

ВИБРАЦИОННЫЕ ГЕОТЕХНОЛОГИИ В 21-М ВЕКЕ

А.С. Алексеев, Б.М. Глинский, М.С. Хайретдинов

Последние 30 лет 20-го века были ознаменованы созданием и внедрением мощных вибраторов в практику сейсмологических исследований. Основная побудительная причина развития этого процесса была связана с фундаментальной задачей изучения внутреннего строения Земли. Методы сейсмологии в этой задаче сильно отстают по точности и надёжности от современных методов сейсморазведки. Это вызвано существенным различием в «контролируемости» источников колебаний.

В сейсмологии основным источником волн является землетрясение – природный процесс, не управляемый ни по времени начала действия, ни по месту возникновения, ни по энергетике. Сфера действия таких источников ограничивается сейсмоактивными районами, которые имеют явно аномальные черты строения по сравнению с обширной асейсмичной зоной Земли.

На основе вибраторов, созданных в СО РАН, были разработаны новые геотехнологии, которые позволяют избежать ряда ограничительных обстоятельств сейсмологии землетрясений и больших взрывов. Они имеют следующие преимущества:

- точно определённые координаты источника и времени начала его работы;
- многократное воспроизведение идентичных воздействий на изучаемую среду (повторяемость эксперимента);
- возможность возбуждения колебаний заранее заданной формы и поляризации;
- возможность автоматизации управления экспериментом на компьютерной основе;
- повсеместность применения, включая густозаселённые и несейсмоактивные зоны;
- экологическая безопасность, т.к. регистрируемый сигнал находится под микросейсмами, а необходимые соотношения сигнал/шум обеспечиваются накоплением слабых сигналов.

Технической основой создания новых геотехнологий явилась разработка ряда мощных низкочастотных управляемых вибраторов. Ставилась задача обеспечить глубинность вибросейсмических просвечиваний по крайней мере до подошвы земной коры (40-50 км). По теоретическим расчётам для этой цели требовался вибратор с амплитудой силы около 100 тонн в частотном диапазоне 2–15 Гц. В результате поисковых разработок были созданы и экспериментально опробованы несколько разных конструктивных схем вибрационных источников и вибровозбудителей, наиболее эффективными из которых оказались *стационарные электро-*

механические дебалансные вибраторы ЦВ-40, ЦВ-100, ЦВО-100, создающие вертикально поляризованную возмущающую силу с амплитудой до 100 тс в диапазоне частот 5-12 Гц с помощью синхронно вращающихся дебалансов.

Другая линия построения и развития вибраторов была основана на резонансной схеме излучения с помощью горизонтально колеблющейся инерционной массы до 300 тонн в диапазоне частот 1-3 Гц (горизонтальный сейсмический вибратор ГСВ-100) либо с помощью колеблющегося столба жидкости в вертикальной или горизонтальной плоскости. К числу последних двух относятся гидрорезонансные вибраторы ГРВ-50 (амплитуда силы 50 тс, диапазон частот 1-15 Гц), ГРВ-200 (амплитуда силы 250 тонносил, диапазон частот 1-10 Гц).

