

## **РАЗВИТИЕ МЕТОДА АКТИВНОЙ СЕЙСМОЛОГИИ**

За последние 30 лет созданы и внедрены в практику геофизических исследований мощные вибрационные источники сейсмических волн. Основной побудительной причиной к их созданию была фундаментальная проблема Наук о Земле - изучение внутреннего строения Земли и геодинамических процессов в ее недрах. В этих задачах традиционно использовались в качестве источников волн землетрясения и взрывы (химические и ядерные). Из-за низкой точности и технологичности исследований на основе использования неконтролируемых, неповторяемых и не повсеместно применимых источников такого типа в сейсмологии наметилось значительное отставание по точности и надежности результатов от результатов современных методов сейсморазведки.

Параллельно с прикладными работами в 1960-70 гг. в институтах РАН и других исследовательских организациях выполнялись теоретические и экспериментальные работы по обоснованию вибросейсмического метода, по исследованию процессов излучения сейсмических волн вибрационными источниками и физических эффектов, возникающих при вибрационном воздействии на геологическую среду.

Развитие методов и успехи вибрационной сейсморазведки позволили предложить и обосновать возможность глубоких сейсмических исследований (ГСИ) с использованием мощных вибрационных источников, которые обеспечивали бы дальность регистрации 500 – 1000 км. Такие источники открывали возможность проводить изучение строения Земли, как в сейсмоактивных, так и в асейсмичных и густонаселенных районах, а также исследовать геодинамические процессы в сейсмоактивных зонах, что напрямую связано с проблемой прогноза землетрясений.

В 70-х годах прошлого века были сформулированы и исследованы основные задачи вибрационного просвечивания Земли с помощью управляемых источников и получены оценки их характеристик. Было показано, что по выделяемой сейсмической энергии землетрясение с магнитудой  $M = 5$  эквивалентно непрерывной работе вибратора с излучаемой сейсмической мощностью 100 кВт в течение 15 часов. Оценка диапазона частот колебаний, необходимых для обеспечения глубокого зондирования Земли и регистрации волн на расстояниях более 1 000 км, составляет единицы герц – 1-5 Гц. Было оценено также, что для излучения энергии 100 кВт в сейсмические волны на частоте 2 Гц, вибратор, работающий на скальном грунте, должен развивать усилие десятки тысяч тонн. При этом вибратор должен обеспечивать постоянное совпадение фазы излучаемого сейсмосигнала с фазой опорного сигнала с точностью 1-2 градуса за время от десятков минут до нескольких часов работы, что соответствует требуемой

стабильности поддержания частоты колебаний  $10^{-6} - 10^{-7}$  и является высоким требованием для механических колебательных систем большой мощности.

*Мощные вибрационные источники и системы регистрации вибрационных сигналов.* В середине 70-х годов прошлого века несколько институтов и СКБ Сибирского Отделения Российской Академии Наук: Институт горного дела, Институт гидродинамики, Институт Геофизики, Вычислительный центр, СКБ Гидроимпульсной техники, СКБ Прикладной геофизики, СКБ Вычислительной техники, Новосибирская Опытно-Методическая Вибросейсмическая Экспедиция совместно с Институтом Физики Земли РАН и Омским НИИ приборостроения (ОНИИП) начали работы по программе «Вибрационное просвечивание Земли» (руководитель академик Алексеев А.С.).

За прошедшее время было создано несколько типов мощных стационарных и передвижных вибрационных источников, прецизионные компьютерные системы управления процессами излучения сейсмических волн и системы регистрации вибросейсмических сигналов с точной временной привязкой по GPS, а также комплексы обработки на основе длительного (до нескольких часов) накопления слабых вибросигналов с амплитудами меньшими уровня микросейсмического шума. Теоретически и экспериментально был разработан резонансный метод согласования вибратора с грунтом и созданы вибрационные источники с перестраиваемым резонансным колебательным контуром для эффективного излучения в области низких частот.

