



8.4. МНОГОВОЛНОВАЯ СЕЙСМОРАЗВЕДКА И ВИБРАЦИОННОЕ ПРОСВЕЧИВАНИЕ – ШКОЛА АКАДЕМИКА Н.Н. ПУЗЫРЁВА

В этом разделе объединены фрагменты, непосредственно связанные с идеями и деятельностью Николая Никитовича Пузырёва. Выше уже отмечалась его роль в развитии глубинных сейсмических зондирований. Много лет Н.Н. Пузырёв являлся руководителем отделения геофизики в ИГиГ СО АН СССР, затем поддержал формирование Института геофизики СО РАН и был его научным руководителем. На этих постах он внес значительный вклад в разные стороны геофизических исследований ИГиГ и ОИГГМ СО РАН.

СТАНОВЛЕНИЕ МНОГОВОЛНОВОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ (теоретическая и практическая осуществимость)

Б.П. Сибиряков

В 1952 г. в научном журнале была опубликована дипломная работа студентов Ленинградского университета Евгения Ивановича Шемякина и Лазаря Михайловича Файншмидта «Касательный удар в полупространство». Суть работы заключалась в том, что в сечениях, перпендикулярных профилю наблюдений, волновое поле оказывалось удивительно простым. Продольные волны там просто отсутствовали, а поперечные относились к так называемым волнам типа SH , которые не порождали других волн в актах отражения и преломления. Профессор Георгий Иванович Петрашень, инициатор создания лаборатории динамики упругих сред в Ленинградском университете, а также его молодые выпускники сразу поняли огромное значение этого теоретического прогноза для сейсморазведки. Они тут же организовали отряд для проверки результатов в поле. В качестве источника касательной силы использовался обыкновенный механический копёр. Опыты отлично подтвердили результаты теории. Автор этих строк сам видел отчет о полевых работах. Даже по современным требованиям качество записи волн было просто отличным. В то время началась активная работа по внедрению в сознание геофизиков результатов динамической теории упругости. Было проведено огромное число лекций, демонстраций различных натуральных экспериментов, выпущены таблицы динамических параметров отраженных и преломленных волн.

Однако великолепная идея располагать сейсмоприемники поперек профиля наблюдений, что многим тогда казалось просто диким, натолкнулась на, казалось бы, чисто технические неудобства. Для глубин, интересных сейсморазведке, маломощные копры как источники просто не годились, а создание больших механических ударников требовало специального транспорта. Сами же большие копры тряслись при падении груза, создавая тем самым мощное поле помех.

Н.Н. Пузырёв был одним из первых сейсморазведчиков, который правильно оценил и достоинства, и недостатки новых идей ленинградцев. Есте-

ственно, что он попытался создать взрывной аналог касательного удара, который бы сочетал в себе касательную силу с мощностью и удобством взрыва.

Первые опыты в Саратовской области по регистрации поперечных волн, которые возбуждались взрывами на стенках специально вырытых полостей, показали весьма странный результат. Поперечных волн регистрировалось огромное количество, но не было обращения фаз при обращении знака воздействия, т. е. при действии касательной силы в противоположную сторону. К чести Н.Н. Пузырёва, он оценил результаты опытов как полный провал, именно полный, а не частичный.

В таком подвешенном состоянии и находилась первоначальная идея, когда в Институте геологии и геофизики была создана лаборатория сейсморазведки. В Сибири наряду с экспериментами, вначале неудачными, была поставлена задача вскрыть их причину. Сам Николай Никитович считал, что теоретическая модель источника предполагает сжатие на переднем конце его и растяжение на тыльной стороне, а при практическом возбуждении сжатие обеспечено давлением взрыва, в то время как о растяжении противоположной стенки никто не заботится. Тем самым реальная модель источника серьезно отличается от его теоретической схемы. Как однажды выразился остроумный человек, хорошо было бы поломать магнит так, чтобы отделить северный и южный полюса друг от друга. Почувствовав в технических неприятностях фундаментальную проблему, один молодой сотрудник Н.Н. увлекся этим делом всерьез. Н.Н. решил отправить его к Е.И. Шемякину, который стал уже к тому времени доктором наук и заведующим лабораторией в Институте теоретической и прикладной механики. Удалось построить теорию источников конечных размеров и дать точные решения довольно широкого круга задач для таких источников.

И здесь сразу же в научных кругах возникло очень сильное возражение. Дело в том, что принцип Сен-Венана утверждает независимость подробностей распределения сил, важна лишь равнодействующая сила. Стало быть, все рассуждения и выкладки с самого начала обречены на провал. Г.И. Петрашень в очень резкой форме выразил свое отношение к недостаточной компетентности сибиряков. В Ленинграде лишь один замечательный ученый и человек удивительной научной культуры — Василий Михайлович Бабич, высказался более осторожно и более содержательно. Он объяснил молодому человеку, что в статике принцип Сен-Венана абсолютен, а вот в динамике он по крайней мере не абсолютен. Окрыленный этой полуподдержкой, молодой человек обратился к Е.И. Шемякину и сослался на устное высказывание В.М. Бабича. На что Е.И. Шемякин возразил, что Леонид Иосифович Слепян недавно обобщил принцип Сен-Венана на динамические явления. Ищи ошибку сам, таков был вердикт. Состоялась встреча с Л.И. Слепяном, одним из замечательных ученых нашего времени, который тогда работал в Институте гидродинамики. Ознакомившись с работой, он сказал, что диссертанту и ему самому следует поблагодарить друг друга, и, во-первых, он согласен оппонировать на защите, а во-вторых, результаты диссертанта он использует в своих лекциях. В то же время работа заинтересовала известного специалиста в области взрыва Владимира Михайловича Кузнецова. Так формировалась концепция взрывных источников конечных размеров. Однако было официальное письмо Г.И. Петрашенья в Объединенный совет по физико-математическим и техническим наукам под председательством Самсона Семёновича Кутателадзе, на что Л.И. Слепян ответил, что научная дискуссия на эту тему



вполне уместна на Совете. И дискуссия состоялась, хотя Н.Н. Пузырёв не принимал в ней участия. Таким образом, одна из важных догадок Н.Н. Пузырёва о том, что подробности инженерных решений имеют существенное, иногда решающее значение в деле изучения сейсмических волн получила подтверждение в ходе исключительно острой и напряженной дискуссии.

Надо сказать, что работы по взрывам были инициированы Михаилом Алексеевичем Лаврентьевым в рамках совета по народно-хозяйственному использованию взрыва. Именно в Новосибирске наиболее часто проходили конференции и семинары по различным аспектам взрывной тематики. Возбуждение сейсмических волн взрывами органично вошло в общую проблематику этого крупного научного направления. В 1964 г. на льду Обского моря Константин Александрович Лебедев провел эксперименты на ледовых полостях с малыми зарядами. Полости, в которых находился воздух, не давали никакого обращения фаз поперечных волн в ледяной пластине, в то время как полости, заполненные снегом и колотым льдом, давали прекрасное обращение фаз, как при горизонтальном ударе. Это вызвало недоумение. Как же так? Ведь, заполняя полость снегом и колотым льдом, мы уничтожаем асимметрию взрыва, приближаемся как бы к однородной среде, какие уж тут касательные удары? И здесь как раз подоспела новая физика. В начале 60-х годов полагали, что кривизна диаграммы «напряжение–деформация» для всех материалов отрицательна, т. е. скорость волн растет с ростом давления в волне. Была даже теорема Цемплена о том, что существуют ударные волны сжатия и не может существовать ударных волн разрежения. Такими материалами являются, например, воздух или вода. Однако были обнаружены и материалы с положительной кривизной диаграммы, у которых скорость падала с ростом давления. Пришлось переписывать классические учебники. Такие среды были названы средами с необычными термодинамическими свойствами. Это обычные грунты, содержащие воздух в порах, а также вода, насыщенная газовыми пузырями. Мощные возмущения в таких средах рас-



Лауреаты Государственной премии СССР, 1987 г.
Слева направо: Б.П. Сибиряков, А.В. Тригубов, академик Н.Н. Пузырёв

пространяются не в виде ударных волн, а в виде так называемых волн Римана, скорость которых тем меньше, чем выше давление. Так что, кроме поглощения в мягком грунте, волна Римана просто не успевает дойти до противоположной стенки полости, что и обуславливает взрывной аналог касательного удара. Возникло известное множество технологических приемов решения задачи возбуждения поперечных волн, как в СССР, так и за границей. В 1987 г. группе сотрудников под руководством Н.Н. Пузырёва была присуждена Государственная премия СССР за работы в области многоволновой сейсморазведки, в том числе за работы по возбуждению волн.

Тем самым подтвердилось, что первоначальная идея редко сохраняется в своем прежнем виде при попытке воплотить ее в жизнь. Как правило, она насыщается новым физическим и инженерным содержанием. Развитие теории и практики возбуждения волн прекрасный тому пример. Автор этих строк часто выезжал с Н.Н. Пузырёвым в поле, и первое, что делал Н.Н., это выбирал глубину погружения зарядов в скважину таким образом, чтобы не попасть в слои, содержащие воздух (он искал пластичные глины), и добивался этим поразительного эффекта. Заряд снижался обычно раз в десять, а качество записей сильно выигрывало от этого. Правда, потом наступила эпоха больших систем наблюдений, и качество как возбуждения, так и регистрации волн резко упало. Тем не менее опыт и теория возбуждения волн разных типов, развитая под руководством Н.Н. Пузырёва, становятся в настоящее время особенно актуальными. Сомнительный лозунг — вычислительная машина всё вынесет на своих плечах — себя уже исчерпал, и внимание к процессам возбуждения волн разных типов снова начинает возрастать как в России, так и за рубежом.

ДИНАМИКА МИКРОНЕОДНОРОДНЫХ СРЕД И ПРОБЛЕМА ПРЯМЫХ ПОИСКОВ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НЕФТИ И ГАЗА

В 1975 г. Н.Н. Пузырёв вызвал автора этих строк и сказал: «Присмотритесь к проблеме прямых поисков углеводородов и составьте мнение о научном содержании этой проблемы». Примерно через месяц я объяснил шефу, что научной проблемы здесь просто нет. Проблема сформулирована чисто административным образом, т. е. надо лучше организовывать наблюдения, больше и чаще бурить, активной изучать геологию и т. д. Иными словами, делать то же самое, но несколько лучше. Н.Н. Пузырёв ответил, что это плохая работа с моей стороны, надо попробовать еще раз разобраться и сказать нечто дельное.

Повторное внимательное рассмотрение проблемы привело меня к ошеломляющему выводу. Научное содержание проблемы состоит в отказе от модели сплошной среды и в переходе к дискретным моделям, которые должны дать не только описание средних свойств среды, но и скачков физических параметров при переходе от скелета к флюиду. А так как скачки сосредоточены на сложных внутренних поверхностях микронеоднородных тел, то не только пористость, но и вся структура порового пространства должна некоторым образом быть отражена в уравнениях равновесия и движения, а также в граничных условиях. Правда, в это время уже существовала интегральная геометрия для описания сложных структур типа нефтяных коллекторов, но дистанция от новой геометрии до новой физики казалась просто бесконечной. Эта проблема известна со времен Ньютона и называется проблемой



многих тел (или многих частиц). Я сказал Николаю Никитовичу, что за такую проблему не возьмется, по-видимому, ни один человек в Академгородке, а если и возьмется, то его будут считать просто сумасшедшим. «Вот Вы и возьмитесь», — был краткий ответ. — «Да ведь нас просто засмеют». — «А мы никому не скажем».

Перед этим Н.Н. Пузырёв делился со мной некоторыми наблюдениями о прохождении диссертаций на нашем совете. Он говорил, что есть работы, где диссертант ныряет мелко и быстро выходит на поверхность с новыми результатами, но не очень существенными. Другие работы связываются с более глубоким погружением, требуют гораздо больше времени, но результаты весьма существенны. И, наконец, есть люди, которые ныряют так глубоко, что не выходят на поверхность никогда. Для меня открылась реальная перспектива третьего пути. Дело даже не в том, что проблема невероятно сложна. Просто не было внятных экспериментальных результатов, где такая мощная проблема заявила бы о себе без обиняков и двояких толкований. Как ни странно, решиться на такое дело мне помогла одна фраза К. Маркса из предисловия к «Капиталу». Там написано, что у стен науки, как и у врат ада, должна быть высечена фраза: «Оставь надежду, всяк сюда входящий». Здесь Маркс просто цитирует Данте. Потянулись трудные дни, недели, месяцы и годы, когда не было никаких работ, правда была свобода делать что хочешь. Н.Н. Пузырёв договорился с Н.Н. Яненко, тогдашним директором ИТПМ СО АН СССР, что с нашей стороны, а также со стороны механиков будет создана неформальная группа для продвижения этих проблем. Было решено вести себя тихо, чтобы не пугать научную общественность и не особенно позориться в случае провала. Началось время наших семинаров в ИТПМ, а также Всесоюзных совещаний по механике, где в той или иной форме поднималась наша проблема. На одной из таких конференций, организованных Н.Н. Яненко в Ужгороде, выступал и Николай Никитович.

Резкое ускорение наступило после появления работы Грегори в США. Он экспериментально наблюдал на образцах аномально высокое отношение скоростей поперечных волн к скоростям продольных волн, что формально означало появление отрицательных коэффициентов Пуассона. Наши тоже наблюдали аналогичные вещи, но не публиковали их, боясь прослыть неграмотными исследователями. Ведь отрицательный коэффициент Пуассона означает, что стержень из микронеоднородного материала при растяжении не утоняется, а, наоборот, увеличивает свои поперечные размеры. Мы еще ничего не сделали, но было ясно, что проблема показала свои грозные клыки, что она реальна, что мы не умничаем и не идем по стопам Дон Кихота. Николай Никитович встретился на общем собрании АН СССР с академиком В.Л. Гинзбургом, и тот подтвердил фундаментальность поставленной проблемы. Жить стало легче, жить стало веселее. Постепенно табу с отрицательных коэффициентов Пуассона было снято, и такие данные перестали удивлять научную общественность, хотя причин столь странного поведения некоторых коллекторов мы так и не понимали. Некоторые не понимают до сих пор. Определелась и логика развития исследований. Это прежде всего структура порового пространства и интегральная геометрия, затем элементарные уравнения равновесия и движения микроструктур, межфазовые взаимодействия и, наконец, прогноз напряженного состояния и его устойчивости в средах со структурой. И здесь произошел сбой. Как только Николая Никитовича из-

брали в академики, он сразу же потерял здоровье, зрение, его стали утомлять сложные проблемы. По-видимому, к таким вещам надо относиться спокойно, это закон жизни, и, конечно, с этим законом следует считаться. Неожиданно для меня в проблему включился академик С.В. Гольдин. Он сразу понял, что наши проблемы теснейшим образом связаны с проблемами мезомеханики, которые активно развиваются в Томске под руководством академика В.Е. Панина. Во многом благодаря С.В. Гольдину началось и продолжается наше сотрудничество с Институтом физики прочности и материаловедения СО РАН в Томске.

Постепенно стало ясно, что на смену модели сплошной среды должны быть созданы модели континуума со структурой, которая описана функционалами интегральной геометрии. Великая гипотеза сплошной среды, созданная Коши и Пуассоном, служила человечеству почти триста лет, но стала величайшим тормозом для развития физики блочных сред и теоретической сейсмологии. Словесное признание блочности, иерархичности геологических сред никак не подтверждалось физико-математическим признанием этого обстоятельства. Когда же удалось создать простейшую модель континуума со структурой, то выяснилось, что и уравнения равновесия, и уравнения движения оказались уравнениями в частных производных бесконечного порядка. Огромное число физических следствий из этой модели сложного пространства далеко превысило наши самые смелые ожидания. Стало понятно, что коллекторы обладают особыми отражательными свойствами, что неустойчивость начинается с появления странных волн с исключительно низкими скоростями, ничего общего не имеющими со скоростями продольных и поперечных волн. Стало ясно, что такое сейсмическая эмиссия и многое другое. Выяснилось, что между статикой и динамикой лежит особое метастабильное состояние среды, когда не действуют ни классические уравнения равновесия, ни классические уравнения движения. Объяснение отрицательного коэффициента Пуассона оказалось на этом фоне мелким делом.

В заключение хочется высказать одну «крамольную» мысль. Конечно, нужно общение, нужны публикации, нужны съезды и конференции, все это верно. Но, кроме того, нужны еще тихие, внешне незаметные, но насыщенные идейно собрания и семинары, нужны паузы в том смысле, чтобы не привлекать внимания научной общественности, тем более средств массовой информации, как к персонам, так и к проблемам. Эта философия совершенно чужда Европе и Америке, она больше свойственна Китаю и Японии. У японцев даже есть такое понятие, как тайный самурайский подвиг. Преждевременный шум почти всегда кончался неудачами, чему мы были свидетелями в нашей недавней истории как науки, так и страны в целом.



