

СЕЙСМОМЕТРИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ НА ТОКТОГУЛЬСКОЙ ГЭС: ИСТОРИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ

В.И.Довгань – ст. науч. сотр., менеджер

History and prospects of seismic survey of Toktogul hydroelectric power station are reviewed.

Инженерно-сейсмологические наблюдения в бассейне р. Нарын в ее среднем и нижнем течении начались еще в 1957 г. для оценки сейсмической опасности для створов проектируемых плотин – Атбашинской, Казарманской, Токтогульской и др. Исследования проводили Таджикская комплексно-сейсмологическая экспедиция ИФЗ АН СССР совместно с отделом сейсмологии Института геологии АН Киргизской ССР.

В период возведения Токтогульской гидроэлектростанции и в первые годы ее эксплуатации задачи исследований заключались в изучении колебаний бортов каньона и напряженного состояния среды. В 1974 г. при заполнении водохранилища начались работы, связанные с проявлением возбужденной сейсмичности [1]. В 1978 г. в рамках советско-американских работ по прогнозу землетрясений к изучению сейсмичности района водохранилища Токтогульской ГЭС были привлечены сотрудники Ламонт-Дохерти обсерватории Колумбийского университета США [2].

Непосредственно к плотине относились исследования, проводимые на Токтогуле Всесоюзным проектно-изыскательским и научно-исследовательским Институтом “Гидропроект” в 1971–1980 гг. [3], основной целью которых было изучение воздействия на плотину и ее скальное основание сильных землетрясений и гидростатической нагрузки, а также в контроле за состоянием плотины и в конечном итоге – обеспечении безопасности эксплуатации сооружения. В 1980 г. на участке

Токтогульской плотины действовали 7 автономных пунктов, из них 5 – в теле плотины (3 – на абсолютной отметке 880 м; 2 – на отметках 825 и 785 м) и 2 – в цементных штольнях правого и левого берегов ущелья на отметке 825 м. Один пункт располагался на рыхлых аллювиальных отложениях в нижнем бьефе плотины на расстоянии 1,5 км от створа (пункт “Лаборатория”). В оборудование каждого автономного пункта наблюдений входили электропитание, датчики и регистры. Использование автономных пунктов наблюдений было связано с отсутствием ниш для приборов и единой коммуникации. Такая схема наблюдений создавала трудности в эксплуатации и не обеспечивала синхронность включения регистров – одно из важнейших условий проведения наблюдений. Приборы были настроены на записи ощутимых землетрясений и нижний порог срабатывания составил 2 балла. В результате такого режима за весь период инженерно-сейсмометрических наблюдений непосредственно на плотине было зарегистрировано всего 7 землетрясений. Полученных данных было недостаточно для оценки сейсмостойкости самой плотины и основные результаты “Гидропроекта” за этот период связаны с модельными исследованиями.

В течение последнего десятилетия система сейсмического мониторинга плотины и прилегающего массива практически отсутствовала, только небольшая техническая группа выполняла и продолжает выполнять регулярные натурные измерения согласно

стандартным инструкциям. Такие инструкции были созданы в Советском Союзе для гидроэлектростанций Волги, рек Сибири, Средней Азии и т.д. В результате собраны данные инструментальных натуральных измерений на Токтогульской плотине и бортах каньона за период с 1993 по 2003 гг.: напряжения в плотине; смещения скальных берегов плотины; фильтрационные расходы в водосливах; пьезометрические уровни в основании русловой части плотины и по берегам; осадки по маркам в дренажной галерее и по реперам за плотиной; показания скальных деформометров в основании и в берегах; показания щелемеров; уровни водохранилища и среднемесячная температура воздуха.

С момента запуска ГЭС прошло около 30 лет. Высокая сейсмичность района, влияние микроклимата, повышенной влажности, наличие фильтрации, сезонные воздействия и пр. оказали свое негативное влияние на сооружение. Серьёзным испытанием для гидроэлектростанции явилось Суусамырское землетрясение 19 августа 1992 г. с интенсивностью в эпицентре более 9 баллов ($M=7.3$), произошедшее на расстоянии 90 км от плотины. Воздействие этого толчка на плотину было ослаблено до 6 баллов благодаря экранирующему действию глубинного Таласо-Ферганского разлома.

