

ИНЖЕНЕРНАЯ СЕЙСМОРАЗВЕДКА И СЕЙСМОАКУСТИКА

Теоретические и методические вопросы применения сейсмической разведки для решения задач инженерной геологии начали разрабатываться в Свердловском (ныне Уральском) горном институте с 1967 года. В последние годы в этом направлении выполнена группа исследований, позволяющая говорить о создании на кафедре структурной геофизики нового научного направления в разведочной геофизике — инженерной сейсморазведки. Свидетельством этому являются докторская диссертация В. И. Бондарева (1978 г.), шесть кандидатских диссертаций (В. Н. Агеев, 1974 г.; В. Б. Писецкий, 1976 г.; Б. М. Александров, 1979 г.; Н. И. Теряев, 1984 г.; С. М. Крылатков, 1986 г.; В. К. Лисунов, 1991 г.) и множество научных публикаций, докладов и сообщений, сделанных сотрудниками кафедры, а также большое число дипломных и курсовых проектов студентов специализации по этому направлению.

Тема исследований возникла по инициативе двух крупных уральских проектно-изыскательских организаций — УралТИСИЗ и УралТЭП — в 1967—1968 гг. На первых шагах ряд ученых кафедры структурной геофизики (Бондарев В. И., Шмаков В. Н., Агеев В. Н.) изучали возможности применения сейсмических методов для определения физико-механических свойств нескальных грунтов на территории Урала, Западной Сибири, Украины и других регионов. При этом большое внимание уделялось разработке методики полевых наземных сейсмических наблюдений. Совершенствовались существующие способы обработки годографов преломленных и рефрагированных волн для определения скоростного строения среды. Решались вопросы, связанные с теоретическим обоснованием вида связи между сейсмическими и физико-механическими свойствами нескальных грунтов. Анализ экспериментальных данных позволил установить ряд корреляционных зависимостей между важнейшими физико-механическими параметрами нескальных грунтов. Названные вопросы нашли свое отражение в ряде работ Бондарева В. И. [1] и в диссертационной работе Агеева В. Н. применительно к песчаным грунтам Западной Сибири и Украины. В. И. Бондаревым совместно с В. Б. Писецким [2], затем с Н. П. Курандиным, А. М. Гореликом и другими был проведен анализ и сформулированы главные требования к специализированной сейсмической аппаратуре, предназначенной для инженерно-геологических исследований в строительных целях.

Специфика предложенного метода исследований требовала существенно иного, чем в сейсморазведке КМПВ, подхода к обработке получаемых результатов. Учитывая это, большое внимание было уделено детальному изучению распределения истинных скоростей распространения упругих волн в разрезе с последующей оценкой физико-механических свойств грунтов. На первом этапе это сводилось к использованию только простейших средств автоматизации расчетов (палетки, таблицы). Необходимые графики и таблицы были одобрены Госстроем РСФСР и изданы в 1974 г. [3]. На втором этапе это привело к созданию отдельных программ на ЭВМ, упрощающих наиболее сложные вычисления. Эти программы получили широкое распространение в организациях Госстроя РСФСР и других министерств и ведомств. Однако ориентация на ЭВМ типа «Найри-2», которыми были в то время оснащены изыскательские организации, не позволяла использовать более сложные, но и более эффективные алгоритмы обработки

исходной информации. Данные обстоятельства привели к созданию комплексов программ для полуавтоматической обработки сейсмической информации «Грунт», затем «Грунт-2» (Бондарев В. И., Писецкий В. Б., Крылатков С. М.). Эти системы использовались многими изыскательскими организациями страны.

В конце 70-х гг. впервые решается задача теоретического обоснования и экспериментального опробования методики изучения скоростного строения среды по наблюдениям поверхностных волн типа Релея и Лява (Бондарев В. И., Писецкий В. Б., Крылатков С. М.). Одновременно ведутся разноплановые исследования в области инженерной сейсморазведки: разрабатывается экспресс-метод оценки свойств грунтов в движении (при участии В. В. Бодина), применяется сейсмический метод для оценки физико-механических свойств торфяных грунтов (Б. М. Александров). Разрабатываются теоретико-экспериментальные зависимости между физико-механическими и сейсмическими параметрами для глинистых и песчаных грунтов (при участии Н. И. Теряева). Решаются прямые и обратные задачи метода преломленных волн для двумерно-неоднородных сред (Крылатков С. М., Рычков С. А.).

