

**НАНОСЕЙСМОЛОГИЯ: ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ***Селезнев В.С., Еманов А.Ф., Соловьев В.М., Лисейкин А.В., Брыксин А.А.**Федеральное государственное учреждение науки Геофизическая служба Сибирского отделения Российской Академии наук (ГС СО РАН), Новосибирск, [sel@gs.sbras.ru](mailto:sel@gs.sbras.ru).***Введение**

В ГС СО РАН в последние годы разработаны отечественная аппаратура и ряд методик, позволяющие по записям сейсмических станций изучать колебания амплитудой в нанометры, которые на несколько порядков ниже амплитуд фоновых шумов. Данная технология получила название наносейсмология и состоит из двух основных направлений. Первое – это изучение неизвестных сигналов за счет пространственно-временного суммирования сейсмограмм, полученных с так называемых сейсмических антенн, состоящих из групп станций, распределенных на некоторой площади. Примером могут служить исследования методом сейсмоэмиссионной томографии, направленные на поиск и локализацию источников слабых (по сравнению с фоном) сейсмических шумов. Второе направление включает выделение из записей одиночных сейсмических станций слабых сигналов, излучаемых по определенным законам. Примером этого могут быть исследования по изучению глубинного строения земной коры и мантии с использованием вибрационных источников.

**Выделение сигналов на сейсмических антеннах**

Сейсмическая антенна представляет собой группу из нескольких сейсмических станций, распределенных на некоторой площади. В общем случае, при соблюдении ряда условий (одинаковый уровень микросейсмических шумов и одинаковый вид полезного сигнала на каждой из станций, корректно введенные временные сдвиги перед суммированием сейсмограмм и др.), отношение сигнал/шум на суммированной сейсмограмме увеличивается пропорционально корню квадратному от количества использованных в антенне сейсмических станций. Таким образом, увеличением количества регистрирующих приборов, достигается выделение слабых сигналов на фоне шумов, которые невозможно анализировать по записям одиночной сейсмической станции.

На рис.1а показан пример сейсмической антенны, реализованной в районе устья одной из скважин Уренгойского месторождения. На площадке 2х2 км были расставлены 36 временных сейсмических станций, которые в течение 2-х недель непрерывно регистрировали колебания. Использовалась трехканальная автономная регистрирующая аппаратура «Байкал-АСН», разработанная и произведенная в ГС СО РАН с подключенными сейсмическими датчиками двух типов: сейсморазведочного типа GS-One и широкополосные сейсмоприемники CMG-6T. За время проведения регистрации на скважине производились работы по гидравлическому разрыву пласта (ГРП). С использованием метода сейсмоэмиссионной томографии было локализовано предполагаемое место ГРП – представляющее собой аппроксимированную эллипсоидом «шумящую» область с центром вблизи начала разрыва (место перфорации по стволу скважины) и вытянутый в вертикальном направлении (рис.1б) [1].

На рис.2 показаны результаты определения параметров очагов землетрясений, выполненные по данным регистрации временной локальной сетью станций, выставленной в районе карьера Бачатский (Кузбасс) [2]). Данная сеть станций представляла собой сейсмическую антенну из 11 сейсмических станций, ее реализация позволила получить информацию о произошедших в районе карьера землетрясениях малых энергий (с ML от 0). Эксперименты показали, что в окрестности разрезов «Бачатский» и «Шестаки» присутствует наведенная добычей угля сейсмичность. Непрерывный мониторинг за более чем год свидетельствует, что режим сейсмической активности изменяется во времени, по числу событий малых энергий, а в периоды наибольшей активности возникают события больших энергий. Техногенные землетрясения происходят на глубинах до четырех километров под разрезом.

В последние годы растет интерес к изучению изменений сейсмических процессов при воздействии на геологическую среду мощными сейсмическими источниками. Так, в работе [3] показано, что постоянные взрывные работы на карьерах Кузбасса вызывают эффекты, приводящие к изменению угла наклона графика повторяемости землетрясений. Аналогичные эффекты наблюдаются под воздействием регулярного движения поездов в районе оз. Байкал: в ближней от железной дороги зоне наклон графика повторяемости отличается от регионального значения.