Одним из первых мощных вибрационных источников является разработанный в ИГиЛ СО РАН гидромеханический вибратор ГСВ-100. Он построен по резонансной схеме, имеет подвижную инерционную массу величиной 300 тонн и развивает вибрационные усилия на грунт до 100 тонн в диапазоне частот 1-3 Гц, обеспечивал регистрацию гармонических сейсмических сигналов на расстояниях 1000 км и 2000 км.

В настоящее время разработаны и смонтированы на Быстровском вибросейсмическом полигоне СО РАН под Новосибирском несколько типов излучателей. Из вибрационных источников наиболее мощным является вибратор

ЦВ-100, который создает вертикально ориентированную возмущающую силу амплитудой 100 тонн в полосе частот 5 – 10 Гц с помощью синхронно вращающихся дебалансов, установленных на платформе. Использование режима излучения вблизи резонансной частоты системы «вибратор-грунт», лежащей в районе 7 Гц, позволяет многократно увеличить мощность излучения. Основанный на этом принципе сборно-разборный источник передвижного типа ЦВ-40 обеспечивает усилия на грунт до 40 тонн в полосе частот от 6 до 12 Гц. Вибраторы типа ЦВ-100 установлены также на Байкальском и Краснодарском прогностических полигонах.

Гидрорезонансные вибраторы ГРВ-50 и ГРВ-200 с усилием 50 и 200 тонн и частотным диапазоном 2-10 Гц созданы по резонансной схеме. В них в

качестве инерционной массы используется столб жидкости, колеблющийся в вертикальном или горизонтальном корпусе между пневматическими пружинами. Возбуждение колебаний осуществляется периодической подачей сжатого воздуха в пневмопружину синфазно с колебаниями инерционной массы с помощью специально разработанных быстродействующих клапанов с гидравлическим приводом и компьютерной системой управления.

Разработан проект создания водозаполненного шахтного источника на резонансном принципе диаметром 12 м и глубиной 100 м. Такой источник может обеспечить амплитуду силы до 10000 тонн и дальность регистрации до 10 тысяч километров.

Методика регистрации вибросейсмических сигналов от этих источников на больших базах наблюдений отличается от общепринятой в сейсмологии. В отличие от импульсных сейсмических событий уровень вибрационных сейсмических сигналов на базах наблюдений более 100 км находится ниже уровня сейсмического шума в 10-100 раз. Поэтому при проведении вибросейсмических экспериментов необходимо обеспечить долговременную регистрацию микросейсмического шума со скрытым под ним полезным сигналом для его последующего выделения. В СО РАН для крупномасштабных вибросейсмических экспериментов были разработаны многоканальные цифровые регистрирующие комплексы БЕРЕЗА, КАРС, ВИРС, КРОСС-РС, РОСА с высокими метрологическими характеристиками и синхронизацией процессов излучения и регистрации вибрационных сигналов с применением GPS-систем. В настоящее время в вибросейсмических экспериментах используются также современные цифровые сейсмические станции Трал, Альфа- и Дельта-Геон, Байкал, Reftek и др.

*Основные задачи активных вибросейсмических исследований.* В активных методах сейсмических исследований отчетливо проявились следующие преимущества по сравнению с пассивными методами:

- Точно определенные 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 управления экспериментом на компьютерной основе;
- Повсеместность применения, включая густо заселенные и несейсмоактивные зоны;
- Экологическая безопасность, т.к. Регистрируемый сигнал находится на уровне микросейсм, а желаемые соотношения сигнал/шум обеспечиваются методом накопления слабых сигналов.

