

ГЕОФИЗИКА

50 ЛЕТ ИССЛЕДОВАНИЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АНИЗОТРОПИИ В РОССИИ

И.Р. Оболенцева, Т.И. Чичинина*

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия*

**Instituto Mexicano del Petroleo, Eje Central Lazaro Cardenas 152, 07730, Mexico D.F., Mexico*

Дается обзор исследований по сейсмической анизотропии, выполненных в России в течение 1940—1980-х гг. Представлены работы, относящиеся к сейсмической разведке, при этом освещаются главные направления исследований. Среди ранних исследований (1940—1950 гг.) отмечены работы А.Г. Тархова, Ю.В. Ризниченко, С.М. Рытова по осреднению параметров тонкослоистых сред; И.И. Гурвича по интерпретации годографов отраженных и преломленных волн в анизотропных средах в предположении эллиптической анизотропии; Н.И. Берденниковой, наблюдавшей анизотропию скоростей поперечных волн. Большая часть исследований 1960—1980 гг. проводилась двумя научными школами: Г.И. Петрашени, в основном с теоретической направленностью работ, и Н.Н. Пузырева — с экспериментальной. Экспериментальные исследования были направлены главным образом на распознавание нового явления — азимутальной анизотропии, возникающей, как выяснилось в ходе исследований, вследствие вертикальной трещиноватости пород. Это явление проявлялось как «аномальная» поляризация поперечных и обменных волн. Модель среды с системой параллельных трещин, предложенная К.Д. Клем-Мусатовым, позволила понять природу наблюдавшейся «аномальной» поляризации поперечных и обменных волн. Проблема была решена полностью после применения к полевым данным предложенного И.Р. Оболенцевой и С.Б. Горшкалевым алгоритма поляризационного разделения суммарного поля поперечных волн двух типов на две поперечных волны с поляризацией в плоскости трещины у быстрой волны и по нормали к этой плоскости у медленной.

Многоволновая сейсморазведка, поляризация, анизотропия, азимутальная анизотропия.

FIFTY YEARS OF SEISMIC-ANISOTROPY STUDIES IN RUSSIA

I.R. Obolentseva and T.I. Chichinina

This is a historic overview of seismic-anisotropy studies in Russia run as part of seismic exploration work in the 1940s through the 1980s, with a focus on main research lines. At the early stage in the 1940s through 1950s, most important contributions belonged to A.G. Tarkhov, Yu.V. Risnichenko, and S.M. Rytov (averaging the parameters of stratified media), I.I. Gurvich (processing reflection and refraction traveltime curves in media with elliptical anisotropy), and N.I. Berdennikova (shear-wave velocity anisotropy). In the 1960s–1980s, there were two basic schools of thought: one of G.I. Petrashen', with a more theoretical approach, and the other of N.N. Puzyrev dealing more with experimental work. Most of experiments addressed a newly discovered phenomenon of azimuthal anisotropy. This anisotropy appearing as “anomalous” polarization of shear and converted waves was found out to result from vertical fractures in rocks. The unusual polarization became understood owing to Klem-Musatov's model of a subsurface with a system of aligned cracks. The problem was fully resolved after field data had been processed with an algorithm by I.R. Obolentseva and S.B. Gorshkalev, for separating the total field of interfering shear waves of two types into fast and slow phases polarized in crack-parallel and crack-orthogonal directions, respectively.

Multicomponent seismic surveys, polarization, anisotropy, azimuthal anisotropy

ВВЕДЕНИЕ

Дается краткий обзор исследований сейсмической анизотропии, выполненных в России за 50-летний период (1940—1980-е гг.). Этот период — эпоха главных открытий в области сейсмической анизотропии, сделанных в России и в мире в целом. Предметом статьи является анизотропия самой верхней части земной коры (задачи сейсмологии, т.е. проблемы анизотропии земной коры как таковой и мантии не затрагиваются). Еще одно ограничение связано с выбором тематики исследований. Ввиду того, что

невозможно осветить все исследования по сейсмической анизотропии, представлены те работы, с которыми связаны главные направления исследований. Обзор исследований идет в хронологическом порядке.

Ранние работы охватывают период 1940—1950 гг., когда появились первые данные по анизотропии скоростей продольных (P) и поперечных (S) волн. А.Г. Тархов, Ю.В. Ризниченко и С.М. Рытов исследовали анизотропию, вызванную тонкой слоистостью [Тархов, 1940; Ризниченко, 1949; Рытов, 1956], которая уже тогда считалась основным типом анизотропии осадочных пород. А.Г. Тархов был первым геофизиком, который дал оценку этого явления с позиций теории и подтвердил экспериментами ее правильность. Затем Ю.В. Ризниченко, работа которого известна не только в России, но и за рубежом, решил ту же задачу, что и А.Г. Тархов, тоже в статической постановке, но в более общей формулировке. Наконец, С.М. Рытов решил задачу о замене тонкослойной периодической среды моделью трансверсально-изотропной среды в динамической постановке, рассматривая распространение волн P , SV и SH в произвольном направлении. Заметим, что С.М. Рытов опубликовал свою работу в 1956 г., т.е. практически одновременно с широко известной работой Г.В. Постмы [Postma, 1955]. Первые способы интерпретации годографов отраженных и преломленных волн, распространяющихся в анизотропной среде, были предложены И.И. Гурвичем [1940]. Первой российской публикацией о регистрации поперечных волн от направленных источников была работа Н.И. Берденниковой [1959]. Ее данные подтвердили полученные ранее экспериментальные результаты [Hagedoorn, 1954; Uhrig, van Meele, 1955; White et al., 1956; Jolly, 1956] и доказали правильность теории, построенной С.М. Рытовым [Рытов, 1956] и Г.В. Постмой [Postma, 1956].

Главный период исследований по анизотропии в России приходится на 1960—1980-е гг. Именно в эти годы были получены наиболее значимые результаты.

Исследования по анизотропии были частью программы исследований P - и S -волн в реальных средах, выполняемых под руководством Н.Н. Пузырева в Институте геологии и геофизики СО АН СССР. Работа проводилась в тесном сотрудничестве с Институтом ВНИИгеофизика (Л.Ю. Бродов, Л.Н. Худобина, Т.Н. Куличихина и др.). В том же направлении исследования проводились в Ленинградском отделении Математического института АН СССР, Ленинградском государственном университете (Г.И. Петрашень, Б.М. Каштан, А.А. Ковтун, Л.А. Молотков), Институте физики Земли АН СССР (А.Л. Левшин, Е.И. Гальперин, Е.М. Чесноков), Московском государственном университете (Ф.М. Ляховицкий, М.В. Невский) и др. В исследовательский процесс были вовлечены и производственные организации. Особо следует отметить среди них трест Сибнефтегеофизика периода 1971—1986 гг. (тогда это была Сибирская геофизическая экспедиция), который работал непосредственно вместе с Институтом геологии и геофизики СО АН СССР; научное руководство многоволновыми исследованиями осуществлялось Г.В. Ведерниковым.

Главными направлениями работы по изучению поперечных и обменных волн были следующие: создание направленных источников поперечных волн, импульсных и вибрационных; разработка способов регистрации и обработки данных поперечных и обменных волн, получаемых разными методами (отраженных волн, ВСП, головных волн, рефрагированных волн и др.); изучение скоростей S -волн, отношения скоростей P - и S -волн ($\gamma = v_s/v_p$) и поглощения для различных пород в различных сейсмогеологических условиях; исследование поляризации поперечных и обменных волн в средах различного строения: горизонтально-слоистых, с наклонными границами, с рассеивающими объектами и др.; теоретические и экспериментальные исследования анизотропии и создание способов обработки и интерпретации для анизотропных сред.

Проблема «теоретические и экспериментальные исследования анизотропии» была одной из проблем первостепенной важности среди всех вышеперечисленных, потому что пренебрежение анизотропией или ее недостаточный учет приводили к невозможности решить другие проблемы (или, в лучшем случае, к неверным результатам). Обнаружение нового типа анизотропии — азимутальной — сделало анизотропию главным фактором в многоволновых сейсмических исследованиях. Открытие азимутальной анизотропии — самая интригующая находка в исследованиях 1960—1980-х гг. В разделе статьи, посвященном этому периоду, прослежена история формирования представлений об азимутальной анизотропии в России и дано сопоставление с продвижением в том же направлении в США.

В 1960—1980-е гг. продолжались начатые ранее исследования анизотропии, связанной с тонкой слоистостью пород. Этот тип анизотропии, получивший позднее название «полярная анизотропия», был изучен достаточно подробно, что нашло отражение в ряде работ, из которых назовем [Ляховицкий, Невский, 1970, 1971; Невский, 1974; Сибиряков и др., 1980]. Моделям трещиноватых сред посвящены работы [Клем-Мусатов и др., 1973; Айзенберг и др., 1974], серия работ Л.А. Молоткова, среди них [Молотков, 1979, 1991; Молотков, Хило, 1983, 1986].

Основы теории распространения упругих волн в анизотропных средах рассматриваются в монографиях [Федоров, 1965; Сиротин, Шаскольская, 1979; Петрашень, 1980], которые можно отнести к числу справочных и учебных пособий по сейсмической анизотропии. Ряд вопросов освещен в статьях [Ус-

пенский, Огурцов, 1962; Мартынов, 1986]. Численным методам построения волновых полей посвящена работа [Мартынов, Михайленко, 1979]. Лучевой метод предложен В.М. Бабичем [1961] и развит в работах [Петрашень, 1980; Петрашень, Каштан, 1984]. Алгоритмам построения лучей и теоретических сейсмограмм для слоисто-однородных сред посвящены работы [Оболенцева, 1975; Каштан, Ковтун, 1984; Каштан и др., 1984; Оболенцева, Гречка, 1988, 1989]. Численное моделирование распространения поперечных и обменных волн в анизотропных средах представлено в работах [Бродов и др., 1986; Оболенцева, Гречка, 1987; Гречка, Оболенцева, 1987а,б].

РАННИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ (1940—1950)

Первые сообщения об анизотропных свойствах осадочных пород, обнаруженных по полевым данным, появились в 1930-е гг. [McCollum, Snell, 1932; Weatherby et al., 1934; Pirson, 1937; Beers, 1940; и др.]. Краткий обзор данных по анизотропии P -волн, полученных в 1930-е гг., а также позднее (1940-е—начало 1950-х), дан в [Uhrig, van Meele, 1955]. Таким образом, к моменту появления первых российских публикаций по анизотропии [Тархов, 1940] было известно, что P -волна распространяется в тонкослоистой среде, как правило, медленнее в вертикальном направлении, чем вдоль наклонных и горизонтальных лучей. Согласно количественным оценкам [McCollum, Snell, 1932; Weatherby et al., 1934], для неглубоко залегающих отложений отношение скорости P -волны в плоскости слоев к скорости по нормали к этой плоскости равно 1.4 для сланцев и 1.3 для мела.

АНИЗОТРОПИЯ, ВЫЗВАННАЯ ТОНКОЙ СЛОИСТОСТЬЮ: ОПРЕДЕЛЕНИЕ УПРУГИХ МОДУЛЕЙ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ТРАНСВЕРСАЛЬНО-ИЗОТРОПНОЙ СРЕДЫ

Статическое решение Тархова.

А.Г. Тархов поднял вопрос о возможных причинах анизотропии метаморфических и осадочных пород [Тархов, 1940]. Он отметил, что чередование тонких слоев с различными упругими свойствами является неединственной причиной анизотропии упругих свойств осадочных пород. Если тонкие слои с одинаковыми упругими свойствами разделены плоскостями, которые в прошлом были подвергнуты иным воздействиям, чем основная порода, тогда такая порода может стать анизотропной. Еще одним фактором, приводящим к появлению анизотропии, А.Г. Тархов назвал давление, которое может изменяться по величине и направлению, приводя к появлению анизотропии пород. Далее А.Г. Тархов ставит вопрос о том, насколько велика может быть возникающая анизотропия. Чтобы получить наглядную оценку этого явления, он решает задачу об определении модулей Юнга тонкослоистой среды в двух направлениях: нормальном и параллельном слоистости.

