

УДК 550.348.422

МОДУЛЯЦИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО МИКРОСЕЙСМИЧЕСКОГО ШУМА ПЛОТИНОЙ БУРЕЙСКОЙ ГЭС

Пупатенко В.В.

*Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, Хабаровск,
e-mail: pvv2.dv@gmail.com*

Воздействие водохранилищ и гидроэлектростанций (ГЭС) на состояние геологической среды не ограничивается изменением природной сейсмичности. ГЭС являются сильным, зачастую доминирующим источником микросейсмических колебаний на расстоянии до нескольких десятков километров. Однако плотины ГЭС могут работать ещё и как резонаторы, усиливая внешние сейсмические колебания, что приводит к усилению и искажению спектрального состава микросейсмических колебаний и записей землетрясений. В работе прослежены изменения амплитудно-частотного состава микросейсмического шума на шести станциях локальной сейсмологической сети Бурейской ГЭС. Показано, что микросейсмический шум преимущественно определяется плотинной и агрегатными ГЭС, на которые наложено влияние локальных факторов. Обнаружено, что высокочастотная составляющая микросейсмических колебаний существенно меняется со временем, и это изменение преимущественно связано с колебаниями уровня воды в водохранилище. Понижение уровня воды сопровождается ростом основной частоты, а после начала повышения уровня воды частота быстро возвращается к низким значениям. Рассчитан нормализованный коэффициент корреляции скорости изменения уровня воды и значений основной частоты, его значения составляют до -0.5 , фазовый сдвиг – порядка 8 суток. Наиболее вероятная причина корреляционной связи заключается в том, что частоты собственных колебаний, а следовательно, и резонансные частоты плотины ГЭС изменяются при изменении нагрузки на неё со стороны водохранилища. Это свидетельствует о том, что при сильном землетрясении колебания плотины ГЭС будут усиливать сейсмические волны землетрясения, а плотина будет являться фактором, повышающим сейсмическую опасность прилегающей территории. Обнаруженные эффекты могут также дополнить общепринятые подходы к мониторингу собственных частот плотин ГЭС.

Ключевые слова: Бурейская ГЭС, водохранилище, резонанс, собственные частоты, сейсмическая опасность

HIGH-FREQUENCY SEISMIC NOISE MODULATION BY THE DAM OF THE BUREYA HYDROELECTRIC POWER STATIONS

Pupatenko V.V.

*Yu.A. Kosygin Institute of Tectonics and Geophysics, Far Eastern Branch, RAS,
Khabarovsk, e-mail: pvv2.dv@gmail.com*

The impact of reservoirs and hydroelectric power stations (HPS) on the state of the geological media is not limited to changes in natural seismicity. HPS are a strong and often dominant source of microseisms at up to several tens of kilometers. However, HPS dams can also work as resonators, amplifying external seismic waves, which leads to an increase and distortion of the spectral composition of microseisms and earthquake records. In this paper we traced changes in the amplitude-frequency composition of seismic noise at six stations of the local seismological network of the Bureya HPS. We show that microseisms are mainly determined by the HPS units and dam, but also are influenced by local factors. We found that the high-frequency component of microseisms changes significantly over time and these changes are mainly associated with fluctuations of the water level in the reservoir. A decrease in the water level is accompanied by an increase in the fundamental frequency, and after the start of an increase in the water level, the frequency quickly returns to low values. The normalized correlation coefficients between the velocity of the water level and the fundamental frequency values are up to -0.5 , with the phase shift of about 8 days. The most probable reason for the correlation is that the frequencies of free oscillations, and, consequently, the resonance frequencies of the HPS dam change when the load on it from the reservoir changes. This indicates that during a strong earthquake, the oscillations of the dam of the HPS will amplify the seismic waves of the earthquake, and the dam will be a factor that increases the seismic hazard of the surrounded territory. The discovered effects can also complement the standard approaches to monitoring the natural frequencies of HPS dams.

Keywords: Bureya hydroelectric power stations, dam, resonance, natural frequencies, seismic hazard

Проектирование, строительство и эксплуатация особо ответственных сооружений должно учитывать, среди прочего, возможные сейсмические воздействия и сопутствующие им опасные геологические процессы. Большинство гидроэлектростанций (ГЭС) расположены в сейсмически активных регионах, поскольку для них необходимы горные реки одновременно с большим расходом воды и с большим перепадом высоты.