Последующие эксперименты на Быстровском вибросейсмическом полигоне показали, что под воздействием на геологическую среду мощным вибратором, варьируются параметры сейсмической эмиссии: меняются углы наклона условных графиков повторяемости. Высказано предположение, что постоянные воздействия на геологическую среду мощными источниками сейсмических колебаний снижают напряжения и приводят к уменьшению вероятности возникновения сильных разрушительных землетрясений.

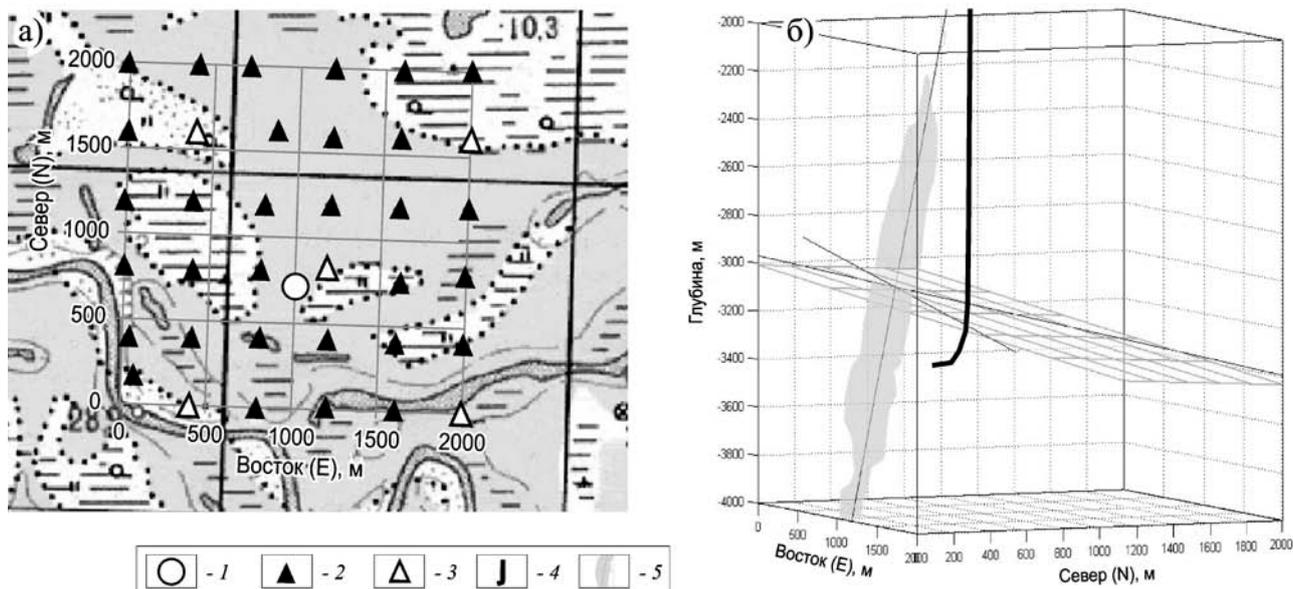


Рис.1. Пример реализованной сейсмической антенны (а) и результат локализации места гидроразрыва (б) на Уренгойском нефтегазовом месторождении (по данным [1]). 1 – устье скважины; 2, 3 – сейсмостанции «Байкал-АСН» с сейсмоприемниками GS-One и CMG-6T, соответственно; 4 – ствол скважины; 5 – область повышенной сейсмической эмиссии – предполагаемое место гидроразрыва.

