



<https://doi.org/10.32454/0016-7762-2023-65-2-67-73>
УДК 550.8.052. 550.831.23. 550.812.14



ОПЫТ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНОЙ ОЦЕНКИ КОЛЕБАНИЯ ГРУНТОВ В ДИАПАЗОНЕ 0,05—0,5 Гц С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ГРАВИМЕТРА ГНУ-КВ

А.П. БЕЛОВ^{1,*}, А.М. ЛОБАНОВ¹, А.М. ЕРОХИН²

¹ ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе»
23, ул. Миклухо-Маклая, г. Москва 117997, Россия

² ООО «Петровайзер»
4, кор. 2, Макарова, г. Тверь 170002, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Чувствительный элемент отечественного гравиметра ГНУ-КВ представляет собой низкочастотный вертикальный сейсмограф Б.Б. Голицына, превосходящий по чувствительности к колебаниям грунтов современные промышленные сейсмографы типа СМ-ЗКВ, используемые на практике для регистрации вибрационных полей. Коллективом геофизиков МГРИ гравиметр ГНУ-КВ был адаптирован для работы в режиме портативной сейсмологической станции для регистрации естественных сейсмических колебаний в диапазоне частот 0,05—0,5 Гц. Учитывая эквивалентность гравитационного и инерциального поля, можно сказать, что опробованная технология позволяет не только обнаруживать низкочастотные колебания грунтов, но и оценивать возникающие при этом ускорения и амплитуды смещения грунтов для указанных частот.

Цель. Исследование возможности прибора ГНУ-КВ для регистрации и количественной оценки амплитуды колебания грунтов в мкм и в мГал.

Материалы и методы. Опробование метода определения аномальных участков повышенной вибрации грунтов путем регистрации с помощью гравиметра ГНУ-КВ колебаний грунтов в двух точках: в районе УЛК МГРИ и в районе РУДН вблизи тоннеля метро.

Результаты. В ходе исследования с целью определения амплитуды колебания грунтов в микрометрах и ускорения в $\text{см}/\text{с}^2 \times 10^{-3}$ (в мГал) был определен переводной коэффициент между результатами оцифрованного сигнала колебаний индикатора — маятника ГНУ-КВ и инерционными ускорениями в мГал.

Заключение. Проведенные исследования подтверждают возможности прибора ГНУ-КВ для количественной оценки физических параметров колебаний грунтов.

Ключевые слова: гравиметр ГНУ-КВ, амплитудно-частотная характеристика колебаний грунтов, техногенный микросейсмический фон, сейсмограф СМ-ЗКВ

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: исследование не имело спонсорской поддержки.

Для цитирования: Белов А.П., Лобанов А.М., Ерохин А.М. Опыт амплитудно-частотной оценки колебания грунтов в диапазоне 0,05—0,5 Гц с использованием чувствительного элемента гравиметра ГНУ-КВ. *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*. 2023;65(2):67—73. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2023-65-2-67-73>

Статья поступила в редакцию 31.10.2022

Принята к публикации 24.05.2023

Опубликована 25.05.2023

* Автор, ответственный за переписку

EXPERIENCE OF AMPLITUDE-FREQUENCY ESTIMATION OF GROUND VIBRATIONS IN THE RANGE OF 0,05–0,5 Hz USING THE SENSING ELEMENT OF THE GNU-KV GRAVIMETER

ALEXEY P. BELOV^{1,*}, ALEXANDER M. LOBANOV¹, ALEXANDR M. EROKHIN²

¹ *Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting
23, Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia*

² *“Petroviser”
4 bld. 2, Makarova str., Tver 170002, Russia*

ABSTRACT

Background. The responsive element of the GNU-KV Russian gravimeter comprises a Golitsyn low-frequency vertical seismograph, which outperforms modern industrial SM-3KV seismographs in terms of sensitivity to ground vibrations. A team of geophysicists at the Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting modified the construction of GNU-KV to adapt this device to work in the mode of a portable seismological station for recording natural seismic vibrations in the frequency range of 0.05–0.5 Hz. Given the equivalence of gravitational and inertial fields, the presented technology is capable of not only detecting low-frequency ground vibrations, but also estimating accelerations and amplitudes of ground displacement at these frequencies.

Aim. To investigate the capabilities of the GNU-KV gravimeter for recording and estimating the amplitude of ground vibrations in μm and mGal.