Обеспечение сейсмической безопасности ГЭС – сложная и многосторонняя проблема, поскольку ГЭС и водохранилище оказывают существенное воздействие на состоянии геологической среды. Наиболее типичное проявление этого воздействия – изменение природной сейсмичности [1; 2]. Сейсмическая активность прилегающих территорий может повышаться или понижаться, может происходить её упорядочение в пространстве и времени. Заполнение

водохранилища может стать триггером гонящегося сильного землетрясения [1].

Изменение природной сейсмичности – не единственный результат воздействия ГЭС на напряжённо-деформированное состояние геологической среды. Плотины ГЭС могут работать как резонаторы, усиливая сейсмические колебания, включая микросейсмический шум. Например, вынужденные колебания плотины ГЭС в штате Монтана (США) под действием сейсмических волн слабых локальных землетрясений оказались настолько сильными, что их успешно использовали для сейсмической томографии прилегающих территорий [3].

В работе [4] показано, как с изменением уровня воды в Чиркейском водохранилище связано изменение частот собственных колебаний плотины ГЭС. Ожидается, что учёт этого эффекта позволит выявлять гораздо меньшие по амплитуде изменения частот собственных колебаний, которые связаны с появлением и развитием дефектов конструкции плотины ГЭС. Аналогичным образом изменения вынужденных колебаний плотины ГЭС должны приводить к изменению интенсивности и частотного состава микросейсмического шума в окрестностях ГЭС, там, где ГЭС является доминирующим источником сейсмического шума.

В настоящей работе представлены результаты анализа изменения во времени высокочастотного микросейсмического шума на станциях локальной сейсмологической сети (ЛСС) Бурейской ГЭС. Как показали предыдущие исследования, существенное искажение спектрального состава микросейсмических колебаний и записей землетрясений под влиянием низкочастотного (2–3 Гц) виброизлучения агрегатов ГЭС и, предположительно, связанное с изменением физических свойств геологической среды, наблюдается на значительном удалении от плотины [5]. В настоящей работе показано наличие связи между основной частотой микросейсмических колебаний и уровнем воды в водохранилище. Высказано предположение о том, что плотина ГЭС является не только источником колебаний, но и «резонатором», усиливающим внешние воздействия от землетрясений.

Целью исследования является изучение вариаций во времени высокочастотного микросейсмического шума на станциях ЛСС Бурейской ГЭС, поиск и выделение их возможных причин.

Материалы и методы исследования

Бурейская ГЭС – северная и наиболее крупная часть Бурейского гидроузла. Бетонная плотина длиной 720 м и высотой 140 м обеспечивает полную ёмкость водохранилища 20 км³. Сезонные колебания уровня воды составляют около 20 м. На удалении 55 км от Бурейской ГЭС расположена Нижне-Бурейская ГЭС.

ЛСС Бурейской ГЭС состоит из шести сейсмических станций, оборудованных регистраторами REFTEK 130-01 и короткопериодными датчиками GS-1. В разные периоды времени одновременно работали от трёх до пяти сейсмостанций. Конфигурация сети позволяет регистрировать землетрясения с магнитудой около $M = 1$ в пределах сети и порядка $M = 2$ на удалениях до 200–250 км [6]. При этом детальные сейсмические наблюдения начались уже после заполнения водохранилища, это осложняет интерпретацию наблюдаемых особенностей как сейсмического процесса, так и микросейсмических колебаний.

Для анализа взяты все имеющиеся сейсмические записи за период с декабря 2010 г. по сентябрь 2018 г. Анализ микросейсмического шума проводился следующим образом. Рассчитывались ежеминутные спектры сейсмических записей (в диапазоне частот 1–40 Гц), которые затем усреднялись медианным фильтром с получением медианных 4-суточных спектров. Таким образом, было исключено влияние на спектр сейсмических колебаний землетрясений, а также минимизировано влияние внутрисуточных и других сравнительно быстрых вариаций интенсивности микросейсмических шумов природного и техногенного происхождения. В результате были получены двумерные частотно-временные зависимости интенсивности микросейсмического шума, которые визуализировались в виде диаграмм.