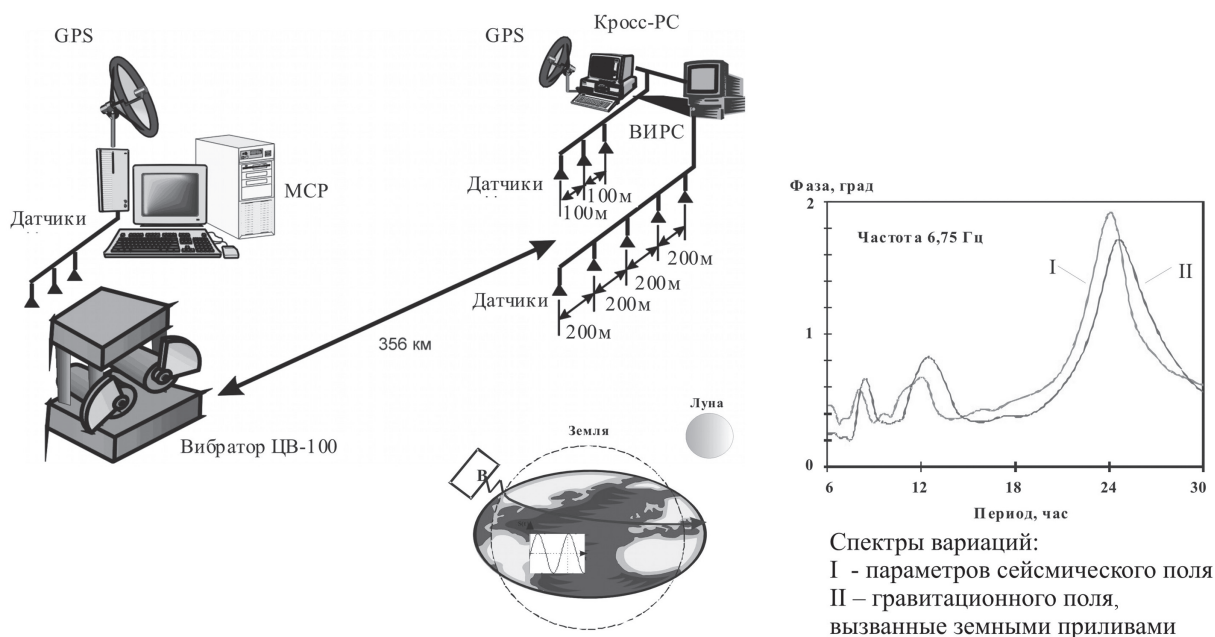
Наряду с мощными вибрационными источниками были разработаны многоканальные полевые комплексы регистрации и обработки данных (ВИРС, РОСА) с набором оригинальных программ для оперативного анализа сейсмических сигналов и измерения основных параметров сейсмических волновых полей. Для численного моделирования процессов вибрационного зондирования земной коры разработана библиотека программ, позволяющая решать сложные задачи распространения сейсмических колебаний в сложнопостроенных трёхмерных средах.

Созданные программно-технические средства явились основой развития ряда вибрационных геотехнологий. Наиболее развитыми из них на сегодня являются:

- технология исследования глубинного строения земной коры и верхней мантии территории Сибири;
- технология активного вибросейсмического мониторинга зон подготовки природных и техногенных катастроф с целью повышения достоверности их прогноза. В первую очередь, сюда относятся сейсмо-вулканоопасные зоны;
- технология инженерно-сейсмических исследований сейсмостойчивости зданий и сооружений;
- технология повышения нефтеотдачи выработанных пластов;
- технология вибросейсмической калибровки сейсмострасс и сеймостанций.

В силу ограниченности размеров статьи остановимся на краткой характеристике лишь последних четырёх технологий.

Технология активного вибросейсмического мониторинга (АВСМ) предусматривает наблюдения за состоянием земной коры по изменению характеристик распространения сейсмических волн, возбуждаемых вибрационным



Экспериментальная оценка относительного изменения скоростей сейсмических волн по результатам измерений земных приливов составляет $10^{-5} - 10^{-6}$

Рис.1

источником сейсмических колебаний. Наиболее важная область применения технологии связана с изучением вариаций напряжённо-деформированного состояния земной коры, предшествующих землетрясениям и извержениям вулканов. В конечном счёте, эта проблема связана с поиском предвестников природных катастроф.

Изучение напряжённого состояния земной коры и его изменения во времени – задача, требующая прецизионной точности при экспериментальных работах с мощными вибраторами. Данная технология основывается на регулярном зондировании зон назревающих катастроф сейсмическими полями от вибраторов со строго заданными энергетическими, частотно-временными и фазовыми характеристиками. Периодичность зондирования определяется скоростью протекания геодинамических процессов в рассматриваемых зонах. Динамика последних отображается в характеристиках регистрируемых вибросейсмических полей. Чувствительность используемого вибросейсмического метода зондирования проверялась на естественном тесте, основанном на лунно-солнечных приливах, сопровождающихся упругими деформациями земной коры. Мониторинг в связи с лунно-солнечными приливами осуществлялся в районе Байкальской рифтовой зоны и в Алтае-Саянском регионе.