В настоящее время выполняется работа по возобновлению прерванных сейсмометрических исследований непосредственно на плотине. Основная цель этих исследований – оценка технического состояния Токтогульской плотины и последующий мониторинг на основании записей микросейсм и землетрясений. Воздействие микросейсм естественной и техногенной природы вызывает вынужденные колебания на частотах, которые определяются собственными формами колебаний сооружения. Динамические параметры колебаний являются функциями частоты и координат точек объекта. Под воздействием землетрясений происходит изменение свойств подстилающего грунта и самого сооружения, что в дальнейшем вызовет изменение параметров колебаний сооружения. Изменение

параметров во времени и будет служить критерием оценки физического состояния сооружения [4].

Исходной базой для изучения сейсмостойкости плотины будут сейсмометрические наблюдения, проводимые в 9 стационарных точках на разных уровнях сооружения. Один сейсмодатчик установлен в коренных породах ущелья на расстоянии 1000 м от плотины. Выбор расположения точек наблюдений обусловлен конструкцией самой плотины, которая состоит из трех крупных секций: правобережной, левобережной и центральной. Центральная секция отделена от боковых деформационными швами. Каждая боковая секция, в свою очередь, состоит из трёх блоков, которые соединены деформационными швами. В каждой из боковых секций в разных блоках установлено по два сейсмодатчика на высотах 825 м и 880 м. Следует предположить, что максимальным внешним воздействиям может подвергаться центральная секция. Там расположены 3 точки наблюдений на высотах 744, 825 и 880 м. По одному сейсмодатчику предполагается установить в скальном массиве правого и левого берегов каньона на высоте 825 м. Данные измерений в этих точках позволят оценить уровень колебаний береговых примыканий. Десятая точка, расположенная “на выносе”, вне гидроузла, будет являться опорной и позволит судить о реакции самой плотины на сейсмические воздействия.

Опыт проведения сейсмологических наблюдений на Токтогуле показал, что установка на плотине приборов для записей сильных движений (с порогом срабатывания в 2 балла) не позволяет оперативно получить необходимую информацию для выполнения исследований по сейсмостойкости. Задача первого этапа заключается в регистрации микросейсм и несильных толчков. Она определила и выбор приборов для наблюдений на плотине. Частотный диапазон аппаратуры должен учитывать частотный состав микросейсм и землетрясений в пределах порядка 200 км, а также значения собственных частот колебаний плотины. В работе [3] приведен анализ записей двух слабых местных землетрясений, которые произошли на

расстоянии около 1 км от створа Токтогульской плотины. Для этих записей характерно наложение на несущие колебания с частотой 3–5 Гц необычно высокочастотных составляющих от 25 до 50 Гц для одного землетрясения и от 40 до 80 Гц – для другого. Длительность записей не превышала 3 с. Колебания зарегистрированных на плотине удаленных землетрясений (с очагами на расстояниях около 200 км) более низкочастотны и укладываются в диапазон частот 0.5–12 Гц, считающихся опасными для сооружения в целом. Более высокочастотные колебания могут быть опасны для отдельных его частей. Интересен также тот факт, что землетрясения, записанные в пункте “Лаборатория” вне плотины, имеют амплитуды колебаний, в 2–3 раза превышающие амплитуды колебаний на самой плотине.

В качестве сейсмоприемников будут использоваться сейсмометры СМ-3 со стандартной полосой пропускания от 0.5 до 100 Гц. Частотная характеристика этих сейсмометров расширена от 0.1 до 200 Гц за счет использования методики калибровки датчиков. Использование сейсмометров СМ-3 должно обеспечить качественную регистрацию микросейсм и землетрясений с интенсивностью в точке наблюдения до 3 баллов.

На основании записей микросейсм и землетрясений будут получены амплитуды колебаний различных частей плотины с учетом ее конструкции, частоты и формы собственных колебаний плотины, спектральный состав колебаний в каждой точке, изменения спектров во времени и в пространстве и т.д.

Микроколебания плотины на собственных частотах и формах вызваны микросейсмическим фоном естественного и техногенного происхождения. Основными техногенными источниками колебаний плотины являются работающие гидроагрегаты, водоводы, водосборы и т.д. Влияние на плотину этих факторов и предстоит выяснить. Как показал обзор публикаций, предстоит выяснить также зависимость высокочастотного сейсмического шума от

экзогенных факторов (ветер, температура, антропогенное воздействие), влияние на уровень шума земных приливов, оценить влияние на динамические параметры направления подхода сейсмических волн от разных очаговых зон. Контроль за изменением собственных частот и форм колебаний плотины позволит судить о ее физическом состоянии.

