



РАЗВИТИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ СЕЙСМОЛОГИИ В СОВЕТСКОМ СОЮЗЕ*

Г.А. Гамбургцев

Кратко характеризуются основные этапы развития в СССР методов экспериментальной сейсмологии за годы Советской власти. Основное внимание уделяется работам, связанным с изучением природы сейсмических волн, а также с разработкой сейсмических методов исследования строения земной коры и разведки полезных ископаемых.

HISTORY OF EXPERIMENTAL SEISMOLOGY IN THE SOVIET UNION

G.A. Gamburtsev

The history of experimental seismology in the USSR is briefly described, with a focus on research in the physics of seismic waves and on the methods for crust structure studies and exploration purposes.

В отличие от общей сейсмологии, занимающейся изучением естественных землетрясений, экспериментальная сейсмология оперирует с искусственно возбуждаемыми сейсмическими волнами, обычно используя для этой цели небольшие взрывы.

Основные задачи экспериментальной сейсмологии заключаются в изучении физики сейсмических волн, условий их возбуждения и распространения в реальных геологических средах, и особенно в изучении строения и сейсмических свойств земной коры и слагающих ее горных пород путем расшифровки записей искусственных землетрясений.

В связи с последним методы экспериментальной сейсмологии нашли широкое применение в геологической разведке, что в свою очередь отразилось на направлении теоретических работ. До настоящего времени работы по методике сейсморазведки преобладают над работами более общего геофизического содержания.

Начало развития методов экспериментальной сейсмологии и первые шаги в области геологических приложений этих методов относятся в СССР к 1926 г., когда акад. П.П. Лазаревым и проф. А.И. Заборовским одновременно и независимо друг от друга в “Журнале прикладной физики” были опубликованы теоретические основы метода первых вступлений**.

Этот метод, как известно, базируется на регистрации тех упругих волн, возбуждаемых с помощью взрывов, которые приходят первыми к сейсмографу. В случае среды, состоящей из двух слоев, на достаточно малых расстояниях от пункта взрыва первыми будут подходить прямые продольные волны в верхнем слое. Начиная с некоторого определенного расстояния от пункта взрыва, если скорость упругих волн в нижнем слое больше, чем в верхнем, первыми будут приходить волны, заходящие в нижний слой. Их часто называют преломленными, или минтроповскими. Построив по экспериментальным данным годографы

обоих типов волн, можно определить глубину границы раздела, а также значения скоростей распространения упругих волн.

В тот период времени была отчетливо сформулирована лишь геометрическая (кинематическая) сторона теории волн Минтропа, непосредственно вытекавшая из принципа Ферма или построений Гюйгенса. Что же касается динамики процесса, то этот вопрос не был исследован, если только отвлечься от некоторых оптических аналогий. В связи с этим полевые сейсморазведочные работы имели немалое значение, подтвердив на обширном экспериментальном материале физическую реальность волн Минтропа.

Почти одновременно, в 1930-х годах, динамический смысл волн, близких по типу к минтроповским, был установлен замечательными теоретическими исследованиями В.И. Смирнова и С.Л. Соболева, разработавшими новый эффективный метод решения динамических задач теории упругости.

Так как для геологической интерпретации наблюдений по методу первых вступлений достаточно было знать лишь кинематические свойства преломленных волн, то уже первые полевые работы приобрели геолого-разведочное значение. Особенно большое развитие работы по методу первых вступлений получили в нефтяной промышленности при изучении строения соляных куполов Эмбы.

Полевые разведочные работы стимулировали развитие методов интерпретации сейсмических годографов. В этом отношении были достигнуты значительные успехи; некоторые из разработанных в то время (1926–1930 гг.) способов интерпретации не утратили своего значения и до настоящего времени (работы П.П. Лазарева, С.В. Чибисова, Г.А. Гамбургцева и др.).

Еще в начальный период развития метода первых вступлений представлялась теоретически ясной возможность использовать с разведочными целями не только преломленные (минтроповские), но и отра-

* Известия АН СССР. Сер. географическая и геофизическая. 1947. Т. XI, № 5. С. 409–414.