В настоящее время определились основные фундаментальные и прикладные задачи, которые могут быть решены методами активной

сейсмологии с мощными вибрационными источниками. К таким задачам и технологиям прежде всего относятся:

- Изучение глубинного строения Земли, включающее изучение земной коры и верхней мантии;
- Изучение геодинамических процессов при длительных наблюдениях вариаций вибросейсмических полей;
- Изучение взаимосвязи сейсмических и акустических волновых полей, генерируемых вибраторами;
- Исследование реологического состояния горных пород (трещиноватости и проницаемости) вибросейсмическими методами;
- Изучение физико-механических свойств горных пород (и другого вещества) при вибровоздействиях;
- Исследование нелинейных эффектов и процессов в многофазных геологических средах при вибровоздействиях;
- Активный вибросейсмический мониторинг сейсмоактивных зон и живущих вулканов;
- Вибросейсмическое воздействие на нефтяные пласты для повышения нефтеотдачи;
- Активное микросейсморайонирование на больших площадях;
- Изучение устойчивости глубинных фундаментов в районах строительства или эксплуатации экологически опасных инженерных сооружений, крупных химических производств, атомных электростанций, плотин в горных местностях и др. объектов;
- Инженерно-сейсмологические исследования зданий и крупных промышленных сооружений;
- Вибросейсмическая калибровка сеймостанций международной сети IMS;
- Перспективные задачи решения проблемы глобальной томографии Земли (основным инструментом исследований могут быть современные цифровые сейсмологические сети и мощные вибросейсмические источники, установленные на континентах).

*Результаты экспериментальных работ.* Геофизические исследования с мощными вибрационными источниками сейсмических волн, созданными в Сибирском отделении РАН, проводятся в течение трех десятилетий в различных районах Сибири и Дальнего востока. Полученные в процессе проведения полевых экспериментов уникальные сейсмические данные положены в основу построения региональных карт сейсмического районирования изучаемых территорий. В проведении широкомасштабных экспериментальных вибросейсмических исследований на территории Сибири участвовали научные коллективы институтов Сибирского отделения РАН – ИГФ, ГС, АСОМСЭ, ИВМиМГ, ИГД. В ряде экспериментов участвовали ученые ИФЗ РАН им. О.Ю. Шмидта, ИГИ НЯЦ Республики Казахстан, Японии, США, организаций промышленности и Высшей школы.

В Алтае-Саянском регионе был выполнен наибольший объем экспериментальных исследований с мощными вибрационными источниками. Основные профили, вдоль которых проводились экспериментальные работы: 1) Быстровка-Алейск-Савушки - протяженность 356 км, ориентация север-юг; 2) Быстровка-Маслянино-Прокопьевск - протяженность 200 км, ориентация запад-восток; 3) Быстровка-Малиновое озеро (направление Быстровка-Дегелен, Семипалатинский полигон) – протяженность 372 км, ориентация северо-восток – юго-запад; 4) Быстровка-Барабинск – протяженность 300 км, ориентация запад-восток.

С использованием стационарного виброисточника ЦВО-100 и пневмоисточника (на акватории оз. Байкал) отработан субмеридиональный профиль Бугульдейка-Бабушкин-Селенга. Совместный анализ материалов позволил детально охарактеризовать строение верхней части земной коры в крест простирания Байкальского рифта и получить новое представление о механизме сочленения Сибирского кратона и Хамардабанского складчатого террейна.

Экспериментальные исследования с мощными вибрационными источниками в Нижнеудинском районе Присяянья проводились в 1990-1991 гг. Здесь решались задачи по отработке технологии эксперимента с новым передвижным 40-тонным виброисточником, сопоставления волновых полей от взрывов и вибратора и изучения глубинного строения на 80-километровом вблизи отработанного 300-километрового профиля ГСЗ с взрывными источниками.

Из научно-методических работ с мощными вибраторами следует отметить Российско-Японский эксперимент 1995 г., когда был пройден 100 км профиль с расстоянием между регистраторами 5 км и отдельными точками регистрации на расстоянии 160 – 356 км. С высокой детальностью было зарегистрировано волновое поле как продольных, так и поперечных волн до удалений 356 км. Для сравнения волновых полей мощных вибрационных источников и 100-тонных химических калибровочных взрывов серии Омега на Семипалатинском полигоне была проведена встречная регистрация волновых полей на 620-км профиле Дегелен-Быстровка.

