V.V.²

¹*National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod,
Nizhny Novgorod, Russian Federation*

²*A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences,
Nizhny Novgorod, Russian Federation*

diniap@mail.ru

Received by the Editor 2024/01/18

This paper analyzes the possibilities of an original approach to constructing a distributed seismic monitoring system based on a stationary seismoacoustic propagation path of a sounding signal. Such a stationary path can be formed by a powerful source of low-frequency vibration oscillations located on the earth's surface, and a signal recording point located tens (or more) kilometers away from it. It is proposed to use hydroelectric power station units as a powerful vibration source, which have a typical mass of several hundred tons and create vibration signals in the environment of the earth's rocks with characteristic frequencies from a few to one to two tens of Hz (including harmonics), and as a registration point – deep well equipped with the necessary measuring instruments. To record low-frequency longitudinal waves in the thickness of the earth's rocks surrounding the well, a fairly simple and effective method is proposed, based on the use of an extended wellbore as a distributed seismic antenna and a microphone installed on the upper section of the well. The work shows that stresses in the field of a longitudinal seismic wave, acting on the wellbore, cause a change in its diameter, which in turn leads to the occurrence of oscillations of the column of liquid filling the wellbore at the frequencies of the seismic waves determined by the source. A specific scheme for implementing the discussed approach is considered using the example of the Nizhny Novgorod hydroelectric station and the Vorotilovskaya deep well located at a distance of about 40 km. Quantitative estimates and experimental data demonstrating the possibilities of using the corresponding stationary route are presented.

Keywords: stationary path, hydraulic units of hydroelectric power station, longitudinal seismic wave, deep well, wellbore deformation, acoustic waves in the well.

* The theoretical part of the study was carried out within the framework of the implementation of the strategic academic leadership program “Priority 2030” (UNN project No N-492-99), experimental – within the framework of the state task of the Institute of Applied Physics RAS (FFUF-2024-0035, FFUF-2024-0011).