Теоретическое решение. Пусть среда состоит из серии чередующихся тонких слоев 1 и 2 с модулями Юнга E_1 и E_2 , плотностями $\rho_1 = \rho_2$ и мощностями h_1 и h_2 . Относительное объемное содержание веществ 1 и 2 в среде равно $n_1 = h_1/(h_1 + h_2)$, $n_2 = h_2/(h_1 + h_2)$. Требуется определить упругие свойства среды в целом в направлениях, нормальном и параллельном плоскостям тонких слоев.

Для решения задачи А.Г. Тархов исследует укорочение параллелепипеда, составленного из двух чередующихся тонких слоев 1 и 2 под действием приложенного к его верхней грани давления p при фиксированном положении нижней грани. Рассматриваются два случая. В первом случае сжимающее давление p направлено нормально к плоскостям тонких слоев, а во втором — параллельно (рис. 1). Тогда, согласно закону Гука,

$$E_{\perp} = \frac{E_1 E_2}{E_2 n_1 + E_1 n_2}, \quad E_{\parallel} = E_1 n_1 + E_2 n_2, \quad (1)$$

где индексы « \perp », « \parallel » означают направления, перпендикулярное и параллельное плоскостям тонких слоев. Эти выражения позволяют дать количественную оценку «масштаба естественного анизотропизма».

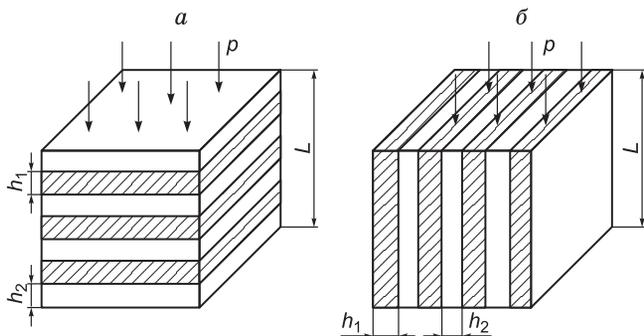


Рис. 1. Модель тонкослоистой среды.

Модель высотой L состоит из чередующихся тонких слоев 1 и 2 толщиной h_1 и h_2 . Давление p приложено к верхней грани нормально к плоскостям слоев (а) и параллельно плоскостям (б). Нижняя грань закреплена [Тархов, 1940].

Таблица 1. Коэффициент анизотропии $K_p = v_{p\parallel}/v_{p\perp}$ в функции отношения модулей Юнга E_2, E_1 в тонких слоях 2 и 1

E_2/E_1	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
K_p	1.02	1.06	1.11	1.15	1.20	1.25	1.30	1.34

Используя известную формулу для скорости P -волны в изотропной среде $v_p = \sqrt{\frac{E(1-\sigma)}{\rho(1+\sigma)(1-2\sigma)}}$,

в которой σ — коэффициент Пуассона, а ρ — плотность, полагая $\sigma = 1/4$ и, следовательно, $v_p = \sqrt{\frac{6E}{5\rho}}$,

А.Г. Тархов получил из выражений (1) при $n_1 = n_2 = 0.5$ следующие простые выражения для коэффициента анизотропии K_p :

$$K_p = v_{p\parallel}/v_{p\perp} = \sqrt{E_{\parallel}/E_{\perp}} = \frac{E_1 + E_2}{2\sqrt{E_1E_2}} = \frac{1 + E_2/E_1}{2\sqrt{E_2/E_1}}. \quad (2)$$

В табл. 1 приведены значения K_p для ряда значений отношения E_2/E_1 , дающие представление об этой зависимости. Видно, что она близка к линейной. При $E_2/E_1 = 1.5$ анизотропия пренебрежимо мала, но уже при $E_2/E_1 = 2$ она становится заметной ($K_p = 1.06$), а большей — начиная с $E_2/E_1 = 2.5$.

Данные лабораторных измерений. Лабораторные измерения модуля Юнга выполнялись на образцах в форме параллелепипеда размером $6 \times 1 \times 0.5$ см³, вырезанных из одного куска данной породы с различной ориентацией относительно слоистости, изменяющейся от 0° до 90° (рис. 2). Использовался статический способ измерения. Образец помещали горизонтально на две фиксированные подставки в форме призм и затем нагружали приложенной к его середине силой (гирьками весом от 0 до 1.5 кг). Определяли прямой и обратный ход изменения прогиба образца в зависимости от силы. Полученные данные усреднялись и затем обрабатывались.

Модуль Юнга был измерен для трех пород: железистого кварцита, состоявшего из чередующихся слоев, толщиной 1—2 мм, кварцита и магнетита; известняка с едва заметными плоскостями разделения; песчаника, также со слабовыраженной слоистостью. Из аппроксимации эллипсом наблюдаемых зависимостей модулей Юнга получены следующие значения коэффициента анизотропии $K_p = V_{p\parallel}/V_{p\perp}$:

- для железистого кварцита 1.45;
- для известняка 1.24;
- для песчаника 1.19.

Строгое статическое решение Ризниченко.

Ю.В. Ризниченко завершил решение задачи о статическом деформировании тонкослоистой среды при нагружении, нормальном и параллельном слоистости [Ризниченко, 1949]. Он получил правильные выражения для жесткостей (модулей упругости) $C_{p\perp}$, $C_{p\parallel}$ ($C_{p\perp} \equiv c_{33}$, $C_{p\parallel} \equiv c_{11}$) и скоростей P -волны $v_{p\perp} = \sqrt{C_{p\perp}/\rho}$, $v_{p\parallel} = \sqrt{C_{p\parallel}/\rho}$ в функции всех параметров тонких слоев: модулей Юнга и коэффициентов Пуассона, отношений плотностей и мощностей чередующихся слоев. Кроме того, Ю.В. Ризниченко обобщил найденное решение на среды, содержащие больше двух компонент, и на среды с непрерывным изменением скорости по нормали к слоистости.

Динамическое решение Рытова.

С.М. Рытов решил, наконец, окончательно задачу об эффективных упругих константах тонкослоистой среды, рассмотрев распространение плоских гармонических волн в периодической среде, состоящей из двух чередующихся слоев [Рытов, 1956]. Решая эту задачу, он опирался на опыт, полученный им при решении задачи об электромагнитных свойствах тонкослоистой среды [Рытов, 1955].

Сущность решения для упругой среды состоит в следующем. Общее решение волнового уравнения выражается через специально выбранные частные решения, а именно четное и нечетное относительно середин слоев. На границах между слоями условия непрерывности и пе-

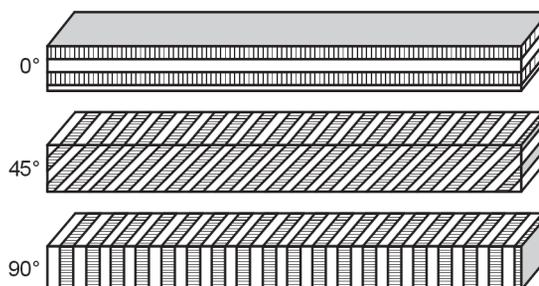


Рис. 2. Пример образцов тонкослоистой породы, вырезанных из одного куска так, что нормаль к верхней грани образует с нормалью к плоскостям тонких слоев углы, равные 0°, 45°, 90° [Тархов, 1940].

риодичности должны выполняться для векторов смещений и нормальных к границе векторов напряжений. Подстановка в граничные условия частных решений, зависящих от неизвестных амплитуд смещений, приводит к системе однородных уравнений относительно этих неизвестных.

Приравнивание детерминантов систем уравнений к нулю дает дисперсионные уравнения и, следовательно, квадраты скоростей продольных и поперечных волн. Таким образом, были найдены все пять упругих констант в функции параметров тонких слоев. Переход от слоев произвольной мощности к тонким слоям явился завершающим шагом. Формулы для пяти упругих констант трансверсально-изотропной среды, эффективной модели тонкослоистой [Рытов, 1956] совпадают с соответствующими формулами в работе [Postma, 1955].

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ В ПРИСУТСТВИИ АНИЗОТРОПИИ

И.И. Гурвич был первым, кто приступил к изучению анизотропии с точки зрения ее влияния на точность результатов сейсморазведки и возможных путей учета при интерпретации [Гурвич, 1940]. К этому времени имеющаяся информация об анизотропии состояла в том, что она возникает вследствие тонкой слоистости пород (скорости по напластованию больше, чем по нормали к напластованию) и что ее влияние можно исключить путем использования специальной палетки [Pirson, 1937].

И.И. Гурвич развил методы интерпретации данных отраженных и преломленных волн в средах с анизотропией скоростей в предположении, что она эллиптическая. Методы основаны на следующей теореме, справедливой для эллиптической зависимости скорости от направления.

Теорема. Уравнение годографа в трансверсально-изотропной среде будет идентично уравнению годографа в изотропной среде, если преобразовать анизотропные координаты (x, z) в изотропные (x', z') : $x' = x$, $z' = kz$, где $k = v_x / v_z = v_{P\parallel} / v_{P\perp}$.

Используя эту теорему, И.И. Гурвич вывел уравнения годографов отраженных и рефрагированных волн для двух случаев среды с наклонной границей: слоистость в среде над границей горизонтальна, слоистость параллельна наклонной границе.

Для оценки ошибок в определении глубины границы и угла наклона при пренебрежении анизотропией И.И. Гурвич представил формулы и результаты вычислений для различных параметров, характеризующих глубину и угол наклона границы, а также коэффициент анизотропии k в покрывающем слое.

Предложен следующий способ определения коэффициента анизотропии $K_p \equiv k$ по измеренным временам пробега вдоль вертикального и наклонного лучей. Пусть один приемник располагается в скважине на глубине z , а источники на различных расстояниях x — от устья скважины. Коэффициент k можно найти из уравнения $t^2 = x^2 / (k^2 v^2) + z^2 / v^2$, предварительно определив вертикальную скорость v по измеренным временам пробега t на пути от источника до приемника. Тогда появится возможность исправить глубинные разрезы за анизотропию, используя коэффициент k .

ПЕРВЫЕ СВИДЕТЕЛЬСТВА АНИЗОТРОПИИ ОСАДОЧНЫХ ПОРОД, ПОЛУЧЕННЫЕ ПО ПОЛЕВЫМ НАБЛЮДЕНИЯМ ПОПЕРЕЧНЫХ ВОЛН

В 1950-е гг. появились сообщения [White, Sengbush, 1953; White et al., 1956; Jolly, 1956] о первых источниках, предназначенных для возбуждения поперечных волн, и первых записях поперечных волн. На поверхности и в скважинах были зарегистрированы поперечные волны, распространяющиеся в близповерхностных отложениях: в горизонтальном направлении скорость SH -волны была больше, чем у SV -волны, тогда как в вертикальном направлении обе волны распространялись с одинаковой скоростью. Н.И. Берденникова вошла в это сообщество анизотропистов с полевыми данными по анизотропии кембрийских глин в верхней части разреза одного из участков Ленинградской области [Берденникова, 1959].

Наблюдения проводились на поверхности и в двух скважинах, при этом было применено несколько разных источников поперечных волн (рис. 3).

Сейсмокаротаж скважин позволил измерить скорость поперечной волны в верти-

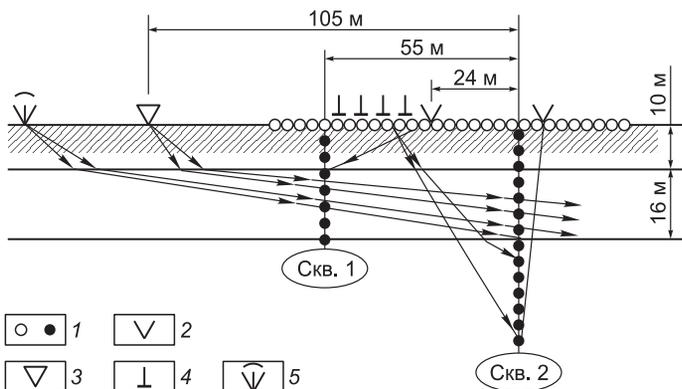
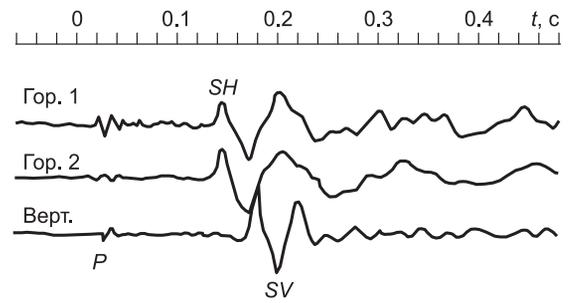


Рис. 3. Схема полевых экспериментов по исследованию анизотропии кембрийских глин в Ленинградской области [Берденникова, 1959].