** В дальнейшем большинство работ в данной области печаталось в следующих журналах и сборниках (созданных после Великой Октябрьской революции): Бюллетень нефтяной геофизики, Труды Сейсмологического института АН СССР, Известия Академии наук СССР (серия геогр. и геофиз.), Доклады Академии Наук СССР (новая серия), Труды Института теоретической геофизики АН СССР, Сборник “Прикладная геофизика” и др.

женные волны. Впервые мысль об этом была высказана В.С. Воюцким еще в 1922 г. Однако в течение долгого времени экспериментальная сейсмология была методически и технически не подготовлена к развитию работ в данном направлении. Это было вызвано, с одной стороны, недостаточной изученностью особенностей возбуждения и распространения упругих волн в реальных геологических средах, а с другой стороны – несовершенством применяемой аппаратуры.

Особенности методики и техники выделения отражений были обусловлены тем, что отражения приходилось регистрировать на фоне ряда других сейсмических волн, по своей интенсивности иногда во много раз превосходивших отраженные волны. Среди этих волн-помех необходимо было не только фиксировать существование отраженных волн, но и определять время их подхода с большой точностью (до 0,001 с), притом не в одной точке, а в ряде точек по профилю, как это требуется для построения сейсмического годографа. Было очевидно, что аппаратура метода первых вступлений для этой цели совершенно непригодна уже по одному тому, что на сейсмограммах, получаемых с помощью этой аппаратуры, отраженные волны, как правило, отсутствовали.

Отсюда вытекала необходимость коренного изменения техники регистрации сейсмических колебаний. Требовалась разработка специальных мер для изменения на сейсмограммах соотношения амплитуды различных волн в пользу отраженных волн. В соответствии с этим было необходимо подобрать оптимальные частотные характеристики и характеристики направленности приемной аппаратуры, а также обеспечить наилучшие условия взрыва, определив предварительно, что под этим следует понимать. Было ясно также значение многоканальной записи сейсмических колебаний, т. е. одновременной регистрации на одной ленте кривых колебаний целой серии сейсмографов, расположенных на разных удалениях от пункта взрыва. Это нововведение должно было облегчить выделение отражений и их прослеживание (корреляцию), а также повысить точность исходных данных, необходимых для составления годографа отраженных волн.

Выполнение совокупности указанных требований было возможно лишь при условии замены механических сейсмографов электрическими, при широком использовании усилительной и осциллографической техники.

При решении стоящих в этой области задач советские геофизики шли своими путями, почти не ориентируясь на иностранный опыт, в основном державшийся в секрете. Был разработан ряд отечественных конструкций электрических сейсмографов, усилителей с фильтрующими ячейками и осциллографов (Г.Л. Шнирман, Г.А. Гамбурцев и др.). Некоторые из моделей приборов с небольшими видоизменениями продолжают до сих пор находиться на вооружении сейсморазведочных партий.

В аппаратурном отношении сейсмометрия сближалась с электроакустикой, но с тем существенным отличием, что в сейсмометрии преследовались задачи записи сейсмических колебаний со специально вводимыми искажениями формы колебаний, способствующими повышению разрешающей способности аппаратуры и подавлению волн-помех, в то время как в акустике основная задача состояла в точном воспро-

изведении формы принимаемых колебаний. В связи с этим в сейсмометрии, наряду с требованиями строгой идентичности отдельных сейсморегистрирующих каналов, особое значение приобрели вопросы искажений стационарных колебаний и импульсов в сложных электромеханических системах. Появилось много работ в данном направлении; некоторые из них нашли применение и в других областях физики и техники. К ним, в частности, относятся работы Г.А. Гамбурцева по теории электромеханических аналогий и по методам расчета сложных электромеханических систем.

Наряду с работами в области теории и построения сейсмической аппаратуры, Сейсмологическим институтом Академии Наук СССР (Е.А. Коридалин, С.И. Масарский и А.Е. Островский) и Нефтяным геолого-разведочным институтом (Г.А. Гамбурцев, Л.А. Рябинкин и др.) были предприняты экспериментальные полевые работы для изучения условий выделения отражений и испытания аппаратуры. Работы вскоре увенчались успехом, что дало основания для дальнейшего интенсивного развития исследований. В 1935 г. Всесоюзная контора геофизических разведок Наркомнефти имела 6 производственных сейсмических партий, работавших по методу отражений в ряде нефтяных районов СССР.