В 1996 – 1997 гг. ИВМиМГ СО РАН был поставлен ряд экспериментов с использованием высокостабильных вибрационных источников, целью которых являлось выявление малых вариаций пространственно-временных характеристик волнового сейсмического поля и установление их связи с деформационными процессами, вызванными земными приливами. В качестве источника использовался 100 тонный центробежный вибратор ЦВ-100, расположенный на Быстровском полигоне. Сеансы зондирования проводились через три часа непрерывно в течение 4 суток на гармонических сигналах, частотой 6.3 Гц и 7.0 Гц длительностью 20 - 25 мин.

Обработки временных рядов вариаций амплитуд и фаз вибросигналов показала, что в спектре вариаций параметров вибросигналов присутствуют максимумы с периодами близкими к 12 и 24 часам хорошо коррелированные с периодами приливных вариаций силы тяжести. Полученные оценки

величин вариаций параметров вибросигналов показали, что влияние земных приливов скорости сейсмических волн на базах 356 – 430 км по результатам проведенных экспериментов характеризуется величиной  $10^{-5} - 10^{-6}$ .

Ряд работ посвящен изучению взаимосвязи сейсмических и акустических волновых полей, генерируемых мощными вибраторами. Экспериментально было обнаружено, что мощные вибраторы, работающие на поверхности излучают наряду с сейсмическими волнами, акустические волны, распространяющиеся в атмосфере. Проведены эксперименты по регистрации акустосейсмических волн на расстоянии 20, 40 и 50 км от вибратора.

Выполнены эксперименты по исследованию нелинейного взаимодействия вибрационных полей низкочастотных и высокочастотных вибраторов. Изучению нелинейных эффектов, возникающих при генерировании вибрационных сигналов и дальнем распространении, посвящены многочисленные работы. Принципиально новые результаты получены в исследовании электромагнитных, акустических и иных геофизических эффектов, возникающих при вибрационной воздействию на геологическую среду.

#### *Вибрационные геотехнологии.*

Активный вибросейсмический мониторинг литосферы относится к числу новых геофизических технологий, включающих методы наблюдения за состоянием земной коры по изменению характеристик распространения сейсмических волн. Основная задача активного вибросейсмического мониторинга – обнаружение опасных тектонических напряжений и оценка запасенной в них энергии до того, как произойдет быстрое ее высвобождение. Разработана концепция и обобщенная модель информационной системы для активного вибросейсмического мониторинга.

Первым опытом масштабных работ по активному вибросейсмическому мониторингу напряженно-деформированного состояния земной коры был двухлетний цикл режимных вибросейсмических просвечиваний в очаговой зоне разлома Сан-Андреас в Калифорнии, США, проведенный в 1976 – 1978 гг. с использованием сейсморазведочных вибраторов.

В России начальный практический опыт активного вибросейсмического мониторинга с целью изучения связи тектонических вариаций с земными приливами был получен в 1991 г в районе Байкальского рифта в вибросейсмических экспериментах на базе наблюдений 125 км, выполненных в ИГФ СО РАН с вибратором ЦВО-100 установленным в п. Бабушкин. Регулярные работы по методике мониторинга с использованием этого вибратора продолжаются по настоящее время. С 2003 г. БФ АСОМСЭ СО РАН и ГИ СО РАН (Улан-Удэ) с участием ИВМиМГ СО РАН начал внедрять методику мониторинга с использованием гармонических зондирующих сигналов и принципов вибросейсмической интерферометрии.

Эксперименты по определению чувствительности системы вибросейсмического мониторинга на базе наблюдений 356 км были проведены ИВМиМГ СО РАН в 1997 г. в Алтае-Саянской сейсмоактивной

зоне. С 1997 г. в ГС СО РАН и АСОМСЭ СО РАН выполняется непрерывный ряд вибросейсмических наблюдений тектонических и сезонно-климатических вариаций волнового поля в Новосибирской области, который позволяет подробно исследовать сезонные изменения спектров сейсмограмм и вариации времен прихода продольных и поперечных волн.