1 — приемники, 2 — Z-, Y-удары 100 кг, 3 — Z-удар 400 кг, 4 — Z-пушка, 5 — взрыв в воздухе.

Рис. 4. Пример типичной записи P , SH - и SV -волн при скважинных наблюдениях.

Скважина № 2, $h = 24$ м (см. рис. 3). Ориентация двух горизонтальных взаимно ортогональных приемников (Гор. 1 и 2) на каждой глубине произвольная; Верт. — вертикальный приемник [Берденникова, 1959].



кальном направлении до глубины 45 м; она оказалась возрастающей функцией глубины, изменяющейся от 170 до 320 м/с на глубине 45 м. Скорости в горизонтальном направлении определялись по лучам рефрагированных волн, проходящих через третий слой (см. рис. 3); было найдено, что $v_{SV\parallel} = 340$, $v_{SH\parallel} = 480$ м/с. Значение $v_{SV\parallel} = 340$ м/с хорошо согласуется со значением $v_{SV\perp} = 320$ м/с на глубине 45 м. Сравнение скоростей $v_{SV\parallel} = 340$ и $v_{SH\parallel} = 480$ м/с также свидетельствует о том, что среда ведет себя как трансверсально-изотропная.

Волновая картина на наклонных лучах выглядит так, как это показано на рис. 4: волна SH прибывает первой (она записана на двух горизонтальных взаимно ортогональных сейсмоприемниках), за ней следует волна SV , которая хорошо видна на z -сейсмоприемнике, а на горизонтальных — в интерференции с волной SH . Таким образом, данные в работе [Берденникова, 1959] согласуются с предыдущими экспериментальными результатами 1950-х гг. [Hagedoorn, 1954; Uhrig, van Meele, 1955; White et al., 1956; Jolly, 1956] и подтверждают справедливость теории С.М. Рытова и Г.В. Постмы [Postma, 1955; Рытов, 1956].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ 1960—1980-х гг.

Возникновение «загадки» больших побочных компонент смещений поперечных и обменных волн

Систематическое изучение поперечных и обменных волн началось в конце 1950—начале 1960-х гг. Оно проводилось двумя группами исследователей. Ленинградская группа, возглавляемая Г.И. Петрашнем, сконцентрировала свои усилия на решении теоретических проблем, появившихся после проведения серии экспериментальных работ 1950-х гг., в которую входит работа [Берденникова, 1959]. Новосибирская группа, возглавляемая Н.Н. Пузыревым, в сотрудничестве с московской группой (Л.Ю. Бродов и др.) проводила экспериментальные полевые исследования на участках с различными сейсмогеологическими условиями, но наибольший объем работ приходится на Прикаспийскую впадину.

Первые экспериментальные и производственные работы на поперечных волнах проводились по схемам Xx и Yy , т.е. возбуждение было направленным по X или Y , и прием был таким же: при X -возбуждении по x , при Y -возбуждении по y . Обменные PS -волны регистрировались x - и z -приемниками. Такой выбор конфигураций источник—приемник возник на основе априорных представлений о том, что геологические среды ввиду тонкой слоистости пород являются трансверсально-изотропными с вертикальной осью симметрии (VTI — или «vertical transversely isotropic» — по современной терминологии). Это аксиоматическое представление было основано на теоретических и экспериментальных данных, полученных в 1940—1950-е гг.

Эксперименты были проведены в различных регионах европейской части СССР, а также в Западной и Восточной Сибири. На многих площадях, действительно, была выявлена анизотропия типа VTI, от умеренной до сильной, по сейсмограммам рефрагированных и отраженных волн и данным ВСП. Присутствие анизотропии выражалось в различии времен пробега и наклонов годографов поперечных волн, наблюдаемых по схемам Xx и Yy . Найденные значения скоростей двух поперечных волн в функции направления распространения оказались хорошо соответствующими теоретическим зависимостям для SV - и SH -волн.

Подозрение, что модель VTI является далеко не универсальной моделью упругих свойств изучаемой геологической среды, появилось после применения трехкомпонентной (x, y, z) регистрации вместо однокомпонентной (y) при Y -источнике или двухкомпонентной (x, z) при X -, Z -источниках или взрыве. Стало ясно, что наблюдаемые поля смещений находятся за пределом наших представлений об анизотропии реальной среды. Наблюдаемые «побочные» компоненты смещений (y - при X -источнике) и x - при Y -источнике для SS -волн и y -компоненты PS -волн (при возбуждении взрывами) часто были такой же величины, как и «основные» компоненты.

Явное несоответствие между наблюдаемыми и ожидаемыми трехкомпонентными записями обнаружилось при проведении экспериментов на склонах соляных куполов в Прикаспийской впадине. Наблюдения проводились на протяжении 1963—1978 гг., и за это время стало ясно, что «побочные» компоненты смещений могут быть достаточно велики по сравнению с «основными» компонентами и что соотношение амплитуд компонент не соответствует тому, которое было бы за счет наклона отражающей границы в случае изотропной покрывающей среды или трансверсально-изотропной с осью симметрии, нормальной тонкослоистым напластованиям.

Уже в 1960-е гг. эксперименты на круговых профилях над склоном соляного купола Теркобай показали, что отношения тангенциальных, «побочных», компонент смещений к радиальным, «основным», в *PS*-волне, отраженной от границы с относительно небольшим углом наклона (10°), изменяются в пределах 0.5—1.5. Ниже, в следующем разделе, эксперименты на склонах соляных куполов в Прикаспийской впадине в течение 1963—1978-х гг. описываются более подробно.

Анализ «аномальной» поляризации *PS*- и *SS*-волн

Впервые «аномальная» поляризация обменных и поперечных волн наблюдалась в 1963 г. на площади соляного купола Теркобай. Обменная *PS*-волна, отраженная от горизонта III, подошвы меловых отложений (рис. 5), была записана на двух круговых профилях с источником (взрыв в скважине) в центре круга (рис. 6). Глубина отражающей границы, горизонта III, под точкой источника по нормали к границе $h \approx 400$ м, угол наклона границы $\varphi \approx 10^\circ$. Радиус первого круга $r = 300$ м, второго круга $r = 500$ м. Горизонтальные сейсмоприемники на круговых профилях были ориентированы в каждой точке наблюдений по радиусу (x) и по касательной (y) (см. рис. 6).

Двухкомпонентные (x, y) записи *PS*-волны на круге радиуса $r = 300$ м приведены на рис. 7. Два столбца в левой половине рис. 7 — это записи x -, y -компонент на первой половине кругового профиля, а два других столбца в правой половине рис. 7, представляют собой записи x -, y -компонент на второй половине этого кругового профиля. Минимальные времена соответствуют восстанию границы, а максимальные — ее падению. Положение линии восстания — падения границы можно найти не только по экстремумам времени, но и по изменению полярности вступления волны на y -приемниках. Положение падения границы фиксируется более отчетливо, в пределах одной — двух трасс (отмечено прямой линией), чем положение восстания границы, которое находится в пределах десятка трасс (отмечены скобкой).

Удивительным и непонятным (для того времени) было наличие больших y -компонент смещений. Амплитуды x -, y -компонент и их отношения представлены на рис. 8. Видно, что касательные y -компоненты сравнимы по величине с радиальными x -компонентами, а на некоторых азимутах даже превышают их. Расчеты показали [Пузырев, Оболенцева, 1967], что если бы y -компоненты возникли из-за наклона границы, то они не могли бы быть такими большими, как на рис. 8. При угле наклона границы $\varphi = 10^\circ$ y -компоненты должны быть не более 0.02—0.03 от амплитуд x -компонент. Результаты вычисления x - и y -компонент смещений *PS*-волны лучевым методом [Алексеев, Гельчинский, 1959] показаны на рис. 9.

Приведенные на рис. 9 графики иллюстрируют зависимость амплитуд x -, y -компонент векторов смещений от азимута точки наблюдения на круговом профиле, который отсчитывается от направления восстания границы (0°). Расчеты выполнены

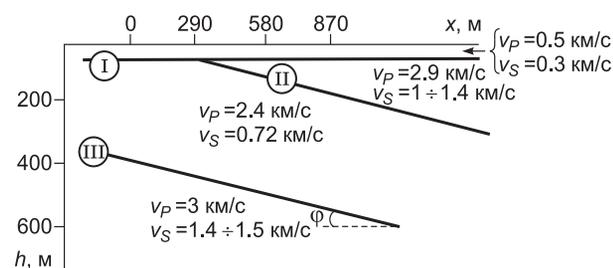


Рис. 5. Соляной купол Теркобай.

Разрез в плоскости восстания—падения на юго-восточном склоне купола на участке расположения круговых профилей [Бахаревская и др., 1967].

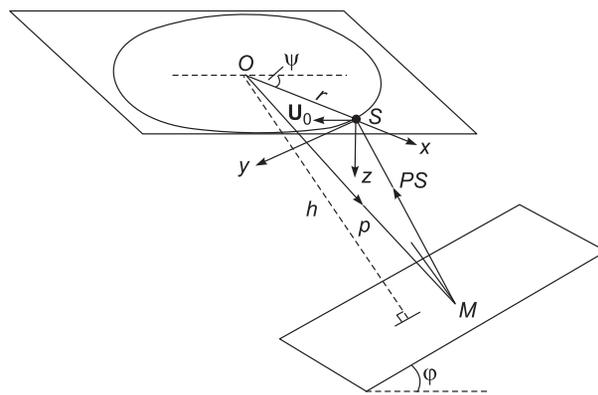


Рис. 6. Лучевая схема для обменной *PS*-волны, отраженной от наклонной границы и наблюдаемой на круговом профиле.

Обозначения: O — точка источника; M — точка отражения и обмена, S — точка наблюдения с полярными координатами (r, ψ), где ψ — угол, измеряемый от направления восстания границы. *PS*-волна приходит в точку S с вектором смещения U_0 и после отражения от дневной поверхности регистрируется вместе со всеми отраженными волнами 3-компонентной (x, y, z) установкой приемников с осями x, y , ориентированными по радиальному (x) и касательному (y) направлениям [Пузырев, Оболенцева, 1967].