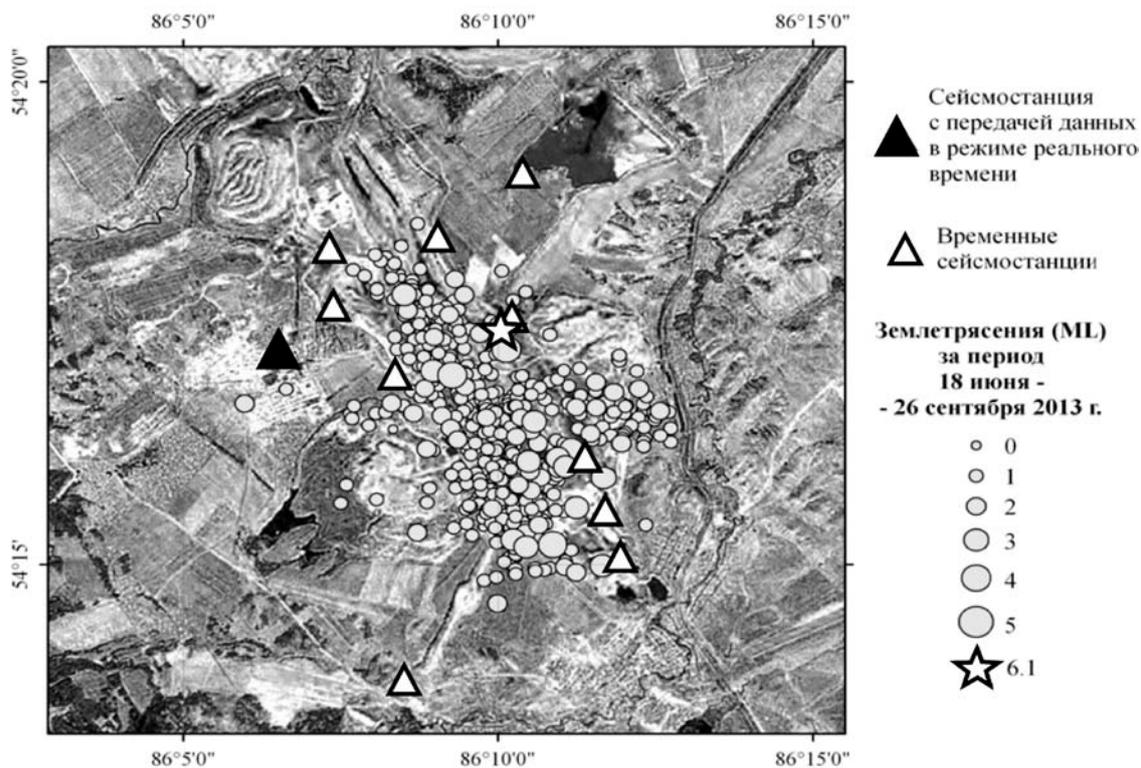


Рис.2. Результаты локализации землетрясений, зарегистрированных сейсмической антенной, в районе карьера «Бачатский» (Кузбасс, по данным [2]).

Таким образом, использование сейсмических антенн с целью регистрации слабых сигналов дает возможность решать задачи сейсмического мониторинга, проводить исследования методами

сейсмоэмиссионной томографии, выделять землетрясения малых энергий. Возможно применение сейсмических антенн и в других областях, где требуется выделять слабые колебания, например, для создания охранных систем.

### Выделение сигналов, излучаемых по определенным законам

В общем виде, задача выделения слабых сигналов, излучаемых по определенным законам, ставится в следующем виде. Пусть имеется непрерывная сейсмическая запись, содержащая в себе как разнообразные шумы, так и полезный сигнал, амплитуда которого существенно ниже уровня шумов, но при этом известен закон, по которому этот сигнал излучался. Выделение полезного сигнала достигается за счет специальных процедур цифровой обработки сейсмограмм, приводящих к накоплению полезного сигнала и ослаблению шума.

Наиболее ярким примером технологии выделения слабых сигналов с известным законом излучения являются исследования по изучению глубинного строения земной коры и мантии с использованием вибрационных источников [4]. Теоретические расчеты показывают, что амплитуды колебаний от 40-тонного вибрационного источника на удалениях в сотни километров составляют единицы нанометра, в то время как амплитуды микросейсм на станциях на несколько порядков выше. Сейсмический вибратор работает в течение длительного времени (порядка одного часа), что дает возможность, после расчета взаимно-корреляционной функции (коррелограммы) между известной функцией источника и регистрируемыми колебаниями, выделить полезный сигнал. На рис.3 показаны примеры сейсмограмм от взрывов (5-6 тонн) и коррелограмм от группы из 2-х 40-тонных вибраторов, полученных на сейсмостанциях до расстояний в 400 км при проведении исследований по глубинному сейсмическому зондированию на профиле ЗДВ (Якутия). Видно, что интенсивность целевых волн и дальность их регистрации для двух типов сейсмических источников практически идентичны.