В первом случае была достигнута точность измерений скоростей волн Р на уровне 10^{-5} , что на 2 порядка выше ранее полученных результатов. Полученному результату соответствует скоростная тензочувствительность коры в районе Байкальского рифта около 0.05%/бар,

что определяет нижнюю границу приливной компоненты.

Был разработан новый метод выявления приливных деформаций на основе оценивания спектра полей амплитуд и фаз гармонических колебаний вибратора в дальней зоне. На основе экспериментов, выполненных в периоды земных приливов на трассах протяжённостью 355–430 км в Алтайском регионе, была достигнута точность измерений вариаций скоростей волн на уровне 10^{-6} . Оба полученных результата на 2–3 порядка превосходят по точности ранее полученные. Это стало возможным лишь благодаря использованию высокочувствительного вибросейсмического метода. Схематически технология вибрационного мониторинга представлена на рис. 1.

Технология вибросейсмического мониторинга земной коры применяется для изучения геодинамических процессов с использованием сети регистрирующих цифровых сейсмологических станций в Алтае-Саянской складчатой области и в Байкальской рифтовой зоне.

Вибросейсмический мониторинг по площади нацелен на изучение характеристик поглощения сейсмических волн в земной коре. Экспериментальными работами, основанными на использовании строго повторяющихся сеансов зондирования обнаружены различия в поглощающих свойствах зон глубинных разломов, которые характеризуют их напряжённое состояние. Учёт поглощающих свойств разломов важен при составлении карт детального сейсмического районирования территории. Результаты этой работы имеют большую важность для изучения геодинамики среды и прогноза землетрясений.