В Японии работы по мониторингу сейсмоопасной зоны в районе о. Авай с использованием вибросейсмического комплекса ACROSS проводятся с 2000 г.

Одним из перспективных методов повышения нефтеотдачи является технология вибросейсмического воздействия на нефтяные пласты поверхностными вибраторами. Опытные работы проводились на месторождениях в Предкарпаты, Киргизии, Башкортостане, Поволжье и Западной Сибири с различными вибрационными источниками СВ-10/100М, СВ-20/60, ВРП-30/120 и ЦВ-100. Было обнаружено, что эффект увеличения нефтеотдачи в результате вибровоздействия сохранялся от нескольких месяцев до двух лет и составлял 10 – 25%, что характеризует перспективность данной технологии.

На основе использования вибрационных источников для возбуждения колебаний зданий разработана технология инженерно-сейсмологических исследований зданий и крупных промышленных сооружений. Технология основывается на выделении и анализе стоячих волн, резонансно возбуждаемых в здании при вибрационном воздействии в широком диапазоне частот. Исследуется многомодовая картина колебаний здания и определяется распределение амплитуд. Разработанная методика обследования инженерных сооружений нашла применение при обследовании зданий в гг. Новосибирск и Улан-Удэ, при обследовании автомобильных мостов в гг. Новосибирск и Тюмень, при исследовании плотин Саяно-Шушенской и Чиркейской ГЭС.

Активное микросейсмораионирование вибросейсмическими методами и изучение устойчивости глубинных фундаментов в районах строительства или эксплуатации экологически опасных инженерных сооружений, крупных химических производств, атомных электростанций, плотин в горных местностях и др. объектов являются одним из направлений практического применения методов активной сейсмологии. Работы по вибросейсмическому мониторингу районов захоронений отходов проводятся в Японии в Геофизическом центре Тоно, и Подземном исследовательском центре в Хоноробе с использованием вибросейсмического комплекса ACROSS. Работы этого направления планируются в России в Красноярске в рамках проекта МНТЦ.

В Международной системе мониторинга (ISM) Договора о запрещении испытаний ядерного оружия и при решении других прикладных задач практической сейсмологии существует проблема калибровки сейсмических станций международной и региональных сетей. Теоретическое и экспериментальное обоснование возможности использования мощных вибраторов для задач калибровки было выполнено в проекте МНТЦ № 1067 “Создание технологии калибровки сейсмических станций и сейсмических

трасс с использованием мощных сейсмических вибраторов” 1999 - 2001 гг. Мощные сейсмические вибраторы дают возможность определения с повышенной точностью поправок времен пробега и амплитуд волн в результате анализа вибрационных сейсмограмм, получаемых при излучении вибратором колебаний в широком диапазоне частот. Исполнителями проекта были ИВМиМГ СО РАН, ГС СО РАН, АСОМСЭ СО РАН, НИИИТ Минатома РФ.

Возможность создания сверхмощных сейсмических вибраторов делает реальной глобальную сейсмическую томографию Земли с использованием управляемых искусственных источников. Разработана концепция глобальной томографии Земли с сетью сверхмощных шахтных вибрационных источников с усилием 1 000 – 10 000 тонн, построенных по гидрорезонансному принципу. Для регистрации вибросейсмических сигналов предполагается использовать международные и национальные сети сейсмических станций.

*Задачи математического моделирования в проблеме активного сейсмического мониторинга.*

Теоретические вопросы излучения сейсмических волн вибрационными источниками рассмотрены в ряде работ. Рассмотрены различные модели сферических источников и решены задачи динамической теории упругости для получения аналитических выражений для волнового поля источника и его энергетических характеристик. Исследованы процессы генерирования сейсмических волн поверхностными вибрационными источниками. В ряде работ исследуются вопросы влияния строения среды под источником на формирование волнового поля. Для моделей слоистых сред рассмотрены задачи резонансного характера взаимодействия источника со средой.