Академики
Н.Н. Пузырёв и С.В. Гольдин



ЗАГАДОЧНОЕ ЯВЛЕНИЕ, ИЛИ КАК ОБНАРУЖИЛИ АЗИМУТАЛЬНУЮ АНИЗОТРОПИЮ

И.Р. Оболенцева

Многоволновые сейсмические исследования как научное направление, развиваемое под руководством Николая Никитовича Пузырёва в Институте геологии и геофизики (и далее в Институте геофизики СО РАН), берут свое начало с 1960–1961 гг., когда Н.Н. Пузырёв переехал из Москвы в Новосибирск и возглавил лабораторию сейсморазведки. К этому времени он был уже известным ученым, в расцвете сил и творческих способностей. Была издана знаменитая «синяя книга» — «Интерпретация данных сейсморазведки методом отраженных волн» (1959), подытожившая его исследования в этой области. Исследования в скважинах были отражены в книге «Измерение сейсмических скоростей в скважинах», изданной двумя годами ранее. Открывались широкие горизонты новых творческих поисков. Где-то вблизи маячило новое направление — исследование поперечных волн с целью их использования в решении задач сейсморазведки. Заметим, что в практике сейсморазведки в то время использовались только продольные волны, а поперечные и обменные, присутствовавшие на полевых сейсмограммах независимо от воли людей, производителей или экспериментаторов, считались обычными помехами, с которыми надо бороться.

Разворот мыслей Николая Никитовича в сторону поперечных волн произошел частично по воле случая, частично в силу его природной любознательности, стремления к познанию неизведанного. Случаем послужило решение руководства ВНИИГеофизики в начале 1958 г. организовать методическую партию по проблемам возбуждения и регистрации поперечных волн и назначить Н.Н. Пузырёва ее начальником. Неслучайным был большой интерес Николая Никитовича к поперечным волнам. Он появился у него после знакомства с теоретико-экспериментальными работами ЛОМИ и ЛГУ в этом направлении, проводившимися в 1952–1956 гг. под руководством Г.И. Петрашеня. Особенно его поразили эксперименты, выполненные ленинградцами (Натальей Ивановной Берденниковой, Артёмом Павловичем Волиным, Александром Георгиевичем Рудаковым, Владимиром Владимировичем Жадиным, Юрием Ивановичем Лимбахом) в Краснодарском крае, куда он приезжал летом 1956 г. и имел возможность видеть все собственными глазами. В «Записках геофизика» Николай Никитович пишет: «Отмечу огромный энтузиазм при проведении полевых экспериментов сотрудниками ЛГУ и ЛОМИ. Этот энтузиазм передался и мне, и потому в 1958 году я без колебаний принял предложение взять на себя научно-техническое руководство партией поперечных волн во ВНИИГеофизике».

Летом 1958 г. начались первые экспериментальные работы по поперечным волнам. Они проводились в Саратовской области сотрудниками ВНИИГеофизики: самим Н.Н. Пузырёвым и Лидией Николаевной Худобиной, Татьяной Николаевной Куличихиной, Тамарой Михайловной Бахаревской, Людмилой Владимировной Каржевой и Натальей Константиновной Молодцовой — при участии двух сотрудников ЛГУ: Н.И. Берденниковой и Ю.И. Лимбаха. Были продолжены начатые в 1952–1956 гг. исследования ЛГУ и ЛОМИ по изучению характеристик поперечных волн (скоростей, поглоще-

ния, поляризации, анизотропии) и по возбуждению поперечных волн ударными воздействиями и взрывами. Летом 1959 г. Николая Никитовича на посту начальника партии поперечных волн ВНИИГеофизики сменил Леонид Юрьевич Бродов, в связи с переходом Николая Никитовича на работу в СО АН СССР. Ему же (Л.Ю. Бродову) было поручено руководство исследованиями по поперечным волнам. С этого времени развитие метода поперечных волн шло параллельно, в тесном сотрудничестве и взаимодействии во ВНИИГеофизике, под руководством Л.Ю. Бродова, и в Сибирском отделении, под руководством Н.Н. Пузырёва.

Серия полевых экспериментов по возбуждению поперечных волн и изучению их свойств была продолжена в 1959–1960 гг. Их география изменилась: работы проводились в нескольких местах Западной Сибири, число участников экспериментов возросло: ВНИИГеофизика (Б.Е. Щербакова), Новосибирский геофизический трест (Ю.И. Недашковский), ИГиГ СО АН (Эрик Васильевич Никольский и Станислав Васильевич Потапьев). Главные усилия были по-прежнему сосредоточены на поиске мощных источников поперечных волн и на изучении обменных преломленных волн с обменами на неглубоко залегающих границах. Как известно, из источника идут продольные волны. Они становятся поперечными в процессе отражения–преломления на границах при обмене типа колебаний ($P \rightarrow S$). Эти исследования кратко описаны в «Записках геофизика» Н.Н. Пузырёва, а научные результаты освещены в статьях участников экспериментов, опубликованных в 60-х годах.

В Институте геологии и геофизики развитие исследований по поперечным волнам в течение 60–80-х годов шло по следующим основным направлениям: создание направленных источников поперечных волн, импульсных и вибрационных; разработка способов регистрации и обработки данных поперечных и обменных волн; изучение скоростей S -волн, отношения скоростей P - и S -волн, поглощения для различных пород в различных сейсмогеологических условиях; исследование поляризации поперечных и обменных волн в средах различного строения; выявление и изучение анизотропии, а также создание способов обработки и интерпретации данных для анизотропных сред.

В начале 60-х годов совокупность методов, направленных на решение вышеперечисленных задач, была названа «методом поперечных и обменных волн». Позже, в 80-е годы, совместному использованию продольных P -волн и двух типов поперечных, SV и SH , в различных комбинациях (например, $P + SH$) было дано общее название «многоволновые сейсмические исследования», в частном случае – «многоволновая сейсморазведка». (Объектом многоволновых сейсмических исследований являются земная кора и верхняя мантия Земли, а объектом сейсморазведки – самая верхняя часть земной коры, содержащая углеводороды и другие полезные ископаемые.)

Анизотропия упругих свойств геологических сред в начальный период многоволновых сейсмических исследований воспринималась скорее как некоторое побочное явление, чем как одно из самых главных, без знания и правильного учета которого невозможно само использование поперечных волн. Такое отношение к анизотропии было вполне естественным, потому что в то время была известна только анизотропия, связанная с тонкой слоистостью геологической среды. Сведения о ней появились в иностранной литературе в 30-е годы, когда при полевых работах стали выявляться различия, и нередко весьма существенные, между скоростями продольных волн, определенными по вертикальному и по наклонным лучам. Проблема построения эффективной модели тонкослоистой среды, т. е. замены неоднородной изотропной



среды другой — однородной, но анизотропной с осью симметрии, нормальной напластованиям, — была решена в течение 1940–1956 гг. в нашей стране Анатолием Георгиевичем Тарховым, Юрием Владимировичем Ризниченко, Сергеем Михайловичем Рыговым (за рубежом — Postma, 1956). Методы интерпретации были предложены Ильёй Исидоровичем Гурвичем (1940), а первые полевые эксперименты по регистрации поперечных волн двух типов, *SV* и *SH*, проведены Н.И. Берденниковой (1958).

Об анизотропии я впервые узнала от Н.Н. Пузырёва, когда пришла в 1961 г. работать под его руководством в Институт геологии и геофизики. Помню, мы шли по лестнице и обсуждали мою «домашнюю работу» — Николай Никитович всем начинающим писал задания на отдельных листочках и потом спрашивал о выполнении. Затем он упомянул об анизотропии. Я спросила, что это такое, и он ответил, что при анизотропии скорость зависит от направления. И я удивилась: «А разве так может быть?» Сейчас смешно об этом вспоминать. Потом, когда я занялась вплотную изучением анизотропии, удивление еще больше возросло. Столько сюрпризов преподнесло нам это свойство пород...

Оказалось, что поперечные волны нельзя применять, за исключением только некоторых случаев, если не понятно, анизотропна среда или нет, насколько и как анизотропна, т. е. какая система симметрии, каково положение в пространстве элементов симметрии (в простейшем случае — оси симметрии бесконечного порядка). И только найдя ответы на эти вопросы, можно изучить записи поперечных волн двух типов и работать с ними так же, как с записями продольных волн. В результате достоверность построения границ возрастает и появляется знание новых констант упругости, которые можно интерпретировать для решения главной задачи — поиска залежей углеводородов или других объектов, ради которых проводятся сейсмические работы.

История развития наших представлений о природе анизотропии, с которой мы сталкиваемся, довольно длинная и очень непростая.

В первые годы работ по возбуждению и регистрации поперечных волн, а также регистрации обменных волн от обычных взрывов все шло согласно теоретическим представлениям. Поперечные волны типа *SV* возбуждались *X*-источниками, регистрировались *x*- и *z*-приемниками; волны *SH* возбуждались *Y*-источниками, регистрировались *y*-приемниками, т. е. основными схемами наблюдения были *Xx* и *Yy*. Однако стоило нарушить этот «стандарт», добавив *y*-приемники в схеме *Xx* и *x*-приемники в схеме *Yy*, как началась серия загадок. Оказалось, что смещения от *X*-источников имеют не только *x*- и *z*-компоненты, но и заметные и даже большие *y*-компоненты, и наоборот: при *Y*-источниках есть *x*- и *y*-смещения.

Наблюдения, о которых идет речь, проводились на склонах соляных куполов в Прикаспийской впадине. Отражающие и преломляющие границы, с которыми были связаны наблюдаемые поперечные и обменные волны, были разными: от горизонтальных до наклонных с углами от 5–10 до 30–40°. Наиболее часто наблюдались поперечные и обменные волны, отраженные от наклонных границ. Поначалу наличие «побочных» компонент смещений (*Xy* и *Yx*) не вызывало особой тревоги, так как они должны появляться при отражении–преломлении на наклонных границах. По мере накопления данных стало ясно, что наклон границ не является причиной (или, по крайней мере, единственной причиной) записи на «побочных» компонентах. Это следовало

из того, что «побочные» компоненты смещений на одних куполах появлялись, а на других нет, хотя наклон отражающих границ был примерно одинаковым. Кроме того, были и такие наблюдения, когда «побочные» компоненты при больших углах наклона оказывались меньше, чем при меньших углах.

Расчеты теоретических сейсмограмм отраженных волн — поперечных (*SS*) и обменных (*PS*) — лучевым методом показали, что «побочные» компоненты смещений могут быть большими только при углах наклона отражающих границ около 30–40°. Кроме того, при наблюдениях на направлениях между простиранием и падением границы амплитуды записи на «побочных» компонентах оказались на один-два порядка больше, чем на направлениях между простиранием и восстанием границы. В экспериментах такого распределения амплитуд не было. Возникли предположения, что зависимость амплитуд от азимута направления «источник–приемник» определяется не только и не столько углом наклона границы, сколько анизотропией среды над отражающей границей. При этом ось анизотропии среды не должна совпадать с нормалью к отражающей границе. Например, граница — наклонная, а слоистость среды над границей — горизонтальная, или наоборот. Однако, согласно имевшимся данным о геологическом строении изучаемых участков, таких резких несогласий в залегании пород не было.

Возникло предложение, что если причина анизотропии — тонкая слоистость пород, то это не должно быть чередование тонких слоев с разными упругими свойствами. Тонкие слои могут быть одинаковыми, разделенными плоскостями, которые в прошлом были подвергнуты иным воздействиям, чем основная порода. Кроме того, и это оказалось главным, давление может быть распределено неравномерно по направлениям, что приводит к закрытию трещин одной преимущественной ориентации и открытию другой системы трещин, перпендикулярной первой. Камилл Давыдович Клем-Мусатов (1973, 1974) построил модель, которая имитирует параллельные трещины в однородной изотропной породе; такая среда может считаться анизотропной для длинных волн (по сравнению с толщиной тонких слоев), а именно трансверсально-изотропной с осью симметрии, нормальной плоскостям трещин. Если трещины вертикальны — ось симметрии горизонтальна. (Заметим, что аналогичная модель (linear-slip model) за рубежом была построена позднее (M. Schoenberg, 1980, 1983).)

Модель К.Д. Клем-Мусатова была применена нами для расчетов теоретических сейсмограмм отраженных *SS*- и *PS*-волн в средах с разным пространственным положением оси симметрии в среде над границей. На основе решения прямой задачи ставилась и решалась обратная задача — найти по трехкомпонентным записям *SS*- или *PS*-волны параметры среды над границей: ориентацию оси анизотропии и упругие константы. Опыт применения этой идеи к практике оказался скорее отрицательным, чем положительным. Выяснилось, что однозначного решения не существует, даже при уменьшении числа искомых параметров до минимума; например, упругие константы заданы, а ищутся два угла оси анизотропии (с вертикалью и азимутальный, т. е. в горизонтальной плоскости). Анализ того, как меняется поляризация поперечной и обменной волны на пути от источника до точки приема, подсказал очень простой выход из этого положения: надо трехкомпонентную запись *SS*- или *PS*-волны преобразовать в записи двух волн (*SV* и *SH*), и только после этого решать обратную задачу, т. е. находить искомые параметры среды по каждой из волн или же вести совместную инверсию по обеим волнам.



Алгоритм выделения «чистых» волн SV и SH из их геометрических сумм на x -, y -, z -компонентах был предложен Ириной Романовной Оболенцевой и Сергеем Борисовичем Горшкалевым и опубликован в 1986 г. (Алгоритмы аналогичного назначения за рубежом появились в это же время: (Alford, 1986) — для отраженных волн, (Neville, 1986) — для скважинных наблюдений; до широких кругов сейсмологов они были доведены на 56th Annual SEG Meeting, 1986.)

На этом можно пока поставить точку в исследованиях анизотропии как одной из главных составляющих многоволновой сейсморазведки, развивавшейся под руководством Николая Никитовича в Сибирском отделении Академии наук. К завершению этого этапа многоволновых исследований приурочено награждение в 1987 г. Государственной премией СССР Н.Н. Пузырёва и десяти участников исследований из Института геологии и геофизики, ВНИИГеофизики, треста «Сибнефтегеофизика» и ЛГУ за цикл работ «Физико-геологические основы многоволновой сейсморазведки», опубликованных в 1962–1985 гг.

В настоящее время работа по многоволновой сейсморазведке продолжается в Институте нефтегазовой геологии и геофизики и во ВНИИГеофизике. В США и ряде других стран наши «анизотрописты» являются ведущими специалистами в этой области, редакторами журнала «Geophysics» и других известных изданий. Жизнь продолжается, дело Николая Никитовича живет. Будем считать, что оно завоевывает мир благодаря актуальности и перспективности направления, основы которого 50 лет назад заложил Н.Н. Пузырёв.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МНОГОВОЛНОВАЯ СЕЙСМОРАЗВЕДКА

В.А. Куликов

Начиная с 1961 г. в связи с организацией лаборатории сейсморазведки в ИГиГ стали интенсивно разрабатываться новые методы сейсмических исследований. В работах принимали участие молодые выпускники московских и ленинградских институтов, а также специалисты из разных районов Сибири, Казахстана и Дальнего Востока. Состав лаборатории включал специалистов по самым разнообразным направлениям сейсмического метода. В первую очередь это полевики с опытом работы: Константин Александрович Лебедев, Аскольд Всеволодович Тригубов, Сергей Васильевич Крылов, Артём Павлович Волин, Борис Петрович Мишенькин, Камилл Давыдович Клем-Мусатов, Ирина Романовна Оболенцева, Иннокентий Сафьянович Чичинин, Евгений Михайлович Аверко, Александр Семёнович Кефели, Иван Петрович Михелёв, Станислав Васильевич Потапьев, Сергей Васильевич Гольдин, Эрик Васильевич Никольский, Владимир Дмитриевич Суворов, Юрий Алексеевич Нефёдкин, Вячеслав Михайлович Куликов.