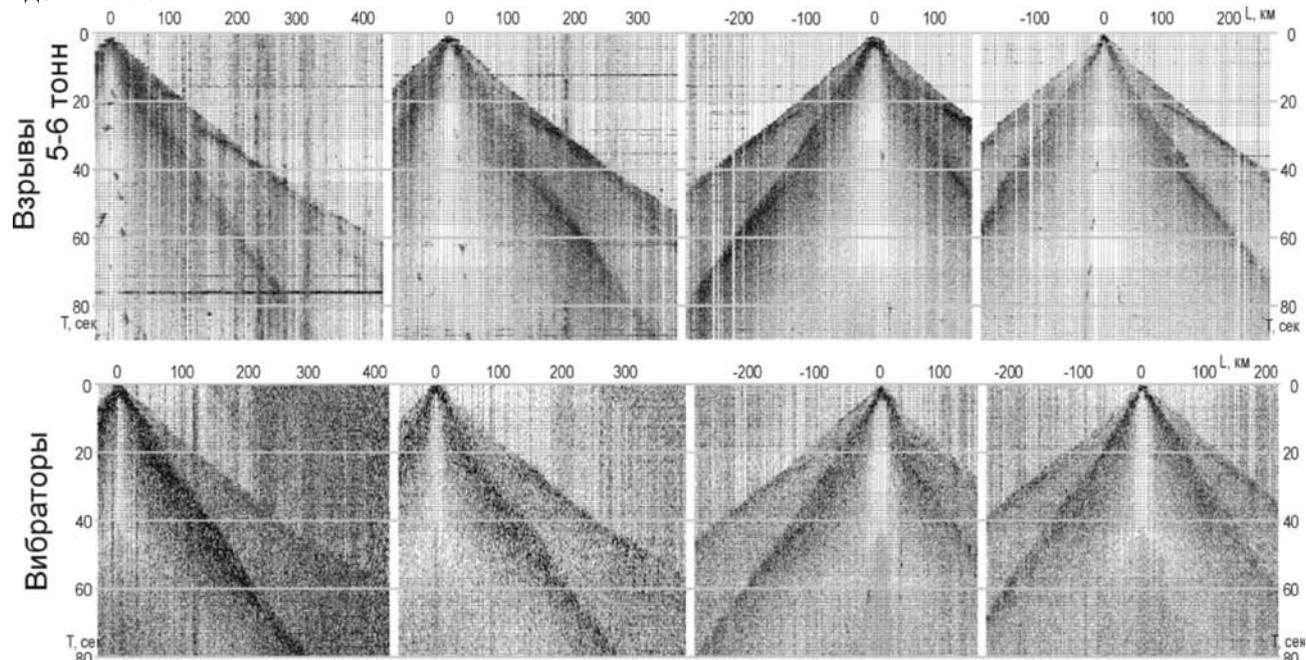


Рис.4. Сейсмические записи от взрывов и группы вибраторов при работах по глубинному сейсмическому зондированию (ГСЗ) на комплексном профиле ЗДВ (Якутия, по данным [4]).

Другим примером технологии выделения сигналов, излучаемых по определенным законам, является метод стоячих волн, разработанный в ГС СО РАН [5]. Данный метод основан на выделении из записей микросейсм когерентных во времени собственных колебаний изучаемых объектов, например, зданий и инженерных сооружений. В последние годы в ГС СО РАН разрабатывается методика изучения резонансных свойств верхней части разреза на заданной площадке с контролируемой точностью, являющаяся дополнением к методу микросейсмического районирования, выгодно отличающимся от известных [6]. Она основана на использовании свойства когерентности во времени стоячих волн, формирующихся в слоистой среде. Источником колебаний грунтов являются микросейсм, которые всегда присутствуют на земной поверхности. Технология измерения с опорной точкой позволяет с использованием малоканальной аппаратуры за несколько дней регистрации охватывать измерениями большие площади и восстанавливать одновременное поле

стоячих волн для всей исследуемой территории. По результатам экспериментальных работ в г. Осинники (Кемеровская область) определены резонансные частоты разреза, построены карты усиления колебаний на собственных частотах и карты точности определения коэффициентов усиления колебаний (рис.4). На поверхности площадки наблюдается серия узких (десятые доли герца) резонансов, связанных с формированием стоячих волн в слоистой среде. Переход от карт прироста балльности, не зависящих от частоты (существующие методики микросейсмического районирования), к серии карт на резонансных частотах (данная методика) позволяет точнее оценить сейсмостойкость зданий разной этажности, обладающих различными собственными частотами.