Materials and methods. The proposed method for determining the anomalous areas of increased ground vibration using a GNU-KV gravimeter was tested in two geographical sites: in the vicinity of the Educational and Laboratory Complex of Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting and in the area of the RUDN University near a subway tunnel.

Results. When determining the amplitude of ground vibrations in μm and their acceleration in mGal, the conversion coefficient for the results of a digital signal obtained by GNU-KV and inertial accelerations in mGal was determined.

Conclusion. The conducted studies confirm the capabilities of the GNU-KV gravimeter for the quantitative estimation of ground vibrations.

Keywords: GNU-KV gravimeter, amplitude-frequency characteristic, ground vibrations, technogenic microseismic background, SM-3KV seismograph

Conflict of interest. The authors declare that there is no conflict of interest.

Funding. The study had no sponsorship.

For citation: Belov A.P., Lobanov A.M., Erokhin A.M. Experience of amplitude-frequency estimation of ground vibrations in the range of 0,05–0,5 Hz using the sensing element of the GNU-KV gravimeter. *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*. 2023;65(2):67–73. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2023-65-2-67-73>

Manuscript received 31 October 2022

Accepted 24 May 2023

Published 25 May 2023

* Corresponding author

Твердая оболочка Земли постоянно испытывает собственные колебания в широком диапазоне частот, источниками которых являются природные и техногенные причины. Периоды, амплитуды, место и время существования этих колебаний, которые часто называют микросейсмическим фоном,

меняются в широких пределах [1, 2, 5]. В районах городских и промышленных застроек доминирующее влияние на характеристики колебаний земной поверхности оказывают техногенные источники: наземное и подземное движение транспорта, вибрация трубопроводов и тоннелей метро,

ветровые колебания зданий и др. Природные объекты в стадии промышленной разработки или эксплуатации (месторождения УВ, ПХГ) также генерируют широкий спектр колебаний земной поверхности [3, 4, 7].

Микросейсмические колебания по частотному составу можно приближенно разделить на три группы: высокочастотные — 30—100 Гц, среднечастотные — 10—30 Гц и низкочастотные — 3—10 Гц. Амплитудно-частотные спектры этих колебаний достаточно хорошо изучены, учитывая высокий уровень инерциальных ускорений, несмотря на очень малые амплитуды перемещения грунтов [3]. Основным инструментом таких исследований является вертикальный сейсмограф типа СМ-3КВ, представляющий собой вертикальную неастазированную пружину с катушкой индуктивности, перемещающейся относительно инертной массы и генерирующей электромагнитные колебания. Эти приборы успешно применяются для определения частотно-амплитудных и фазовых характеристик сейсмических колебаний в диапазоне 1—50 Гц [6]. В результате этих исследований определяется скорость сейсмических волн в диапазоне 0,01—100 мкм/с. Минимальная частота изучения микросейсмических колебаний ограничена пределом 2 Гц.

Колебания грунтов в диапазоне менее 1 Гц практически не изучены. Низкочастотные колебания имеют гораздо большие амплитуды по сравнению с равномоными высокочастотными колебаниями. Они распространяются на значительно большие расстояния, поскольку поглощение таких волн породами значительно меньше. Образование таких колебаний связано с динамическим состоянием крупных природных и промышленных объектов. К геологическим объектам, генерирующим подобные колебания, относятся тектонические структуры, залежи углеводородов, процессы отбора/закачки газа в подземных хранилищах газа (ПХГ), состояние конструктивных элементов тоннелей и др. Целью наших исследований является обоснование возможности использования чувствительного элемента гравиметра ГНУ-КВ для качественного и количественного изучения низкочастотных колебаний грунтов в диапазоне частот 0,05—0,5 Гц. Чувствительный элемент гравиметра представляет собой горизонтальный астазированный маятник в виде сейсмографа Б.Б. Голицына. Метод измерения приращений силы тяжести — компенсационный, с помощью измерительного микрометренного устройства и компенсационной пружины. Для регистрации колебаний грунтов окуляр гравиметра был

заменен на цифровой видеорегилятор (видеокамера), а маятник гравиметра был выведен в режим свободных колебаний, которые записывались и оцифровывались на компьютере. Собственная частота чувствительного элемента гравиметра ГНУ-КВ равна 0,1—0,2 Гц, т.е. почти такая же, как и у современных стационарных сейсмографов. Чувствительность гравиметра к инерциальным и гравитационным ускорениям — порядка 3—5 мкГал, что достаточно для записи инфранизких частот колебаний грунтов в диапазоне 0,05—0,5 Гц и оценки амплитуд смещения грунтов таких колебаний в мкм.