Исследования в области сейсмической геофизики велись параллельно с работами по решению метеорологических проблем, связанных с поиском

путей управления погодой. Такая задача стояла перед учеными по той причине, что в Кулундинских и Барабинских степях шло распахивание степей по программе «освоение целинных и залежных земель», а лето там было засушливым, с малым количеством осадков. В то время были предложены идеи искусственного образования дождевых облаков при помощи воздействия на атмосферу мощными восходящими потоками горячего воздуха, насыщенного парами воды. Последующее охлаждение этих потоков на высоте приводило к инициированию процесса конденсации паров воды и образованию дождевых облаков, а следовательно, и к выпадению осадков. Предварительные расчеты показывали, что физически такой эффект возможен. Пришла очередь проверки этого эффекта в эксперименте. В 1965–1966 гг. началась работа над проектом «Метеотрон», когда в окрестностях с. Боровое на Новосибирском водохранилище была построена экспериментальная установка, представлявшая собой кольцевую систему трубопроводов, оснащенную специальными соплами. Сопла, через которые под высоким давлением распылялся бензин, были направлены в центр кольца. Горючая смесь поджигалась ракетой. В центральной части кольца происходило воспламенение паров бензина и создание мощного и долговременного восходящего потока продуктов горения. Со стороны ИГиГ эту работу возглавлял Сергей Михайлович Жданов, перед этим защитивший диссертацию по техническим наукам. Кажется, все было удачно, облако действительно образовалось, но на крайне непродолжительное время. Атмосфера над водохранилищем была неустойчивой, и облако, созданное искусственно, быстро рассеялось без выпадения дождя. Дальнейшего продолжения эти исследования не получили.

Для развития теории и экспериментальных исследований в области сейсморазведки потребовались специалисты — математики и физики. Нас, группу физиков-выпускников НГУ, пригласили для работы в этом направлении. Здесь были разработаны основные идеи по возбуждению взрывами сдвиговых волн заданной поляризации. Их предлагал наш идейный наставник Н.Н. Пузырёв, можно сказать, истовый сторонник взрывных источников упругих волн. Во вступительной беседе с нами Николай Никитович сформулировал задачу повышения идентичности и устойчивости работы взрывной камеры скважинного снаряда, причем особо обратил внимание на обеспечение принципа фазовой инверсии поперечных волн. Идея была поразительно проста. Суть ее заключалась в следующем. Взрыв заряда ВВ образует в ближней зоне среды (очаге источника) симметричное распределение напряжений. Для создания направленного воздействия на породу необходимо ограничить область действия взрыва путем специальных массивных преград. На поверхности земли такие методы работали, что называется, «по науке», но при погружении в скважины, да еще на глубины до 50 м, происходило резкое снижение направленности взрывного воздействия, а следовательно, эффективности возбуждения поперечных волн. Теперь, по прошествии стольких лет, мы хорошо знаем, что выделение поперечных колебаний представляет собой гораздо более трудную задачу по сравнению с продольными. Дело в том, что сдвиговые волны регистрируются на фоне слабо затухающих волн-помех, в том числе обладающих и признаком фазовой инверсии. Погружение источника на глубину более 30 м существенно снижает уровень помех, одновременно повышая рабочую полосу частот поперечных волн.

Задача, поставленная Николаем Никитовичем, оказалась интересной с научной точки зрения и трудно разрешимой в инженерном смысле, поскольку



ку базировалась на взаимоисключающих требованиях. Главное требование заключалось в существенном ограничении диаметра взрывной камеры в скважине, которое приводило к снижению порога устойчивости и работоспособности. Над этой задачей бились целых два года. В конце концов нам удалось повысить ресурсы работоспособности в 10 раз. Это явилось результатом проведения теоретико-экспериментальных исследований поведения цилиндрических толстостенных оболочек при их деформировании взрывной нагрузкой. Эксперименты показали, что существует принцип линейности приращения остаточной деформации металла после каждого очередного подрыва заряда ВВ. Этот принцип был положен в основу для вывода простой формулы для расчета числа взрывных воздействий, которые выдержит корпус взрывной камеры до своего полного разрушения. Формула на самом деле оказалась подходящей для инженерных расчетов. Продолжая дальше развивать эти исследования, нам удалось разработать новые модели взрывной камеры скважинного снаряда и пневматического прижима на основе использования эффекта дросселирования газа при выдавливании его из одного объема в другой через отверстие малого диаметра. Вместе с тем пришлось увеличить диаметр скважины со 150 до 250 мм, что, конечно, усложняло технологию наблюдений на профиле, и снаряд мог быть использован только в научных целях. В частности, такая конструкция скважинного источника поперечных волн применялась при изучении анизотропных свойств альбских отложений на соляном куполе Доссор. Это предопределило получение Сергеем Борисовичем Горшкалёвым (ныне заведующим лабораторией многоволновой сейсморазведки) совершенно уникальных результатов о существовании особого типа анизотропии в породах осадочного чехла и выяснении положения в пространстве осей симметрии пород в условиях их естественного залегания.

Следующим этапом в развитии физического моделирования была идея Н.Н. Пузырёва об использовании принципов планирования физического эксперимента в натуральных условиях. В своих многочисленных статьях Николай Никитович неоднократно подчеркивал, что успех в изучении структурных особенностей и свойств горных пород лежит в понимании физических законов распространения упругих волн, которые проявляются не столько в кинематике, сколько в динамике сейсмической записи. Исходя из этих представлений, Николай Никитович поставил перед нашей группой, в которую теперь входили Владимир Михайлович Куликов, Ю.А. Нефедкин и автор этих строк, новую задачу: изучить особенности процесса возбуждения поперечных волн взрывами удлинённых зарядов в двух узких траншеях, отделённых друг от друга барьером неразрушенной породы. Впоследствии такой источник получил название «барьерный». Исследования были поставлены на льду Новосибирского водохранилища, который можно описать двумерной моделью сплошной среды. Результаты превзошли все ожидания. Были определены оптимальные условия излучения поперечной волны SH и сделан вывод о том, что они определяются упругими постоянными горных пород, формирующих очаг взрывного источника. Здесь необходимо добавить, что Николай Никитович предвидел результаты эксперимента заранее и был удовлетворен, когда мы их докладывали на семинаре лаборатории. Обращивать и анализировать сейсмограммы, полученные таким способом, доставляло большое удовольствие.

Развитием этого нового по сути метода исследований стало предложение Николая Никитовича искать такие условия залегания горных пород, при которых можно было рассчитывать на применение физического моделирования. При этом геологическое строение в регионе должно быть более или менее выдержанным, а верхняя часть разреза — изменчивой, включая в себя разнообразные состояния почвенно-грунтового слоя. Оказалось, что самым подходящим районом является Прикаспийская впадина. Именно в этом геологически сложном районе проводились основные исследования по многоволновой сейсморазведке.

Первоочередным было создание мощного источника монотипных поперечных волн, энергия которого была бы достаточна для регистрации отражений от глубинных горизонтов. Ее решению уделялось много времени, в течение которого в самых разнообразных геологических условиях опробовались практически все способы возбуждения поперечных волн, в том числе и первые модификации «Вибролокатора». Основной упор в работах делался на развитие процессов детонации взрывчатых веществ. Исследования заняли довольно продолжительное время (более 10 лет). В результате нами был разработан новый тип генератора упругих волн сдвига, получивший название «плужный вариант траншейного источника» (ПВТИ). Этот вариант был основан на преимуществах распределения взрывчатого вещества по объему, в качестве которого использовался детонирующий шнур. Одновременно с этими исследованиями в лаборатории конструирования и моделирования под руководством С.М. Жданова шли разработки и изготовление механизмов для автоматизации процесса подготовки источника монотипных поперечных волн. В этот же период были разработаны и поступили в сейсмические партии Сибирской геофизической экспедиции такие механизмы, как плужный (для талых) и баровый (для мерзлых грунтов) укладчики линейных зарядов. Авторами устройств были С.М. Жданов, Александр Николаевич Арженков и Василий Васильевич Ложкин. Эти механизмы обеспечивали невиданно высокую на то время производительность источников поперечных волн при профильных наблюдениях, что позволило перейти к практической разработке методики общей глубинной точки на поперечных волнах (МОГТ).

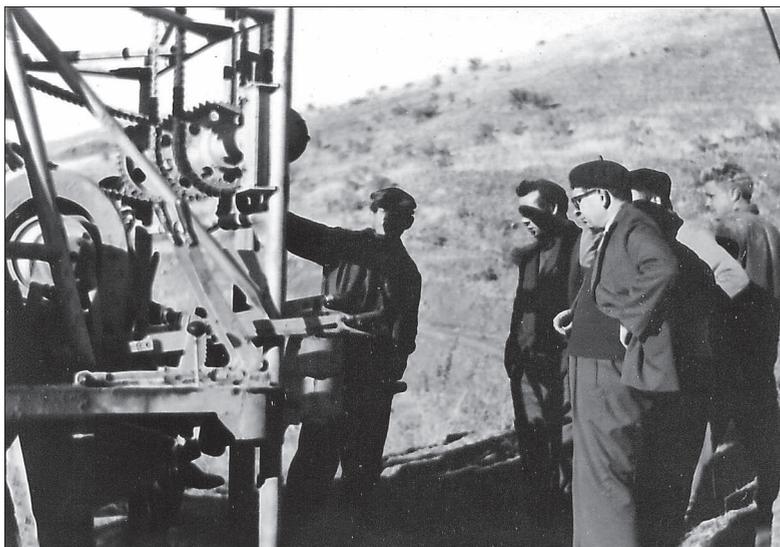
Успехи в решении задач возбуждения и регистрации поперечных волн выдвинули на первый план создание технологии многоволновой сейсморазведки (МВС). Этот термин был предложен Н.Н. Пузырёвым в 1985 г., когда в стенах Института геологии и геофизики открылось первое Всесоюзное совещание по проблемам нового сейсмического метода. Другой целью разработки мощных источников поперечных волн были исследования по влиянию грунтовых условий на динамические параметры упругих волн. Моделирование условий регистрации поперечных волн базировалось на известных к тому времени исследованиях сотрудников ИФЗ АН СССР и работах геофизиков-сейсмологов Тюмени, изучавших резонансные свойства системы «сейсмоприемник–почва». С самого начала Николаю Никитовичу, в отличие от нас, молодых и самоуверенных, было ясно, что поперечные волны должны быть более чувствительны к резонансным свойствам таких систем, в особенности в тех случаях, когда подповерхностные слои грунта обводнены. Мы долго не могли понять, почему это так важно, если сейсмоприемник выступает в роли «таймера», т. е. регистратора только времени подхода волны. Первые же сейсмограммы, полученные на профиле с грунтом разной водонасыщенности, убедили нас в необходимости более углубленного понимания



самого процесса взаимодействия между датчиком, почвой и упругой волной. В серии экспериментов были получены новые данные, которые свидетельствовали о том, что обводнение грунтов усложняет процессы возбуждения сдвиговых колебаний, практически начисто ликвидируя фазовую инверсию поперечных волн в источнике. Более того, поляризация поперечных волн может непредсказуемо измениться вследствие проявления «естественной направленности грунтов» (термин, введенный Николаем Никитовичем). Фактически мы стояли перед дилеммой — продолжать наши разработки, которые зашли слишком далеко, или подтвердить мнение многих зарубежных геофизиков о несостоятельности поперечных волн как инструмента сейсморазведки. Победило первое предложение, поскольку к этому времени нами же были получены сейсмограммы поперечных отраженных волн с тех глубин и той интенсивности, которые были характерны для метода монотипных продольных волн. Кроме того, снижение плотности зарядов на единицу объема, которое достигалось простым рассредоточением их по профилю, привело к повышению отношения полезный сигнал/помеха и повсеместному проявлению фазовой инверсии.

С этого момента началось уверенное продвижение поперечных волн в практику полевых работ. Это было достигнуто благодаря стремлению Сибирской геофизической экспедиции использовать их для повышения разрешающей способности сейсморазведки в целом. Были отработаны многочисленные профили в самых разных районах Прикаспийской впадины и получены результаты, которые показали преимущества комплексирования продольных и поперечных волн при решении задач нефтяной геологии, и в частности ПГР (прогнозирование геологического разреза). Были исследованы купола Ново-Богатинский, Матинский, Доссорский, Улькен-Тюбе, Дунга и Тенгиз. Мощные производственные геофизические тресты стали предлагать проведение совместных работ по МВС. Районы исследований расширялись из года в год. Теперь мы работали в Краснодарском и Ставропольском краях (купол «Русский хутор»), Волгоградской (площадь Мирошниковская и др.) и Тюменской (площади Усть-Балыкская, Правдинская, Горбуновская, Солкинская) областях, а также Казахской (Зайсанская площадь) и Узбекской (Алмалык и Голодная степь) ССР. Вместе с тем нас настойчиво приглашали на Север и в «родные пенаты», т. е. в Сибирь. Николай Никитович решил использовать результаты исследований, полученные в талых грунтах Прикаспийской впадины, как основу развития многоволновых исследований на Западно-Сибирской плите в условиях сезонно- и многолетнемерзлых грунтов, а также на Сибирской платформе. Первые же опытные работы подтвердили его предвидение о том, что и в этих условиях сейсморазведка на поперечных волнах будет не менее эффективна, чем в Прикаспии.

Технология проведения многоволновой сейсморазведки все еще отставала от возможностей сейсморазведки на монотипных продольных волнах. Для поднятия производительности необходимо было автоматизировать процесс подготовки источника поперечных волн для работы в мерзлых породах. Дальнейшее развитие в этом направлении вылилось в создание нового универсального механизма, пригодного одновременно для работы как в талых и сезонномерзлых грунтах, так и в многолетнемерзлых породах в пределах Арктической зоны СССР. Машина для укладки линейных зарядов взрывчатого вещества (МУЛЗ) обеспечивала не только полную автоматизацию цикла подготовки источника, но и, что самое важное, сохранение идентичности па-



Возбуждение поперечных волн. Спуск взрывного снаряда в скважину.
На переднем плане — Н.Н. Пузырёв

раметров источника возбуждения независимо от свойств грунтов верхней части разреза. На ВДНХ СССР эта разработка была отмечена серебряной медалью. В конечном счете МУЛЗ обеспечил успех многоволновой сейсморазведки на одном из участков Восточной Сибири (с. Осиновка, 40 км от г. Братск). На этой же площади проводили и испытания «Вибролокатора».

Н.Н. Пузырёв уделял много времени исследованию чисто физических явлений на искусственных моделях горных пород. Это было связано с разработкой методов моделирования в задачах прогнозирования геологического разреза. В основе их применения лежали исследования связи между изменениями динамических параметров отраженных волн со структурными особенностями границ; блоковости строения горных пород нефтяных и газовых коллекторов; наличия пор и трещин, а также влияния напряженного состояния пород. В результате широкого круга этих исследований было предложено ввести в арсенал сейсмических методов новые прогнозные параметры, определяющие состояние горных пород, такие как поляризация сейсмических волн, углеводородный фактор и коэффициент Пуассона. Основная роль здесь принадлежала теоретическим исследованиям Б.П. Сибирякова, которые привели к созданию методов прогноза напряженного состояния и постановке задач подземной флюидодинамики на основе использования данных МВС.

За этот период были не только получены практически важные результаты, необходимые для геологов-нефтяников, но и решены фундаментальные проблемы физики твердого тела. В частности, доказана необходимость разработки новых физических законов распространения упругих волн в микро-неоднородных и гетерогенных средах в противовес господствовавшей континуальной гипотезе строения твердого вещества.

Современные методы сейсмических исследований, которые развиваются зарубежными геофизиками, были развернуты в СССР за много лет до этого благодаря трудам нашего выдающегося соотечественника академика Николая Никитовича Пузырёва и его научной школы!



ДИФРАКЦИЯ ВОЛН

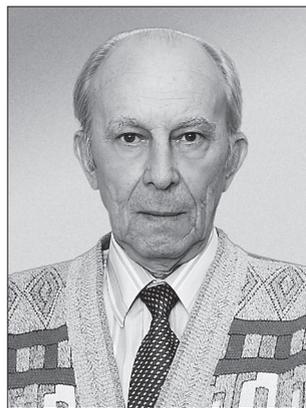
К.Д. Клем-Мусатов, А.М. Айзенберг

Исследование дифракции сейсмических волн в мировой геофизике до начала 70-х годов XX века развивалось на основе кинематических представлений и физического моделирования. Теоретический фундамент для динамической интерпретации этих явлений фактически закладывается путем адаптации теории дифракции Кирхгофа к сейсмическим моделям среды (Клем-Мусатов, 1970; Трори, 1970; Хилтерман, 1970). Они базировались на принципе Юнга, т. е. обобщения асимптотической лучевой теории на основе представления о диффузии энергии в смежные лучевые трубки. Последующее развитие этих двух направлений и определило современный уровень представлений о дифракции сейсмических волн. Ниже мы излагаем основные этапы исследований, проводившихся в Институте геологии и геофизики (далее в Институте геофизики и затем в ИНГГ). Эти работы были начаты в конце 1968 г. по инициативе академика РАН (тогда члена-корреспондента АН СССР) Н.Н. Пузырёва для поиска достаточно простого приближенного математического описания краевых дифрагированных волн, обеспечивающего реальную возможность интерпретации данных сейсморазведки. Такой поиск включал физический анализ механизмов дифракции для выбора адекватного математического аппарата, численные эксперименты и физическое моделирование для проверки рассматриваемых приближений. Исследования проводились совместно с Сибирской геофизической экспедицией (СибГЭ), в которой были созданы специальная дифракционная партия (Георгий Леонидович Ковалевский, Евгений Иосифович Ланда, Елизавета Дмитриевна Ковалевская, Галина Александровна Клем-Мусатова, Сергей Алексеевич Гриценко и др.) и партия физического моделирования (Леонид Анатольевич Максимов, Михаил Александрович Татарников). Со стороны Института геологии и геофизики в работах принимали участие Камилл Давыдович Клем-Мусатов, Владимир Георгиевич Черняков и Аркадий Маркович Айзенберг.