Мы провели эксперимент, используя переносной сейсмометр СМ-3, и получили записи шума вдоль и поперек течения в тех точках, в которых планируется установка стационарных приборов. Для увеличения надежности эксперимента каждая составляющая дублировалась 5 раз. Длительность анализируемого участка записи в 10 с рассчитана на анализ микросейсм и близких землетрясений. Удаленные землетрясения, даже сильные, не окажут серьезного влияния на плотину. Для каждой точки и каждой составляющей получена осредненная запись с учетом амплитудно-частотной характеристики прибора. Далее для каждой составляющей (для пяти дублей) рассчитывались амплитудные спектры Фурье и находились их средние значения.

Предварительные результаты анализа записей шума на плотине сейсмометром СМ-3 показали, что рабочий диапазон частот выбран правильно. Достаточно высокий уровень амплитуд шума наблюдается на частотах до 120–160 Гц, при этом максимальная его часть – в диапазоне частот от 40 до 60 Гц. Максимумов в спектрах шума на низких частотах в точках, расположенных непосредственно на плотине, не обнаружено. При этом для большинства из них характерна резонансная частота 44.4 Гц. Для четырех точек появляется также резонанс на частоте 50 Гц. Пики, но не столь резко выраженные, присутствуют и на других частотах. Наличие пиков в спектрах микросейсмических колебаний отмечалось в публикациях [5,6 и др.], особенно вблизи частот $F_k = 50/k$, где $k = 1, 2, 3, \dots$. Возникновение гармонических компонент на этих частотах связывают с вибрацией, создаваемой мощными генераторами электростанций.

На рис. 1 дан пример спектра Фурье, полученного на основе записи шума в центре плотины на высоте 880 м поперек течения.

В точке “на выносе” максимум спектра Фурье приходится на неожиданно низкую

частоту, близкую к 0.1 Гц. Максимумы, но с меньшими амплитудами, появляются на частотах 50 и 88.8 Гц (рис. 2).

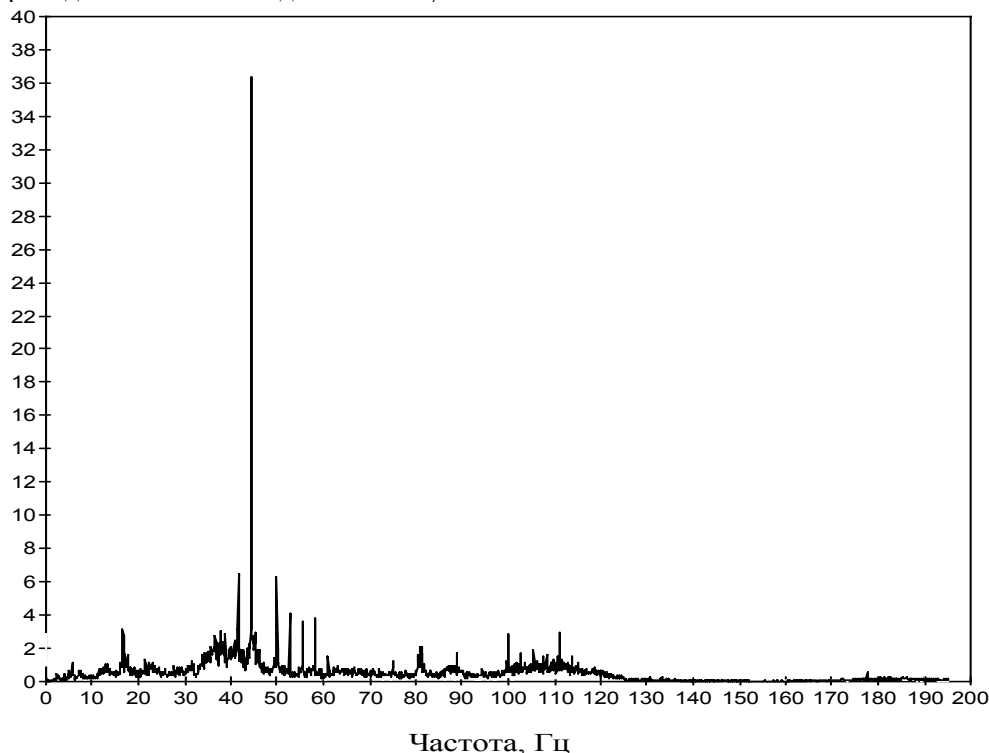


Рис. 1. Амплитудный спектр записи шума в центре плотины на высоте 880 м поперек течения.