Созданная в рамках этого научного направления технология использования инженерной сейсморазведки, а также сейсмоакустики для оценки физико-механических свойств грунтов нашла широкое применение при производстве инженерных изысканий на суше и на море. Уже в 1969 г. в УралТИСИЗе, а затем в УралТЭПе началось производственное внедрение разрабатываемой методики сейсмических исследований в комплексе полевых инженерно-геологических методов исследования грунтов. В последующие годы в изыскательских организациях страны накоплен значительный опыт таких исследований для решения сложных инженерно-геологических задач на стройплощадках крупных тепловых и атомных электростанций, многих объектах промышленного и гражданского строительства. Результатом этого явились разработанные с участием ученых кафедры нормативные документы [3, 4, 5], действующие в изыскательских организациях страны.

Созданное на кафедре научное направление состоит из следующих основных частей:

1. Оригинальная теория и методика решения прямых и обратных задач сейсморазведки по годографам первых волн.

В рамках этого введены в рассмотрение и заняли серьезное место в исследованиях непрерывная и слоисто-непрерывная сейсмические модели среды. Для решения прямой задачи использована идея замены неоднородной модели среды до глубины максимального проникания сейсмического луча некоторой эффективной моделью с линейным законом изменения скорости с глубиной. Получены аналитические выражения и проанализированы характерные особенности годографов преломленно-рефрагированных волн для полутора десятков основных моделей среды типа неоднородный слой на неоднородном полупространстве. Для этих же моделей изучены особенности вертикальных годографов первых волн (для методики вертикального сейсмического профилирования). Разработаны методы интерпретации годографов рефрагированных волн, основанные на последовательной совместной аппроксимации небольшого интервала (элемента) годографа и всего годографа от начальной точки до выбранного интервала функцией заданного вида, соответствующей линейному или более сложному закону изменения скорости с глубиной. Впервые для интерпретации одиночного годографа и системы годографов первых волн применен аппарат линейного программирования. Созданы способы определения скоростного разреза среды по непродольному вертикальному годографу первых волн.

2. Теоретико-методические основы и экспериментальное обоснование использования фазовых годографов поверхностных волн релеевского типа и волн типа Лява с целью получения информации о строении среды по скорости распространения поперечных волн.

В частности, построена теория, проведены необходимые расчеты и проанализированы так называемые дисперсионные кривые волн типа Релея и Лява для некоторых основных сейсмических моделей среды типа неоднородный слой на неоднородном полупространстве. Предложена, теоретически обоснована и практически подтверждена методика определения скоростей распространения поперечных волн по разрезу на основе экспериментально полученных зависимостей фазовых скоростей поверхностных волн типа Релея или Лява от их видимого периода (частоты). Разработана методика возбуждения и регистрации таких волн в инженерной сейсморазведке.

3. Новая сейсмическая модель песчано-глинистого грунта, позволяющая на основе ограниченного объема дополнительной информации установить теоретико-экспериментальные зависимости между параметрами физико-механических свойств грунтов и их сейсмическими характеристиками.

4. Комплекс оригинальных методических приемов проведения полевых экспериментальных исследований как на поверхности земли, так и с использованием инженерно-геологических скважин.

Решены технические и технологические задачи, связанные с успешным проведением наземных и скважинных работ сейсмическим методом в инженерно-геологических целях. Составлены и опубликованы методические рекомендации, инструкции по наземным и скважинным методам инженерно-сейсмических исследований, рекомендации по получению и применению при изучении физико-механических свойств грунтов результатов наблюдений поверхностных волн.

5. Организационные мероприятия (обучение специалистов, реклама и т. п.) по внедрению разработанной технологии в десятки организаций, выполняющих инженерно-геологические исследования.

Обучение специалистов проведено на организованных при СГИ (1975, 1977 гг.) курсах повышения квалификации инженеров-геофизиков по инженерной сейсморазведке. Такие курсы успешно закончили более 60 человек, представителей многих исследовательских организаций страны. Инструкции, рекомендации, алгоритмы и программы для ЭВМ различного типа (Наири-2, Наири-3-3, ЕС-1020, ЕС-1022, БЭСМ-6) постоянно рассылались по заявкам многочисленных организаций, занимающихся инженерно-геологическими изысканиями. Во многих из них эти разработки нашли успешное применение.

С течением времени, по мере накопления опыта и фактического материала, изменялась оценка различных сторон разработанной теории и методики. Уточнялись и видоизменялись способы получения и обработки информации. По мере изменения материальной базы изыскательских организаций перерабатывались методики и программыные средства обработки сейсмических данных. Этот процесс продолжается и в настоящее время, что свидетельствует о жизненности созданного 25 лет назад научного направления — инженерной сейсморазведки.

Перспективы развития инженерной сейсморазведки связаны со следующими направлениями работ:

— разработка и внедрение цифровой компьютеризированной многоканальной портативной регистрирующей аппаратуры;

— усовершенствование методики наблюдений, в частности, выполнение работ по плотной сети наблюдений, внедрение пространственных систем наблюдений;

— разработка машинных методов решения прямых и обратных за-

дач на персональных ЭВМ, включая процедуры на основе цифровой томографии, а также развитую систему отображения данных и результатов обработки;

— разработка таких сторон теории, как учет горизонтальных неоднородностей среды, получение оценок сейсмических и физико-механических характеристик среды в зонах волноводов.