КРАЕВЫЕ И КОНЦЕВЫЕ ВОЛНЫ

Исходным объектом исследования являлись волны, дифрагированные гладкими ребрами границ в среде (краевые волны) при наличии дизъюнктивных нарушений (выклинивания и примыкания границ, сбросы, малоамплитудные сбросы). К искомому теоретическому описанию таких волн приводили различные математические постановки задачи: асимптотический анализ интегралов типа Кирхгофа, метод параболического уравнения Фока–Леонтовича с условиями непрерывности на границе тени, задача Сохотского–Племеля о сглаживании скачка по границам тени распространяющихся волн (первичные границы тени) и, наконец, сведение волнового уравнения в окрестности луча прямым интегрированием к уравнению Куммера, которое имеет два фундаментальных решения (приближения геометрической оптики и краевой дифракции). Достаточность полученного описания была подтверждена сравнением результатов численного и физического моделирования дифракции на выклинивающихся слоях и малоамплитудных сбросах.

Следующим объектом исследования являлись волны, порождаемые точками излома ребер границ в кусочно-блочных сейсмических моделях (остриево-волны). Такие волны представлялись комбинацией более простых дифрагированных волн (концевые волны). Они обеспечивали непрерывность суммарного волнового поля на границах тени краевых волн, порождаемых точками излома (вторичные границы тени). К искомому теоретическому описанию концевых волн также приводили различные математические постановки задачи, подобные уже упомянутым выше. Наиболее важным прикладным результатом первого этапа исследований являлось динамическое описание краевых и концевых волн в окрестностях границ геометрической тени (приближение дифракционного пограничного слоя). Его математическая форма была пригодна для решения прямых и обратных задач сейсмологии. В этом приближении амплитуда дифрагированной волны получается путем простого умножения амплитуды исходной волны (падающей на границу, отраженной или преломленной) на специальную функцию, которая зависит только от фазовых сдвигов между фронтами распространяющихся волн. Специальные функции краевой и концевой дифракции табулированы или вычисляются с помощью стандартных программ.



К.Д. Клем-Мусатов.
2009 г.

Результаты этого этапа исследований опубликованы в периодической печати и обобщены в монографии К.Д. Клем-Мусатова «Теория краевых волн и ее применение в сейсмологии» (1980), которая была удостоена диплома третьей степени (наряду с монографиями Н.Н. Пузырёва и С.В. Гольдина) на конкурсе фундаментальных работ СО АН СССР в 1984 г. Выражения для краевых волн были использованы для создания вычислительных программ и апробированы в некоторых геофизических предприятиях СССР. Однако, судя по научной периодике, использование дифракции для повышения разрешающей способности сейсморазведки в СССР не получило широкого развития. Иное отношение к рассматриваемой проблематике складывалось в странах, где уровень развития вычислительной техники уже обеспечивал возможность динамической интерпретации данных сейсмологии. По-видимому, практическая значимость наших результатов наиболее быстро была понята в Институте земной и планетарной физики Университета Альберты (Эдмонтон, Канада), где изучались публикации в странах социалистического содружества в связи с разработкой математического обеспечения для решения задач сейсмологии. В открытых отчетах этого института за 1985 и 1987 гг. указано, что доктор R. Chan и профессор F. Hron создали программы вычисления дифрагированных волн, основанные на работах Клем-Мусатова и его коллег из Новосибирска, и внедрили их в пакеты программ, которые до этого не учитывали явления дифракции. Указывалось, что сравнение скорости, точности и пределов применимости такого подхода с методом Алексева–Михайленко и методом Гауссовых пучков показало «замечательное согласие результатов». Позднее F. Chan и G.H. Chan опубликовали руководство по численному моделированию краевых волн этим методом в «*Studia geophysica et geodaetica*» (1995). Однако к этому времени внимание зарубежных геофизиков к результатам рассмотренного этапа исследований уже было привле-



чено публикациями К.Д. Клем-Мусатова и А.М. Айзенберга в журналах «Geophys. J. R. Astr. Soc.» (1984) и «J. Geophys.» (1985) и использованием этих результатов в алгоритмах выделения дифрагированных волн израильскими геофизиками (Landa, Shtivelman, Geltchinsky, 1987). Приближение пограничного слоя было верифицировано сравнением с результатами моделирования методом конечных разностей (Rabbel, 1987, PhD Thesis) и позднее использовано для учета краевой дифракции в асимптотическом методе моделирования волновых полей в сложно построенных средах (Klaeshen, Rabbel, Flue, 1994). Р.М. Bakker (1990) получил аналогичное приближение пограничного слоя в терминах динамического лучевого трассирования для продольных и поперечных волн, решая задачу методом параболического уравнения. Обширный отчет об использовании нашей теории в пакетах математического моделирования краевой дифракции, который содержал результаты совместных исследований Сейсмологической обсерватории Бергенского университета и Исследовательского центра компании Norsk Hydro, был представлен норвежскими геофизиками (J. Pajchel, Н.В. Helle, L.A. Frøyland) на III Международном совещании по сейсмическим волнам в горизонтально-неоднородных средах (Замок Либлице, Прага, 13–18 июня 1988 г.). В отчете демонстрировались результаты моделирования дифракции продольных, поперечных, обменных и головных волн как в простых двумерных тестовых моделях, так и в более реалистических геологических ситуациях, учитывающих сложную тектонику. Было показано, что полученные синтетические сейсмограммы можно успешно использовать для опробования различных процедур математической обработки сейсмических данных, в частности для процедур сейсмической миграции. Авторы пришли к выводу, что приближения пограничного слоя достаточно для приложений в практических задачах сейсмоки. По-видимому, результаты исследований канадских и норвежских геофизиков послужили поводом к тому, что в 1988 г. комитет по переводам SEG предложил перевести упомянутую выше монографию К.Д. Клем-Мусатова на английский язык. Расширенный вариант этой монографии под названием «Theory of Seismic Diffractions» был опубликован в США в 1994 г.

МЕТОДЫ СУПЕРПОЗИЦИИ ДИФРАГИРОВАННЫХ ВОЛН

Второе важное направление теоретических исследований было связано с использованием приближения пограничного слоя для учета каустических явлений, порождаемых кривизной сейсмических границ. Подходы к описанию таких явлений в упомянутых выше пионерных работах Трори (1970) и Хилтермана (1970) по адаптации теории Кирхгофа к сейсмическим моделям основывались на кусочно-плоской аппроксимации криволинейных границ при достаточно плотной сетке. Каустические явления возникали в результате суперпозиции дифрагированных волн от контуров множества плоских элементов криволинейной границы. Развиваемый нами подход также основывался на суперпозиции вкладов от элементов границы, возникающих при ее кусочно-плоской аппроксимации. Однако вклад каждого отдельного элемента в нашем подходе представлялся волной, описываемой нулевым приближением лучевого метода, и дифрагированными волнами от контура элемента в приближении пограничного слоя. Предельный переход при стремлении размеров каждого элемента к нулю приводил к представлению поля, рассеянного исходной криволинейной границей, в виде дифракционного поверхностного интеграла. По существу, наш подход отличается от подходов

Трори и Хилтермана только формой описания волн, дифрагированных плоскими элементами границы. Однако это, казалось бы, незначительное отличие существенно расширяет рамки приложений математического моделирования, поскольку приближение пограничного слоя справедливо для всех типов объемных волн (продольных, поперечных, обменных, головных) в неоднородных средах и допускает описание в терминах лучевого трассирования.

Полученный дифракционный интеграл изучался методами асимптотического анализа в ситуациях, когда волновое поле является функцией двух пространственных координат (2D-модели). Такой анализ приводил к формулам лучевого метода, каустическим функциям Эйри и формулам для краевых волн (Айзенберг, Клем-Мусатов, 1980). Это и служило теоретическим оправданием нашего подхода. Численное сравнение нашего описания отражения от вогнутой цилиндрической поверхности с помощью суперпозиции краевых волн с аналитическим решением, использующим интеграл Кирхгофа, приведено в (Wang, Waltham, 1995) и показывает практически точное совпадение результатов. Сравнение результатов математического и физического моделирования прохождения волн через сложную криволинейную границу (Лунёва, Харламов, 1990) также показало хорошее совпадение результатов. Метод суперпозиции краевых волн в приближении пограничного слоя был использован в алгоритме математического моделирования упругих волн в двумерных многослойных средах с границами сложной формы (Luneva, 1996).

Дискретный аналог дифракционного интеграла в пространственных сейсмических моделях (3D-модели) представляется суперпозицией концевых дифрагированных волн. Разработка алгоритмов и программ математического моделирования рассеяния волн пространственными криволинейными границами (метод наложения концевых волн) началась в первой половине 80-х годов (Klem-Musatov, Aizenberg, 1985). Однако уровень развития вычислительной техники в отечественной сейсморазведке (отсутствие автоматических генераторов сейсмических моделей, недостаточные память и быстродействие ЭВМ) в то время еще не обеспечивал возможность моделирования достаточно реалистических ситуаций. Более широкие возможности открылись с начала 90-х годов на пути совместных исследований с упомянутыми выше норвежскими геофизиками Хансом Хелле и Яном Пэйчелом (Исследовательский центр Norsk Hydro). Они уже имели существенный опыт в использовании наших теоретических результатов для математического моделирования краевой дифракции. В этих совместных исследованиях использовались реалистические модели криволинейных пространственных сейсмических границ с дизъюнктивной тектоникой, которые строились с помощью автоматических модельных генераторов. Алгоритмы и программы метода наложения концевых волн адаптировались к использованию на современных суперкомпьютерах. Результаты по первому и второму направлениям теоретических исследований вошли в монографию «Edge and Tip Diffractions: Theory and Applications in Seismic Prospecting» (К. Клем-Мусатов, А. Айзенберг, Я. Пайчел, Н.В. Хелле), которая опубликована в США в 2008 г.

ОПЕРАТОРЫ ОТРАЖЕНИЯ–ПРЕЛОМЛЕНИЯ

В разработанной в 90-е годы версии метода наложения концевых волн, как и в созданных к тому времени сейсмических версиях интеграла Кирхгофа (Frazer, Sen, 1985; Frazer, 1987), условия на границах сред учитывались из



эвристических соображений с помощью коэффициентов отражения–преломления плоских волн (принцип локальности). Однако результаты математического моделирования показывали, что такой способ учета граничных условий не обеспечивает корректного описания волновых полей. Быстрое изменение коэффициентов отражения–преломления в окрестностях критических лучей порождало помехи в виде ложных дифрагированных волн. Эвристический способ учета граничных условий за счет разложения функции Грина по плоским волнам в двумерном случае был предложен в (Wenzel et al., 1990; Sen, Frazer, 1991). Однако вопрос об учете условий на пространственных границах неоднородных сред оставался открытым из-за отсутствия теоретической базы.

Ее поиск проводится нами со второй половины 90-х годов и до настоящего времени. В результате исследований была выведена специальная система граничных интегральных уравнений для задачи о рассеянии скалярных волн криволинейными границами в многослойных неоднородных средах (Klem-Musatov, Aizenberg, Helle, Pajchel, 2004). Неймановский формализм метода последовательных приближений для полученной системы уравнений приводил к представлению решения указанной задачи в виде последовательности многократных отражений–преломлений. При этом условия на каждой отдельной границе автоматически учитывались специальной комбинацией прямого и обратного пространственных преобразований Фурье (оператор отражения–преломления). Такие операторы вырождались в известные коэффициенты отражения–преломления плоских волн только при одновременной локально-плоской аппроксимации границ и волновых фронтов. Найденные операторы отражения–преломления послужили теоретической базой для разработки алгоритмов математического моделирования. Методами асимптотического анализа вычисление операторов отражения–преломления было сведено к интегрированию двумерного спектра пространственных частот (суперпозиция плоских волн), который выражался через элементарные функции. Вычислительные программы разрабатывались студенткой НГУ (с 2002 г. аспиранткой) Милоной Аркадьевной Айзенберг совместно с Исследовательским центром Norsk Hydro и Университетом Тронхейма (Норвегия). Численные эксперименты показали, что развиваемый подход позволял корректно воспроизводить волновые явления, в том числе головные волны, обусловленные кривизной и нерегулярностью границ в среде (Айзенберг А., Клем-Мусатов, Айзенберг М., Хелле, Пейчел, 2006; Auzenberg M., Aizenberg A., Helle, Klem-Musatov, Pajchel, Ursin, 2007).

ФИЗИЧЕСКОЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

А.Д. Гук

Физическое моделирование распространения сейсмических волн было поставлено в институте академиками Николаем Никитовичем Пузырёвым и Анатолием Семёновичем Алексеевым в 1973 г. в связи с организацией сов-

местных с Вычислительным центром работ по сейсмической голографии. Целью крупной работы двух институтов являлось создание геофизического метода, который позволил бы изучать сложно построенные структуры, в то время недоступные для исследования традиционной сейсморазведкой. К объектам изучения относились рудные проявления, алмазоносные кимберлитовые трубки, «неструктурные» нефтегазовые залежи, а также целый ряд иных геологических объектов. Общим для них была сложность геометрической формы поверхностей, разделяющих зоны с различным вещественным составом. Практическое применение сейсморазведки на тот момент ограничивалось главным образом изучением осадочных слоистых структур нефтегазовых месторождений, границы которых характеризовались малой кривизной. Теоретики сейсмологии утверждали, что существовавшие аналитические и численные методы не были пригодны для расчета сейсмических волновых полей для объектов сложной геометрической формы. Считалось, что единственным средством их исследования остается эксперимент. При этом две причины препятствовали использованию волновых полей реальных природных объектов: во-первых, отсутствовала полная и достоверная информация об их сложной форме, и, во-вторых, они были малоудобны в качестве тестов для проверки правильности методов расчета, разрабатываемых на основе голографии.

Практическое проведение экспериментальных работ потребовало создания соответствующего аппаратного комплекса (Гик, 1983; Бобров и др., 1984; Орлов, Гик, Пузырёв, 1988). Приемоизлучающая аппаратура была построена по принципу V-образных пьезоэлектрических преобразователей. К контактному основанию преобразователя, выполненному в виде диска малой площади (условие подобия требовало малых размеров источника и приемника), жестко крепились под углом 45° и ортогонально друг другу два поршневых пьезоэлемента. Согласованное включение таких элементов обеспечивало наибольшую чувствительность в ортогональном к поверхности объекта направлении. Это соответствовало чувствительности к продольным (P) волнам. Противофазное включение приводило к чувствительности в горизонтальном направлении, что соответствовало поперечным (S) волнам. Особенностью аппаратного комплекса была возможность плавного регулирования углового (по φ) направления чувствительности путем изменения весового соотношения чувствительностей по отношению к продольным и поперечным волнам: $u_\varphi = u_P \cos \varphi + u_S \sin \varphi$. Важным достоинством такого подхода являлась возможность выполнения поляризационного анализа. Это оказалось очень полезным при изучении сложных волновых полей, поскольку позволяет разделять и, следовательно, изучать в отдельности их различные составляющие. При этом имелась возможность на стадии компьютерной обработки в циклической форме определять угловые положения, соответствующие экстремальным значениям конкретных составляющих волновых полей. Для анализа применялась отдельная регистрация в угловых направлениях, соответствующих продольным и поперечным волнам, а их результаты суммировались в задаваемом соотношении.

Второй особенностью аппаратного комплекса, обеспечивающей дополнительные возможности при изучении волновых полей сложных объектов, была удобная возможность детального изучения спектральных компонент зондирующего сигнала. Для этой цели приемоизлучающие преобразователи были выполнены с равномерной чувствительностью в широком частотном диапазоне — приблизительно от 15 до 700 кГц. Компьютерно-ре-



гистрирующий блок аппаратного комплекса обеспечивал возможность проведения спектрального анализа на стадии регистрации и обработки волнового поля. Детальный спектральный анализ являлся важным дополнением к поляризованному, позволяя выделять «тонкие» особенности в сложных волновых полях.