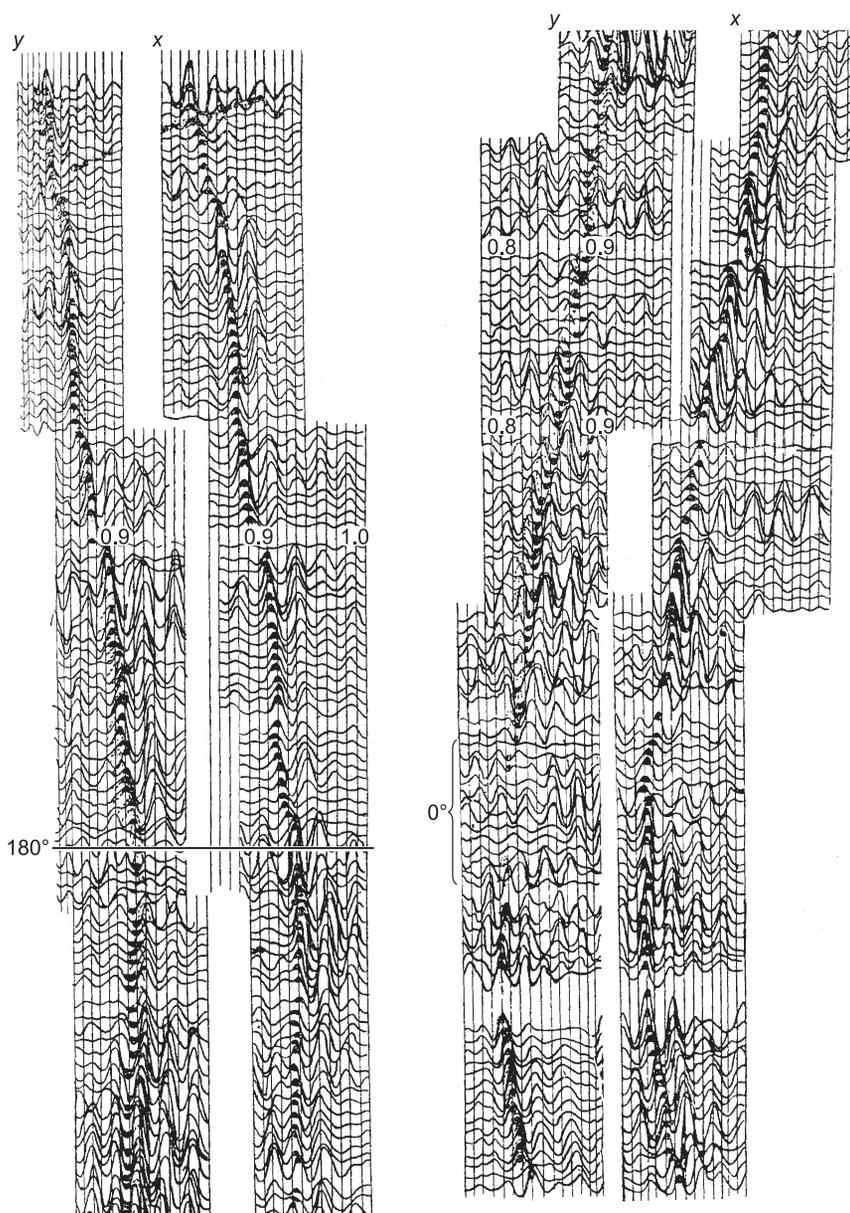


Рис. 7. Двухкомпонентная (x , y) сейсмограмма PS -волны, отраженной от наклонной границы на склоне соляного купола Теркобай и наблюдаемой на круговом профиле на радиальной (x) и касательной (y) компонентах записи.

Усиление на y -канале в 2 раза больше, чем на x -канале. Отмечены направления восстания границы (0°) и падения (180°) [Бахареvская и др., 1967].

для трех значений отношения радиуса круга к глубине границы в центре круга: $r/h = 0.2$; 0.6 ; 1.0 . Для экспериментальных амплитудных кривых (см. рис. 8) $r/h = 0.75$, т.е. соответствующие теоретические кривые проходят между изображенными для $r/h = 0.6$ и $r/h = 1.0$. Как можно видеть, максимальные значения отношений u_y/u_x приходятся на азимуты между простираем (90°) и падением (180°) границы, и эти отношения не превышают 0.02 — 0.03 . На азимутах между простираем (90°) и восстанием (0°) отношения u_y/u_x пренебрежимо малы. Поиск наилучших теоретических кривых, соответствующих экспериментальным данным, приводит к значению угла наклона границы $\varphi = 26^\circ$ с очень большим среднеквадратическим отклонением, что и следовало ожидать из проведенного выше анализа поведения теоретических кривых (см. рис. 9) и сравнения этих кривых с экспериментальными зависимостями (см. рис. 8).

Результаты проведенных наблюдений отраженных PS - и SS -волн над склонами соляных куполов в Прикаспийской впадине собраны в табл. 2. Данные о величине отношения амплитуды на побочной ком-

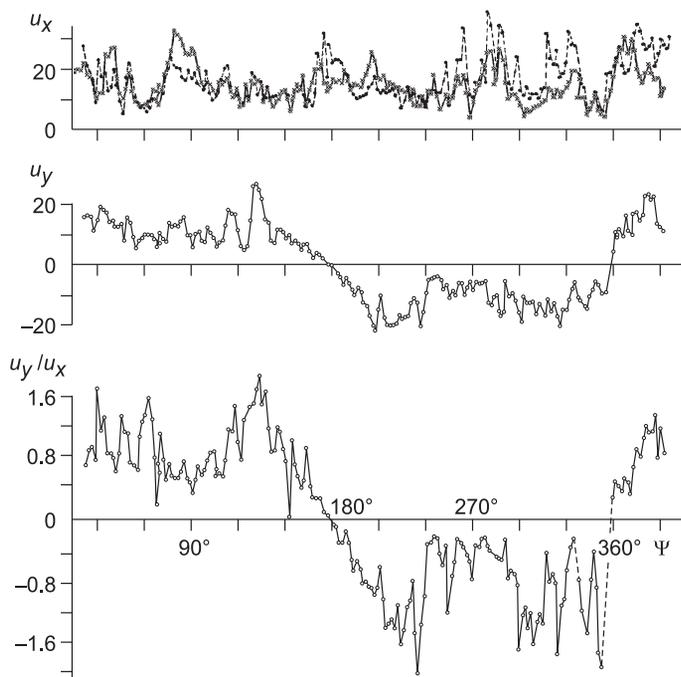


Рис. 8. Амплитуды компонент u_x , u_y и их отношение u_y/u_x в функции азимутального угла ψ на круговом профиле на склоне соляного купола Теркобай.

Первичные наблюдения показаны сплошными линиями, а повторные — штриховыми [Бахаревская и др., 1967].

не является той моделью, в рамках которой можно объяснить наблюдаемые аномалии поляризации обменных и поперечных отраженных волн.

Решающим шагом в понимании природы «аномальной» поляризации был переход к анизотропной модели с произвольным положением оси симметрии (т.е. с произвольными значениями полярного и азимутального углов, характеризующих положение этой оси). Такая анизотропия не может быть результатом тонкой слоистости (за исключением отдельных случаев вертикальной слоистости). Главной причиной ее возникновения могут быть ориентированные трещины, т.е. находящиеся в параллельных плоскостях протяженные трещины (fractures) или короткие дисковидные (penny-shaped cracks), возникающие вследствие неоднородного распределения горизонтальных напряжений в земной коре. На эти причины указывал еще А.Г. Тархов в 1940 г., когда писал о среде, состоящей из тонких одинаковых слоев, разделенных некоторыми плоскостями, возникшими в процессе осадконакопления при изменении его условий. Его эксперименты по статическому нагружению известняка и песчаника показали, что анизотропия такого типа может быть сильной. В 1973 г. К.Д. Клем-Мусатов с соавторами предложил модель трансверсально-изотропной среды, основанную на теории линейного проскальзывания, которая имитировала присутствие в породе трещин.

Важно то, что анизотропия среды с системой вертикальных трещин проявляется в волновых полях совершенно по-другому, чем анизотропия, возникающая в результате переслаивания тонких слоев с раз-

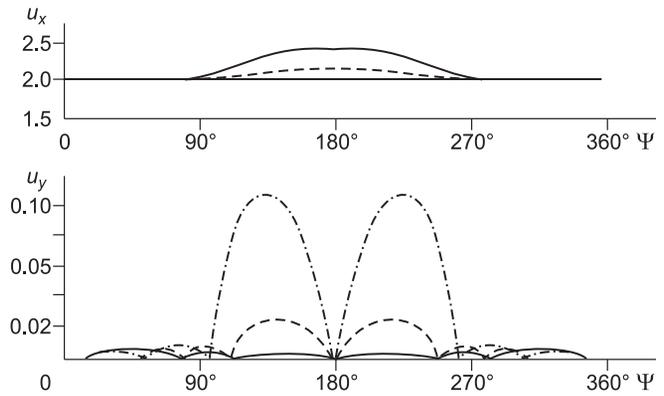
понтенте к амплитуде на основной компоненте, $u_{\text{пов}}/u_{\text{осн}}$, на склонах куполов с разными углами наклона φ свидетельствуют об отсутствии корреляции между этими параметрами. Отсюда следует, что принятая модель — наклонная отражающая граница и изотропная среда выше и ниже границы —

Таблица 2. Экспериментальное исследование поляризации отраженных *PS*- и *SS*-волн над склонами соляных куполов в Прикаспийской впадине

Участок работ (дата проведения)	Объект изучения, схема наблюдений	Отношение компонент $u_{\text{пов}}/u_{\text{осн}}$	Корреляция с углом наклона границы
Теркобай, юго-восточный склон (1963, 1964)	<i>PS</i> -волна, $\varphi = 10^\circ$, круговые профили	0.5—1.5	Нет
Теркобай, восточный склон (1971)	<i>PS</i> -волна, $\varphi = 21^\circ$, $\varphi = 25^\circ$, круговые профили	0.3—0.5	Нет
Станция № 2 (1970)	<i>PS</i> -волна, $\varphi = 26^\circ$, круговые профили	0.5—2.0	Да
Шукаг (1976)	Две <i>SS</i> -волны: 1: $\varphi = 10^\circ$, 2: $\varphi = 30^\circ$; ОГТ	0.2—1.0	Да для 1, нет для 2
Танатар, южный склон (1978)	Волны <i>PS</i> , <i>SS</i> от <i>Y</i> -источника, $\varphi = 5\text{—}6^\circ$, линейные, радиальные и круговые профили, ОГТ	0—5	Нет

Рис. 9. Теоретические амплитудные кривые (вычисленные лучевым методом) x - и y -компонент вектора смещений U отраженной волны PS в изотропной модели в функции угла ψ между направлением линии источник—приемник и восстанием границы.

Представлены модули комплексных амплитуд u_x и u_y . Сплошными линиями нанесены зависимости для $r/h = 0.2$, штриховыми линиями для $r/h = 0.6$, штрихпунктирными для $r/h = 1.0$. Угол наклона границы $\varphi = 10^\circ$. В среде над границей $\gamma = v_s/v_p = 0.31$ [Пузырев, Оболенцева, 1967].



ными упругими свойствами. В следующем разделе дается краткая характеристика модели [Клем-Мусатов и др., 1973; Айзенберг и др., 1974] и описываются попытки использования этой модели для интерпретации наблюдаемой с 1963 г. аномальной поляризации обменных (PS) и поперечных (SS) волн.

Анизотропия как возможная причина явления «аномальной поляризации»

Модель Клем-Мусатова и др.

Пусть среда состоит из одинаковых параллельных тонких слоев, разделенных границами, на которых выполняются условия нежесткого контакта. Для нестационарных колебаний эти условия имеют вид [Клем-Мусатов и др., 1973]

$$\sigma_q(M_0) = \lim_{M \rightarrow M_0} \sigma_q(M),$$

$$\frac{dU_q(M_0)}{dt} = \lim_{M \rightarrow M_0} \left[\frac{dU_q(M)}{dt} + \int_0^t \sigma_q(M) \tau \Lambda_q(t - \tau) d\tau \right], \quad (3)$$

$$\Lambda_q(t) = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty \frac{e^{i\omega t}}{Z_q(\omega)} d\omega, \quad q = p, s,$$

где σ_q — напряжения, а u_q — смещения нормальные ($q = p$) и касательные ($q = s$); $Z_q(\omega)$ — продольный ($q = p$) и поперечный ($q = s$) импедансы; M_0 — точка в плоскости разделения; M — переменная точка в слое. Импедансы Z_q ($q = p, s$) могут быть определены различными способами, и от этого будет зависеть характер анизотропии и степень ее проявления. Анизотропия появляется при переходе к пределу $n \rightarrow \infty$ в решении для дискретной тонкослоистой среды (n — количество тонких слоев в модели).

В анизотропной однородной среде, которая заменяет прежнюю тонкослоистую, скорости волн P , SV и SH зависят от направления распространения, задаваемого углом θ между волновой нормалью и осью симметрии z , следующим образом:

$$\begin{aligned} v_P(\theta) &= c_P \left[1 + g_P (1 - 2\gamma^2 \sin^2 \theta)^2 + g_S \gamma^2 \sin^2 2\theta \right]^{-1}, \\ v_{SV}(\theta) &= c_S \left[1 + g_P \gamma^2 \sin^2 2\theta + g_S \cos^2 2\theta \right]^{-1}, \\ v_{SH}(\theta) &= c_S \left[1 + g_S \cos^2 \theta \right]^{-1}, \\ \gamma &= c_S / c_P, \end{aligned} \quad (4)$$

где c_P, c_S — скорости волн P и S в среде без трещин, а g_P, g_S — константы, характеризующие убывание модулей упругости c_P, c_S за счет трещин. Если $g_P = g_S = 0$, среда становится изотропной и в ней $v_P = c_P, v_S = c_S$.