Уже с первых лет практического применения метод отраженных волн прочно вошел в разведочную практику нефтяной промышленности, почти полностью вытеснив метод первых вступлений и заняв среди других методов разведочной геофизики доминирующее положение. Успех метода отражений в нефтяной промышленности был связан с тем, что с его помощью могло быть изучено с большей точностью строение геологической среды в значительном интервале глубин, а именно форма антиклинальных или синклинальных складок, элементы залегания пластов, примыкающих к соляным куполам и т. д. Эти сведения, мало доступные другим видам разведочной геофизики, имели первостепенное значение для поисков и разведки нефтеносных структур.

Дальнейшее развитие метода отражений шло в направлении улучшения методов селекции отраженных волн, а также усовершенствования методики и техники полевых наблюдений. Основные работы в этой области были выполнены Государственным союзным геофизическим трестом Наркомнефти, выросшим на базе Всесоюзной конторы геофизических разведок.

В 1936 г. в сейсморазведочную практику нефтяной промышленности внедряется метод группирования сейсмографов, предложенный и разработанный В.С. Воюцким в 1935 г. В этом методе каждый шлейф осциллографа записывает колебания целой группы сейсмографов, находящихся в разных точках. Сейсмографы, составляющие единый групповой приемник колебаний, можно расположить на поверхности наблюдений таким образом, что амплитуды отраженных волн на сейсмограммах будут увеличены пропорционально числу сейсмографов в группе, а амплитуды поверхностных волн, сильно мешающих выделению отражений, будут значительно ослаблены. Несколько меньший, но все же вполне ощутимый выигрыш получается и в том случае, когда выделению отражений препятствуют различного рода случайные колебания, точнее, колебания, происхождение и кажущаяся скорость которых не установлены. Метод группирования

с успехом применялся при разведке ряда трудных для сейсмоки районов и лишь в последнее время он стал вытесняться методом “смещения”, представляющим собой по существу один из вариантов группирования.

В 1938 г. в связи с организацией Института теоретической геофизики Академии Наук СССР был расширен круг сейсмических исследований. Было возобновлено изучение преломленных волн, начато изучение поперечных волн, а также ряда других сейсмических процессов и явлений.

В 1938 г. А.Г. Ивановым был открыт сейсмoeлектрический эффект второго рода, заключающийся в появлении переменного электрического поля в реальной геологической среде при распространении в ней упругих волн. До этих работ был известен лишь сейсмoeлектрический эффект первого рода, когда в среду искусственно вводился постоянный ток. В дальнейшем теорию эффекта, открытого А.Г. Ивановым, развил чл.-кор. АН СССР Я.И. Френкель.

В 1939 г. Г.А. Гамбурцевым был поставлен вопрос о выборе такого рода фильтрующей способности сейсмической аппаратуры и такого способа группирования, при которых достигается оптимальная эффективная чувствительность сейсмической аппаратуры. В результате проведенных опытов оказалось возможным значительно увеличить глубину проникновения сейсмического метода. В одном из опытов при взрыве заряда аммонита в 100 кг длительность колебаний, фиксируемых на сейсмограмме, достигала 1 мин.; обычно же длительность записи не превосходит нескольких секунд. Полученные фазы по их характеру можно было бы приписать отраженным волнам (в этом случае глубины отражающих горизонтов выражались бы числами порядка сотен километров), но не исключена вероятность, что в этом опыте были получены сходные результаты, имели место эффекты, связанные с многократными отражениями.

За три года, с 1938 по 1940 г., Институтом теоретической геофизики (Г.А. Гамбурцев, Ю.В. Ризниченко, И.С. Берзон и А.М. Епинатьева) были разработаны основы корреляционного метода преломления волн. От метода первых вступлений новый метод отличается тем, что в регистрируются не только первые, но и последующие вступления преломленных волн. По технике выделения и прослеживания (корреляции) преломленных волн этот метод весьма близок к методу отражений, характеризуясь более строгим подходом к вопросам корреляции.