Основу выполненных экспериментов составило объемное твердотельное моделирование. При проведении работ физическая модель изготавливалась в виде уменьшенной геометрической копии натурального объекта. По технологическим соображениям масштаб уменьшения выбирался равным около 10^4 . В соответствии с принципом подобия во столько же раз необходимо было увеличить частотный диапазон зондирующего сигнала. В качестве материала при изготовлении моделей чаще всего использовались плексиглас, сургуч, гудрон, пенопласт и эпоксидная смола с наполнителями, влиявшими на скорость звука в среде. Для уменьшения скорости звука в смолу добавлялась пенопластовая крошка, для увеличения — алюминиевая пудра. Плавное варьирование пропорций наполнителей в процессе изготовления технологически обеспечивало возможность получать объекты с плавным изменением скорости звука.

Оригинальный результат — замещение твердой фазы микронеоднородных включений на жидкую — был получен Борисом Александровичем Бобровым следующим способом. Среда, где распространялся звук, изготавливалась в виде смеси эпоксидной смолы и кристалликов легкоплавкого вещества — гипосульфита. При комнатной температуре кристаллы гипосульфита представляли собой твердые включения повышенной жесткости. Нагревание модели до температуры плавления гипосульфита (приблизительно $55\text{ }^\circ\text{C}$) превращало гипосульфит в жидкость. Таким путем удавалось изучать эффект влияния на сейсмическое волновое поле замещения твердых микронеоднородных включений жидкими.

Для экспериментального решения задач нефтегазовой геофизики разрабатывалась специальная технология изготовления пористых и трещиноватых тел. Для моделирования объектов, содержащих газонаполненные поры, хорошо зарекомендовали себя смеси эпоксидной смолы с пенопластовой крошкой. Эффект замещения газа жидкостью исследовался на плексигласовых моделях, в которых поры имитировались высверленными сообщающимися отверстиями. Погружение сухой модели в воду или в нефть позволяло получить эффект замещения соответствующей внутрипоровой среды. Для изучения влияния на сейсмическое волновое поле трещин, включая исследование эффектов проницаемости пород-коллекторов, были созданы модели в виде сжимаемого пакета плексигласовых пластин. При малом сжатии из-за наличия неровностей поверхностей пластин имели место межпластинчатые щели шириной около $0,1\text{ мм}$, имитирующие трещины в горных породах. Сжатие пакета давлением до 4 МПа уменьшало ширину «трещин» практически до нуля. Сборка пакета в воздушной среде позволяла проводить изучение газонаполненных трещин, сборка в водной и нефтяной среде — влияние соответствующего флюидонаполнения. Для разработки аппаратного комплекса физического моделирования была организована научная группа в составе Юрия Анатольевича Орлова, Б.А. Боброва, Наума Моисеевича Держи и Леонида Давидовича Гика.

В качестве примера исследований, касающихся сейсмологографической тематики и явившихся началом деятельности группы физического моделирования, назовем две работы: 1) по оптимизации путей поиска кимбер-

литовых трубок и 2) по изысканию пути «просветления» шероховатой (рассеивающей) границы.

Первая из этих работ выполнялась в содружестве с геофизиками Вычислительного центра СО АН во главе с А.С. Алексеевым и ленинградскими сейсморазведчиками, возглавляемыми Н.А. Караевым. В то время при проведении производственных геофизических работ для изучения кимберлитовых полей сейсмическими методами использовались временные разрезы, заимствованные из нефтегазовой сейсморазведки. Специальных сейсмических методов для решения задач «алмазной» тематики не существовало: позднее по инициативе сотрудников ВЦ стали разрабатываться методы «горизонтального сейсмического просвечивания». Поскольку форма кимберлитовой трубки не имела ничего общего с формой и размерами нефтегазовых залежей, то неудивительно, что применение методики, основанной на стандартных временных разрезах, было малоэффективным.

Физическое моделирование показало, что есть рациональный путь применения сейсморазведки для поиска таких объектов. При зондировании среды обычными продольными волнами в результате их взаимодействия с негоризонтальными границами возникают значительные поперечные волны, которые и могут использоваться в качестве индикатора «трубок взрыва». Было замечено и другое, менее очевидное явление: кимберлитовые трубки частично «заслоняли» отражения от подстилающих горизонтов, что также могло применяться в качестве поискового признака. А.С. Алексеев и его коллеги в своей работе использовали волновые поля, полученные в результате физического моделирования. В частности, удалось учесть эффекты рефракции, игравшие заметную роль при распространении волн в средах со значительным вертикальным градиентом. Оценить эти эффекты в математическом моделировании в то время не удавалось.

Тематика, связанная с «просветлением» шероховатой границы, возникла в связи с проблемами сейсморазведки, обусловленными трапшовыми структурами в Восточной Сибири. Дело в том, что в условиях Сибирской платформы верхняя часть разреза содержит слои (силлы) эффузивных пород (трапш). Эти геологические тела имеют сложную геометрическую форму и характеризуются повышенной сейсмической скоростью. Для сейсмических волн такие слои были близким аналогом оптических «матовых» стекол, рассеивающих проходящие волны. Влияние «линз» на сейсмическое волновое поле приводило к сильным искажениям. В некоторых случаях его не удавалось проследить, а значит, и применять к данным наблюдения традиционные методы обработки сейсмической информации.

В качестве выхода из положения было предложено восстанавливать регулярную часть (устранением эффектов рассеивания) зондирующей волны. Традиционными методами сейсморазведки определялись форма кровли и подошвы трапшвого слоя. Величина сейсмической скорости в этом слое задавалась априори. На этой основе рассчитывалось аномальное значение временной задержки волны, обусловленной пересечением трапшвого слоя. Далее применялась методика, подобная «коррекции статики» в традиционной сейсморазведке. Такой путь устранял эффекты рассеивания. Физическое моделирование подтвердило работоспособность этого подхода.

Важную роль в деятельности группы физического моделирования занимали эксперименты, целью которых была проверка корректности вновь разрабатываемых теоретических методов решения прямых динамических задач сейсмологии. Это требовало экспериментального получения сейсмических вол-



новых полей для сложных геологических объектов и их сравнения с теоретическими расчетами. В процессе выполнения работ установились тесные связи с ведущими научными школами России, занимавшимися разработкой аналитических и численных методов расчета сейсмических волновых полей. В Новосибирске это были коллективы ИГиГ во главе с Сергеем Васильевичем Гольдиным и ВЦ во главе с Анатолием Семёновичем Алексеевым и Борисом Григорьевичем Михайленко, в Ленинграде — коллективы, возглавляемые Георгием Ивановичем Петрашенем и Татьяной Борисовной Яновской, в Киеве — Юрием Васильевичем Тимошиным, а также ряд других групп. Научные и деловые связи с этими коллективами оказали глубокое влияние на уровень работ группы физического моделирования.

Надо заметить, что физическое моделирование выполнялось и в других научных подразделениях ИГиГ. Одним из первых исследователей в этом направлении был Евгений Михайлович Аверко. В своих работах он использовал главным образом двумерные (листовые) физические модели. Такие объекты выполнялись в виде тонкого листа, распространение сейсмических сигналов в котором соответствовало волнам в двумерных объектах. Среди исследований Е.М. Аверко необходимо выделить работы его и Камилла Давыдовича Клем-Мусатова, выполнявшиеся в содружестве с трестом «Сибнефтегеофизика» по изучению закономерностей дифракции волн на объектах с сильно криволинейными границами. Заслуживают внимания также совместные работы Е.М. Аверко и Юрия Алексеевича Нефёдкина в области моделирования для многоволновой сейсморазведки, в том числе при создании аппаратуры акустического каротажа с использованием крутильных колебаний.

Большое научное значение имеет инициированное С.В. Гольдиным физическое моделирование, направленное на изучение происходящих процессов при землетрясениях. Среди них важное место занимают исследования особенностей распространения волн в сыпучих средах, выполненные Юрием Ивановичем Колесниковым. Особый интерес имело изучение аномальных сейсмических процессов, возникающих в микронеоднородных средах. Так, Ю.И. Колесниковым в развитие работ ведущих теоретиков, посвященных изучению волновых полей в микронеоднородных средах, было показано одновременное существование нескольких сейсмических волн, обладающих различными скоростями. Это может найти практическое применение в сейсмологии, где необходимо выявлять очень малые аномальные эффекты.

Постепенно центр тяжести работ группы физического моделирования стал сосредоточиваться на поиске оптимальных путей разведки и изучения месторождений нефти и газа — направление, развитие которого было рекомендовано основателем института академиком А.А. Трофимуком. Физическое образование исполнителей, накопленные к тому времени опыт работы и аппаратная база предоставили возможность выполнения работ по этой тематике. Наш подход заключался в следующем. Поскольку нефтегазовый коллектор представляет собой пористую горную породу, внутрипоровое пространство которой заполнено либо нефтью, либо газом (метаном), либо водой, то необходимо:

- 1) произвести измерение удельного объема пор, а также определить границы пористого пространства;
- 2) определить вещественный состав внутрипорового флюида.

Лабораторные эксперименты показали очень сильную зависимость затухания звуковых волн от удельного объема трещин и пор. Последующие

аналитические выкладки позволили установить, что величина декремента затухания пропорциональна произведению коэффициента пористости на относительную плотность внутрипорового флюида при коэффициенте пропорциональности, равном 2π . Поскольку коэффициент пористости нефтегазовых пород составляет величину около 0,1–0,15, то при распространении сейсмических волн в таких средах декремент затухания близок к единице. Это оказывается выше по крайней мере в несколько десятков раз, чем значение декремента в сплошных (не содержащих трещин и пор) горных породах. Иными словами, измерение декремента затухания представляет собой оптимальный путь для определения коэффициента пористости, что фактически дает надежный способ определения коллекторских свойств геоакустической среды.

К сожалению, этот путь не оказался оптимальным для определения вещественного состава внутрипорового флюида. Дело в том, что в нефтегазовых коллекторах удельная плотность внутрипорового вещества изменяется не очень значительно — максимально на 30 % (при замещении газа водой). Соответственно, на столько же изменяется и величина декремента. Поэтому для определения вещественного состава внутрипорового флюида, по нашему мнению, в дополнение к «методу измерения декремента» рациональнее использовать другие геофизические методы, например, метод измерения удельного электрического сопротивления горных пород.

Таким образом, логичный путь построения оптимального метода поиска месторождений углеводородов заключается в построении распределения декремента затухания сейсмических волн Q^{-1} в изучаемой геологической среде. Сейсмическая информация в геофизической разведке практически всегда представляется в виде временных разрезов сейсмических волн: $u[x, t]$. Это означает, что решение задачи оптимального поиска месторождений углеводородов можно сформулировать как пересчет временного разреза в параметры поля декремента затухания $Q^{-1}[x, t]$. Рациональный способ решения этой задачи был определен на основании результатов физического моделирования.

Было показано (и последующие теоретические выкладки это подтвердили), что при распространении в поглощающей (пористой) геоакустической среде частотный спектр широкополосного зондирующего сигнала сдвигается в область низких частот пропорционально произведению декремента затухания на интервал времени распространения. Другая формулировка этого утверждения заключается в увеличении периода зондирующего сигнала как функции интервала времени распространения. Периоды сигнала T и интервалы времени их распространения $d(t)$ можно получить из временных разрезов. Поэтому указанный пересчет может быть выполнен на основании информации, полученной при стандартной регистрации сейсмических сигналов. Опробование указанной методики на данных сейсморазведки одного из месторождений баженовской свиты Западной Сибири подтвердило правильность такого пути.

При этом нами была применена следующая технология обработки сейсмической информации. Изначально предполагалось, что изучаемый нефтегазовый объект является слоистым, что типично для многих залежей углеводородов. В качестве поискового признака использовался скачок коэффициента пористости $K_{\text{ПОР}}$, который в свою очередь определялся как величина, пропорциональная декременту затухания: $K_{\text{ПОР}} = Q^{-1}/2\pi$. Значение декремента Q^{-1} рассчитывалось как отношение приращения периода сигнала от



раженной волны $d(T)$ к интервалу времени $d(t)$, в течение которого это приращение произошло. Фактически основная технология обработки сводилась к прослеживанию малых величин приращения периода $d(T)$ отраженной волны на временном разрезе. На практике оценка малого приращения $d(T)$ была затруднена из-за наличия случайных погрешностей в зарегистрированном сигнале. Для уменьшения этой погрешности применялось усреднение по группе сейсмотрасс временного разреза. В использованных нами полевых материалах зондирование осуществлялось с шагом $d(x) = 25$ м. На пространственном интервале профиля длиной $x = 500$ м укладывалось $N = 20$ сейсмотрасс. В соответствии с законами статистики это приводило к уменьшению нормально распределенных случайных погрешностей в \sqrt{N} раз, что оказывалось достаточным для выявления малой величины приращения периода зондирующего сигнала и, как следствие, к выявлению наличия углеводородов в изучаемой геоакустической среде (Гик, 2008).

ГЕОАКУСТИКА

В.З. Кокшаров

Когда начинаешь заниматься каким-либо делом, то задумываешься, что конкретно в научном языке означают термины, которые мы употребляем. Конечно, главная составляющая большинства наших терминов — это «гео», от греческого *geo* — Земля, например, геология.

Но геоакустика?.. Акустика, вроде, понятно: от греческого *akustikos* — слуховой, чаще связана с учением о звуке, речи. То есть геоакустика — это земная акустика?

Если взять определение из физической энциклопедии под редакцией А.М. Прохорова, то геоакустика — раздел акустики, в котором изучаются закономерности распространения упругих волн с частотами от 10^{-1} до 10^6 Гц в земной коре. Сюда относится также исследование акустических характеристик горных пород (скорости распределения и затухания упругих волн в них). В геоакустике наряду с продольными изучаются и другие типы упругих волн (поперечные, волны Лява, Стоунли, Лэмба). Геоакустические исследования проводят с целью прогноза землетрясений (сейсмология), изучения строения и свойств литосферы (глубинное сейсмическое зондирование), поиска и разведки месторождений и полезных ископаемых (сейсморазведка, звуковой каротаж).

И вот примерно в конце 1990-х — начале 2000-х годов направления наших исследований стали полностью соответствовать этому определению. Наша лаборатория объединилась с лабораторией физического моделирования во главе с Леонидом Давидовичем Гиком, петрофизической группой Геннадия Дмитриевича Ушакова. Юрий Иванович Колесников вместе с Евгением Михайловичем Аверко в это время усиленно занимались тематикой, связанной с землетрясениями. Кроме того, в лабораторию пришел Эдуард Иннокентьевич Машинский, который изучал нелинейно-неупругие эффек-

ты в горных породах на самых разных частотах. Валерий Зосимович Кокшаров совместно с представителями Сибнефтегеофизики, Тюменнефтегеофизики и других производственных организаций в большей степени занимался методом акустического каротажа.

Понятно, к чему я клоню! Сейсмология, сейсморазведка, вертикальное сейсмическое профилирование, акустический каротаж, методы ультразвукового моделирования волновых явлений и лабораторные петрофизические исследования являются только небольшими разделами Геоакустики.

Возбуждение и прием упругих волн, как и на практике, осуществлялись на поверхности земли, на поверхности и дне акваторий, в глубоких скважинах и горных выработках. Источниками упругих волн при натурных исследованиях служили: естественная и наведенная эмиссия, возникающая при растрескивании массивов горных пород, специально проводимые взрывы, электрогидравлические вибраторы, пьезоэлектрические магнитострикционные и множество других типов излучателей звука, а точнее сейсмических волн.

Прием упругих колебаний также выполнялся с помощью сконструированных нами датчиков или геофонов, и в зависимости от интенсивности упругих волн и характера взаимодействия их с геологическими средами мы занимались как линейной, так и нелинейной упругостью и неупругостью. Если же сюда присовокупить исследования, которые проводил Анатолий Иванович Булычев, — сейсмoeлектрический эффект, ширина научного фронта нашей лаборатории становится очень большой, почти безграничной.

Можно еще много говорить о науке, научных достижениях, но в дни празднования юбилейных дат, как правило, вспоминаешь о людях, которые были с тобой рядом и многих из которых, увы, уже нет с нами. Поэтому несколько личных впечатлений.

В институт я пришел студентом четвертого курса геолого-геофизического факультета НГУ. В то время студенты-старшекурсники уже определялись с направлениями исследований и почти все устраивались на работу. По примеру Александра Владимировича Михеева я пошел к Владимиру Михайловичу Матошину в лабораторию геоакустики.

Что такое геоакустика и чем мне придется заниматься, я представлял смутно, но нравилось, что мои занятия были связаны с радиотехникой, а этим многие мальчишки увлекались еще со школы.