При создании мощных вибрационных источников большое внимание уделялось математическому моделированию механических колебательных систем источников и вопросам согласования со средой. Выполнено моделирование сверхмощных резонансных источников для суши и акваторий.

В конструкциях мощных вибрационных источников важное место занимают прецизионные системы управления, выполняющие задачи синтеза зондирующих сигналов и собственно управления механической колебательной системой и приводом вибратора. Решены теоретические вопросы синтеза зондирующих сигналов и построены их математические модели.

Математическим вопросам обработки вибросейсмических данных посвящено большое количество работ, так как этот раздел вибросейсмического метода является основным при получении данных во всех направлениях исследований как фундаментального, так и прикладного характера. В большей части работ исследуются характеристики шумов и математические методы фильтрации в задачах выделения вибрационных сигналов. В последние годы появились работы связанные с применением вейв-лет анализа в задачах вибросейсмических исследований.

Динамические задачи теории сейсмических волн в проблеме активного сейсмического мониторинга представляют отдельный раздел теоретических

исследований, связанный с решением динамических уравнений теории упругости для сложных реалистичных моделей сред и вибрационных источников. Применение вибрационных источников в сейсмологии для изучения строения Земли и мониторинга реологического состояния очаговой зоны дало новые возможности использования динамики волн и полных сейсмических полей. Эти возможности связаны со стабильностью формы сигналов в источнике независимо от точки его приложения и времен начала работы. Реализация этих возможностей связана с решением динамических задач для трехмерных реалистичных моделей среды. Практические приемы количественной обработки и интерпретации материалов наблюдения сейсмических и акустических волн основываются сейчас на физических представлениях и математическом аппарате лучевого метода. В задачах для сложных сред эти физические представления и количественные лучевые формулы имеют часто лишь асимптотический смысл в области достаточно высоких частот. От классического лучевого метода в этих случаях переходят либо к его нетривиальным физико-математическим расширениям, либо к использованию общих численных методов решения задач для дифференциальных уравнений. Метод определения формы дифрагирующего тела и его физических характеристик основывается на использовании информации о динамических свойствах волн в точках регистрации. Такие задачи относятся к классу обратных динамических задач дифракции волн. В этих задачах не только строится образ рассеивающего тела, но и изучаются проблемы единственности их решения при разных схемах наблюдения, а также вопросы устойчивости решения при постоянно присутствующем дефиците измерительной информации и существовании ошибок измерения и других шумов. Имеется успешный опыт решения двумерных обратных кинематических задач глобальной сейсмологии, когда был построен двумерный разрез верхней мантии Земли по сейсмологическим измерениям кинематического типа вдоль профиля Памир-Байкал, один из первых примеров «сейсмотомографии» – термина который появился позднее и применяется в настоящее время. В задачах активной сейсмологии с управляемыми вибрационными источниками становится возможным решение динамических обратных задач, основываясь на точно известных и контролируемых характеристиках излучаемого волнового поля, т. е. реализация возможностей «динамической томографии» трехмерных объектов в скалярном волновом поле.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алексеев А.С., Глинский Б.М., Геза Н.И., Еманов А.Ф., Кашун В.Н., Ковалевский В.В., Манштейн А.К., Селезнев В.С., Сердюков С.В., Соловьев В.М., Собисевич А.Л., Собисевич Л.Е., Хайретдинов М.С., Чичинин И.С., Юшин В.И. Активная сейсмология с мощными вибрационными источниками / отв. ред. Г.М. Цибульчик. - Новосибирск: ИВМиМГ СО РАН, Филиал «Гео» Изд. СО РАН, 2004. - С. 387.
2. Алексеев А.С., Глинский Б.М., Дряхлов С.И. Ковалевский В.В., Михайленко Б.Г., Пушной Б.М., Фатьянов А.Г., Хайретдинов М.С., Шорохов М.Н. Эффект

акустосейсмической индукции при вибросейсмическом зондировании // Докл. АН СССР. - 1996. - Т. 346, N 5. - С. 664-667.