Дополнительно определялась частота с наиболее интенсивными микросейсмическими колебаниями в диапазоне 5–30 Гц (не включающем частоты около 2–3 Гц, на которых непосредственно происходит виброизлучение агрегатов ГЭС).

Результаты исследования и их обсуждение

По приведённой методике были рассчитаны вариации частотного состава микросейсмического шума для станций ЛСС Бурейской ГЭС. Несмотря на то что постаменты сейсмических датчиков на всех станциях

ЛСС установлены на скальный грунт, частотный состав микросейсмических колебаний и характер их вариаций во времени на разных сейсмостанциях принципиально различаются. Частотный состав микросейсмических колебаний и его вариации также принципиально различны на вертикальных и горизонтальных каналах сейсмических записей. Далее будут обсуждаться преимущественно результаты, касающиеся горизонтальных каналов, поскольку амплитуды микросейсмического шума на них более чем в два раза выше, чем на вертикальных.

Примеры полученных спектрально-временных диаграмм показаны на рис. 1 для станции РАУК и на рис. 2 для станции МКSH, в обоих случаях – для вертикальной и одной из горизонтальных компонент. Именно на этих станциях наиболее явно выделяются изменения частотного состава микросейсмических колебаний, а также минимальные дополнительные антропогенные помехи, не связанные с работой ГЭС.

Вертикальным серым линиям на низких частотах на рис. 1 и 2 соответствуют

периоды интенсивного сброса воды через водосбросы мимо турбин. В целом на станциях ЛСС преобладают частоты, которые непосредственно не излучаются агрегатами ГЭС, и их амплитуды во много раз выше амплитуд «традиционного» виброизлучения на частотах около 2–3 Гц. Это касается в том числе и самой близкой к плотине ГЭС продолжительно работающей станции, расположенной в п. Талакан. Вместе с тем, в отличие от низких частот, высокочастотное излучение непостоянно и по амплитуде, и по частоте. Меняются в том числе величины доминирующих частот – на десятки процентов на вертикальных компонентах и почти до двух раз на горизонтальных компонентах.

Изменение доминирующих частот колебаний носит сезонный характер с периодом около года, однако его характер не может быть объяснен локальными явлениями. Например, процессы промерзания и оттаивания грунта не совпадают по времени с временными интервалами повышения и понижения основной частоты колебаний.

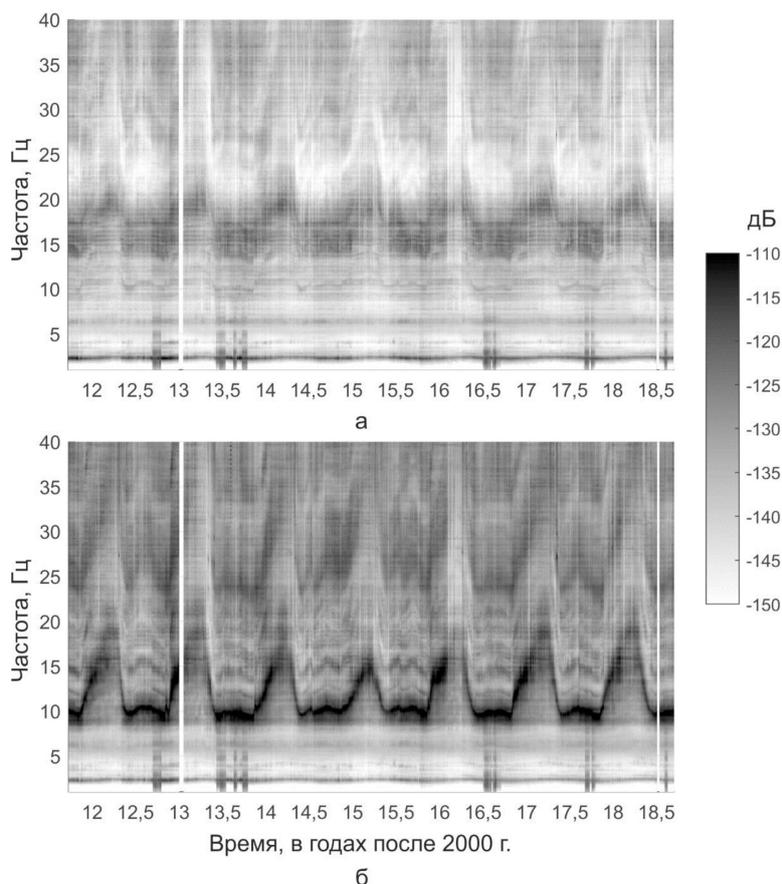


Рис. 1. Изменение интенсивности микросейсмического шума в дБ относительно $1 \text{ (м/с}^2\text{)}^2/\text{Гц}$ на станции РАУК: а – Z-компонента, б – Y-компонента