В США на несколько лет позже (1945 г.) также были начаты работы в этой области. В результате там был развит метод, отличающийся от корреляционного метода преломленных волн лишь схемами полевых наблюдений.

В СССР при помощи корреляционного метода преломленных волн были собраны большие экспериментальные полевые материалы. В результате были выяснены разведочные возможности этого метода в различных геологических условиях и получены новые данные, касающиеся сейсмических свойств реальных геологических сред и особенностей распространения в них упругих волн, главных образом волн Минтропа. В частности, были в известных условиях наблюдаемы эффекты весьма резкого ослабления с расстоянием минтроповских волн. Эти эффекты ведут к исчезновению на сейсмограммах “первых вступлений” и за-

трудняют, а часто делают невозможным применение метода первых вступлений.

Следует также упомянуть о возможности применения корреляционного метода преломленных волн для систематических глубинных зондирований земной коры. С помощью тех же методов повышения эффективной чувствительности, которые ранее были разработаны при наблюдении отраженных волн с большими временами пробега, была существенно увеличена дальность регистрации преломленных волн, возбуждаемых слабыми взрывами. Рекордной явилась сейсмограмма, записанная на расстоянии 32 км от пункта взрыва при заряде аммонита весом в 5 кг.

Ранее глубинные сейсмические исследования, если отвлечься от записей естественных землетрясений, производились только путем регистрации мощных эпизодических взрывов.

Использование мощных взрывов для глубинного сейсмического зондирования с успехом культивировалось в Сейсмологическом институте Академии Наук СССР (чл.-кор. П.М. Никифоров, Е.А. Коридалин и др.). Так, в 1936 г. при взрыве в Коркино, под Челябинском, когда одновременно было взорвано 1800 т взрывчатых веществ, сейсмические наблюдения, организованные Сейсмологическим институтом, дали возможность детально расчленить по сейсмическим скоростям толщу земной коры и найти ее мощность.

В годы Великой Отечественной войны, а также после войны развитие экспериментальной сейсмологии (с приложениями к поискам полезных ископаемых) шло усиленными темпами.

Метод отраженных волн стали испытывать и применять в значительно более сложных условиях, причем в большинстве случаев были получены вполне удовлетворительные результаты. Так, Главным управлением Северного морского пути метод отражений был прочно внедрен в практику арктических геологоразведочных работ (М.К. Полшков и И.И. Гурвич) в условиях вечной мерзлоты, сейсмические свойства которой были изучены Ю.В. Ризниченко (Институт теоретической геофизики АН СССР). Государственным Союзным геофизическим трестом в районе нефтяных промыслов Апшеронского полуострова разведка по методу отраженных волн с суши была перенесена на море, причем качество материалов морских наблюдений не уступало сухопутным (А.А. Цветаев и Н.И. Шапировский). При работах по морской сейсмике было открыто новое интересное явление, названное сейсмической реверберацией – по аналогии с известным в архитектурной акустике эффектом акустической реверберации. На море это явление наблюдается в форме следующих за взрывом интенсивных короткопериодных колебаний, по-видимому, диффузного происхождения. Реверберация иногда длится 10 и более секунд, сильно препятствуя выделению отражений. Сейсмическую реверберацию не следует смешивать с хорошо известным еще с 1938 г. эффектом вторичных ударов в воде, которые вызываются пульсацией пузыря образующихся при взрыве газов.

Общий объем разведочных работ по методу отражений в нефтяной промышленности за военные годы сильно возрос. Организация при Государственном Союзном геофизическом тресте Научно-исследовательского института прикладной геофизики во многом способствовала дальнейшему прогрессу методики

и техники сейсморазведочных наблюдений (В.С. Воюцкий, М.К. Полшков, М.Л. Антокольский и др.).