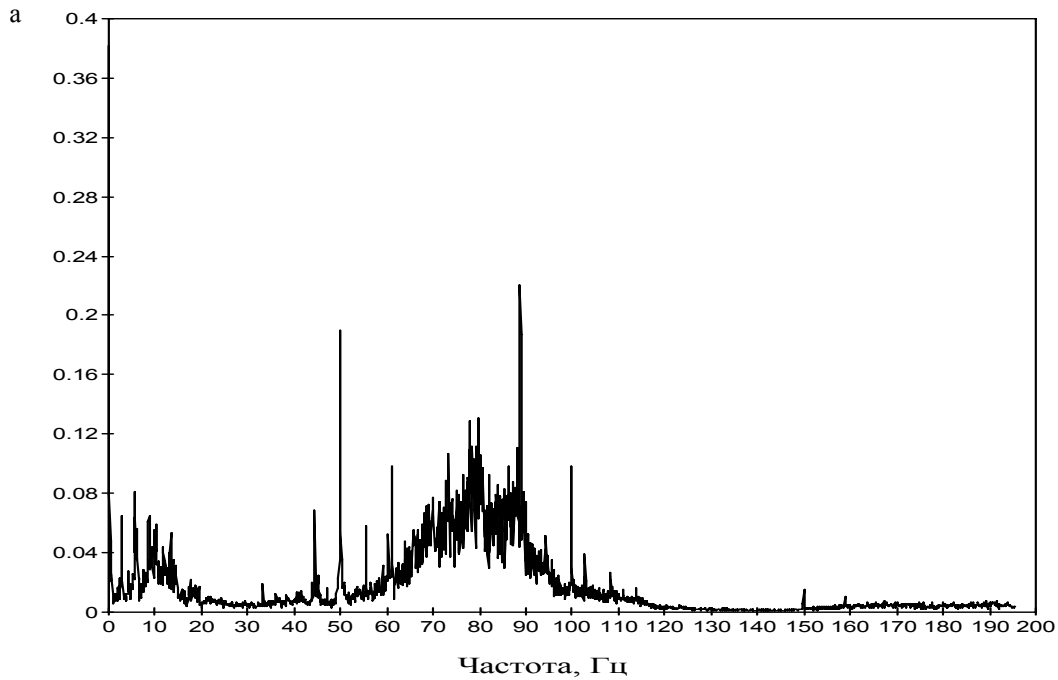
В точках правого и левого берегов каньона, так же как и в точке “на выносе”, появляются значительные максимумы на низкой частоте 0.1 Гц. Максимумы спектров левого борта каньона как по X-, так и по Y-составляющей примерно в 5 раз превышают максимальные спектральные амплитуды правого борта на этой частоте. На частоте 44.4 Гц это различие в величине спектральных амплитуд тоже существует, но не так велико. О том, что амплитуды горизонтальных колебаний левого борта, как правило, выше, отмечено также в работе [3], за исключением тех случаев, когда сейсмическая волна подходит со стороны правого борта. В этих случаях наблюдается некоторое уменьшение амплитуд при прохождении волны к левому борту на фоне влияния локальных

особенностей его строения, которые вызывают относительное усиление колебаний.

Анализ зависимостей спектральных амплитуд на частоте 44.4 Гц от высоты расположения точек для левой стороны плотины, правой и центра вдоль и поперек течения (рис. 3) показал, что максимальные спектральные амплитуды по обоим составляющим наблюдаются в центре плотины на высоте 880 м. При этом резонансная амплитуда по Y-составляющей на этой высоте больше, чем по X. По X-составляющей спектральные амплитуды в левой части плотины и левого борта каньона на всех трех высотах больше, чем амплитуды в правой части плотины. По Y-составляющей картина иная. На высоте 825 м резонансные амплитуды для правой, левой сторон и центра

близки. Для высоты 880 м амплитуда на левой стороне плотины ниже, чем на правой, и на высоте 905 м она принимает максимальное значение как по X-, так и по Y-составляющей. Общий характер зависимостей существенно не меняется, если мы построим эти графики не

для конкретной частоты 44.4 Гц, а для максимальной амплитуды независимо от того, на какой частоте она появилась. Уровень помех в точке вне плотины примерно на два порядка меньше, чем на самой плотине.