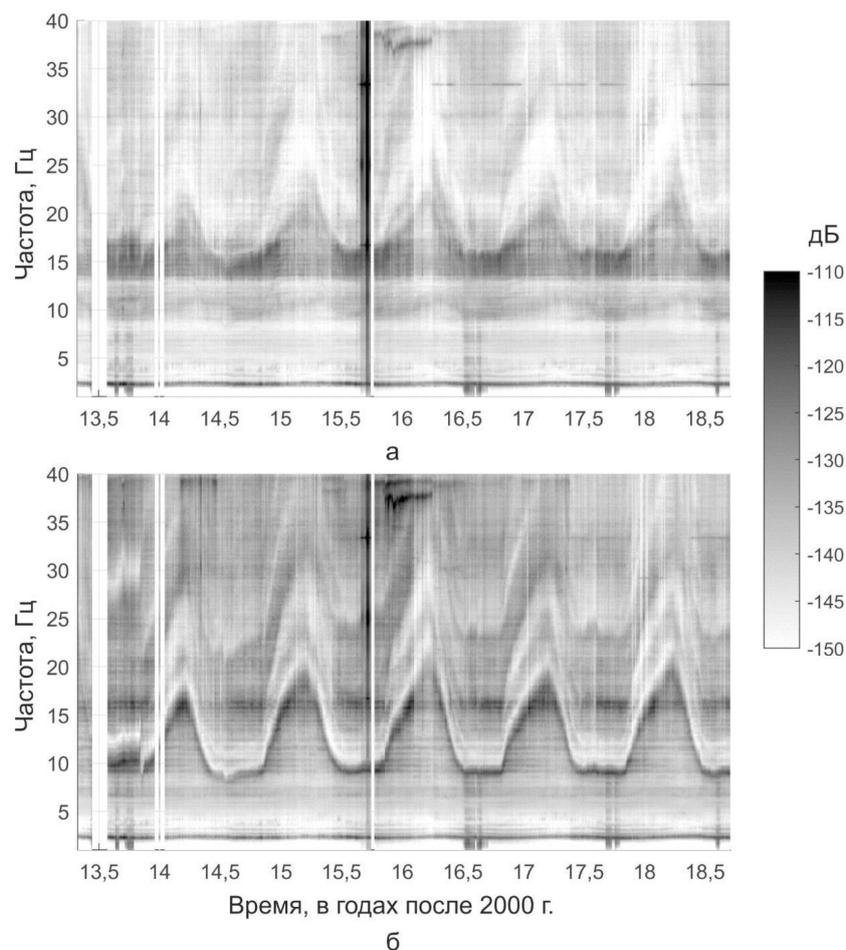


Рис. 2. Изменение интенсивности микросейсмического шума в дБ относительно $1 \text{ (м/с}^2\text{)}^2/\text{Гц}$ на станции MKSH: а – Z-компонента, б – X-компонента

Одной из возможных причин наблюдаемых изменений являются вариации уровня воды в водохранилище. На рис. 3 приведены графики изменения уровня воды в водохранилище и основной частоты высокочастотной составляющей микросейсмических колебаний на станции РАУК (по Y-компоненте). Понижение уровня воды сопровождается ростом основной частоты. После начала повышения уровня воды частота быстро возвращается к низким значениям.

Нормализованный коэффициент корреляции между скоростью изменения уровня воды в водохранилище и основной частотой горизонтальных составляющих высокочастотных микросейсмических колебаний составляет для станций СНГД и РАУК около $-0,5$, для остальных станций (ТЛК и MKSH) около $-0,3$. Для горизонтальных составляющих микросейсмических колеба-

ний корреляция слабее, но во всех случаях остаётся статистически значимой.