Корреляционный метод преломленных волн также продолжал развиваться, причем большое внимание уделялось не только задачам разведочного характера, но и теоретическим вопросам из области физики упругих волн. Были получены большие экспериментальные материалы, характеризующие динамические особенности преломленных волн (интенсивность, форма колебаний) в реальных геологических средах. Была установлена возможность использования динамических признаков на сейсмограммах преломленных волн для изучения некоторых особенностей строения среды и ее свойств. Так, например, М.П. Косминской (Институт теоретической геофизики АН СССР) был дан метод определения средней скорости сейсмических волн в среде над преломляющей границей по положению так называемой начальной точки годографа минтроповских волн.

Дальнейшие работы Института теоретической геофизики по теории и методике сейсморазведки в 1945–1946 гг. обосновали развитие комбинированного метода отраженных и преломленных волн, представляющего собой синтез метода отражений и корреляционного метода преломленных волн и свободного от ряда недостатков, свойственных каждому из методов в отдельности (Г.А. Гамбурцев, Ю.В. Ризниченко, И.С. Берзон и А.М. Епинатьева).

Значение для сейсморазведки имеют также работы А.Е. Островского (Сейсмологический институт АН СССР), который существенно усовершенствовал технику сейсмокаротажных измерений, служащих для изучения изменений с глубиной сейсмических скоростей, значительно повысил точность этих определений.

Характеристика достижений экспериментальной сейсмологии была бы неполной, если бы мы не коснулись вопросов теории сейсмических годографов. Работы в этой области были разнообразны и многочисленны. Большинство из них было посвящено решению обратной задачи геометрической сейсмологии – по заданным годографам определить строение среды.

Наиболее крупные результаты в этом отношении были получены Ю.В. Ризниченко, предложившим еще в 1939 г. метод полей времен, позволяющий подойти с одной общей точки зрения к решению большого класса интерпретационных задач. Метод полей времен в настоящее время широко используется при обработке годографов преломленных волн. Он позволяет определять не только форму границ раздела, но и значения скоростей распространения минтропов-

ских волн вдоль сейсмических границ. Многослойность среды и криволинейность границ раздела не представляют для этого метода никаких затруднений.

Дальнейшее развитие методов интерпретации сейсмических годографов шло в направлении изучения более сложных или более общих случаев. Ряд новых частных задач был решен с помощью метода полей времен. Для решения других задач были развиты самостоятельные методы. От двумерных задач перешли к рассмотрению трехмерных, от однородных и изотропных слоев – к неоднородным и анизотропным. Работы Ю.В. Ризниченко, И.С. Берзон, И.И. Гурвича, В.Н. Руднева, А.М. Епинатьевой, Н.Н. Пузырева и др. позволили весьма обстоятельно исследовать эти задачи как в применении к методу отраженных, так и преломленных волн.

Переход к изучению неоднородных сред потребовал в некоторых случаях самостоятельного исследования прямой задачи, т. е. задачи о построении сейсмических годографов по заданным свойствам среды. Здесь следует отметить работу И.С. Берзон, показавшую возможность существования в некоторых случаях двух видов продольных минтроповских волн, связанных с одной границей раздела. Ею же были развиты и конкретизированы общие методы решения прямых задач геометрической сейсмологии.

Динамические задачи теории упругости сплошных сред несоизмеримы по своей трудности с кинематическими задачами. Но и в этой области благодаря фундаментальным исследованиям акад. В.И. Смирнова, акад. С.Л. Соболева и их учеников были получены интересные и важные в принципиальном отношении результаты. Основное их значение для сейсмологии состоит в том, что они устанавливают не только кинематический, но и динамический смысл тех волн, которые используются в экспериментальной сейсмологии для зондирования земной коры. Из числа работ, допускающих более близкое сопоставление с результатами экспериментальных исследований, отметим работу Л.М. Бреховских (Физический институт АН СССР), который для случая двух жидких граничащих друг с другом полупространств нашел физически интерпретируемые выражения для минтроповской и отраженной волн.

Экспериментальная сейсмология с ее приложениями к разведке полезных ископаемых зародилась при советской власти. За двадцатилетний период существования этой области геофизики были достигнуты значительные успехи как теоретического, так и практического характера, опережающие в ряде случаев достижения зарубежных стран.