Благодаря измерительной компенсационной системе гравиметр, в отличие от сейсмографа, является не только индикатором изменения гравитации и инерции, но и измерительным инструментом этих ускорений. Измерительное компенсационное устройство характеризуется постоянной ценой деления оборота микрометренного винта, которое определяется путем эталонирования гравиметра на полигоне или в лаборатории на специальном стенде и может быть использовано для создания кажущихся ускорений для чувствительного элемента. Таким образом можно моделировать колебательные движения маятника при «внесении» в природный колебательный процесс различных амплитуд и колебаний в виде отдельных импульсов, ступенчатых сигналов или даже низкочастотных колебаний заданной частоты и амплитуды. Это необходимо для экспериментального определения переходной характеристики между входным и выходным сигналами и численного определения инерциальных ускорений и амплитуд входящих сигналов.

По общепринятой практике колебания грунтов аппроксимируют гармоническими функциями — синусоидой с периодом ω и амплитудой A :

$$Z = A \sin(\omega t),$$

ускорения колебаний для различных частот и амплитуд будут выражаться формулой:

$$d^2z/dt^2 = \omega^2 A \sin(\omega t).$$

Измеряя ускорение d^2z/dt^2 и частоту колебаний ω , можно вычислить амплитуду колебаний в микрометрах. Так, например, при $d^2z/dt^2 = 1,6$ мГал и $\omega = 0,2$ Гц максимальная амплитуда смещения волны будет равна 0,01 мм.

В настоящее время инерциальные и гравитационные ускорения в науке считаются эквивалентными. В гравиметрии чувствительность относительных статических гравиметров достигает 0,01 мкГал, что эквивалентно инерциальному

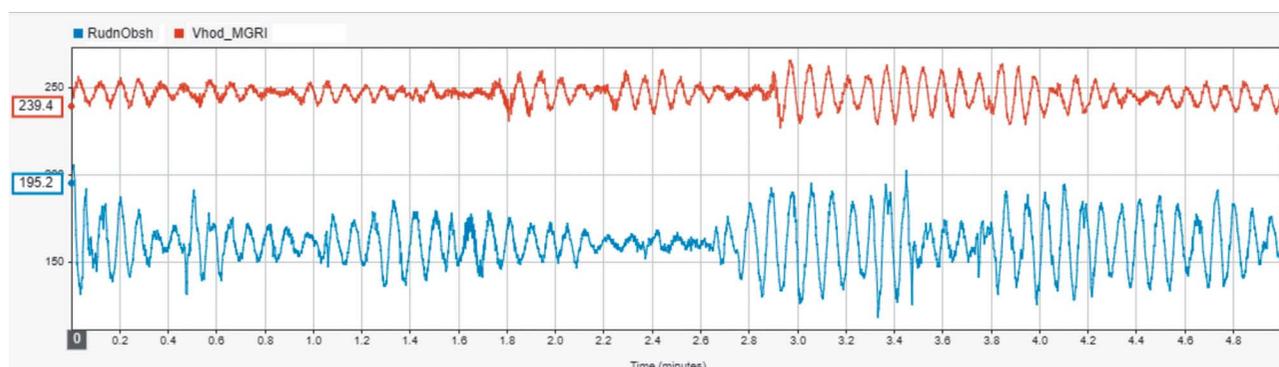


Рис. 1. График временного представления замеров на пунктах «РУДН» и «МГРИ»
Fig. 1. A graph of time representation of measurements at the points “RUDN” and “MGRI”

ускорению в $0,1 \text{ нм/с}^2$. Чувствительность системы отечественных гравиметров ГНУ-КВ гораздо ниже и составляет порядка 3—10 мкГал. Тем не менее эти приборы уверенно регистрируют низкочастотные колебания в указанном диапазоне и интенсивности частот. Пример такой регистрации представлен на рисунке 1.