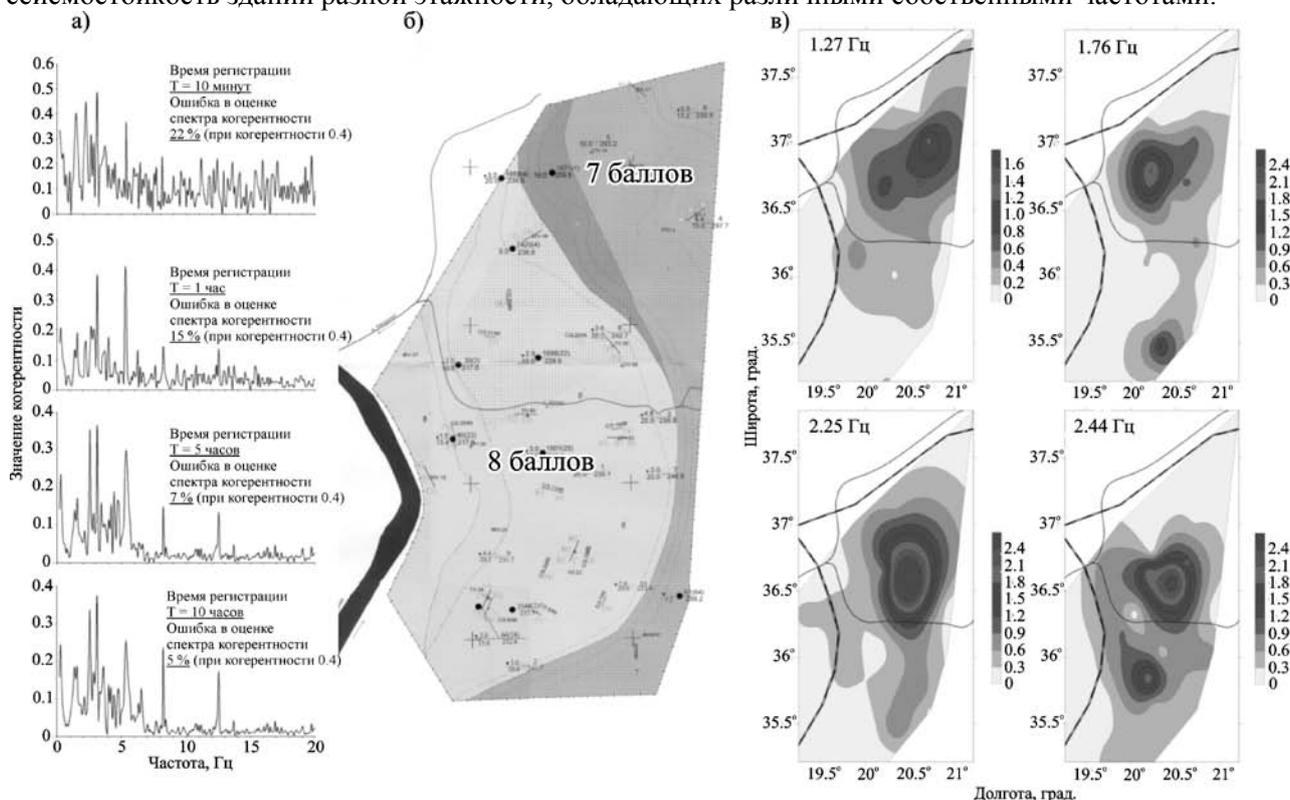


Рис.5. Результаты изучения резонансных свойств верхней части разреза (по данным [6]). (а) – спектры когерентности для разных длительностях регистрации; (б) – фрагмент карты сейсмического микрорайонирования территории г. Осинники для периода повторяемости 500 лет; (в) – карты коэффициентов усиления микросейсмических колебаний на резонансных частотах.