В аналогичной модели [Schoenberg, 1980, 1983], хотя и предложенной позднее модели [Клем-Мусатов и др., 1973; Айзенберг и др., 1974], но доведенной до широкого использования, выражения для фазовых скоростей имеют вид [Schoenberg, Douma, 1988]

$$v_P(\theta) = \sqrt{(\lambda_b + 2\mu_b) / \rho_b} \left[1 - E_N (1 - 2\gamma_b \sin^2 \theta)^2 - E_T \gamma_b \sin^2 2\theta \right]^{1/2},$$

$$v_{SV}(\theta) = \sqrt{\mu_b / \rho_b} \left[1 - E_N \gamma_b \sin^2 2\theta - E_T \cos^2 2\theta \right]^{1/2}, \quad (5)$$

$$v_{SH}(\theta) = \sqrt{\mu_b / \rho_b} \left[1 - E_T \cos^2 \theta \right]^{1/2},$$

где λ_b, μ_b — константы Ламе и ρ_b — плотность изотропной вмещающей породы, $\gamma_b = \mu_b / (\lambda_b + 2\mu_b)$, E_N, E_T — нормальная (N) и касательная (T) податливости породы, характеризующие систему трещин.

Выражения (5) совпадают с выражениями (4). Чтобы это увидеть, надо разложить правые части этих равенств в биномиальные ряды по малым параметрам: g_P, g_S для уравнений (4) и E_N, E_T для уравнений (5), поскольку и те, и другие намного меньше единицы, и ограничиться линейными членами. При сравнении получившихся выражений выявляется следующее соответствие между параметрами моделей:

$$c_P = \sqrt{(\lambda_b + 2\mu_b)\rho_b^{-1}}, \quad c_S = \sqrt{\mu_b\rho_b^{-1}}, \quad \rho = \rho_b, \quad \gamma^2 = c_S^2 / c_P^2 = \gamma_b, \quad 2g_P = E_N, \quad 2g_S = E_T.$$

Трансверсально-изотропная среда, эффективная модель среды с нежесткими контактами между образующими ее тонкими слоями, описывается не пятью модулями упругости, а четырьмя ($c_{11}, c_{33}, c_{44}, c_{66}$), см. выражения (4), (5). Поэтому в принципе для определения всех модулей упругости этой среды достаточно знания скоростей P - и S -волн на оси симметрии ($\theta = 0$) и в плоскости изотропии ($\theta = 90^\circ$):

$$v_{SH\perp} = v_{SV\perp} = v_{SV\parallel} = c_S(1 - g_S) = \sqrt{\mu_b / \rho_b} (1 - E_T / 2) = \sqrt{c_{44} / \rho},$$

$$v_{SH\parallel} = c_S = \sqrt{\mu_b / \rho_b} = \sqrt{c_{66} / \rho},$$

$$v_{P\perp} = c_P(1 - g_P) = \sqrt{(\lambda_b + 2\mu_b) / \rho_b} (1 - E_N / 2) = \sqrt{c_{33} / \rho},$$

$$v_{P\parallel} = c_P \left[1 - (1 - 2\gamma^2) g_P \right] = \sqrt{(\lambda_b + 2\mu_b) / \rho_b} \left[1 - (1 - 2\gamma_b) E_N / 2 \right] = \sqrt{c_{11} / \rho}.$$

Пятую константу трансверсально-изотропной среды c_{13} можно найти из уравнения $c_{11}c_{33} - c_{13}^2 = 2c_{44}(c_{11} + c_{13})$, см. [Schoenberg, Sayers, 1995].

Первые шаги в интерпретации x -, y -сейсмограмм с использованием модели Клем-Мусатова и др.

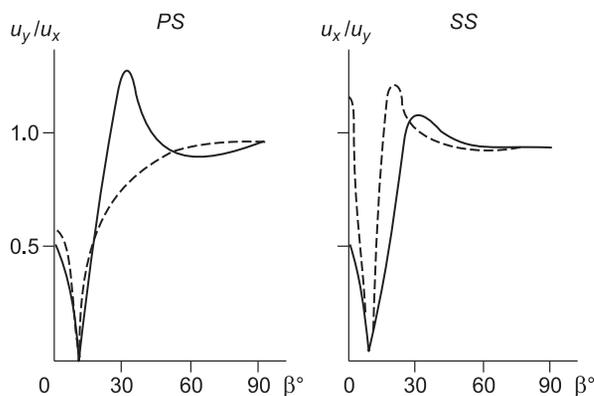
Анизотропная модель [Клем-Мусатов и др., 1973; Айзенберг и др., 1974] была применена для расчета теоретических сейсмограмм с целью нахождения наилучшего приближения к экспериментальным данным (см. рис. 7, 8), полученным на площади соляного купола Теркобай. При расчетах ось симметрии считалась направленной не по нормали к отражающей границе, а вертикально, чтобы побочные компоненты стали больше. Варьируемым параметром был коэффициент анизотропии $K_P = v_{P\parallel} / v_{P\perp}$, который принимал значения в пределах $1.0 \div 1.1$; значения, превышающие 1.1, не задавались, так как при $K_P > 1.1$ разность времен прихода волн PSV и PSH превышает 1.5 периода колебаний, что должно приводить к соответствующему удлинению записи суммарной волны $PSV + PSH$, чего в экспериментах не наблюдалось. Однако, как можно увидеть из рис. 6 в статье [Клем-Мусатов и др., 1973], удовлетворительного соответствия между теоретическими и экспериментальными сейсмограммами достичь не удалось, особенно на азимутах между восстанием и простиранием границы ($0^\circ, 90^\circ$). Очевидно, что нужен был поиск и по положению оси симметрии.

Другой пример аппроксимации экспериментальных сейсмограмм теоретическими с использованием модели [Клем-Мусатов и др., 1973] приведен в работе [Гречка, Оболенцева, 19876]. Экспериментальные данные относятся к соляному куполу Танатар (см. табл. 2), они представлены в работе [Пузырев и др., 1983]. В данном случае поиск положения оси симметрии производился в пространстве (по двум углам: полярному β и азимутальному α) и при варьировании параметрами анизотропии в широком диапазоне. Наилучшее соответствие между теоретическими и экспериментальными сейсмограммами было достигнуто при отклонении оси симметрии от нормали к границе на 10° как по полярному углу β , так и по азимутальному углу α . Полярный угол β измерялся как угол между заданным направлением и осью z , ориентированной вертикально вниз, а азимутальный угол α — как угол между заданным направлением и осью x , направлением восстания границы. Таким образом, найдено, что для оси симметрии $\beta_{sa} = 20^\circ, \alpha_{sa} = 10^\circ$, в то время как для нормали к отражающей границе $\beta_{nr} = 10^\circ, \alpha_{nr} = 0^\circ$.

Для того чтобы понять, как отношения побочных компонент смещений к основным в волнах PS и SS на круговых и линейных профилях зависят от взаимного пространственного положения отражающей границы и оси симметрии покрывающей трансверсально-изотропной среды, была проведена серия расчетов теоретических сейсмограмм. Ввиду большого количества переменных пришлось ограничиться

Рис. 10. Отношения u_y/u_x побочных компонент смещений к основным для отраженных волн PS и u_x/u_y для отраженных волн SS (от Y -источника) в функции полярного угла оси симметрии β , измераемого от вертикального направления.

Угол падения границы $\varphi = 10^\circ$. Отношения u_y/u_x и u_x/u_y являются средними значениями для относительных расстояний $r/h = 0—1.25$ на профилях с азимутом 45° от направления восстания границы. Сейсмограммы вычислены лучевым методом. Преобладающие частоты импульсов: $f = 20$ Гц (сплошные линии), и $f = 40$ Гц (штриховые линии) для PS -волны; $f = 10$ Гц (сплошные линии), $f = 20$ Гц (штриховые) для SS -волны [Гречка, Оболенцева, 1987].



теми сочетаниями параметров, которые, согласно экспериментальным данным [Бахаревская и др., 1967; Пузырев и др., 1983, 1985], представляются наиболее вероятными и позволяющими сделать некоторые общие выводы.

На рис. 10 приведены результаты расчетов отношения побочных компонент смещений к основным в волнах PS и SS , отраженных от наклонной границы с углом наклона $\varphi = 10^\circ$ и наблюдаемых на профиле, идущем под углом 45° к линии восстания—падения границы. Ось симметрии среды над границей находится в плоскости восстания—падения границы и образует с вертикалью углы β , задаваемые в интервале $(0^\circ, 90^\circ)$. Выбор такой взаимной ориентации отражающей границы, оси симметрии среды и направления профиля был сделан на основании экспериментальных данных и предварительных расчетов, которые показали, что отношения амплитуд компонент векторов смещений $u_{\text{поб}}/u_{\text{осн}}$ (α, β) максимальны при значениях азимутального угла α порядка 45° , и задача состояла в исследовании отношений $u_{\text{поб}}/u_{\text{осн}}$ в функции полярного угла β . Значения параметров анизотропии были выбраны большими, чтобы получить максимальные значения искомого отношения $u_{\text{поб}}/u_{\text{осн}}$. Коэффициенты анизотропии волн P, SH, SV , определяемые как отношения максимальных значений соответствующих фазовых скоростей к минимальным, равны $k_P = k_{SV} = 1.1$; $k_{SH} = 1.2$ при значениях фазовых скоростей на оси симметрии $v_{P\perp} = 2$ км/с; $v_{S\perp} = 0.6$ км/с ($\gamma_\perp = 0.3$). Отношения $u_{\text{поб}}/u_{\text{осн}}$, отложенные по осям ординат графиков на рис. 10, представляют собой средние значения на профилях длиной $l = 1.5h$, где h — глубина отражающей границы под источником, измеренная по нормали к границе.

Расчеты выполнялись в нулевом приближении лучевого метода. В качестве источника для волн PS был выбран центр давлений, а для волн SS — сила Y , т.е. сила, нормальная к направлению профиля. В источнике задавался импульс Берлаге длительностью $2.5/f$ при $f = 20$ и 40 Гц для волны PS и $f = 10$ и 20 Гц для волны SS .

Из графиков, представленных на рис. 10, следует, что отношения $u_{\text{поб}}/u_{\text{осн}}$ (β) минимальны (нулевые, как в соответствующей изотропной модели), если ось симметрии направлена по нормали к границе ($\beta = \varphi$). По мере отклонения оси анизотропии от нормали к границе отношения $u_{\text{поб}}/u_{\text{осн}}$ (β) растут до значений $0.5—1$ при $\beta < \varphi$ и до значений ~ 1 при $\beta > \varphi$; в последнем случае это достигается в результате разделения волн при субгоризонтальной и горизонтальной осях симметрии.

Выше мы писали о поиске коэффициента анизотропии k_P при фиксированном значении угла β ($\beta = 0^\circ$) по данным круговых наблюдений волны PS на склоне соляного купола Теркобай. Как видно из рис. 10, поиск k_P производился на левой ветви ($\beta < \varphi$), в этом случае отношения $u_{\text{поб}}/u_{\text{осн}}$ (β) в волне PS не могут превышать 0.5 . Во втором вышеприведенном примере поиска параметров, обеспечивающих наилучшее соответствие между экспериментальными и теоретическими сейсмограммами волны PS на склоне соляного купола Танатар, было получено, что $\beta = 20^\circ$, т.е. оно найдено на правой ветви графика $u_{\text{поб}}/u_{\text{осн}}$ (β) волны PS . Надо, однако, заметить, что в случае наблюдений на площади купола Танатар поиск проводился совместно по двум углам: β и α , и было найдено, что $\alpha = 10^\circ$, а графики на рис. 10 рассчитаны для $\alpha = 0^\circ$.