3. Алексеев А.С., А.Ф. Еманов, Б.М. Глинский, В.В. Ковалевский, Б.Г. Михайленко, В.С. Селезнёв, В.И. Юшин, М.С. Хайретдинов, Д. Касахара, Т. Сато, К. Мочизуки, М.Н. Шорохов, А.П. Григорюк. Изучение структуры Алтае-Саянского региона с применением мощных вибросейсмических источников // Тр. ВЦ СО РАН. Серия: Математ. модел. в геофизике. – Вып. 4, Новосибирск, 1996. – С. 3-17.

4. Глинский Б.М., Еманов А.Ф., Ковалевский В.В., Соловьев В.М., Хайретдинов М.С. Экспериментальные исследования по вибросейсмической калибровке сейсмических трасс // Сб. науч. трудов «Современные математические и геологические модели природной среды». – М.: ОИФЗ РАН им. Шмидта. – 2002. - С. 153-165.

5. Глинский Б.М., Ковалевский В.В., Хайретдинов М.С. Взаимосвязь волновых полей мощных вибраторов с атмосферными и геодинамическими процессами // Геология и геофизика. - 1999. - Т. 40, N 3. - С. 431-441.

6. Глинский Б.М., Ковалевский В.В., Хайретдинов М.С. Вибросейсмический мониторинг сейсмоопасных зон // Вулканология и сейсмология. - 1999. - N 6. - С. 56-66.

7. Ковалевский В.В., Колюх Г.В. Моделирование сверхмощного шахтного гидрорезонансного виброисточника // Тр. междунар. конф. «Внутреннее ядро 2000». - М., 2001.

8. Мак Эвили. Глубинное зондирование методом «Вибросейс» в центральной Калифорнии // Проблемы вибрационного просвечивания Земли. - М.: Наука, 1977. - С. 152-162.

9. Николаев А.В., Артюшков Е.В., Чичинин И.С. и др. Вибрационное просвечивание Земли. - М.: ВИНТИ, 1974. Деп. N 2549-74.

10. Селезнев В.С., Еманов А.Ф., Соловьев В.М., Алексеев А.С., Глинский Б.М., Ковалевский В.В. Исследование земной коры и верхней мантии территории Сибири с использованием мощных вибрационных источников // Вестник НЯЦ РК, вып. 2. – 2004. - С. 154-159.

11. Чичинин И.С. Вопросы теории сейсмического виброзондирования // Методика сейсморазведки. - М.: Наука, 1965, С. 147-163.

12. Юшин В.И., Велинский В.В., Геза Н.И., Савиных В.С. Экспериментальная оценка тензочувствительности коры в районе Байкала по данным активного вибросейсмического мониторинга и упругого прилива // Геология и геофизика. - 1999. - Т. 40, N 3. - С. 395-408.

13. Kasahara J., Ysuruga K., Hasada Y., Yamaoka K., Fujii N., Yochida Y., Kunitmo T., Kumazawa M. A proposal of imaging of the plate boundary using the active monitoring method. // The Proceedings of 1<sup>st</sup> International Workshop on Active Monitoring in the Solid Earth Geophysics (IWAM04) - Mizunami, Japan, 2004 – p. 44-48.

14. Korneev V., Nadeau R., Vibroseismic monitoring of San Andreas Fault in California. // The Proceedings of 1<sup>st</sup> International Workshop on Active Monitoring in the Solid Earth Geophysics (IWAM04) - Mizunami, Japan, 2004 – p. 88-95.

© А.С. Алексеев, Б.М. Глинский, В.В. Ковалевский, 2006