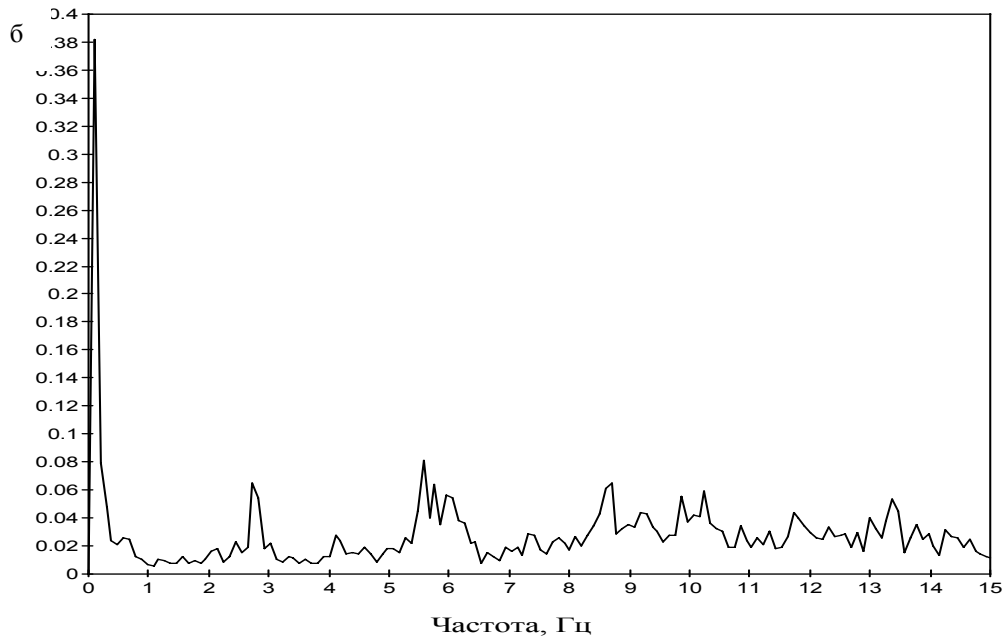
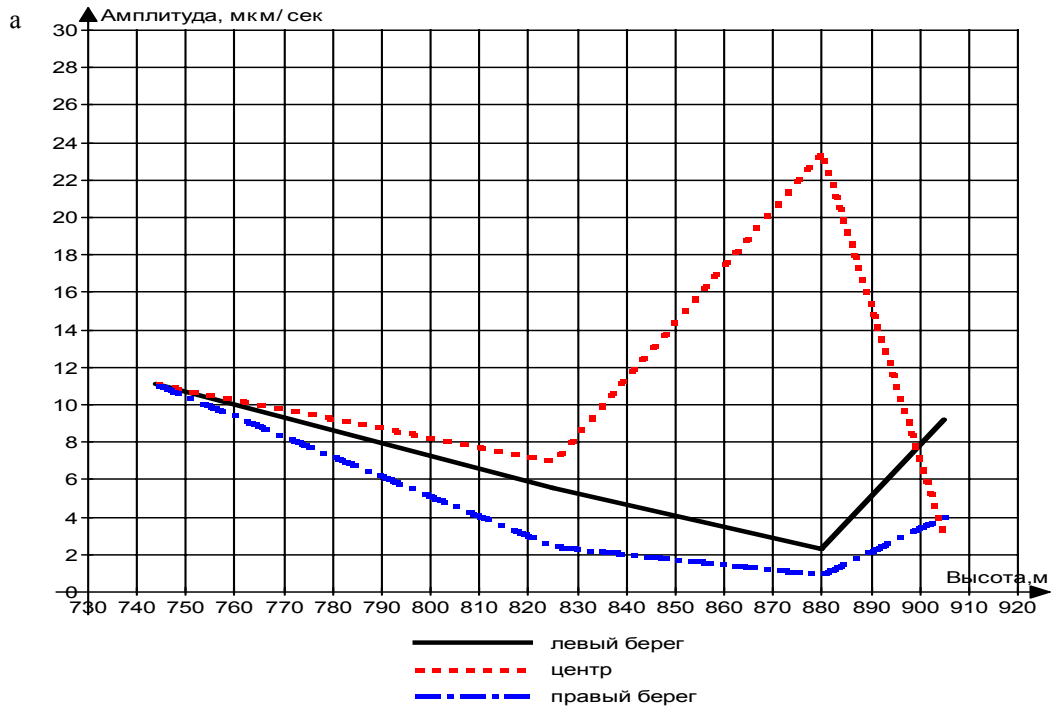


Рис. 2. Амплитудный спектр записи шума в точке “на выносе”:
а – в диапазоне частот от 0 до 200 Гц; б – в диапазоне частот от 0 до 15 Гц.