Таким образом, хотя графики $u_{\text{поб}}/u_{\text{осн}}$ (β) (см. рис. 10) и дают представление о возможной величине отношения побочных компонент смещений к основным в волнах PS и SS , но они охватывают далеко не все случаи, которые могут встретиться на практике. Не освещено поведение функций $u_{\text{поб}}/u_{\text{осн}}$ (β) при различных значениях азимутального угла α . Нет расчетов для углов наклона границы, отличных от 10° . Кроме того, параметры анизотропии могут иметь различные значения, и число их сочетаний практически необозримо. Поэтому аппроксимация полевых данных теоретическими функциями представляет собой трудную задачу, не имеющую однозначного решения. Все перечисленные обстоятельства приводят к выводу, что надо искать иные пути решения проблемы «аномальной поляризации» волн PS и SS .

Алгоритм восстановления поперечных волн S_1 и S_2 из их интерференции

Мысли о необходимости и возможности извлечения «чистых» поперечных волн S_1 и S_2 (SV и SH в трансверсально-изотропных средах) из трех- или двухкомпонентных полевых сейсмограмм возникли у И.Р. Оболенцевой и С.Б. Горшкалева в конце 1970—начале 1980-х гг., и тогда же они были реализованы на практике. Разработанный алгоритм разделения двух интерферирующих поперечных волн S_1 и S_2 и пример его применения к полевым данным были описаны в статье [Оболенцева, Горшкалев, 1986]. Этот алгоритм был опубликован одновременно с получившими широкую известность алгоритмами [Alford, 1986; Naville, 1986], решающими ту же задачу, первый — для данных ОГТ, а второй — для данных ВСП.

Алгоритм [Оболенцева, Горшкалев, 1986] оперирует с каждой двухкомпонентной записью $[u_x(t), u_y(t)]$, полученной в данной точке наблюдения. В этой точке должно быть известно направление луча поперечной волны. Считается, что лучи двух поперечных волн совпадают и эквивалентны волновым нормальям. Это допущение справедливо, строго говоря, при слабой анизотропии. Пусть направление луча задается вектором \mathbf{l}^0 . (Здесь и в дальнейшем верхний индекс «0» используется для обозначения единичного вектора.)

Первый шаг алгоритма состоит в построении матрицы \mathbf{M} перехода от системы координат наблюдений xuz к новой координатной системе $x'y'z'$, в которой $z'^0 = \mathbf{l}^0$ (вектор \mathbf{l}^0 определяется, в общем случае, двумя углами: полярным и азимутальным), а оси x' , y' находятся в плоскости, нормальной к z'^0 , при этом положение оси x' выбирается произвольным, а $y'^0 \perp x'^0$. На втором шаге запись $[u_x(t), u_y(t)]$ переводится из системы координат xuz в систему координат $x'y'z'$ с помощью матрицы \mathbf{M} . Последующие шаги состо-

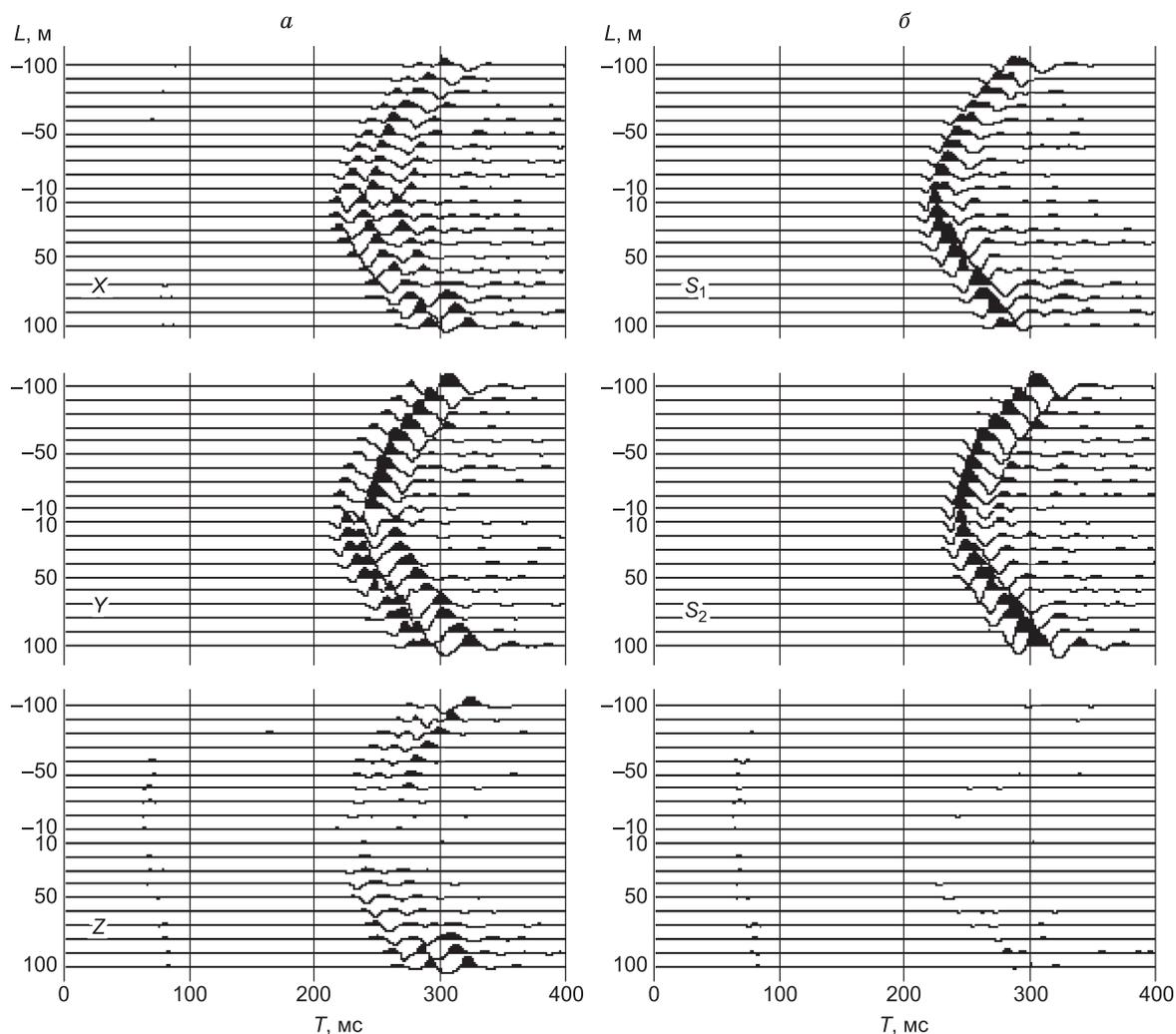


Рис. 11. Пример преобразования исходных записей x, y, z (от X -источника) в записи x', y', z' волн S_1 (быстрой) и S_2 (медленной):

а — исходные сейсмограммы, зарегистрированные в скважине в альбских отложениях на глубине 100 м на площади соляного купола Доссор при перемещении источника на поверхности в направлении 45° от плоскости симметрии на расстояния L ; *б* — результат поляризационной обработки [Горшкалев, 2002].

ят в том, что производятся преобразования записей x -, y -компонент в записи x' -, y' -компонент путем поворота на углы α вокруг оси z' и на каждом шаге вычисляется и запоминается функция взаимной корреляции $K(\tau)$ между $u_{x'}(t)$ и $u_{y'}(t - \tau)$. Заключительный шаг алгоритма состоит в поиске $\max_{\alpha} \max_{\tau} K(\tau)$. Найденное значение угла α определяет положение осей x' и y' «естественной» системы координат. Значение τ определяет разницу времен пробега «медленной» и «быстрой» поперечных волн (S_1 и S_2).

На рис. 11 показаны результаты применения вышеописанного алгоритма к скважинным данным на площади соляного купола Доссор [Горшкалев, 2002]. Точка наблюдения с ориентированным трехкомпонентным сейсмоприемником находится в альбских породах на глубине 100 м. Источник типа сила X действует на поверхности в направлении 45° от плоскости симметрии. В левой половине рис. 11 приведены полученные записи $u_x(t)$, $u_y(t)$, $u_z(t)$ для удалений источника от устья скважины на расстояния L , а в правой половине — записи $u_{x'}(t)$, $u_{y'}(t)$, соответствующие волнам S_1 и S_2 . Результатом работы алгоритма являются также углы, характеризующие пространственное положение оси симметрии среды, и временные сдвиги между приходом волн S_1 и S_2 .

Дальнейшее развитие алгоритма [Оболенцева, Горшкалев, 1986] выполнено в работах [Никольский, 1987, 1992], автор которых применил разработанный им алгоритм к x -, y -наблюдениям PS -волн, полученным на площади соляного купола Танатар в 1982 г. Преобразовав эти записи в записи SV - и SH -волн, он построил карту векторов поляризации волны PS , расщепившейся на волны PSV и PSH [Никольский, Шитов, 1992]. При совмещении этой карты с картой изогипс горизонта III оказалось, что волны SV и SH поляризованы преимущественно в плоскостях восстания — падения и простирания III горизонта. (Аналогичная зависимость ранее наблюдалась для альбских отложений в районе соляного купола Доссор [Тригубов, Горшкалев, 1988].) В области тектонических нарушений было отмечено изменение поляризации, сопровождаемое увеличением разброса направлений векторов смещений.

Разработанные алгоритмы разделения интерферирующих волн S_1 и S_2 применимы не только к трансверсально-изотропным средам, но и к средам других систем симметрии [Тригубов, Горшкалев, 1988]. Применение алгоритма разделения волн к данным, полученным на соляном куполе Доссор, позволило построить индикатрисы лучевых скоростей волн S_1 и S_2 в трех плоскостях симметрии, в результате чего было найдено, что симметрия среды — моноклиная.

ТЕОРЕТИКО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ 1960—1980-х гг.

Публикаций по вопросам теории сейсмической анизотропии и создания методов и алгоритмов вычисления волновых полей в тех или иных моделях анизотропных сред довольно много. Здесь мы назовем главным образом те из них, которые были опубликованы только в России и были первыми в мире или одними из первых в рассматриваемых направлениях исследований.

Эффективные модели тонкослоистых и трещиноватых сред

В конце 1960—начале 1970-х гг. появились работы [Локцик, 1969, 1970а,б], посвященные анизотропии тонкослоистых сред. Особого внимания заслуживают исследования Ф.М. Ляховицкого и М.В. Невского, опубликованные в 1970-е гг. [Ляховицкий, Невский, 1971, 1972; и др.], они в обобщенном виде представлены в книге [Невский, 1974]. Рассматривается анизотропия скоростей, возникающая вследствие тонкой слоистости пород. Изучение характера зависимости скоростей от направления распространения в тонкослоистых средах, состоящих из тонких слоев с различными отношениями скоростей v_{S_1}/v_{S_2} , v_{P_1}/v_{P_2} , плотностей ρ_1/ρ_2 и мощностей h_1/h_2 в слоях (чередуются слои 1 и 2), привело к построению классификации тонкослоистых сред. Выделено четыре типа анизотропии.

Теоретические и экспериментальные исследования периодических слоистых структур (экспериментальные — путем физического моделирования на листовых моделях) описаны в книге [Сибиряков и др., 1980]. Авторы показали, что аппроксимация таких сред моделью однородной трансверсально-изотропной среды справедлива, если отношение толщины слоя к длине волны $h/\lambda < 0.1 \div 0.2$.

Анизотропная модель трещиноватой среды впервые была представлена в статьях [Клем-Мусатов и др., 1973; Айзенберг и др., 1974]. Об этом мы написали в предыдущей главе, поскольку освещение экспериментальных исследований 1960—1980 гг. потребовало включения элементов теории, созданной в связи с этими исследованиями. Моделям тонкослоистых сред разного типа, включая трещиноватые, посвящена серия работ [Молотков, 1979, 1991; Молотков, Хило, 1983, 1986; и др.] и книга [Бакулин, Молотков, 1998], в которой обобщаются выполненные ранее исследования.

Основы теории распространения упругих волн в анизотропных средах

Учебных пособий и монографий, посвященных теории распространения упругих волн в анизотропных средах, в России издано мало.