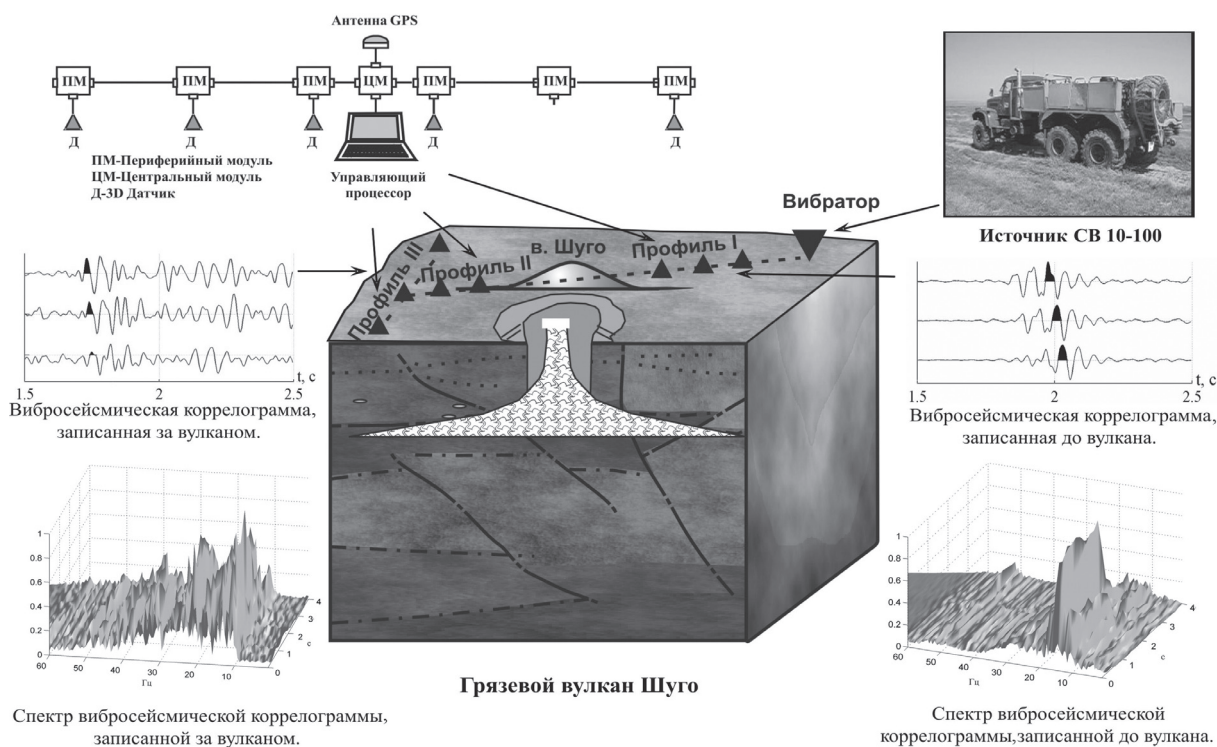


Рис. 2. Схема зондирования грязевого вулкана Шуго

Цикл экспериментальных работ по вибро-сейсмическому мониторингу среды во времени заложил основы методики исследования медленных тектонических процессов, происходящих в земной коре. Эксперименты проводились на принципиально новом уровне точности, не доступном для исследований с другими типами источников. По данным многолетних экспериментов по долговременному просвечиванию земной коры с интервалами между наблюдениями, менявшимся в пределах от одного дня до недели, получены принципиально новые результаты. Доказано, что времена вступления сейсмических волн не зависят от сезонных изменений. Вариация первых несёт в себе информацию о процессах, происходящих в земной коре. Установлено, что на динамические характеристики волн оказывают сильное влияние процессы промерзания и оттаивания грунта под вибратором. Изменение динамики волн вызывается изменением диаграммы направленности источника и спектра излучения. Детально изучены циклические сезонные изменения динамики волн и создана методика их учёта при интерпретации материалов.

Ещё один пример вибрационного просвечивания среды связан с изучением сложного сейсмического поля в районе живущих вулканов. В данном случае имеется в виду грязевый вулкан Шуго, расположенный в Таманской грязевулканической провинции (Краснодарский край). На рис. 2 представлены основные компоненты применяемой технологии: широкополосный вибратор СВ-10/100, аппаратура регистрации и обработки сейсмических сигналов РОСА, объект исследования – вулкан Шуго,

результаты обработки сейсмических сигналов до вулкана и за вулканом. Последние представлены во временной области в виде результатов кросскорреляционных свёрток (вибрационных сейсмограмм) аддитивной смеси регистрируемых сейсмических сигналов с шумом с опорными свип-сигналами (последние восстанавливаются в пункте приёма и повторяют по форме зондирующий сигнал вибратора), а также частотно-временными спектрами вибрационных сейсмограмм. Сложность сейсмического поля – отклика наглядно иллюстрируется обеими видами функций.

Технология инженерно-сейсмических исследований зданий и сооружений. На основе вибрационных технологий создана методика детального инженерно-сейсмологического обследования зданий и сооружений на основе использования вибраторов как источников прецизионных колебаний.

Для детальных сейсмологических обследований инженерных сооружений необходимы плотные системы наблюдений с помощью трёхкомпонентных сейсмотатчиков с шагом между приборами в единицы метров. Создание аппаратуры с тысячами сейсмических каналов для обследований инженерных сооружений – дорогой и неперспективный путь.

В рамках данной технологии сделана ориентация на измерения с малокаанальной аппаратурой на плотной системе наблюдений с одной или несколькими опорными точками и несколькими движущимися. Последовательная обработка системы наблюдений требует использования одного и того же источника колебаний при каждом цикле измерений. Источниками, не за-

держивающими процесс измерений, могут быть вибраторы, которые можно включать в любой момент и которые действуют на инженерное сооружение постоянно. Созданы способы обработки, позволяющие строить фильтры по одновременным записям в опорной и перемещающейся точках, что позволяет пересчитывать колебания из опорной точки в подвижную точку. Связав все точки с подвижными фильтрами пересчёта колебаний, мы получаем одновременные колебания всех точек системы наблюдений. При изучении моделей, заложенных в основу алгоритмов пересчёта, и результатов пересчёта доказано, что пересчитываются только волны, а все остальные колебания подавляются алгоритмами обработки. Многоканальные сейсмограммы стоячих волн на плотной системе наблюдений позволяют решать задачи диагностики физического состояния зданий и инженерных сооружений.

Методика детальных обследований инженерных сооружений позволяет обнаруживать и тонко изучать целый набор форм собственных колебаний инженерного сооружения. Так, для Саяно-Шушенской ГЭС обнаружено и изучено 27 форм собственных колебаний. Предшествующие методики позволяли обнаружить не более 6 форм. Существенно повышена точность определения частот собственных форм до тысячной доли Гц. Пространственные искажения амплитуд собственных форм увязываются с особенностями состояния инженерного сооружения и позволяют обнаружить имеющиеся дефекты. Данная методика применена для различного типа инженерных объектов: здания, плотины ГЭС, мосты.