Большая часть сотрудников работала в комнате 112. Там были рабочие места у Ивана Петровича Михелёва, Юрия Алексеевича Нефёдкина, который с Вадимом Михайловичем Куликовым оккупировал также и 114 комнату. Вадим Михайлович занимался физическим ультразвуковым моделированием, и я его часто заставал за любимым или даже «основным» занятием — он склеивал листы винипласта. Ю.А. Нефёдкин постоянно экспериментировал с каким-то крутильным приемником.

Лабораторией руководил Евгений Михайлович Аверко. Когда он приходил и давал всем наставления, то упоминал имя некоторого Божества, которого звали Николай Никитович Пузырёв. Н.Н. Пузырёв все про нас знал и не всегда был доволен результатами нашей работы. По-видимому, волны крутились плохо.

В.М. Матошин был оригинальным человеком. В свое время он был связан с армией и уважал все военное. На тот момент его цель была сделать усилитель с коэффициентом усиления 100 000. Несмотря на все наши старания, усилитель постоянно возбуждался, и в конце концов нам пришлось остановиться на 30 000. Такой усилитель должен был располагаться в зонде акусти-



ческого каротажа и выдерживать температуру минимум $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$, т. е. удовлетворять всем требованиям военной приемки. Естественно, что все детали в усилителе были не обычными, а также выполненными по специальному заказу со штампом «военная приемка».

Сам зонд, который мы конструировали, был также во всем предельно оригинален. Это потом, когда я набрался опыта и познакомился с серийными разработками, я понял, какой неблагодарной работой мы занимались.

Зонд имел диаметр 110–120 мм, так как поместить транзисторный усилитель на 100 000 в меньший объем не удавалось. Самое оригинальное в зонде — это акустические датчики из сегнетовой соли. Для компактности конструкции они располагались в металлических коробочках-кубиках, так как кристаллы сегнетовой соли были выполнены в виде кубиков с ребром 40 мм. Коробочки были шедевром мастерства фрезеровщика, сварщика, слесаря и конструктора, а сама идея принадлежала Владимиру Михайловичу. Проблема состояла в том, что сегнетовая соль быстро растворяется в воде, поэтому, в принципе, как и для многих узлов скважинных зондов, требовались специальные уплотнительные прокладки. Конструкции цилиндрических узлов и цилиндрических прокладок хорошо отработаны и работают великолепно. Здесь же использовалась квадратная прокладка, и, естественно, такая конструкция фактически не выполняла свою функцию.

Выбор такой коробочки был необходим, чтобы создать плоскую рабочую поверхность для формирования в скважине диаграммы направленности приблизительно под критическим углом, при котором образуется поперечная волна.

Много можно говорить об акустических зондах... Это небольшое упоминание свидетельствует лишь о большой сложности изготовления аппаратуры, особенно если ее приходится эксплуатировать в скважине, на глубине 3–5 км с рабочей температурой 100–150 $^{\circ}\text{C}$.

После усиленной подготовки мы выехали в поле на берег Берди — наше любимое место полевых работ. Здесь стоит рассказать о другой колоритной фигуре лаборатории — это начальник полевого отряда Иван Петрович Михелёв. В манере поведения Ивана Петровича было много такого, что его кардинально отличало от других сотрудников. Так, когда он что-либо рассказывал, то летоисчисление называл точно. Он начинал так: «В одна тысяча девятьсот пятьдесят восьмом году работали мы...». Почему Иван Петрович постоянно прибавлял «одна тысяча девятьсот», сам он объяснить не мог. Просто так получалось.

Хотя прав на вождение автомобиля у него не было (из-за проблем со слухом), водителем он был классным. Начальнику отряда без прав было туговато. В нашем отряде числилось четыре машины. Два ЗИСа (которые все почему-то называли труманами), бывшие радиолокационные станции с кунгами, легковой уазик и хозяйственная машина ГАЗ-63. А водитель у нас был один. Так что в магазин и по хозяйственным нуждам часто приходилось ездить самому Петровичу.

Манера вождения у него была великолепная. Я как-то спросил, какую он скорость сейчас включил. Он ответил, что не знает — какая везет, ту и втыкает.

На уазике, естественно также военном, ездил сам Владимир Михайлович. Но поскольку он был все время занят изготовлением нового варианта акустического зонда, то уазик больше стоял. К этой машине он относился бе-

режно, любовно. Чтобы оценить его заботу о машине, следует рассказать историю, которую нынешняя молодежь может и не понять. Что такое 1970-й год? Питались мы в поле неплохо, но в основном употребляли продукты, полученные со склада: макароны, тушенка и т. д. В магазине в ближайшей деревне покупали хлеб, чай. Спиртного в те годы в свободной продаже не было. Но какой же геолог не любит... В любом отряде для медицинских целей, а у нас и для технических, был спирт. Его также получали на складе. Этот ценный продукт хранился у Владимира Михайловича в сейфе, точнее металлическом ящике с замком. Иногда по праздникам, в дни рождений Владимир Михайлович доставал эту потаенную бутылочку и наливал всем грамм по пятьдесят. Больше, он говорил, нельзя, так как за спирт, или, как его называли, «валюту», он добывал мелкие запчасти для уазика.

Естественно, я, как начинающий ученый, задался вопросом: «Почему спирта, если это такая необходимая валюта, дают мало? И почему в других отрядах его оказывается больше?» Это первая крупная научная проблема, которая была мной поставлена и в дальнейшем успешно решена.

Мое официальное устройство в лабораторию после окончания университета в 1971 г. ознаменовалось тем, что Леонид Максимов, молодой, но уже с жизненным опытом, решил перейти в только что созданную Сибирскую опытно-методическую экспедицию (Николай Никитович умудрился пробить в министерстве организацию экспедиции для проведения научных исследований) на должность руководителя партии. Так как Максимов был материально ответственным по лаборатории, то всю эту ответственность решили взвалить на меня — другие категорически отказывались.

Тем, кто не понимает, в чем тут подвох, могу пояснить на примере прибора ВК 7-9. Это был ламповый вольтметр, который исчез к первой инвентаризации. Так как в некоторые моменты на мне числилось до ста различных изделий и приборов, то за всем этим уследить, конечно, было сложно. ВК 7-9 числился за мной до самого увольнения из института в 2001 г. Иногда ночью я просыпался в поту, когда мне во сне задавали сакраментальный вопрос: «А где ты прячешь прибор ВК 7-9?» Если б только один ВК 7-9! Приборы гуляла по институту как могли, а спрашивали с нас.

Большая часть наших практических успехов связана с акустическим каротажем. Все началось со знакомства с начальником геологического отдела «Запсибнефтегеофизики» Юрием Алексеевичем Курьяновым. Выяснилось, что используя разработку АЦП, которой занимался Александр Владимирович Михеев (сотрудник Сибнефтегеофизики, но до настоящего времени работающий в институте), и разработку цифрового регистратора «Запсибнефтегеофизики», можно было зарегистрировать «в цифре» данные акустического каротажа. (Кстати, после создания экспедиции, а потом и треста, таких сотрудников в институте было много.) Проблема состояла в том, что оцифровать данные с частотой 100 кГц на тот момент было не так просто. Задача была решена, открывались безграничные возможности для решения новых, так необходимых производству задач.

Дальше выстраивалась классическая схема взаимодействия науки с производством. Зарегистрировали — молодцы! «А обработать сможете?» — Пришлось писать программы обработки на ЭВМ БЭСМ-6. Обработали, но опять нам задают вопрос: «А геологию по своим данным вы выдать можете?» — Выдали геологию. Но после того как похвалили: «Геология — это хорошо! А где нефть вы сказать можете?», я понял, что следующий вопрос бу-



дет таким: «Нефть... да ну ее... Может, вы сделаете машинку, которая доллары печатает?»

Мы работали с крупными компаниями — «Уренгойгазпром», «Пурнефтегаз» и др. К сожалению, желание внедрять новые технологии чаще декларируется, чем выполняется.

Однако нам грех было жаловаться. В трудные безденежные времена мы имели прочные договоры с «Пурнефтегазом» (решали задачу выделения газо-жидкостных контактов в глинистых коллекторах). Как-то я пришел к нашему директору Сергею Васильевичу Крылову и попросил его позволить часть заработанных нами денег истратить на аппаратуру. На это он мне горестно так ответил: «Валерий, ну это же негуманно, весь коллектив института оставлять без зарплаты».

По-видимому, беда России — это ее природное богатство.

После увольнения из института и переезда в Тюмень, в «Тюменнефтегеофизику», которую возглавил на тот период Ю.А. Курьянов, мы создали там департамент научно-технических работ. Основой послужили разработки лаборатории геоакустики и института в целом. Сейчас уже четыре сотрудника департамента (а скоро будет пять) работают в СНИИГГиМСе, так что знания и практический опыт, полученный в лаборатории, мигрируют и пусть окольными путями, но доходят до производства.

Многие бывшие сотрудники лаборатории и специалисты, связанные с ней той или иной частью своей биографии, работают в разных организациях. Так, мой непосредственный начальник, бывший генеральный директор «Енисейгеофизики» заявил, что считает себя моим учеником. Поскольку я был несколько удивлен, он пояснил, что был у нас на практике в поле и под руководством Ивана Петровича выполнял важную производственную функцию — стоял на устье скважины и четко делал отмашку, когда снаряд подходил к очередной точке измерения.

Так что не будем грустить. Время идет, все меняется, но дух славной лаборатории геоакустики живет в нас, а «ГЕО» от греч. *geo* — Земля — пусть живет вечно.

ИСТОЧНИКИ ДЛЯ ВЫСОКОРАЗРЕШАЮЩЕЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ НА ПРОДОЛЬНЫХ И ПОПЕРЕЧНЫХ ВОЛНАХ

И.С. Чичинин

О ПРОБЛЕМЕ СОЗДАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ НА ПОПЕРЕЧНЫХ ВОЛНАХ

Несмотря на упорную 30-летнюю (1960–1990 гг.) работу новосибирской группы сейсмиков по созданию сейсморазведки на поперечных волнах, она не существует. Ни одна сейсмопартия — ни в России, ни за рубежом — не работает на поперечных волнах. Это драматическая история, приведшая к тому, что *сейсмики ИГиГ в отличие от электроразведчиков пришли к «перестройке» без собственной технологии многоволновой сейсморазведки*. Поэтому на этой истории следует остановиться.

Существует два общих требования. Первое из них состоит в том, что глубинность разведки на поперечных отраженных волнах должна быть не менее 3–4 км. Второе — спектр отраженных от целевых горизонтов продольных и поперечных волн должен находиться в одной и той же частотной области. Поскольку скорость поперечных волн приблизительно в два раза меньше скорости продольных (т. е. длина поперечных волн в два раза меньше), предполагалось, что на поперечных волнах разрешающая способность возрастет примерно в два раза.



И.С. Чичинин (справа) и Е.П. Анкудинов на р. Васюган. 1963 г.

В течение 1979–1989 гг. в США при помощи группы из четырех-пяти десятитонных вибраторов с горизонтальной ориентацией силы были проведены полевые работы на весьма протяженных профилях. Контакт вибратора с грунтом обеспечивался треугольными зубьями, привариваемыми под виброплатформой. При этом достигалась требуемая глубинность, однако поперечные волны на сейсмограммах оказались низкочастотными. Если спектр продольных (отраженных) волн располагался (в основном) в диапазоне 20–40 Гц, то для поперечных волн — в диапазоне 10–20 Гц. Таким образом, длины продольных и поперечных волн оказались примерно одинаковыми. Проведенные полевые работы показали, что надежды геофизиков на повышение разрешающей способности сейсморазведки не оправдываются. После этого геофизики в основной массе отвернулись от поперечных *SH*-волн, хотя отдельные энтузиасты продолжали настаивать, что разрезы на поперечных волнах полезны, так как помогают повысить достоверность построенных геологических разрезов.

Усилия новосибирской группы сейсмиков-«поперечников» в 60–90-х годах были сосредоточены на решении первой из этих проблем (т. е. на достижении глубинности 3–4 км сейсморазведки на поперечных волнах при приемлемой для практики технологичности). Сейсмики-методисты пытались решить эту проблему при помощи траншейных источников путем взрыва сначала около одной стенки траншеи, затем — около другой. Сейсмики-вибрационщики в это время увязли в проблеме повышения надежности вибратора: необходимо было обеспечить бесперебойную работу вибраторов в сейсмопартиях, работающих на продольных волнах. Им было не до поперечных волн, так как «Вибролокаторы» в сейсмопартиях продольных волн непрерывно ломались (хотя сила «Вибролокатора» переключалась с вертикального направления на горизонтальное одним поворотом переключателя). В то же время сейсмоотряд, предназначенный для регистрации поперечных волн, должен быть укомплектован большим числом дефицитных горизонтальных сейсмоприемников.

В 1989 г. методисты пришли к выводу, что с помощью взрывов в траншеях не удастся создать приемлемую для практики технологию сейсморазведки на поперечных волнах и наконец, когда все запланированные диссертации на траншеях были уже защищены, «повернулись лицом» к «Вибролокатору». В 1990–1992 гг. на Новомихайловском месторождении около Минусинска



Комплекс «Вибролокатор» на профиле в Богучанах.
В «бочке Диогена» — регистрирующая аппаратура

был «отстрелян» 30-километровый профиль на трехкомпонентных приемниках с вертикальной и горизонтальной ориентацией силы (одиночный «Вибролокатор»). Сеанс вибрации длился 10 минут. Амплитуда силы вибратора составляла около 10 тонн.

По этим материалам были построены временные разрезы на продольных (PP), поперечных (SS) волнах, а также на обменных (PS и SP) волнах. На временных разрезах всех типов волн были выделены сейсмогеологические комплексы, характерные для Новомихайловской площади. Оказалось, что отражения от глубоких горизонтов более отчетливо прослеживаются на поперечных волнах. Этот кажущийся парадокс позднее объяснился очень просто: когда сейсмопартия «отстреливала» профиль на поперечных волнах, там сидел мнс-«нытик» из ИГиГ Василий Петрович Зайцев. Когда же сейсмопартия перешла на работу с продольными волнами, В.П. Зайцев уехал домой, и было некому ходить и «ныть», чтобы сейсмоприемники ставили аккуратно и что перед работой надо все проверить.

Эти материалы подтвердили, что поперечные отраженные волны низкочастотные. «Видимая частота» отраженных продольных волн составляет около 30 Гц, а поперечных волн — около 15 Гц. Устранять причины этого явления времени не осталось, так как СССР скоростно (и главное неожиданно!) скончался, и методисты-«поперечники» остались фактически безработными.

А что, авторы «Вибролокатора» не знали об этом? Знали! Более того, было начата разработка модели «Вибролокатора», в которой виброплатформа имела вид перевернутого цилиндрического котла диаметром около 2 м. Для улучшения контакта вибратора в горизонтальном направлении, борта этого котла внедрялись в грунт на 50–70 см путем поворотов. Но из Москвы пришло распоряжение: «нечего умничать: американцы в вибраторах «Вибросейс» контакт вибратора с грунтом обеспечивают при помощи треугольных зубьев. Извольте делать так, как американцы!» Сделали, как американцы, и подтвердили их результаты.

Почему «Вибролокаторы» часто ломались? Всё довольно просто и прозаично. Каждый экземпляр «Вибролокатора» был фактически новой машиной, так как достать одинаковые комплектующие детали хотя бы для одной группы вибраторов было невозможно. Особенно драматично выглядел пятилетний план 1980–1985 гг. По этому плану к 1985 г. новосибирское СКБ геофизической техники должно было подготовить одну группу из пяти десяти-тонных усовершенствованных вибраторов. Снабженцы СКБ в течение всего этого времени ездили по всему Советскому Союзу, чтобы достать комплектующие. И вот наступает 1985 год. Нужных деталей нет. Чтобы «выполнить план», было решено изготовить пять вибраторов на тех деталях, которые как-то удалось достать, а не на тех, которые нужны. Подходит декабрь. Ни один вибратор не работает, настраивать их времени нет, но все равно надо идти на «государственные испытания» — из Министерства геологии СССР прибыли члены приемочной комиссии.

Автор этих заметок настаивал на признании того, что вибраторы к испытаниям не готовы. Но высокие члены приемочной комиссии заявили, что это недопустимо, так как в этом случае за невыполнение пятилетнего плана выговор получают заместители министра Мингео СССР (геологи) и другие лица, которые к геофизике не имеют отношения. И тогда геофизикам житья не будет! И вот под руководством членов комиссии написали длинный текст (акт об успешном выполнении пятилетнего плана), с оговоркой, что там «кое-что надо доделать». Но советская техника, принятая государственной комиссией, в доработке не нуждается! Конструкторы были переброшены на другие темы, стоящие в длинной очереди. Поэтому все пять ненастроенных вибраторов простояли без движения и пошли на металлолом, когда СССР не стало.