Вследствие переходной характеристики чувствительного элемента гравиметра на входной сигнал, его фильтрационных характеристик, а также неизвестного направления суммарного вектора входящего сигнала его реакция на инерциальные ускорения подставки прибора будет несколько иной, то есть отклонения маятника не будут в точности совпадать с характером колебаний основания гравиметра, а будут доминировать амплитуды гармоник, совпадающие с его частотной характеристикой и с вертикальным фронтом волн. Вычислить теоретически значения переходной характеристики не представляется возможным, так как технические параметры чувствительного элемента нам точно не известны и направление фронта волн также неизвестно. Величину амплитуды инерциальных ускорений исследуемых частот можно оценить приближенно эмпирически путем масштабирования отчетов в единицах ускорений. Для оценки величины амплитуды отклонения маятника гравиметра в единицах ускорения можно использовать три способа:

- путем подачи на чувствительную систему калибровочного единичного импульса инерциального ускорения (а также ступенчатого импульса, калибровочного синусоидального сигнала заданной частоты и амплитуды);
- использовать нормальный вертикальный градиент силы тяжести;
- изменением наклона установки гравиметра;

Нами использованы первые два метода. В первом случае на чувствительную систему мы подавали заданный сигнал путем поворота микрометричного винта компенсационной пружины на 0,1 оборота (что соответствует амплитуде, равной 0,1 значения цены деления микрометричного устройства, примерно $\pm 0,6 \text{ мГал}$). Это будет калибровочный сигнал. Его можно выполнить как ступенчатый сигнал, как единичный импульс или как синусоидальный сигнал с периодом 5—10 с (в ручном исполнении). Анализируя записи регистрирующего гравиметра, мы оценили переводной коэффициент цифровых отсчетов в единицы ускорения.

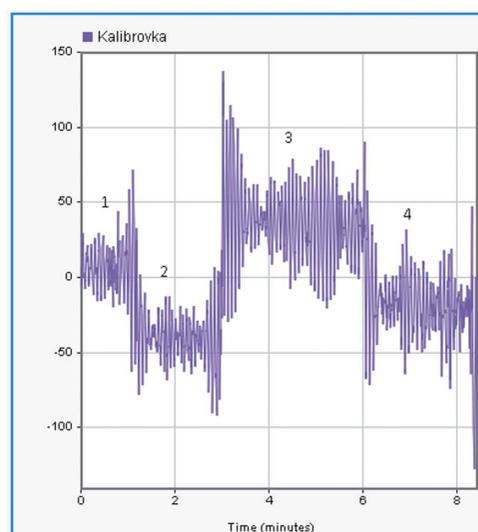


Рис. 2. График колебаний индикатора ГНУ-КВ при проведении эксперимента по калибровке. Числами 1—4 отмечены периоды с различным положением калибровочного винта
Fig. 2. A graph of fluctuations of the GNU-KV indicator during the calibration experiment. The numbers 1—4 indicate periods with different positions of the calibration screw

Для калибровки показаний гравиметра вторым способом мы проводили записи микросейсм на одной и той же точке, но на разных высотах, используя в качестве эталона изменения ускорения силы тяжести, нормальный вертикальный градиент силы тяжести, равный 0,3086 мГал/м. Расстояния между центрами интервалов записей, деленные на приращения калибровочного сигнала, дают представление о величине переводного коэффициента. Проводя описанные экспериментальные калибровочные работы, мы определили оценочную величину переводного коэффициента для программы компьютерной регистрации и обработки. Образцы регистраций и их спектры представлены на рисунках 2, 3.

Представленные спектры колебаний маятника гравиметра показывают, что АЧХ характеристика

при «наложении» калибровочного импульса не изменилась при калибровке.

Основными принципиальными отличиями предлагаемого метода (оцифровка колебания индикатора гравиметра типа ГНУ-КВ) по сравнению с используемыми в настоящее время сейсмографами являются:

- измерение колебаний грунтов в более низком частотном и амплитудном диапазонах, в границах 0,05—0,5 Гц. Как показывает практика, существующие методы ограничиваются частотами от 2 Гц;
- чувствительность гравиметра к низкочастотным колебаниям очень высокая и измеряется микрогалами (1—0,1) нм/с²;
- возможность моделирования колебаний инфранизкой частоты и разной амплитуды и оценки переходной характеристики датчика;