Можно ожидать более рационального сочетания инженерно-сейсмических исследований с геологическими методами, расширения областей применения инженерной сейсморазведки, в частности, для решения экологических проблем и проведения мониторинга.

В начале восьмидесятых годов в СССР начались интенсивные геолого-геофизические работы по освоению месторождений нефти и газа на шельфе. В связи с необходимостью проведения буровых работ и дальнейшего освоения месторождений возникла объективная необходимость в проведении инженерно-геологических и геофизических исследований на шельфе. Для разработки и создания необходимой техники и технологии было создано Всесоюзное морское научно-производственное объединение по морской инженерной геологии и геофизике (ВМНПО «Союзморинжгеология», г. Рига). Один из авторов был приглашен на работу в качестве руководителя объединения по геофизическому направлению. В рамках этого объединения были выполнены научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по адаптации ранее развитых идей в области инженерной сейсморазведки применительно к специфическим условиям морских работ и морских грунтов. На основе этих исследований под руководством одного из авторов была создана специфическая ветвь инженерной геофизики — морская инженерная геофизика. Важнейшей компонентой этого комплекса является цифровая многоканальная сейсмоакустика. Для выполнения полевых работ впервые в мире на основе отечественной сейсморазведочной аппаратуры типа «Прогресс-2» была создана многоканальная (8 или 12 каналов) цифровая сейсмоакустическая аппаратура, получившая название МЦСАК-2. Она позволяла в движении выполнять сейсмоакустические зондирования в частотном диапазоне до 750 (при 8 каналах) или до 500 Гц (при 12 каналах). Опытное производство объединения выпустило около 10 экземпляров такой аппаратуры. Для обработки и интерпретации получаемых материалов в объединении на базе программного комплекса СЦЗ-3 был создан специализированный комплекс, получивший название СЦС-3 ИНЖГЕО. На базе этого аппаратного и программного комплексов была создана промышленная технология, на базе которой производственные организации объединения на Балтийском, Черном, Баренцевом, Карском и Охотском морях в период 1985—1990 годы выполнили более 25 тыс. км профилей. По мере увеличения объемов выполняемых работ становилось очевидным, что ориентация на централизованную обработку в г. Риге для производственных экспедиций, расположенных в Одессе, Мурманске и Южно-Сахалинске, становится обременительной. Возникла потребность создания локальных обрабатывающих систем, ориентированных на возможность экспедиций. Для решения этой задачи под руководством В. И. Бондарева уже в составе кафедры структурной геофизики Свердловского горного института была сформирована группа специалистов, силами которой в 1990—1991 гг. разработан, создан и введен в эксплуатацию в Одессе, Южно-Сахалинске и Мурманске аппаратурно-методический комплекс для обработки и интерпретации в интерактивном режиме данных цифровой многоканальной сейсмоакустики. Основу этого комплекса составляют: аппаратурно-технологическая база; программно-методическая часть.

Аппаратурно-технологическая база включает в себя: персональный

компьютер типа РС-АТ-286/386; два магнитофона типа СМ-5309; плоттер типа ЭСПУ-К (ЭСПУ-2); плату (контроллер) связи; служебное матобеспечение.

Программно-методическая часть содержит: мобильную обрабатывающую сейсмоакустическую систему цифровой сейсмоакустики (МОСС-МЦСАК); руководство геофизику-интерпретатору; руководство аппаратурно-методического комплекса.

Обрабатывающая система МОСС-МЦСАК позволяет по исходным полевым записям в мультиплексной форме выполнить всю первичную обработку (от демультимплексации до оценки качества полевых записей), осуществить в интерактивном режиме выделение и корреляцию годографов отраженных волн и выполнить все необходимые дальнейшие расчеты для получения следующих конечных материалов: временной и глубинный разрезы в штриховой форме, графики пластовых скоростей по профилю в различной форме, графики показателей физико-механических свойств грунтов, итоговую информацию по всем параметрам в табличной форме по всем зондированиям.

Принципиально новой в системе МОСС-МЦСАК является идеология определения эффективных скоростей по совокупности годографов либо в зондировании (от разных границ), либо по совокупности зондирований (от одного горизонта). Этот методический прием позволяет существенно повысить точность и надежность определения по этим данным пластовых скоростей.