Применение вибраторов в качестве источника колебаний позволяет получить информации о состоянии здания большей детальности и точности. Вибрационные обследования зданий позволяют видеть скрытые трещины.

Разработанная методика обследования зданий при высокой детальности и точности результатов характеризуется большой производительностью (обследование здания за один – три дня, плотины Саяно-Шушенской ГЭС за десять дней) и низкой стоимостью работ. Методика применялась при обследовании зданий в г.г. Новосибирск и Улан-Удэ, при обследовании плотин Саяно-Шушенской и Чиркейской ГЭС, при обследовании автомобильных мостов в г.г. Новосибирск и Тюмень. Полученные результаты имеют как прикладное, так и фундаментальное значение. Решены задачи диагностики физического состояния обследованных объектов, а также получены результаты, важные для физики стоячих волн в инженерных сооружениях, оказавшие влияние на модели.

Вибросейсмическая технология повышения нефтеотдачи пластов. Разработана и экспериментально исследована методика вибросейсмического воздействия на массив горных пород с целью создания научных основ и поиска путей повышения эффективности вибросейсмических

технологий, предназначенных для увеличения нефтеотдачи пластов, дегазации угольных толщ и предотвращения горных ударов.

Эксперименты в натуральных условиях доказали, что в массиве горных пород под влиянием вибросейсмического воздействия удельной мощностью менее 10^{-4} Вт/м² возникают эффекты, большинство из которых наблюдалось ранее только в лабораторных условиях при мощности воздействия на 5–6 порядков выше.

Экспериментально показано, что вибросейсмическое воздействие ведёт к перестройке структуры горных пород, к увеличению их проницаемости, снижению макронеоднородности и усилению сейсмоакустической эмиссии.

Выполнены комплексные исследования влияния вибросейсмического воздействия на жидкую и газовую фазы нефтенасыщенных пород. Изучено влияние вибросейсмического воздействия на увеличение дебита попутного газа, изменение физико-химических свойств и состава нефти и попутного газа, увеличение дебита и снижение обводнённости жидкости, отбираемой из скважин.

Впервые многие явления, возникающие при вибросейсмическом воздействии на массив горных пород, исследованы в натуральных условиях комплексно, а также во времени и в зависимости от расстояния до эпицентра воздействия.

Полученные результаты положены в основу технологии вибросейсмического воздействия на нефтепродуктивные пласты. В ходе проведения опытно-промышленных работ на Правдинском, Северо-Салымском и Суторминском месторождениях Западной Сибири впервые доказана технико-экономическая эффективность вибросейсмического воздействия с дневной поверхности на нефтепродуктивные пласты в промысловых условиях.

Технология калибровки трасс распространения сейсмических волн и сейсмических станций. Эффективность систем контроля за ядерными испытаниями, землетрясениями зависит от точности определения параметров источников сейсмических событий – времён происхождения, географических координат, глубины, а также их мощности. Точность вычислений влияет на достоверность идентификации событий. Как известно, основная трудность точного определения параметров сейсмического источника связана с существенной горизонтальной и вертикальной неоднородностью коры и верхней мантии Земли, которая вносит большие вариации параметров сейсмических волн в зависимости от расстояния и азимута на источник. Рассматриваемая технология калибровки направлена на учёт указанных неоднородностей на основе калибровочного зондирования сейсмострасс от предполагаемых источников до сеймостанций с помощью мощных вибраторов. Она имеет ряд физических и экологических преимуществ перед методом больших химических

калибровочных взрывов, основные из которых были отмечены выше.

Результаты экспериментов по виброГСЗ (вибрационное глубинное сейсмическое зондирование) на дальностях до 360 км подтверждают возможность уверенного выделения волн в первых вступлениях в интересах решения задач калибровки. При этом точность определения времён первых вступлений может повышаться за счёт синхронного суммирования вибрационных сейсмограмм благодаря высокой повторяемости их динамических характеристик от сеанса к сеансу в заданном пункте регистрации. С другой стороны синхронное суммирование является резервом в наращивании дальности регистрации.