Еще одно направление изучения сигналов с известными законами излучения относится к мониторингу работающего оборудования крупных промышленных объектов по данным регистрации колебаний с сейсмостанций, расположенных в стороне от этих объектов. Данную методику начали развивать после событий в августе 2009 г, когда на Саяно-Шушенской ГЭС произошла крупнейшая в истории гидроэнергетики авария. После инцидента, вызванного разрушением 2-го гидроагрегата, электростанция получила значительные повреждения. Кроме того, практически вся контрольно-измерительная аппаратура на ГЭС также вышла из строя, что создало определенные трудности в расследовании причин аварии. Вместе с тем, на удалении около 4 км от ГЭС размещена постоянно действующая сейсмостанция «Черемушки», которая регистрировала колебания, как во время аварии, так и после нее (рис.6). Анализ данных с этой сейсмостанции и с временно установленных после аварии сейсмических регистраторов на плотине и в машинном зале ГЭС показал, что колебания, происходящие на ГЭС могут быть выделены из записей с удаленной сейсмостанции. Данная информация была использована при анализе колебательных процессов, происходящих во время аварии, и помогла разобраться в ее причинах [7,8].

Таким образом, технологии выделения из сейсмических записей сигналов, излучаемых по определенным законам, позволяют решать следующие задачи:

- изучение глубинного строения Земли с использованием сейсмических вибраторов;
- мониторинг состояния оборудования крупных промышленных объектов;
- исследования методом стоячих волн (здания и сооружения, микросейсморайонирование).