Определение пластовой модели среды по совокупности годографов в зондировании осуществляется исходя из условия наилучшего совпадения расчетного годографа с экспериментальным, начиная от первой отражающей границы послойно вниз. Качество совпадения расчетного и экспериментального годографов определяется по совокупности признаков, характеризующих различные стороны сходства годографов: близость t_0 кривизны, площадей, ограниченных годографами, и т. д.— всего около двух десятков признаков. При этом расчет параметров очередного слоя проводится с учетом результатов определения параметров пластовой модели среды в предыдущем шаге.

Определение пластовой модели по одному горизонту, но по ансамблю соседних зондирований построено на минимизации совокупности сумм квадратов отклонений между теоретическими и экспериментальными годографами как по годографу, так и по ансамблю годографов на соседних зондированиях. При этом предполагается, что эффективная скорость до расчетного горизонта одинакова, а глубина залегания различна на разных зондированиях.

В обоих случаях сформулированные алгоритмы сложны, в силу чего осуществляется решение поставленной задачи численными методами.

Эти алгоритмы лежат в основе разработанной системы МОСС-МЦСАК для обработки сейсмоакустической информации и используются в производственных экспедициях Одессы, Мурманска и Южно-Сахалинска.

На основе сказанного можно констатировать, что при непосредственном участии сотрудников кафедры разработана, создана и внедрена в практику работ принципиально новая технология ведения морских сейсмоакустических исследований — многоканальная цифровая сейсмоакустика, открывающая реальные возможности дистанционной оперативной оценки свойств и состояния морских грунтов.

Созданные на кафедре структурной геофизики за последнюю четверть века новые научные направления — инженерная сейсморазведка и сейсмоакустика — имеют большие возможности для дальнейшего развития и совершенствования и открывают широкие перспективы использования сейсмических методов в инженерной геологии.

1. Бондарев В. И., Агеев В. Н. Вероятностно-статистическое обоснование корреляционной зависимости модуля деформации песчаных грунтов от модуля упругости // Реферативный сборник научно-исследовательских работ СГИ.— Свердловск, СГИ.— 1973.— С. 62—65.
2. Бондарев В. И., Писецкий В. Б. Сейсмическая аппаратура для инженерно-геологических исследований // Геофизическая аппаратура.— Л.: Наука, 1972. Вып. 50.— С. 143—150.
3. Рекомендации по применению сейсмической разведки для изучения физико-механических свойств рыхлых грунтов в естественном залегании / В. И. Бондарев.— М.: Стройизыскания, 1974.—142 с.
4. Рекомендации по применению вертикального сейсмического профилирования в инженерно-геологических скважинах с целью оценки физико-механических свойств рыхлых грунтов / В. И. Бондарев, В. Б. Писецкий, В. Н. Агеев, Г. Г. Вербицкий.— М.: Стройизыскания, 1976.—30 с.
5. Руководство по эксплуатации 1-й части системы «Грунт-2» / В. И. Бондарев, В. Б. Писецкий, С. М. Крылатков.— М.: Стройизыскания, 1982.—128 с.

УДК 550.83

А. В. Давыдов

СПОСОБ ОПРОБОВАНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД И РУД ПО ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЮ

Опробование горных пород и руд по гамма-излучению производится радиометрами направленного приема излучения. В настоящее время на производстве используются два типа радиометров опробования — однодетекторные и двухдетекторные [5]. В однодетекторных радиометрах направленность опробования создается частичной экранировкой детектора от мешающего (фонового) излучения вне зоны опробования (полная экранировка невозможна по весогабаритным характеристикам свинцовых экранов) и двойным измерением интенсивности излучения на точках опробования: с открытым и закрытым окном в зону опробования (с применением специального фильтра окна). Более производительными являются двухдетекторные радиометры, в которых интенсивность излучения одновременно измеряется вторым (фоновым) детектором и вычитается из измерений первого детектора, помещенного в специальный экран с окном в зону опробования, с определенным коэффициентом приведения. Однако детекторы в таком радиометре занимают разное геометрическое положение относительно зоны опробования, а соответственно приведение измерений фонового детектора к положению основного детектора (решение системы двух уравнений относительно интенсивности излучения из зоны опробования) осуществляется с определенной погрешностью, которая может возрастать до существенных значений (более 10 %) при большой фоновой интенсивности излучения (например, в условиях горных выработок) и при больших градиентах интенсивности излучения на площади опробования (при резко неравномерном распределении содержаний радиоактивных элементов в породах), т. е. именно тогда, когда требуется повышенная точность измерений. Разное положение детекторов относительно зоны опробования накладывает определенные ограничения и на размеры детекторов, а соответственно и на чувствительность приборов.

Возможен и другой, спектральный способ получения системы двух уравнений и их решения относительно интенсивности излучения из зоны опробования, при этом способ реализуется с использованием только одного детектора. Сущность способа заключается в следующем.