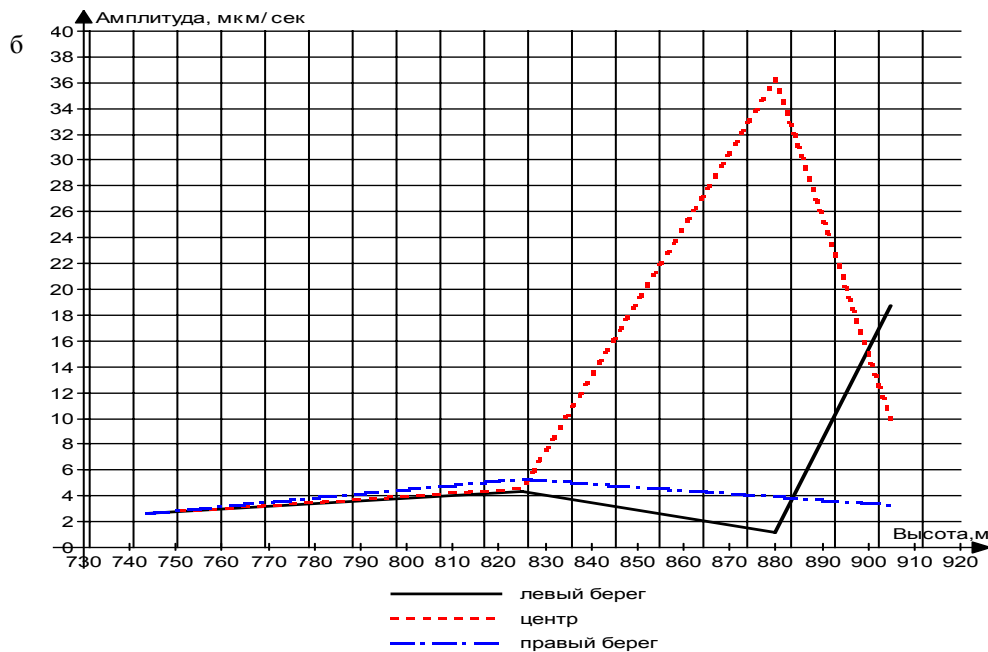


Рис. 3. Зависимости амплитуд спектров шума на частоте 44.4 от высоты:
а – вдоль течения (составляющая X); б – поперек течения (составляющая Y).

Работа выполняется при поддержке гранта МНТЦ KR-547.2.

Литература

1. Шукин Ю.К. Методика оценки сейсмической опасности гидротехнических сооружений. – М.: Наука, 1990. – 138 с.
2. [Simpson D.W.](#), [Hamburger M.W.](#), [Pavlov V.D.](#), [Nersesov I.L.](#) Tectonics and seismicity of the Toktogul reservoir region, Kyrgyz // USSR Journal of Geophysical Research. – 1981. – Vol. 86. – Issue B1. – P. 345–358.
3. Результаты инженерно-сейсмометрических наблюдений на участке створа Токтогульской ГЭС по состоянию на 1980 г. // Отчет Всесоюзного проектно-изыскательского и научно-исследовательского Института “Гидропроект”. Фонды Института. – М., 1980. – 58 с.
4. Еманов А.Ф., Селезнев В.С. и др. Детальные инженерно-сейсмологические исследования зданий и сооружений // Методы изучения, строение и мониторинг литосферы: Материалы к международным конференциям. – Новосибирск: Изд-во СО РАН НИЦ ОИГГМ, 1998. – С. 61–72.
5. Боярский З.А., Афанасьева Л.В. Влияние регулярных микросейсм на измерения абсолютным гравиметром // Физика Земли. – 1998. – № 12. – С. 15–21.
6. Яковлев А.П., Алешин В.А. Исследование монохроматических компонент в высокочастотном сейсмическом шуме // Физика Земли. – 1994. – № 3. – С. 3–19.