Перспективы развития вибросейсмических технологий. Полученные в процессе проведения широкого круга теоретических и экспериментальных исследований сведения о волновых полях от мощных виброисточников на больших расстояниях и глубинные вибросейсмические разрезы являются уникальными и не имеют мировых аналогов. Существующие в мире (и России) маломощные нефтеразведочные вибраторы принципиально не пригодны для выполнения подобных глубинных сейсмических исследований, поскольку обеспечивают максимальную регистрацию лишь в первом десятке километров.

Использование мощных вибрационных источников позволяет снизить затраты на организацию источников возбуждения и открывает широкие возможности проведения глубинных сейсмических исследований в промышленных районах, территориях национальных заповедников (например 100 километровая заповедная зона вокруг оз. Байкал) и др., где невозможно проведение стандартных буровзрывных работ. Примерные расчёты показывают, что экономический эффект за счёт использования мощных вибраторов при изучении глубинного строения регионов Сибири в настоящее время составил 2-2.5 млн. рублей; выполнение же одного детального 100 километрового профиля ГСЗ-ОГТ с расстоянием между источниками возбуждения в 1 км и базами зондирования до 150 км позволит сэкономить от 4 до 5 млн. рублей. Для Сибири общая потребность в профилях ГСЗ составляет десятки тысяч погонных километров.

Благодаря высокой разрешающей способности и возможностям промышленного тиражирования вибросейсмического метода круг вибрационных технологий, построенных на его основе, в настоящее время продолжает расширяться и развиваться. В первую очередь, сюда входят технологии: вибросейсмической томографии Земли, предупреждения горных ударов и дегазации в шахтах, вибрационного сейсморайонирования в районах АЭС, ГЭС и др. опасных производств, вибрационной стимуляции процессов извлечения руд и ряд других полезных ископаемых.

Литература

1. Алексеев А.С., Глинский Б.М., Геза Н.И., Еманов А.Ф., Кашун В.Н., Ковалевский В.В., Манштейн А.К., Михайленко Б.Г., Селезнёв В.С., Сердюков С.В., Собисевич А.Л., Собисевич Л.Е., Соловьёв В.М., Хайретдинов М.С., Чичинин И.С., Юшин В.И. Активная сейсмология с мощными вибрационными источниками. Новосибирск, филиал «Гео» Изд. СО РАН, 2004, 387 с.
2. Б.М. Глинский, М.С. Хайретдинов, Г.Ф. Седухина. Обработка геофизических данных с учётом нелинейности эффектов излучения и распространения упругих волн //Автометрия, №5, 2006, с.45-53.
3. Б.М. Глинский, А. Г. Фатьянов. Проблемы вибросейсмического мониторинга вулкана Эльбрус.// Сб. материалов межд. научно-го конгресса «ГЕО-СИБИРЬ -2006», 2006, Новосибирск, Ч.2, С. 3-7.
4. А.С. Алексеев, Б.М. Глинский, М.С. Хайретдинов. Активная сейсмометрия с использованием вибрационных источников в проблеме инспекции на местах //Вестник НЯЦ РК, выпуск 26, июнь 2006, С.142-147.
5. Б.М. Глинский, А. Г. Фатьянов, М.С. Хайретдинов. О возможности применения вибросейсмических методов для изучения флюидонасыщенных и трещиноватых сред //Там же. С. 155-160.

Алексеев Анатолий Семенович: академик РАН, академик МАИ, советник РАН, научный руководитель отдела математических задач геофизики, Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН (630090, Новосибирск, проспект академика Лаврентьева, 6)

Глинский Борис Михайлович: д.т.н., профессор, академик МАИ, зам. директора по науке, Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН (630090, Новосибирск, проспект академика Лаврентьева, 6), тел. (383) 330-62-79

Хайретдинов Марат Саматович: д.т.н., профессор, академик МАИ, советник РАН, главный научный сотрудник лаборатории геофизической информатики, Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН (630090, Новосибирск, проспект академика Лаврентьева, 6), тел. (383) 330-87-43, e-mail: marat@opg.sccc.ru