СУБЪЕКТИВНАЯ ИСТОРИЯ РАЗРАБОТКИ «ВИБРОЛОКАТОРА»

В.И. Юшин

В ноябре 1966-го, через четыре года после поступления на работу в Институт автоматики и электрометрии (ИАЭ), я защитил кандидатскую диссертацию по разработке цифровых корреляторов и стал оглядываться вокруг, куда бы приложить этот инструментарий. Роясь по реферативным журналам, наткнулся на интересную статью некоего И.С. Чичинина, из которой понял, что в нефтяной сейсморазведке существует проблема использования методов оптимального приема сигналов (согласованной фильтрации). Как-то рассказал об этой статье своим коллегам по лаборатории и услышал в ответ: «Не тот ли это Чичинин, что завтра выступает с докладом на институтском семинаре?» Оказалось, что недавно в нашем институте по соглашению директоров ИАЭ и ИГиГ К.Б. Карандеева и А.А. Трофимука была создана тематическая группа во главе с молодым геофизиком, кандидатом наук, тем самым Иннокентием Сафьяновичем Чичининым. И как раз завтра состоится,



как теперь бы сказали, научная презентация нового руководителя и его научного направления. В задачу нового подразделения — даже не лаборатории, а тематической группы — входила реализация двух выдвинутых И.С. Чичининым аппаратурных проектов, один из которых — метод и аппаратура для вибрационной сейсморазведки — и являлся темой доклада.

Надо заметить, что Институт автоматизации и электрометрии и раньше был не чужд геофизической тематики. Геофизический отдел, возглавляемый в тот момент Г.А. Штамбергером, играл в нем существенную роль и, более того, по словам моего тогдашнего руководителя Б.С. Сеницына, «кормил» весь институт, принося приличный хозяйственный доход. Как я помню, основной тематикой отдела были аэроэлектромагнитные методы и так называемый «бесконечно длинный кабель». Однако незадолго до того в институте со скандалом была закрыта одна провалившаяся разработка — «сейсмомашина», именуемая остроумным мэнэсовским народом по имени ее руководителя Арнольда Константиновича Романова «Арнольдовой могилой». Бесславная кончина этой разработки, долго находившейся в центре внимания, навязшей в зубах всех окружающих и отвлекавшей на себя значительные ресурсы, выработала в молодых сотрудниках устойчивую аллергию на слово «сейсмо», и когда был объявлен доклад, в теме которого упоминалась сейсморазведка, предвзятость аудитории «автоматчиков» была запрограммирована.

Несмотря на то что прошло более 40 лет, тот доклад И.С. Чичинина я хорошо помню, поскольку его результатом был крутой поворот в моей жизни. Сначала докладчик обратил внимание слушателей на то, что в последние годы из привычной плакатной пропаганды «Пятилетку в 4 года!» исчез шахтер с отбойным молотком на плече. Открыт Самотлор. Паровозы заменялись тепловозами, страна переходила с угля на нефть, и разведка ее становилась актуальнейшим делом. Затем Чичинин рассказал об изобретенном им методе...

В то время сейсморазведка проводилась с помощью взрывов, но в одном из американских журналов промелькнуло сообщение об использовании в качестве источника сейсмических волн вибратора. Причем было упомянуто, что частота вибратора изменяется во время зондирования. И.С. Чичинин, окончивший физфак Ленинградского университета и аспирантуру при кафедре геофизики, попытался сообразить, как это американцам удалось «свернуть» гармонический сигнал, чтобы получить привычную геофизикам «взрывную» сейсмограмму. Алгоритм он нашел. Но позже, когда появились публикации американских патентов, выяснилось, что им изобретен совершенно оригинальный способ, отличный от американского. Рассказ об этом способе и его предлагаемой реализации «в железе» и являлся содержанием доклада...

Это было время, когда о цифровой магнитной записи мы еще только мечтали, а данные в ЭВМ вводились с помощью перфокарт или бумажных перфолент. На весь Новосибирский научный центр была только одна ЭВМ — ламповая машина М-20 (20 тыс. операций в секунду), располагавшаяся, кстати, в Институте геологии и геофизики. В Институте автоматизации разрабатывались первые АЦП и пытались создать устройство считывания данных с диаграммных лент.

...Но вернемся к докладу. Я тогда обратил внимание на одну особенность чичининского подхода — видеть за математической формулой конкретный способ ее практической реализации. И хотя предлагаемые докладчиком пути реализации показались мне наивными, а сам метод настолько необычным

для специалиста, знакомого с существующей теорией оптимального приема, и поначалу даже ошибочным, грандиозность самой задачи захватила меня. После доклада я зашел в лабораторию к Чичинину, где начавшаяся на докладе дискуссия продолжилась. Здесь я впервые познакомился с Геней Евчатовым, недавним выпускником НГУ — учеником Чичинина, который уже защитил дипломный проект по его методу, и мы продолжили спор. Я никак не мог понять, в чем решающее преимущество чичининского метода перед «вибросейсом», поскольку твердо уверовал в равноценность операций во временной и частотной областях. А Гена, горячо защищая метод Чичинина, не мог понять меня, поскольку был слабо знаком с методами корреляционных вычислений. Мне же показалось, что там была и принципиальная ошибка. Поколебать же убежденность самого Чичинина в своей правоте «с наскоку» было невозможно (он спокойно расправлялся с любыми каверзными вопросами), и я, в конце концов, попросил дать мне материалы его проекта для домашнего анализа.

Если живописать идею крупными мазками, то она состояла в следующем. Вибрационная сейсморазведка алгоритмически похожа на радиолокацию. В основе лежит оптимальный прием зондирующих сигналов, упрощенно говоря, вычисление взаимной корреляционной функции посылки и отклика. Можно еще добавить, что эта процедура суть накопление полезного сигнала во временной области. Но если в радиолокации длительность посылки значительно короче времени пробега волны до цели и обратно, то в вибрационной сейсморазведке она во много раз длиннее. По «корреляционному» пути пошли американцы, разработав сложнейший комплекс с аналоговой магнитной записью и специальным барабаном с подвижными магнитными головками. Создать подобный комплекс в наших условиях в то время, когда и простой бытовой магнитофон был большой роскошью, было просто нереально (пример — вышеупомянутая злосчастная «сейсмомашина», представлявшая собой устройство для преобразования аналоговых сейсмических записей в сейсмограммы ОГТ путем введения в них регулируемых задержек с помощью многократной магнитной перезаписи и аналогового суммирования).

Я изучал проект вибрационной сейсморазведки Чичинина с пристрастием (он был оформлен в виде научного отчета объемом с кандидатскую диссертацию), проверяя все математические выкладки по-своему. Ошибок не нашел и, наконец, понял: замечательная догадка Чичинина состояла в том, что накопление энергии отраженного сигнала можно выполнять не только во временной, но и в частотной области, причем во втором случае накопителем энергии полезного сигнала может служить обыкновенный RC-фильтр (а не коррелятор!). А это уже радикально упрощало требования к регистрации, в сотни раз уменьшая объем полевых записей. И хотя при этом возникали другие сложные аппаратурные проблемы, они уже не казались такими непреодолимыми, как построение коррелятора с требуемыми для сейсморазведки параметрами. Коррелятор же, эквивалентный чичининскому методу, должен был бы строиться по параллельному принципу, что в то время было абсолютно нереально.

...В общем, я попросился в группу Чичинина и был принят. Надо сказать, это решение не было простым. Оставить замечательный, дружный коллектив моей прежней лаборатории, который к тому же находился на творческом подъеме, и я в нем, смею думать, был не последним... Нет, мои коллеги меня не поняли. Но в качестве «приданого» при уходе мне разрешили забрать по-



строенный мной цифровой коррелятор, который я затем с успехом использовал как источник электронных «кирпичей» для новых устройств.

В момент, когда я пришел в группу Чичинина, в нее входили: Владлен Николаевич Кузаков, инженер, он был старше всех по возрасту — 37 лет; геофизик Гена (Геннадий Петрович) Евчатов, он только что окончил геофак НГУ, а у Чичинина работал со студенческой скамьи и специализировался в теории вибросейсморазведки (а точнее, теория только здесь и начинала создаваться); Юра (Юрий Вильгельмович) Михаэлис, недавний выпускник техникума и студент-заочник НЭТИ, и к тому же чудо-радиомонтажник; Язеп Тарвид — молодой инженер-электронщик высокой квалификации из Риги, человек странной и драматической судьбы. После какого-то конфликта на родине он бросил всё: дом, работу, уехал «куда глаза глядят», высадился в Новосибирске, пошел в горком комсомола и попросил помочь с устройством на работу. Так, волею случая, оказался в группе Чичинина. Почти одновременно со мной в группу Чичинина был принят Миша (Михаил Александрович) Старков. Он приехал из Тамбова. Тоже молодой специалист, стремящийся в науку и достаточно амбициозный. Кроме того, у меня в тот момент был подопечный дипломник из НЭТИ Коля (Николай Феодосьевич) Сперанский, которого после защиты диплома тоже приняли в нашу группу.

Здесь надо сказать, что Чичинин обладает редким даром, как теперь говорят, «харизмой», убеждать, обращать в свою веру людей. Благодаря этому качеству, не будучи формально крупным начальником, он привлекал специалистов из других организаций, обеспечивая их хозяйственными средствами, которые сам же «выбивал» из Мингео и Миннефтепрома. Так, в начальный период над аппаратурным комплексом трудился Владимир Евгеньевич Окунев из СНИИГГиМСа, а над конструкцией гидравлического вибратора работали специалисты СКБ гидроимпульсной техники, руководимого знаменитым и всесильным (в СО АН СССР) Богданом Вячеславовичем Войцеховским, Альфред Александрович Зуев и Володя (Владимир Валерьянович) Маньковский.

И.С. Чичинин теоретически показал, что если генерировать с помощью сейсмического вибратора колебания с очень медленной линейной разверткой частоты, а отклик среды перемножать с исходными колебаниями, подавляя затем все высокочастотные компоненты, то образуется инфранизкочастотный во времени сигнал, спектр которого представляет собой искомую импульсную сейсмограмму. Фильтр, подавляющий высокие (почти равные удвоенной частоте вибратора) частоты, и является одновременно накопителем энергии полезного сигнала. Чем медленнее развертка частоты, тем дольше она проходит заданный частотный диапазон, тем больше возрастает отношение полезного сигнала к сторонним помехам. Поэтому Чичинин первоначально назвал свой метод «методом длинных сеансов». Полученная в результате этой процедуры функция, если ее ось времени отградуировать соответствующими частотами вибросигнала, представляет собой известным образом искаженную комплексную частотную характеристику среды. Мне же показалось естественным назвать метод Чичинина частотным, как это принято в теории автоматического регулирования, а полученные записи — частотными сейсмограммами, что в дальнейшем и прижилось*. Математи-

* В отличие от частотного американский вибросейсмический метод с запатентованным к тому времени названием «вибросейс» мы стали именовать корреляционным.

чески алгоритм Чичинаина близок к преобразованию Фурье, но все же отличается от последнего: я назвал его «фазоскорректированным Фурье-преобразованием», но это название не прижилось. Тем не менее я и сейчас считаю, что открытием этого преобразования сделан существенный вклад в прикладную математику, и его было бы справедливо называть преобразованием Чичинаина.

СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ В СССР

Справедливости ради следует сказать, что к 1967 г. в СССР не один Чичинин разрабатывал вибросейсмический метод. Над ним работали по своей инициативе еще две группы энтузиастов: А.М. Седин с Г. Молокановым в Краснодаре и Юрий Петрович Лукашин с Татьяной Марковной Гродзянской в Ленинграде. Путь, по которому шел Седин, был близок к частотному методу Чичинаина, но его беда, на мой взгляд, состояла в недостаточном владении математическим аппаратом. То, что Чичинин выводил «на кончике пера», Седин с Молокановым пытались проверить физическим моделированием в бочке с водой, угробив на эту неблагодарную работу уйму труда и времени. Но главное, они так и не нашли правильного алгоритма восстановления импульсных сейсмограмм из частотных (того самого преобразования Чичинаина), а использовали для этого стандартный анализатор спектра, который мог дать только амплитудную информацию, полностью теряя важнейшую для сейсмограмм фазовую.

Впереди всех коллег-соперников был Ю.П. Лукашин из Ленинградского ВИРГа: у него к тому времени уже были получены вибрационные сейсмограммы в привычной импульсной форме. Он, хотя и шел по корреляционному направлению, но также не повторял «вибросейс». Он изобрел и построил оригинальный аналоговый коррелятор параллельного типа по так называемой релейной схеме. Устройство получилось громоздкое, но вполне работоспособное. А главное, резко упростились требования к точности работы вибратора, что позволило ему использовать с незначительной доработкой обычный строительный вибратор — уплотнитель бетона. Для задач малоглубинной рудной сейсморазведки, которыми занимался Лукашин, мощности этого вибратора вполне хватало.

НАЧАЛО РАБОТЫ. ПЕРВЫЙ МАКЕТ АППАРАТУРЫ

В момент моего прихода уже существовал разработанный группой Чичинаина макет шестиканальной ламповой сейсмостанции частотного метода. Регистратором служил барабан со сменной магнитной лентой (использовалась прямая запись без модуляции, причем скорость протяжки составляла единицы мм в секунду). Для воспроизведения и обработки эта лента должна была переноситься на другой барабан, который вращался уже со скоростью около 30 оборотов в минуту, т. е. раз в 100 быстрее, правда, самой «обрабатывающей машины» еще не было.

Владлен Кузаков собирал следующий макет сейсмостанции на транзисторах. Язеп Тарвид трудился над схемой аналогового перемножителя (также на лампах) для будущей «обрабатывающей машины» и пытался получить линейную развертку частоты для управления вибратором, используя стандартный звуковой генератор. В СНИИГТиМСе Окунев разрабатывал узел генератора для «обрабатывающей машины» — вращающийся прозрачный барабан с нанесенной на него маской Фурье-гармоник. Барабан должен был вращаться



подобно обрабатываемой детали на токарном станке, а считывающая фотоголовка при этом — передвигаться подобно резцу, закрепленному в суппорте.

Специалистов, знакомых с цифровыми устройствами, у нас не было, поэтому все конструкторские идеи крутились вокруг аналоговых устройств. Более того, понимая ограниченную точность генерации линейной развертки частоты, Чичинин с Евчатовым проделали огромную теоретическую работу по обоснованию методов коррекции частотно-фазовых ошибок, возникающих при исполнении программы линейной развертки частоты.

Разобравшись с положением дел, я решил начать с программного генератора. Мне пришла в голову идея весьма простого генератора с разверткой частоты на дискретных элементах. Разобрав на части макет своего «диссертационного» цифрового коррелятора, я довольно быстро построил из его «кирпичей» программный генератор с линейной разверткой частоты. Но надо было еще заставить работать вибратор по этой программе.

ПЕРВЫЙ ВИБРАТОР

Летом 1967 г. А.А. Зуев, сотрудник Б.В. Войцеховского, работавший по хоздоговору с Чичининым, продемонстрировал стенд-макет первого гидравлического вибратора. Стенд размещался в лабораторном корпусе СКБ ГИТ, питался насосом от буровой установки, но вибрировать не хотел. Поскольку мы тогда еще не имели представления о реальных вибросигналах и не могли задать конкретные параметры вибрации, начались препирательства с Войцеховским о том, выполнено техническое задание по хоздоговору или нет. Чтобы убедить конструктора и его амбициозного руководителя, что построенный ими вибратор никуда не годится, мы приобрели у строителей небольшой стандартный вибратор для уплотнения бетона и включили его рядом со стендом. Эффект был оглушительный. Споры прекратились, и работа была продолжена. В результате к весне 1968 г. был построен достаточно мощный вибратор вертикальной силы. К сожалению, фотографии его не сохранилось. Вес толстой стальной плиты (реактивной массы) составлял, как точно помню, пять тонн. Войцеховский, надо отдать ему должное, железа не жалел. В комплект входил еще и ангар для громоздкого насоса и бак для рабочей жидкости объемом два кубометра. В качестве последней использовалась охлаждающая эмульсия для металлорежущих станков (вода с добавкой минерального масла).