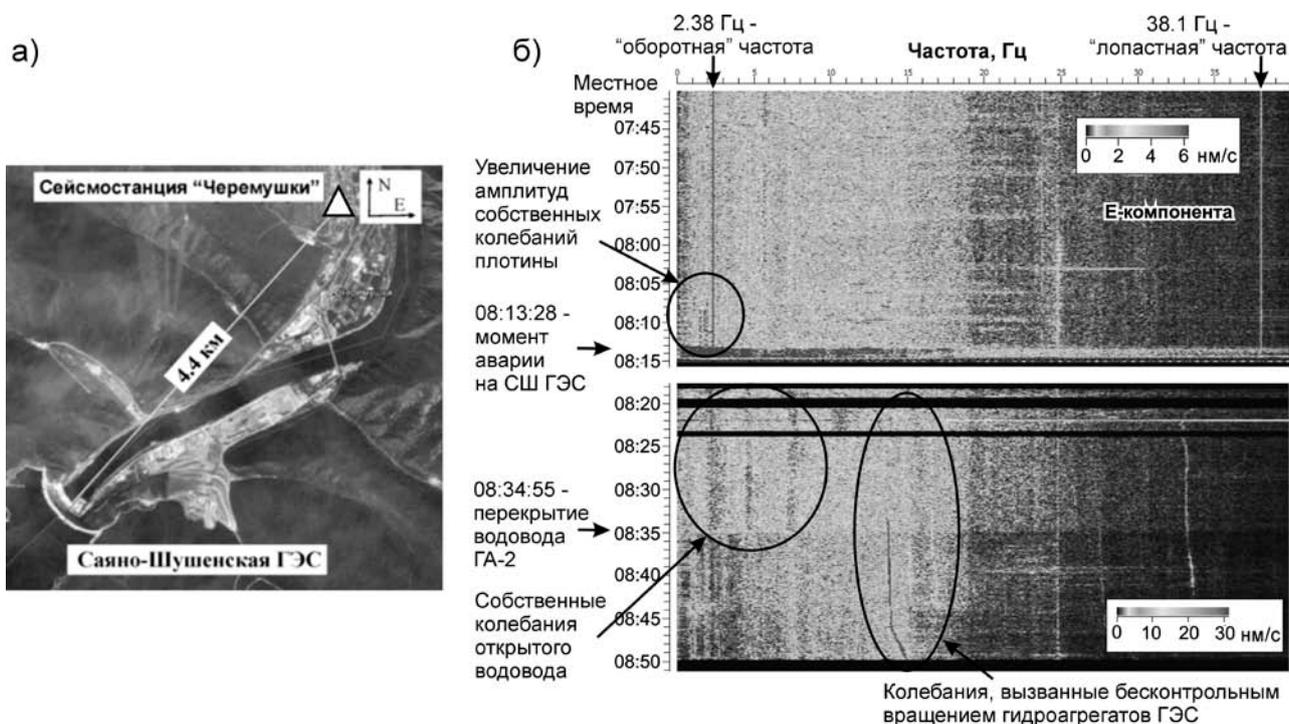


Рис.5. Схема размещения сейсмостанции «Черемушки» (а) и спектрограмма ее записи во время аварии на Саяно-Шушенской ГЭС 17.08.2009 с элементами интерпретации (б).

### Заключение

В ГС СО РАН разработаны отечественная аппаратура и ряд методик, позволяющие изучать колебания амплитудой в нанометры (наносейсмология), что дало возможность не только создать современную систему сейсмологического мониторинга, не уступающую зарубежным аналогам и передающую за первые минуты в директивные органы информацию о случившихся сейсмособытиях, но и проводить изучение Земли мощными вибраторами, контролировать сейсмостойкость зданий, сооружений и работу крупного промышленного оборудования. Новые технологии позволили разобраться в причинах аварии на Саяно-Шушенской ГЭС и предложить меры контроля вибраций гидроагрегатов и плотин, изучить физическое состояние гидростанций, мостов, жилых зданий и промышленных объектов, приступить к созданию в Кузбассе системы контроля техногенной сейсмичности.

### Список литературы

1. Брыксин А.А., Селезнев В.С., Лисейкин А.В., Колесников Ю.И., Хогоев Е.А. Локализация сейсмических возбудителей при гидроразрыве пласта: классический и экспериментальный томографические подходы // Материалы XI Международного научного конгресса и выставки «Интерэкспо Гео-Сибирь-2015». – Новосибирск: СГУГиТ., 2015. Том 2. С.20-24.
2. Еманов А.Ф., Еманов А.А., Фатеев А.В., Лескова Е.В., Шевкунова Е.В., Подкорытова В.Г. Техногенная сейсмичность разрезов Кузбасса (Бачатское землетрясение 18 июня 2013г.) // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2014. № 2. С. 41-46.
3. Брыксин А.А., Селезнев В.С. Влияние техногенных факторов на сейсмичность районов Кузбасса и озера Байкал // Геология и геофизика. 2012. Т.53. №3. С. 399-405.
4. В.С. Селезнев, В.М. Соловьев, А.Ф. Еманов, А.С. Ефимов, А.С. Сальников, И.С. Чичинин, В.Н. Кашун, И.Е. Романенко, С.А. Елагин, А.В. Лисейкин, А.Е. Шенмайер, Н.А. Сережников, М.А. Максимов. Глубинные вибросейсмические исследования на Дальнем Востоке России // Проблемы информатики, 2013, №3, с.30-41.
5. Еманов А.Ф., Селезнёв В.С., Бах А.А., Гриценко С.А., Данилов И.А., Кузьменко А.П., Сабуров В.С., Татьков Г.И. Пересчёт стоячих волн при детальном инженерно-сейсмологических исследованиях // Геология и геофизика. №2. 2002. С. 192-207.
6. Еманов А.Ф., Красников А.А., Бах А.А., Черных Е.Н., Еманов А.А., Семин А.В., Черепанов А.В. Резонансные свойства верхней части разреза // Физическая мезомеханика. 2008. Т. 11. № 1. С. 26-36.
7. Селезнев В.С., Лисейкин А.В., Громько П.В. Были ли повышенные колебания второго гидроагрегата до аварии на Саяно-Шушенской ГЭС 17.08.2009г.? // Гидротехническое строительство. 2012. №10. С. 48-50.
8. Селезнев В.С., Лисейкин А.В., Брыксин А.А., Громько П.В. О причине аварии на Саяно-Шушенской ГЭС с точки зрения сейсмолога // Материалы XI Международного научного конгресса и выставки «Интерэкспо Гео-Сибирь-2015». Новосибирск: СГУГиТ., 2015. Том 2. С.136-140.