Невозможно однозначно утверждать, что наблюдаемая корреляция носит причинно-следственный характер. Теоретически её причиной может быть другое явление, связанное с низкими температурами, замерзанием или оттаиванием почвы, появлением ледяного покрова на водохранилище. В отсутствие подробных метеорологических наблюдений и их тщательного анализа невозможно подтвердить или опровергнуть такую возможность, однако против неё говорит несовпадение периодов увеличения и уменьшения основной частоты и метеорологических процессов, в то время как фазовый сдвиг между скоростью изменения уровня воды в водохранилище и основной частотой высокочастотных микросейсмических колебаний (на горизонтальных составляющих) невелик и составляет порядка 8 суток.

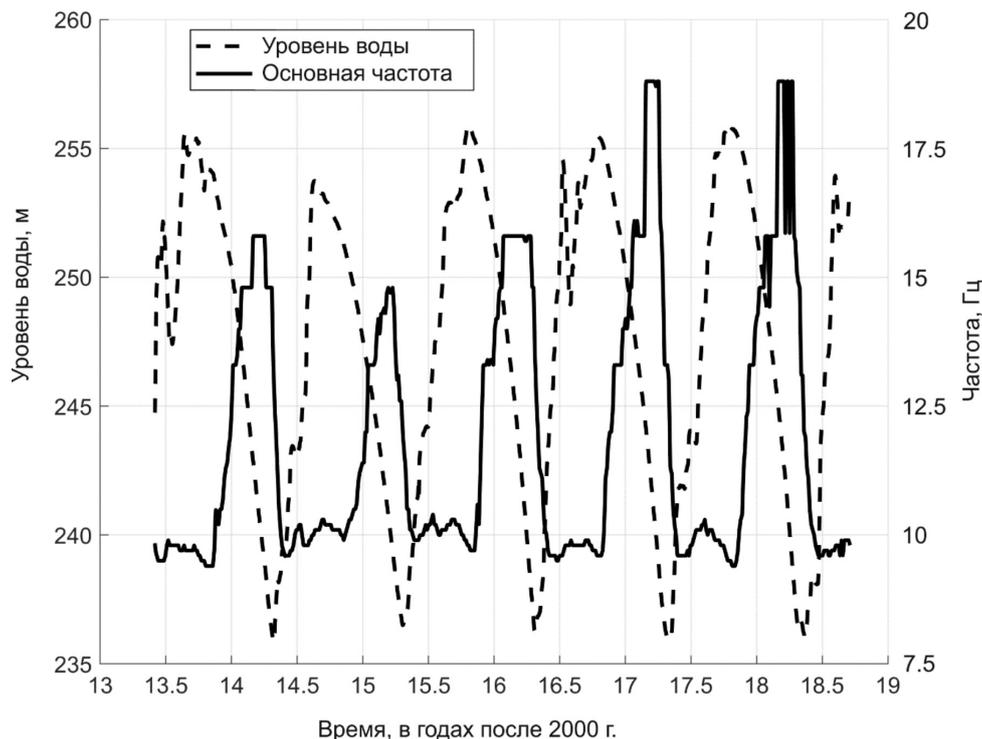


Рис. 3. Уровень воды в водохранилище и основная частота высокочастотной составляющей микросейсмических колебаний на станции РАУК (Y-компонента)

Таким образом, наиболее вероятная причина наблюдаемой корреляции уровня воды в водохранилище и частотного состава высокочастотных микросейсмических шумов состоит в том, что наблюдаемый микросейсмический шум – следствие вынужденных колебаний плотины ГЭС. В этом случае изменение уровня воды в водохранилище приводит к изменению нагрузки на плотину. Перераспределение напряжений в теле плотины приводит к изменению частот собственных колебаний плотины.

Наблюдаемые различия в частотах микросейсмических колебаний на разных станциях ЛСС могут быть следствием различий геологического строения в области сейсмических станций и на пути распространения микросейсмических колебаний.

Заключение

Основной полученный в работе результат заключается в обнаружении корреляционной связи между скоростью изменения уровня воды в водохранилище и частотным составом высокочастотного сейсмического шума на станциях ЛСС Бурейской ГЭС. Наиболее вероятная причина этой связи кроется в том, что дополнительная нагрузка

ка на плотину со стороны водохранилища меняет частоты её собственных колебаний, а следовательно, и резонансные частоты.