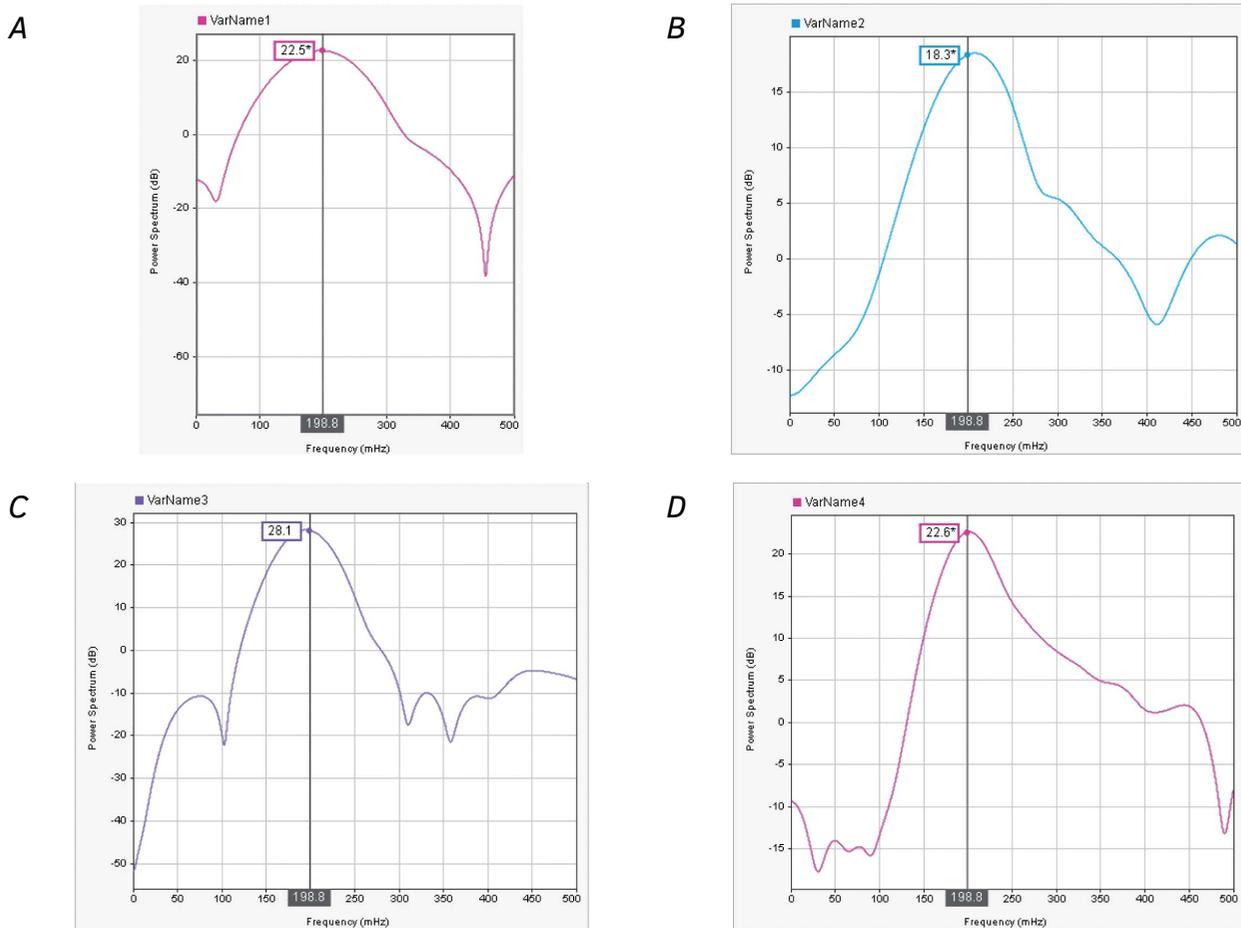


Рис. 3. Графики периодов колебаний индикатора ГНУ-КВ в частотной области: А — при положении калибровочного винта 0; В — при положении калибровочного винта -1; С — при положении калибровочного винта +2; D — при возврате калибровочного винта в положение ноль (исходное)

Fig. 3. Graphs of the periods of fluctuations of the GNU-KV indicator in the frequency domain: A — at the position of the calibration screw 0; B — at the position of the calibration screw -1; C — at the position of the calibration screw +2; D — when the calibration screw is returned to the zero (initial) position

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОИСКОВ И РАЗВЕДКИ / GEOPHYSICAL METHODS OF PROSPECTING AND EXPLORATION