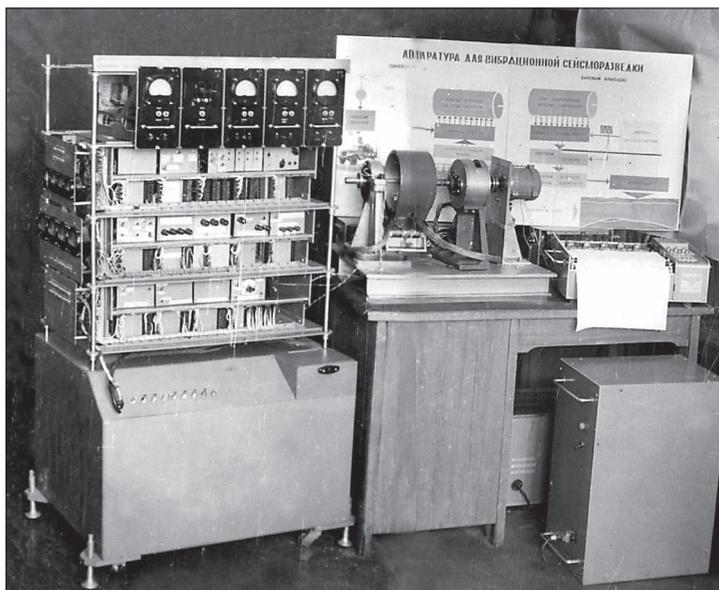
Для управления частотой колебаний Зуев предложил простую конструкцию на основе вращающейся дроссельной заслонки. Но заслонку надо было вращать с высокой точностью по сигналу программного генератора. Эта проблема еще не была решена, и Войцеховский «выкручивал руки» Чичинину на предмет нового хоздоговора под разработку какого-то изобретенного им «турбодвигателя».

И здесь огромная заслуга принадлежит Мише Старкову. Он где-то раздобыл американский сельсин-индикатор, перемотал его с трех фаз на две и превратил в уникальный двухфазный синхронный двигатель с активным ротором. Включив его через два самодельных 50-ваттных транзисторных преобразователя DC/AC, управляемых по частоте нашим цифровым программным генератором, мы получили идеальный привод заслонки управления гидравлическим вибратором. Все эти работы были выполнены в короткий срок, в течение весны–лета 1968 г. Сейчас, вспоминая, поражаюсь, как было

спрессовано время! Почти всё, о чем говорилось выше, было сделано менее чем за год. Уже в августе 1968 г. на базе Войцеховского «Зеленая горка» состоялись первые испытания этого вибратора в комплексе с ламповой сейсмостанцией, в результате которых мы впервые увидели, как выглядит реальная частотная сейсмограмма. Правда, обратить ее в импульсную тогда еще не было возможности.

Кроме высокоточной генерации свип-сигнала, не менее сложной была техническая реализация чичининского алгоритма восстановления импульсных сейсмограмм из частотных. Сложность его, подобно «программнику», также состояла в необходимости высокоточной генерации гармоник различных частот, строго синхронизованных со шкалой времени полевого зондирования. Оптико-механический генератор гармоник, над которым трудился Володя Окунев, мне казался нереализуемым монстром, а остановить напрасный труд можно было, только выставив действующий альтернативный макет. Поэтому, закончив с «программником», я переключился на обрабатывающую машину и, слегка доработав его принципы, из оставшихся обломков своего коррелятора построил генератор гармоник для Фурье-анализатора. К тому времени Язеп Тарвид уже настроил несколько ламповых перемножителей. Оставалось собрать в единый комплекс барабан ускоренного воспроизведения, генератор гармоник, перемножители и добавить выходной регистратор.

Еще весной 1968 г. Чичинин организовал для лаборатории коллективную поездку вокруг Обского моря для выбора виброполигона. Выбрали окраину с. Бурмистрово в Искитимском районе. Договорились с сельсоветом. На лето поселились в пустующей школе, а к осени сняли два дома на окраине с. Бурмистрово. К сожалению, лето 1968 г. заканчивалось, и мы провожали его в полевых условиях на окраине села. Вот-вот должен был «задышать» Фурье-анализатор, и хотя уже кончалась осень, возвращение затягивали, чтобы вернуться «на белом коне». Тогда же я впервые столкнулся со стилем рабо-



Фурье-анализатор

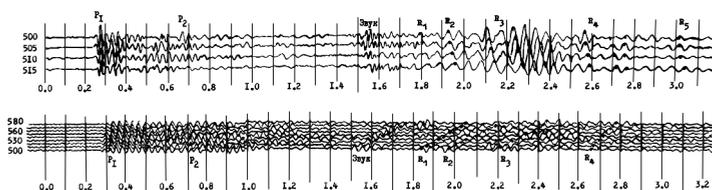


ты, введенным Чичининым: лето проводить в поле. Казалось бы, идет разработка аппаратуры, надо сидеть в окружении приборов в лаборатории, под боком конструкторы, мехмастерская. Нет! — погрузили пол-лаборатории приборов на грузовики, сняли избу в деревне, сеть вместо 220 дает 150 вольт, летом — комары, осенью — печное отопление, связи с городом нет и т. д. Но зато какое погружение в работу! Ничто не отвлекает. Можно работать, кто, конечно, хочет, хоть круглые сутки! Именно тогда, в октябре 1968 г., в избушке на околице с. Бурмистрово впервые закрутился барабан воспроизведения и «задышал» Фурье-анализатор. Сохранилась его фотография.

Конечно, у этого стиля были не столько романтические, сколько прозаические причины. Разработка финансировалась не только академическим бюджетом, но и хоздоговорами. Договоры заключались с Мингео и контролировались ВНИИГеофизикой. Отчитываться надо было ежегодно и отчитываться полевыми материалами, как это принято в производственных геофизических партиях.

Итак, начало зимы 1968 г., а она началась в первых числах ноября метелями и морозами за тридцать, мы встретили в с. Бурмистрово. Собирались к 1 ноября вернуться домой, но три дня бушевала пурга, и дорогу так занесло, что в село не могли завезти даже хлеб из соседнего с. Улыбино, где была пекарня, не говоря уже о машине из института. Питались только цыплятами местной птицефабрики, которых у нас было запасено в холодных сенях два ящика-вьючника. Они были куплены по льготным ценам (70 коп. за кг). Чичинин, остававшийся в институте, поднял на ноги все начальство и «выбил» в местном Военном училище гусеничный вездеход, который к вечеру 3 ноября пробился к нам из Академгородка. Мы было собрались тут же в дорогу, но командир, заметив у нас канистру со спиртом, решил дожидаться утра. А на дворе было около минус тридцати с ветром. Поэтому каждый час надо было прогревать дизель бронетранспортера. Спать легли, когда канистра опустела. Утро оказалось солнечным, тихим и еще более морозным. Часам к 12, наконец, собрались ехать. На всякий случай загрузили еще и поленицу дров, и не напрасно. Не проехали и 5 км, как мотор заглох. Кончилось горючее (хорошо посидели прошедшей ночью!). Ох, какие цветистые тексты выдавал командир в адрес водителя! Но тут, к счастью, навстречу появился бульдозер, а следом за ним вереница машин и в том числе наш институтский уазик. Командир поехал с нами, а водителя, еще раз обругав, оставил караулить железо на морозе, хотя мы-то понимали, кто в действительности виноват.

Лето 1969 г. мы опять провели в Бурмистрово. Туда Войцеховский пригнал (подальше от глаз начальства) пострадавшую от пожара баржу «Зоя Космодемьянская» и туда же перевезли первый гидравлический вибратор Зуева. Энергопитание обеспечивалось мощной передвижной дизель-электростанцией армейского образца, которой управляли Володя Маньковский и Миша Старков. Наконец-то весь виброкомплекс заработал и были получены



Сейсмограмма, 1969 г.



Ю.П. Лукашин (слева). 1981 г.



Вибратор. 1970 г.

первые полноценные вибрационные сейсмограммы на удалении 500 м от вибратора*. Правда, и здесь не обошлось без казуса. Есть такой армянский анекдот: что изображено на картине (а на ней — одна наклонная линия от края до края полотна)? Ответ: «дама с собачкой» — в кадр попал только поводок. Так и у нас сначала яркие волны оказались за пределами сейсмограммы, как слева, так и справа.

В марте 1969 г. Чичинин отправил меня в командировку в Ленинград (в ВИРГ к Ю.П. Лукашину), Краснодар (в ЮжМорГео к Седину) — познакомиться с коллегами-конкурентами, и в Баку (к Ганбарову и Бабаеву) — как своим единомышленникам. Краснодарская разработка оказалась в тупике по причине, о которой я упомянул выше, но главным образом из-за внутренней склоки. Но было у краснодарцев и рациональное зерно: они построили дебалансный вибратор и первыми применили для его привода следящую сис-

* Документировано по сохранившемуся у меня отчету. Цитата: «Летом 1969 г. впервые получены нормальные вибрационные сейсмограммы с осями синфазности до 3 с».



Полевой лагерь на р. Чая в Колпашевском районе Томской области, 1970 г. Слева направо: Ю.В. Михаэлис, В.В. Маньковский, С. Павлов, И.С. Чичинин, П.А. Андреев (с карасем)

тему с двигателем постоянного тока. Кстати, и цифровой программный генератор, близкий по идее к нашему, у них также был уже построен Димой Линчевским.

А Ю.П. Лукашин в Ленинграде в ВИРГе уже занимался интерпретацией своих первых полевых вибро-сейсмограмм.

Баку же мне запомнился только сырой ветреной пасмурной погодой и плавучей гостиницей-кубриком, где я с трудом устроился и где с железного потолка капала вода-конденсат, как в раздевалке общественной бани.

Бурмистровский успех окрылил. Новым этапом была разработка А.А. Зуевым в СКБ Войцеховского передвижного вибратора. Этот вибратор по настоянию Н.Н. Пузырёва было решено приспособить для возбуждения поперечных волн.

Сезон 1970 г. мы провели в Томской области в с. Гришкино на р. Чая, где работала сейсмопартия только что образованной по инициативе Н.Н. Пузырёва СибГЭ под руководством Г.Л. Ковалевского и В. Локцика. Вся техника туда была доставлена на барже. Наш сводный отряд состоял из группы Института автоматики и электрометрии (И.С. Чичинин, я, Гена Евчатов, Юра Михаэлис, Владлен Кузаков, Володя Сквыкин, Стас Павлов) и представителей разработчика вибратора — от СКБ ГИТ Володя Маньковский и от СНИИГГиМСа Володя Окунев и Толя Гейлер.

ИСТОРИЯ СОЗДАНИЯ БЫСТРОВСКОГО ВИБРОСЕЙСМИЧЕСКОГО ПОЛИГОНА

В.В. Маньковский

Одним из занимательных событий в жизни Института геологии и геофизики явилась организация вибросейсмического полигона. По программе «Вибрационное просвечивание Земли» началось создание мощных вибрационных источников. Работы уже шли полным ходом, и требовалось найти место для испытаний вибраторов. В городской черте проводить испытания было нельзя, так как возникала угроза разрушения близлежащих сооружений. К полигону выдвигались следующие требования: близость энергетических мощностей (электрические сети), наличие выходов коренных пород, достаточно проезжая дорога и водоем. Последнее требование было обязательным, поскольку один из руководителей проекта и мой непосредственный начальник Иннокентий Сафьянович Чичинин был заядлым рыбаком и не мог себе представить полигон, где нельзя половить рыбу. Приняли решение вести поиски полигона вверх и вниз по течению р. Оби.

Весной 1977 г., когда дороги немного подсохли и уже можно было проехать на вездеходе, команда в составе И.С. Чичинина, Николая Павловича Ряшенцева и меня отправилась в дорогу. Сначала поехали вниз по Оби примерно до пос. Пристань-Почта. Ехать дальше показалось неразумным — полигон был бы очень оторван от Академгородка, где находился «мозг проекта». Следующая поездка была совершена вверх по Оби до пос. Ерестная, но, к нашему сожалению, и здесь мы не увидели ничего подходящего. Высокое



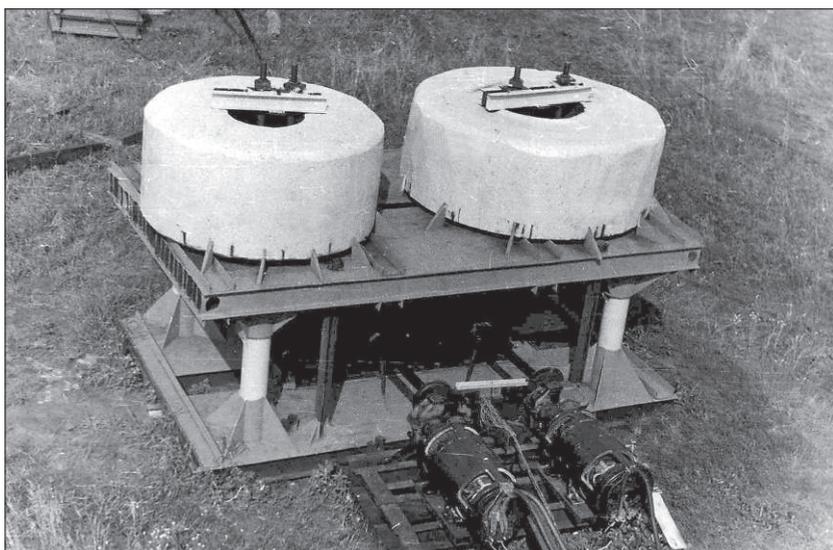
Выбор места для вибросейсмического полигона. Быстровка, 1977 г. Слева направо: А. Рябков и А. Котов (Институт гидродинамики), В.В. Маньковский и И.С. Чичинин (Институт геологии и геофизики)



начальство, утомившись, поручило продолжить это дело мне. Мотаясь почти месяц вдоль реки, я уже решил, что ничего подходящего, наверное, не найду и поиски в этом районе надо прекратить. На обратном пути водитель предложил заехать к его отцу, который работал на базе отдыха завода имени Чкалова, — он повидается с отцом, а заодно и перекусим. И вот, хлебая уху, мы пожаловались ему на наши проблемы. Немного подумав, он сказал, что, видимо, сможет нам помочь, и посоветовал посмотреть место в районе впадения реки Тулка в Обь. Мы, быстренько закончив еду, понеслись в указанное место. Приехав, сразу же обнаружили выходы коренных пород, в двух километрах довольно приличную для тех лет дорогу и линию электропередачи.

Вернувшись в институт, я сообщил И.С. Чичинину о сделанном мной открытии. Он сказал, что через день прибудет еще один из руководителей проекта Алексей Всеволодович Николаев из Института физики Земли, и мы поедем осматривать это место на профпригодность. В следующую субботу, собрав нехитрую снедь и кое-какие мелочи, мы на моторной лодке Чичинина отправились в дорогу. Когда мы прибыли на выбранное место и высадились на берег, то и Чичинину, и Николаеву там сразу понравилось. После детального осмотра, проверив выходы скального грунта и сделав несколько фотографий, мы написали на бумаге табличку «Вибросейсмическая станция СО АН», прикрепили ее на деревянный кол и воткнули в землю, тем самым закрепив это место за институтом.

И сразу же появилась другая задача: ведь мало за столбить место, надо его юридически оформить. Для этого требовалось разрешение сельскохозяйственного отдела Новосибирского облисполкома. А чтобы его получить, необходимо было разрешение Тулинского совхоза, на чьей земле мы хотели построить полигон, а также разрешение Искитимского Совета народных депутатов. Для получения этих документов потребовалась экспликация всех запрашиваемых участков, которая делалась главным землеустроителем Искитимского района с выездом на место. Когда половина работы уже была завершена, случилось несчастье. В отделе главного землеустроителя необходи-



Вибратор-«гадёныш»

мо было сделать выкопировки плана участка, экспликации и т. д. Тогда вместо ксероксов были очень сложные копировальные машины, которые выдавали так называемые синьки. Чистили эти машины спиртом, и главный землеустроитель сказал, что они могли бы сделать копии уже завтра, но у них нет спирта почистить барабан, а без этого копий не получится. Я из Искитима помчался в институт, взял спирт и привез его в отдел землеустройства. А наутро, приехав за документами, узнал, что главный землеустроитель умер. Я ужасно расстроился, подумав, что вдруг в этом виноват мой спирт, но это оказалось не так. Оформление полигона началось заново, так как был назначен новый главный землеустроитель со стороны, естественно, не знакомый с обстоятельствами дела. Но, так или иначе, все разрешения удалось оформить. Я сдал документы в отдел землепользования Новосибирского облисполкома, привел к нужной двери сотрудника, который должен был получать готовое разрешение на пользование землей, и сказал, что в среду будут готовы все документы на право пользования землей для полигона. А сам отправился заниматься своим вибратором, которому Чичинин дал ласковое прозвище «гадёнш». Хочу заметить, что при оформлении мне очень повезло, что у института уже была своя база отдыха. Все считали, что мы добиваемся участка, да на берегу реки, для постройки базы отдыха, а я в ответ махал им бумагами, из которых следовало, что база-то у нас уже есть, а мы создаем полигон.