Похожие искажения частотного состава колебаний регистрируются также и при локальных и региональных землетрясениях [5]; установлено, что эти искажения не связаны с аномалиями затухания сейсмических волн [7]. Если плотина Бурейской ГЭС действительно способна усиливать сейсмические волны землетрясений, то это является фактором, существенно повышающим сейсмическую опасность для прилегающей территории (п. Талакан), а не только для самой плотины, которая проектируется по существенно более жёстким нормам. Понимание причин и механизмов обнаруженных явлений может быть также полезным при оценке состояния плотины ГЭС, дополнив традиционный мониторинг частот собственных колебаний.

Исследования выполнены в рамках государственного задания Института тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН и при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских учёных – кандидатов наук (№ МК-306.2020.5).

Список литературы / References

1. Simpson D.W., Stachnik J.C., Negmatoullaev S.K. Rate of Change in Lake Level and Its Impact on Reservoir Triggered Seismicity. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2018. Vol. 108. No. 5B. P. 2943–2954. DOI: 10.1785/0120180026.
2. Barros L.V., Assumpção M., Ribotta L.C., Ferreira V.M., de Carvalho J.M., Bowen B.M., Albuquerque D.F. Reservoir-Triggered Seismicity in Brazil: Statistical Characteristics in a Midplate Environment. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2018. Vol. 108. No. 5B. P. 3046–3061. DOI: 10.1785/0120170364.
3. O’Connell D.R.H. Concrete dams as seismic imaging sources. *Geophysical Research Letters*. 2007. Vol. 34. No. 20. L20307. DOI: 10.1029/2007GL031219.
4. Лисейкин А.В., Селезнев В.С., Адилев З.А., Ting-Yu Hsu, Arygianni V. Особенности мониторинга собственных частот плотин гидроэлектростанций (на примере Чиркейской ГЭС) // *Российский сейсмологический журнал*. 2019. Т. 1. № 1. С. 23–34. DOI: 10.35540/2686-7907.2019.1.02.
5. Лисейкин А.В., Селезнев В.С., Адилев З.А., Ting-Yu Hsu, Arygianni V. Features of the monitoring of natural frequencies of hydro power plant dams (on the example of the Chirkey dam) // *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal*. 2019. Vol. 1. No. 1. P. 23–34 (in Russian).
6. Трофименко С.В., Рябинкин К.С., Пупатенко В.В., Колотова Л.Г., Харитонов М.Е. Динамика геосреды по спектральной плотности мощности микросейсм до и после землетрясений // *Тихоокеанская геология*. 2017. № 5. С. 20–28.
7. Трофименко С.В., Рябинкин К.С., Пупатенко В.В., Колотова Л.Г., Харитонов М.Е. Dynamics of geophysical medium from power spectral density of microseisms before and after earthquakes: case study of Bureya massif, Amur region // *Tikhookeanskaya geologiya*. 2017. No. 5. P. 20–28. DOI: 10.1134/S1819714017050062.
8. Харитонов М.Е., Гильманова Г.З. Эффекты наведенной сейсмичности вблизи Бурейской ГЭС // *Геодинамические процессы и природные катастрофы. Опыт Нефтегорска: Всероссийская научная конференция с международным участием (г. Южно-Сахалинск, 26–30 мая 2015 г.)*. Владивосток: Дальнаука, 2015. Т. 1. С. 218–221.
9. Харитонов М.Е., Гильманова Г.З. The effects of induced seismicity near the Bureya hydropower station // *Geodinamicheskie processy i prirodnye katastrofy. Opyt Neftegorsk: Vserossiyskaya nauchno-prakticheskaya konferenciya s mezhdunarodnym uchastiem (g. Yuzhno-Sakhalinsk, 26–30 maya 2015 g.)*. Vladivostok: Dal’nauka, 2015. Vol. 1. P. 218–221 (in Russian).
10. Пупатенко В.В., Рябинкин К.С. Затухание сейсмических колебаний в районе Бурейской ГЭС и его связь с резонансными эффектами // *Успехи современного естествознания*. 2018. № 10. С. 108–113. DOI: 10.17513/use.36891.
11. Пупатенко В.В., Рябинкин К.С. Seismic wave attenuation near the Bureya hydropower station and its connection with the resonance effects // *Uspekhi sovremenogo yestestvoznaniya*. 2018. No. 10. P. 108–113 (in Russian).