В 1960-е гг. вышла монография Ф.И. Федорова [1965]. Хотя эта книга адресована специалистам по физике кристаллов, долгие годы, вплоть до настоящего времени, она является одной из лучших книг для желающих получить необходимые сведения о свойствах симметрии и о закономерностях распространения плоских упругих волн в средах различных систем симметрии, а также о методах решения соответствующих задач. Десять лет спустя появилось первое издание книги «Основы кристаллофизики» и еще через четыре года — ее второе издание [Сиротин, Шаскольская, 1979]. Эта книга стала для многих исследователей незаменимым справочным пособием по многим вопросам, относящимся к симметрии материальных объектов и их физическим свойствам. Следующими выдающимися публикациями учебного плана явились монография [Петрашень, 1980] и сборник научных трудов [Распространение..., 1984]. Последний состоит из трех статей теоретического и алгоритмического плана. Он предназначен служить руководством к применению основ теории распространения упругих волн в анизотропных средах в практике сейсмических исследований.

Вычислительные методы и алгоритмы

Численный метод и его применение для моделирования распространения упругих волн в анизотропных неоднородных средах в случае полупространства и сферы описаны в статье [Мартынов, Михайленко, 1979]. Точечные источники в трансверсально-изотропной упругой среде впервые рассмотрены в статье [Успенский, Огурцов, 1962]. Метод вычисления волновых полей от точечных источников в трансверсально-изотропных средах опубликован в статье [Мартынов, 1986].

Лучевой метод впервые был применен к анизотропным средам В.М. Бабичем, он рассматривал неоднородные анизотропные среды [Бабич, 1961]. Лучевой метод для неоднородных анизотропных сред представлен в главе 5 монографии [Červený et al., 1977], написанной с участием Л.А. Молоткова. Позднее, в 1980-е гг., лучевой метод и способы вычисления лучевым методом волновых полей в анизотропных средах были представлены в работах [Каштан, 1982; Петрашень, Каштан, 1984; Каштан и др., 1984; Каштан, Ковтун..., 1984].

В 1970—1980-е гг. появилась серия публикаций И.Р. Оболенцевой и В.Ю. Гречки, посвященная проблемам вычисления лучей и теоретических сейсмограмм в лучевом приближении для трехмерных анизотропных слоистых сред. Сначала был опубликован алгоритм вычисления лучей, распространяющихся в слоистой трансверсально-изотропной среде из источника в заданные точки наблюдения [Оболенцева, 1975]. Он представлял собой аналог опубликованного годом ранее алгоритма для слоистых изотропных сред [Оболенцева, 1974]. В этих работах координаты точек пересечения лучом границ раздела находились непосредственным применением принципа Ферма, т.е. из условий стационарности времени пробега волны, и решением полученной системы уравнений итерационным способом. Позднее были созданы алгоритмы с применением методов нелинейного программирования без ограничений, с использованием производных для изотропных сред, они описаны в статье [Оболенцева, 1980а]. Для сред с анизотропными слоями любой системы симметрии алгоритмы расчета лучей даны в работе [Оболенцева, Гречка, 1988]. В них поиск траекторий лучей выполняется несколькими оптимизационными методами. Сравнение различных способов расчета лучей в слоистых анизотропных средах выполнено в работе [Оболенцева, Гречка, 1992]; оно повторяет аналогичное сопоставление алгоритмов для слоистых изотропных сред [Оболенцева, 1980б].

Книга [Оболенцева, Гречка, 1989] вобрала в себя все предыдущие алгоритмические разработки этих авторов для анизотропных сред, включающие расчет лучей и теоретических сейсмограмм лучевым методом. Этому посвящены две первые главы книги. В третьей главе собраны алгоритмы для исследования волновых поверхностей поперечных волн в окрестности сингулярных направлений, а также способы разделения n -значных волновых поверхностей на n однозначных областей, к которым применимы имеющиеся алгоритмы расчета лучевым методом. Четвертая глава содержит алгоритмы вычисления лучей и смещений в анизотропных гиротропных средах.

Численное моделирование распространения поперечных и обменных волн в анизотропных средах с использованием разработанных И.Р. Оболенцевой и В.Ю. Гречкой алгоритмов представлено в работах [Гречка, Оболенцева, 1987а,б; Оболенцева, Гречка, 1987]. В них объясняется, каким именно образом возникает «аномальная поляризация» PS - и SS -волн в средах с азимутальной анизотропией. Приводятся примеры теоретических сейсмограмм PS - и SS -волн, отраженных от кровли и от подошвы азимутально анизотропного слоя, для случаев различной ориентации оси симметрии в этом слое. Показано, что у волн, отраженных от кровли слоя, побочные компоненты векторов смещений малы, тогда как у волн, отраженных от его подошвы, побочные компоненты могут достигать величины основных компонент.

Результаты численного моделирования волновых полей для различных моделей трансверсально-изотропной среды содержатся в работе [Бродов и др., 1986]. Расчеты, представленные в этой работе, выполнены с использованием алгоритмов из сборника работ [Распространение..., 1984].

Среди других работ, выполненных в России, назовем еще несколько, оказавших влияние на развитие исследований анизотропии. В начале 1980-х гг. была издана способом депонирования книга [Лапин, 1980]; она нашла широкое применение у сейсморазведчиков того времени. Немного позднее был опубликован ряд работ Э.А. Бляса, посвященных приближенным способам расчета времен пробега отраженных PP - и PS -волн в горизонтально-слоистых средах с анизотропными слоями (см. [Бляс, 1983, 1987] и другие его публикации). Решение обратной задачи по данным продольных и обменных волн дано в работе [Селезнев и др., 1986].

Вышеприведенные списки работ по исследованию распространения упругих волн в анизотропных средах, естественно, не могут охватить все работы, опубликованные на протяжении рассматриваемого периода времени. Предпочтение отдано тем работам, которые находятся на главном для этого периода направлении — выяснении роли азимутальной анизотропии в «аномальной поляризации» поперечных волн и других особенностях наблюдаемых в экспериментах трехмерных волновых полей. Названы и кратко освещены работы, опубликованные в России и неизвестные зарубежным исследователям. Теперь они смогут познакомиться с ними в англоязычном выпуске журнала «Геология и геофизика» (Russian Geology and Geophysics).

ВЫВОДЫ

Построение модели явления эквивалентно раскрытию его природы.

В самом начале исследований сейсмической анизотропии и до середины 1960-х гг. единственной моделью среды с анизотропными свойствами была модель трансверсально-изотропной среды с вертикальной осью симметрии (VTI). Она возникла на основе наблюдаемых с 1930-х гг. различий скоростей, определяемых по вертикали и по наклонным лучам, последние были больше. За период с 1940-х до середины 1950-х гг. объяснение было найдено: эффект вызван тонкой по сравнению с длиной волны слоистостью отложений; была построена модель, связывающая параметры тонких слоев с параметрами трансверсально-изотропной среды, ось симметрии которой нормальна к напластованиям.

Следующим шагом было открытие в 1960-е гг., что, как правило, распространение поперечных волн не может быть понято в рамках модели среды VTI. В такой среде не могут появляться y -компоненты смещений (и тем более большой амплитуды) SS -волн при X -источнике и x -компоненты при Y -источнике, а также y -компоненты смещений PS -волн, возбуждаемых взрывами. Также не должно быть больших невязок времен пробега на пересечениях профилей разных азимутов. Ось симметрии среды TI (трансверсально-изотропной) должна быть горизонтальной (H) или наклонной (T, от tilted), т.е. среда должна быть HTI или TTI (по существующей на сегодня терминологии), или ромбической и даже моноклинной. В этом случае возникает вопрос: какова возможная физическая причина такой симметрии.

В 1970-е гг. появилась модель, основанная на теории линейного проскальзывания (проскальзывание (или «linear slip») — это вид нежесткого контакта между слоями), из которой следовало, что внешне однородная порода может быть разбита сетью параллельных микротрещин, горизонтальных или наклонных, вследствие чего она становится трансверсально-изотропной типа HTI или TTI соответственно. А в такой модели появление побочных компонент смещений — очевидное событие, так как регистрация смещений происходит в системе координат, произвольной по отношению к «естественной»* системе координат. Чтобы преодолеть появление побочных компонент смещений, возникла идея перехода от произвольной системы координат, в которой они регистрируются, к «естественной» системе координат; в 1980-е гг. был построен соответствующий алгоритм.

Экспериментальные, теоретические и алгоритмические разработки происходили одновременно и в тесной связи друг с другом, приводя ко все более глубокому пониманию и соответствующему использованию получаемых полевых данных. Постепенно все характеристики анизотропии — времена пробега и амплитуды волн трех типов (P , S_1 , S_2), зависящие от коэффициентов отражения и поглощения, — стали использоваться для структурных построений и определения физических свойств изучаемых сред. Исследования сейсмической анизотропии в России до начала 1990-х гг. проводились параллельно с исследованиями в других странах, часто, особенно до 1980-х гг., в опережающем режиме. В приведенном обзоре мы осветили часть этих работ на примере формирования представлений о природе сейсмической анизотропии.

Данная работа посвящается Николаю Никитовичу Пузыреву, основателю нового направления сейсмических исследований — многоволновой сейсморазведки, включающей в качестве одной из главных составных частей исследования сейсмической анизотропии.

* «Естественной» называют ту систему координат xuz , в которой заданному направлению волновой нормали z отвечают две поперечных волны со своими строго фиксированными взаимно ортогональными направлениями смещений в плоскости xu и разными, в общем случае, скоростями распространения.

ЛИТЕРАТУРА

Айзенберг А.М., Клем-Мусатов К.Д., Ланда Е.И. Модель анизотропной сейсмической среды // Сейсмические волны в сложнопостроенных средах. Новосибирск, Наука, 1974, с. 64—110.

Алексеев А.С., Гельчинский Б.Я. О лучевом методе вычисления полей и волн в неоднородных средах с криволинейными границами раздела // Вопросы динамической теории распространения сейсмических волн. Л., Изд-во Ленингр. ун-та, 1959, вып. 3, с. 107—161.

Бабич В. М. Лучевой метод вычисления интенсивности волновых фронтов в случае упругой неоднородной анизотропной среды // Вопросы динамической теории распространения сейсмических волн. Л., Наука, 1961, вып. 5, с. 36—46.

Бакулин А.В., Молотков Л.А. Эффективные сейсмические модели трещиноватых и пористых сред. СПб., Изд-во С.-Петерб. ун-та, 1998, 141 с.

Бахаревская Т.М., Бродов Л.Ю., Оболенцева И.Р., Пузырев Н.Н. Экспериментальное изучение поляризации обменной волны типа PS, отраженной от наклонной границы раздела // Поперечные и обменные волны в сейсморазведке. М., Недра, 1967, с. 203—209.

Берденникова Н.И. О некоторых проявлениях анизотропии в слоистой среде при работе на поперечных волнах // Вопросы динамической теории распространения сейсмических волн. Л., Изд-во Ленингр. ун-та, 1959, вып. 2, с. 187—196.

Бляс Э.А. Годографы отраженных волн в горизонтально-слоистой среде с поперечно-изотропными слоями и их интерпретация // Геология и геофизика, 1983 (2), с. 91—95.

Бляс Э.А. Годографы отраженных обменных волн в горизонтально-слоистых средах с поперечно-изотропными слоями // Алгоритмические проблемы обработки данных сейсморазведки. Новосибирск, ИГиГ, 1987, с. 79—87.

Бродов Л.Ю., Ковтун А.А., Тихонов А.А. Некоторые результаты численного моделирования для поперечно-изотропной среды // Изв. АН СССР. Физика Земли, 1986, № 11, с. 48—57.

Горшкалев С.Б. Разработка способов экспериментального изучения анизотропии осадочных отложений методами многоволновой сейсморазведки: Автореф. дис. ... к.т.н. Новосибирск, ОИГГМ СО РАН, 2002, 23 с.

Гречка В.Ю., Оболенцева И.Р. Математическое моделирование отраженных волн в слоисто-однородных трансверсально-изотропных средах // Изв. АН СССР. Физика Земли, 1987а, № 7, с. 50—59.

Гречка В.Ю., Оболенцева И.Р. Результаты математического моделирования трехмерных полей смещений отраженных PS- и SS-волн в трансверсально-изотропных средах // Многоволновые сейсмические исследования. Новосибирск, Наука, 1987б, с. 20—25.