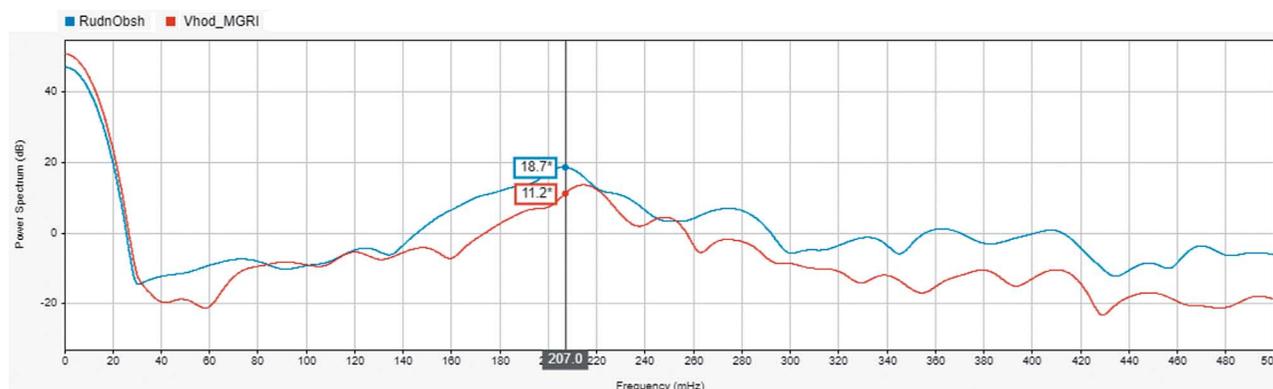


Рис. 4. Частотное представление замеров на пунктах «РУДН» и «МГРИ», где частота от 0 до 0,5 Гц
Fig. 4. Frequency representation of measurements at the points “RUDN” and «MGRI» where the frequency is from 0 to 0.5 Hz

- высокая точность нивелирования прибора, позволяющая более точно регистрировать колебания;
- возможность оценки амплитуды колебания грунтов в мГал.

Заключение

Результаты таких исследований могут быть использованы как для фундаментальных геофизических исследований низкочастотных колебаний земной коры при непрерывном мониторинге с целью изучения процессов подготовки механизмов разрушения динамических напряжений (про-

седания грунтов, оползней и др.), механизма подготовки землетрясений, так и для решения многих прикладных задач геологии и геофизики. В частности, для районирования и изучения динамически нестабильных природных объектов, в инженерной, проектной, экологической деятельности, исследовании строения месторождений УВ, выделении зон вертикальных плотностных контактов (разломов), выделения зон поглощения, при проектировании места заложения поисково-разведочных, эксплуатационных и нагнетательных скважин, оперативном контроле динамики добычи УВ сырья.

ЛИТЕРАТУРА

1. Буллен К.Е. Плотность Земли. // Под ред. В.Н. Жаркова. М.: Мир, 1978. С. 308—340.
2. Торге В. Гравиметрия // Под ред. А.П. Юзefовича. М.: Мир, 1999. С. 75—76.
3. Лобанов А.М., Романов В.В. Перспективы гравиметрии при изучении динамически нестабильных природных объектов // Разведка и охрана недр. 2015. № 7. С. 42—46.
4. Николаевский В.Н. Изменения сейсмических волн из-за присутствия газа в пластах // Геофизика. 2014. № 3. С. 14—20.
5. Лобанов А.М., Каххоров У.Х., Гарбацевич В.А. Опыт регистрации инфранизкочастотных гравиинерциальных колебаний. Троицк: ИЗМИРАН, 2012.
6. Бережной Д.В., Бирляцев Е.В., Бирляцева Т.Е., Кипоть В.Л., Рыжов В.А., Тумаков Д.Н., Храмченков М.Г. Анализ спектральных характеристик микросейсм как метод изучения структуры геологической среды. Казань: КГУ, 2008. С. 360—386.
7. Birkelo B., Duclos M., Artman B., Schechinger B., Witten B., Goertz A., Weemstra K., Hadidi M.T. A passive low-frequency seismic survey in Abu-Dhabi. SEG, Denver, 2010.

REFERENCES

1. Bullen K.E. Earth Density // Ed. by V.N. Zharkov. Moscow: Mir, 1978. P. 308—340 (In Russian).
2. Torge V. Gravimetry // Ed. by A.P. Yuzefovich. Moscow: Mir, 1999. P. 75—76 (In Russian).
3. Lobanov A.M., Romanov V.V. Prospects of gravimetry in the research of dynamically unstable natural objects // Exploration and protection of mineral resources. 2015. No. 7. P. 42—46 (In Russian).
4. Nikolaevsky V.N. Changes in seismic waves due to the presence of gas in formations // Geophysics. 2014. No. 3. P. 14—20 (In Russian).
5. Lobanov A.M., Kakhkhorov U.H., Gorbatshevich V.A. The experience of recording infra-low-frequency gravitational inertial oscillations. Troitsk: IZMIRAN, 2012 (In Russian).
6. Berezhnoy D.V., Biryaltsev E.V., Belyavtseva T.E., Kipot V.L., Ryzhov V.A., Tumakov D.N., Khramchenkov M.G. Analysis of spectral characteristics of microseisms as a method of studying the structure of the geological environment. Kazan: KSU. 2008. P. 360—386 (In Russian).
7. Birkelo B., Duclos M., Artman B., Schechinger B., Witten B., Goertz A., Weemstra K., Hadidi M.T. A passive low-frequency seismic survey in Abu-Dhabi. SEG, Denver, 2010.

ВКЛАД АВТОРОВ / AUTHOR CONTRIBUTIONS

Лобанов А.М. — внес основной вклад в разработку концепции статьи, сформулировал основные идеи описанного метода, подготовил текст статьи, окончательно утвердил публикуемую версию статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Белов А.П. — внес основной вклад в разработку концепции статьи, присоединился к подготовке текста статьи, окончательно утвердил публикуемую версию и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Ерохин А.М. — внес вклад в разработку концепции статьи, подобрал математический аппарат для обеспечения расчетов, указанных в статье, разработал программное обеспечение для проведения анализа исходных данных, обеспечил графическое представление данных, присоединился к подготовке текста статьи, окончательно утвердил публикуемую версию и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Alexander M. Lobanov — made the main contribution to the development of the concept of the article, formulated the main ideas of the described method, prepared the text of the article, finally approved the published version of the article and agreed to take responsibility for all aspects of the work.

Alexey P. Belov — made the main contribution to the development of the concept of the article, joined the preparation of the text of the article, finally approved the published version and agreed to take responsibility for all aspects of the work.

Alexander M. Erokhin — contributed to the development of the concept of the article, selected a mathematical apparatus to ensure the calculations specified in the article, developed software for analyzing the source data, provided a graphical representation of the data, joined the preparation of the text of the article, finally approved the published version and agreed to take responsibility for all aspects of the work.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Лобанов Александр Михайлович — кандидат технических наук, доцент ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе».
23, ул. Миклухо-Маклая, г. Москва 117997, Россия
e-mail: lobanovam@mgri.ru
тел.: +7 (495) 255-15-10, доб. 21-52
SPIN-код: 8713-9468

Alexander M. Lobanov — Cand. of Sci. (Tech.), Assoc. Prof. of the Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting.
23, Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia
e-mail: lobanovam@mgri.ru
tel.: +7 (495) 255-15-10, ext. 21-52
SPIN-code: 8713-9468

Белов Алексей Павлович* — кандидат геолого-минералогических наук, доцент ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе».
23, ул. Миклухо-Маклая, г. Москва 117997, Россия
e-mail: belovap@mgri.ru
тел.: +7 (495) 255-15-10, доб. 21-52

Alexey P. Belov* — Cand. of Sci. (Geol.-Min.), Assoc. Prof. of the Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting.
23, Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia
e-mail: belovap@mgri.ru
tel.: +7 (495) 255-15-10, ext. 21-52

Ерохин Александр Михайлович — руководитель экспертно-методической группы подразделения ИТ ООО «Петровайзер».
4, корп. 2, Макарова ул., г. Тверь 170002, Россия
e-mail: erokhin_am@petroviser.ru
тел.: + 7 (915) 724-82-76

Alexander M. Erokhin — Head of the Expert and Methodological Group of the IT department, “Petroviser” LLC.
4, bld. 2, Makarova str., Tver 170002, Russia
e-mail: erokhin_am@petroviser.ru
tel.: + 7 (915) 724-82-76

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author