Гурвич И.И. Интерпретация данных сейсморазведки в случае анизотропной среды // Изв. АН СССР. Серия географ. и геофиз., 1940, № 5, с. 108—116.

Каштан Б.М. О вычислении геометрического расхождения в кусочно-однородных анизотропных средах // Вопросы динамической теории распространения сейсмических волн. Л., Наука, 1982, вып. 22, с. 14—23.

Каштан Б.М., Ковтун А.А. Программы расчета волновых полей и краткий обзор полученных при их помощи количественных результатов // Распространение объемных волн и методы расчета волновых полей в анизотропных средах. Л., Наука, 1984, с. 248—282.

Каштан Б.М., Ковтун А.А., Петрашень Г.И. Алгоритмы и методики вычисления полей объемных волн в произвольных анизотропных упругих средах // Распространение объемных волн и методы расчета волновых полей в анизотропных средах. Л., Наука, 1984, с. 108—248.

Клем-Мусатов К.Д., Оболенцева И.Р., Айзенберг А.М. Расчет полей упругих волн для одной модели анизотропной среды // Динамические характеристики сейсмических волн. Новосибирск, Наука, 1973, с. 73—98.

Лапин С.И. Сейсмическая разведка анизотропных сред. Часть I // Пермь, 1980, 240 с. Деп. в ВИНТИ, № 848-80.

Локцик В.В. К вопросу об анизотропии упругих свойств мелкослоистых сред // Геология и геофизика, 1969 (3), с. 91—101.

Локцик В.В. Совместная интерпретация годографов продольных и поперечных отраженных волн в мелкослоистых средах // Геология и геофизика, 1970а (10), с. 109—113.

Локцик В.В. Определение коэффициентов анизотропии продольных и поперечных волн на тонкослоистых моделях и образцах горных пород // Геология и геофизика, 1970б (12), с. 87—93.

Ляховицкий Ф.М., Невский М.В. Анализ анизотропии скоростей сейсмических волн в тонкослоистых периодических средах // Изв. АН СССР. Физика Земли, 1970, № 9, с. 12—21.

Ляховицкий Ф.М., Невский М.В. Годографы отраженных волн для поперечно-изотропной среды // Докл. АН СССР, 1971, т. 196, № 2, с. 327—330.

- Мартынов В.Н.** Волновые поля от сосредоточенных источников в трансверсально-изотропных средах // Изв. АН СССР. Физика Земли, 1986, № 11, с. 19—26.
- Мартынов В.Н., Михайленко Б.Г.** Численное моделирование распространения упругих волн в анизотропных неоднородных средах для полупространства и сферы // Математические методы интерпретации геофизических наблюдений. Новосибирск, Вычислительный центр СО РАН, 1979, с. 85—114.
- Молотков Л.А.** Об эквивалентности слоисто-периодических и трансверсально-изотропных сред // Математические вопросы теории распространения волн. Записки научных семинаров ЛОМИ. Л., Наука, 1979, т. 89, № 10, с. 219—233.
- Молотков Л.А.** О новом способе вывода осредненной эффективной модели периодических сред // Математические вопросы теории распространения волн. Записки научных семинаров ЛОМИ. Л., Наука, 1991, т. 195, с. 82—102.
- Молотков Л.А., Хило А.Е.** Эффективные среды для периодических анизотропных систем // Записки научных семинаров ЛОМИ, 1983, т. 128, с. 130—138.
- Молотков Л.А., Хило А.Е.** Эффективные модели слоистых сред с линейными контактами общего вида // Записки научных семинаров ЛОМИ, 1986, т. 156, с. 148—157.
- Невский М.В.** Квазианизотропия скоростей сейсмических волн. М., Наука, 1974, 179 с.
- Никольский А.А.** К вопросу об обработке PS - и SS -волн в анизотропных средах // Алгоритмические проблемы обработки данных сейсморазведки. Новосибирск, ИГиГ СО АН СССР, 1987, с. 66—79.
- Никольский А.А.** Поляризация обработки обменных отраженных PS -волн в анизотропных средах // Исследования распространения сейсмических волн в анизотропных средах. Новосибирск, Наука, 1992, с. 118—129.
- Никольский А.А., Шитов А.В.** Определение направлений векторов поляризации SV - и SH -волн в анизотропных средах по результатам площадных работ // Исследования распространения сейсмических волн в анизотропных средах. Новосибирск, Наука, 1992, с. 129—133.
- Оболенцева И.Р.** Численные способы решения прямых пространственных задач геометрической сейсмологии для многослойных сред с границами произвольной формы // Геология и геофизика, 1974 (9), с. 113—128.
- Оболенцева И.Р.** Численный способ решения прямых пространственных задач геометрической сейсмологии для сложнопостроенных анизотропных сред // Экспериментальные и теоретические исследования отраженных волн. Новосибирск, Наука, 1975, с. 134—142.
- Оболенцева И.Р.** Прямые трехмерные задачи геометрической сейсмологии. Новосибирск, ИГиГ СО АН СССР, 1976, 108 с.
- Оболенцева И.Р.** Решение прямых кинематических задач сейсмологии методами нелинейного программирования (слоисто-однородные среды) // Геология и геофизика, 1980а (3), с. 123—132.
- Оболенцева И.Р.** Численные эксперименты по исследованию различных оптимизационных алгоритмов решения прямых кинематических задач сейсмологии для слоисто-однородных сред // Геология и геофизика, 1980б (5), с. 113—124.
- Оболенцева И.Р., Горшкалев С.Б.** Алгоритм разделения интерферирующих квазипоперечных волн в анизотропных средах // Изв. АН СССР. Физика Земли, 1986, № 11, с. 101—105.
- Оболенцева И.Р., Гречка В.Ю.** Изучение трехмерных волновых полей отраженных PS - и SS -волн в трансверсально-изотропных средах (по результатам математического моделирования) // Геология и геофизика, 1987 (8), с. 107—116.
- Оболенцева И.Р., Гречка В.Ю.** Двухточечные алгоритмы расчета лучей в слоисто-однородных анизотропных средах // Геология и геофизика, 1988 (10), с. 104—112.
- Оболенцева И.Р., Гречка В.Ю.** Лучевой метод в анизотропной среде (алгоритмы, программы). Новосибирск, ИГиГ СО АН СССР, 1989, 225 с.
- Оболенцева И.Р., Гречка В.Ю.** Сравнение различных алгоритмов расчета лучей в слоисто-однородных анизотропных средах // Исследования распространения сейсмических волн в анизотропных средах. Новосибирск, Наука, 1992, с. 182—190.
- Петрашень Г.И.** Распространение волн в анизотропных упругих средах. Л., Наука, 1980, 280 с.
- Петрашень Г.И., Каштан Б.М.** Элементарная теория распространения объемных волн в анизотропных упругих средах // Распространение объемных волн и методы расчета волновых полей в анизотропных упругих средах. Л., Наука, 1984, с. 15—107.
- Пузырев Н.Н., Оболенцева И.Р.** Поляризация продольных и обменных отраженных волн на горизонтальной поверхности наблюдений в случае наклонных границ раздела // Поперечные и обменные волны в сейсморазведке. М., Недра, 1967, с. 171—202.

Пузырев Н.Н., Оболенцева И.Р., Тригубов А.В., Горшкалев С.Б. Экспериментальные исследования анизотропии скоростей в осадочных отложениях по наблюдениям на поперечных волнах // Геология и геофизика, 1983 (11), с. 8—19.

Пузырев Н.Н., Тригубов А.В., Бродов Л.Ю., Ведерников Г.В., Лебедев К.А., Оболенцева И.Р., Нефедкина Т.В., Худобина Л.Н., Сибиряков Б.П., Куличихина Т.Н., Лебедева Г.Н., Каржева Л.В. Сейсмическая разведка методом поперечных и обменных волн. М., Недра, 1985, 277 с.

Распространение объемных волн и методы расчета волновых полей в анизотропных упругих средах / Ред. Г.И. Петрашень. Л., Наука, 1984, 282 с.

Ризниченко Ю.В. О сейсмической квазианизотропии // Изв. АН СССР. Серия географ. и геофиз., 1949, № 6, с. 518—543.

Рытов С.М. Электромагнитные свойства мелкослоистой среды // ЖЭТФ, 1955, т. 29, 5 (11), с. 605—616.

Рытов С.М. Акустические свойства мелкослоистой среды // Акустический журнал, 1956, т. 2, вып. 1, с. 71—83.

Селезнев В.С., Соловьев В.М., Никитенко А.Б. Определение параметров сейсмической анизотропии земной коры в Западной Якутии // Геология и геофизика, 1986 (8), с. 90—98.

Сибиряков Б.П., Максимов Л.А., Татарников М.А. Анизотропия и дисперсия упругих волн в слоистых периодических структурах. Новосибирск, Наука, 1980, 73 с.

Сиротин Ю.И., Шаскольская М.П. Основы кристаллофизики. М., Наука, 1979, 639 с.

Тархов А.Г. К вопросу об анизотропии упругих свойств горных пород // Материалы ВСЕГЕИ. Общая серия, сб. № 5, М.; Л., Изд-во АН СССР, 1940, с. 209—222.

Тригубов А.В., Горшкалев С.Б. Экспериментальное изучение анизотропии осадочных пород по скважинным данным // Математические проблемы интерпретации данных сейсморазведки. Новосибирск, Наука, 1988, с. 206—217.

Успенский И.Н., Огурцов К.И. Точечные источники в трансверсально-изотропной упругой среде // Вопросы динамической теории распространения сейсмических волн. Л., Наука, 1962, вып. 6, с. 75—83.

Федоров Ф.И. Теория упругих волн в кристаллах. М., Наука, 1965, 386 с.

Alford R.M. Shear data in the presence of azimuthal anisotropy: Dilley, Texas // Proceedings of the 56th Annual SEG Meeting, 1986, Houston, p. 476—479.

Beers R.F. Velocity stratification as an aid to correlation // Geophysics, 1940, v. 5, № 1, p. 15—21.

Červený V., Molotkov L., Pšenčík I. Ray method for anisotropic media // Ray method in seismology, Praha, Univerzita Karlova, 1977, p. 159—172.

Hagedoorn J.G. A practical example of an anisotropic velocity-layer // Geophys. Prosp., 1954, v. 2, № 1, p. 52—60.

Jolly R. N. Investigation of shear waves // Geophysics, 1956, v. 21, № 4, p. 905—938.

McCollum B., Snell F.A. Asymmetry of sound velocity in stratified formations // Physics, 1932, v. 2, № 3, p. 174.

Naville Ch. Detection of anisotropy using shear-wave splitting in VSP surveys: requirements and applications // Proceedings of the 56th Annual SEG Meeting, Houston, 1986, p. 391—394.

Pirson S.J. The correlation method of seismographing for oil // Oil Weekly, 1937, v. 87, № 2, p. 24—44.

Postma G.W. Wave propagation in a stratified medium // Geophysics, 1955, v. 20, № 4, p. 780—806.

Schoenberg M. Elastic wave behavior across linear slip interfaces // J. Acoust. Soc. Amer., 1980, v. 68, № 5, p. 1516—1521.

Schoenberg M. Reflection of elastic waves from periodically stratified media with interfacial slip // Geophys. Prosp., 1983, v. 31, p. 265—292.

Schoenberg M., Douma J. Elastic wave propagation in media with parallel fractures and aligned cracks // Geophys. Prosp., 1988, v. 36, p. 571—590.

Schoenberg M., Sayers C. Seismic anisotropy of fractured rock // Geophysics, 1995, v. 60, № 1, p. 204—211.

Uhrig L.F., Van Meele F.A. Velocity anisotropy in stratified media // Geophysics, 1955, v. 20, № 4, p. 774—779.

Weatherby B.B., Born W.T., Harding R.L. Granite and limestone velocity determinations in Arbuckle Mountains, Oklahoma // Bull. AAPG., 1934, v. 18, p. 106—118.

White J.E., Sengbush R.L. Velocity measurements in near-surface formations // Geophysics, 1953, v. 18, p. 54—69.

White J.E., Heaps S.H., Lawrence P.L. Elastic waves from a horizontal force // Geophysics, 1956, v. 21, № 3, p. 715—723.