

Геофизические технологии, № 1, 2021, с. 19–37 doi: 10.18303/2619–1563–2021–1–19 **www.rjgt.ru** УДК 550.834

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗУЧЕНИЯ АЗИМУТАЛЬНОЙ АНИЗОТРОПИИ ПАЛЕОЗОЙСКОГО ФУНДАМЕНТА ПО ТРЕХКОМПОНЕНТНЫМ НАБЛЮДЕНИЯМ ГОЛОВНЫХ ВОЛН НА БЫСТРОВСКОМ ВИБРОСЕЙСМИЧЕСКОМ ПОЛИГОНЕ

С.Б. Горшкалев, В.В. Карстен, П.А. Дергач

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия, e-mail: GorshkalevSB@ipqq.sbras.ru

На Быстровском вибросейсмическом полигоне (Новосибирская область) проведены трехкомпонентные наблюдения головных волн на трех пересекающихся профилях. Анализ поперечных волн позволил выявить анизотропию палеозойского фундамента, залегающего на глубине ≈10 м, и сделать предположения об элементах симметрии среды и их ориентации. По данным продольных волн построены разрезы и определены скорости головных волн, эти скорости демонстрируют существенные различия на профилях разной ориентации. Полученные результаты согласуются с ранее проведенными наблюдениями методом ВСП.

Многоволновая сейсморазведка, обработка сейсмических данных, поляризация, азимутальная анизотропия

RESULTS OF STUDYING THE AZIMUTHAL ANISOTROPY OF THE PALEOZOIC BASEMENT WITH VSP TECHNIQUE AT THE BYSTROVKA VIBROSEISMIC TEST SITE

S.B. Gorshkalev, W.V. Karsten, P.A. Dergach

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Koptyug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia, e-mail: GorshkalevSB@ipgg.sbras.ru

At the Bystrovka vibroseismic test site (Novosibirsk region) 3-component refracted waves profiling was performed at three intersecting lines. Shear waves analysis made possible to detect anisotropy of the Paleozoic basement occurring at depth of about 10 m and to suggest symmetry elements of this medium along with their orientation. Compressional waves data were used to construct depth sections estimating head waves velocities. These velocities demonstrate significant variation in lines of different orientation. The results obtained agree with previously performed VSP.

Multicomponent seismic, seismic data processing, polarization, azimuthal anisotropy

ВВЕДЕНИЕ

Быстровский вибросейсмический полигон, расположенный в Новосибирской области, характеризуется тем, что на его территории палеозойский фундамент Западно-Сибирской плиты, перекрытый рыхлыми четвертичными отложениями, залегает на глубине около 10 м.

На рисунке 1 представлен фрагмент геологической карты Новосибирской области, на котором красной стрелкой указано расположение полигона. Практически на всем побережье Новосибирского водохранилища под четвертичными отложениями залегают породы турнейского яруса нижнего карбона

C₁t, представленные темно-серыми глинистыми сланцами мощностью 150–200 м, в которых встречаются прослои песчаников и линзы известняков. Залегание согласное.



Рис. 1. Фрагмент геологической карты Новосибирской области. Красной стрелкой указано расположение полигона

В настоящее время наибольший научный и практический интерес с точки зрения поисковоразведочных работ в Западной Сибири представляют интервалы палеозойского фундамента. Однако анизотропия сланцев, слагающих фундамент, представляет существенные трудности в их исследовании, и Быстровский полигон дает возможность разрабатывать методы проведения сейсмических работ и обработки данных в условиях, когда эти анизотропные породы залегают на малой глубине.

Использование многоволновых наблюдений позволяет однозначно обнаружить анизотропию среды. В анизотропной среде вдоль произвольного направления могут распространяться одна квазипродольная и две квазипоперечные волны с различной поляризацией и различными скоростями. Одну из этих поперечных волн называют быстрой (*S*₁), а другую медленной (*S*₂). При падении на границу анизотропного слоя поперечной волны с произвольной поляризацией происходит расщепление *S*-волн, которое и является признаком наличия анизотропии. Это явление известно как двойное лучепреломление. Параметры поляризации расщепленных поперечных волн связаны с характеристиками анизотропной среды [Сгатріп, Lovell, 1991].

При обработке данных ВСП скважины глубиной 100 м, расположенной на Быстровском вибросейсмическом полигоне, был проведен поляризационный анализ поперечных волн с целью изучения анизотропии геологического разреза [Горшкалев, Карстен, 2020]. Результаты обработки дали возможность разделить интерферирующие волны S_1 и S_2 и получить скоростную характеристику разреза на трех типах волн. На глубине 100 м Δ t между волнами S_1 и S_2 достигает 14 мс, вектор смещения волны S_1 имеет азимут 185°, а $k = V_{S_1}/V_{S_2}$ достигает значения 1.23, что является явным критерием наличия сильной азимутальной анизотропии.

На основании полученных данных была составлена трехслойная горизонтально-слоистая модель анизотропной верхней части разреза на Быстровском вибросейсмическом полигоне, включающая в себя

трансверсально-изотропные, с горизонтальной осью симметрии, слой и полупространство. Параметры модели приведены в табл. 1.

Таблица 1

a, M	H, M	а али,	а али,	CTb,	Коэффициенты анизотропии		
Подоше	Кровля	V _P н. вертика км/с	V _S H _S Вертика км/с	Плотно т/м ³	$arepsilon^{arepsilon}$	δ٧	γ ^v
10		0.4	0.26	1.8			
30	10	2.655	0.85	2.0	-0.108	-0.127	0.138
	30	4.294	2.15	2.6	-0.108	-0.159	0.138

Модель анизотропной верхней части разреза на Быстровском вибросейсмическом полигоне

МЕТОДИКА НАБЛЮДЕНИЙ МПВ

Полученные данные о скоростной модели среды по данным ВСП показали, что слоистая модель характеризуется возрастанием скоростей с увеличением глубины на всех типах волн [Горшкалев, Карстен, 2020]. Этот факт послужил основанием для планирования наблюдений методом преломленных волн (МПВ) с целью изучения зависимости скоростей этих волн от азимута профиля.

Схема расположения профилей на полигоне приведена на рис. 2. Скважина ВСП находится на расстоянии около 400 м от точки пересечения профилей.



Рис. 2. Расположение профилей при трехкомпонентных наблюдениях на головных волнах



Рис. 3. Система наблюдений на профиле 1

Наиболее представительную систему наблюдений удалось реализовать на профиле 1, поскольку он является наиболее протяженным. Эта система наблюдений приведена на рис. 3.

На каждом пункте возбуждения (ПВ) осуществлялось три типа воздействия. Вертикальное *Z*-воздействие было реализовано в виде падающего груза массой ≈100 кг с высоты ≈1.3 м. Источником колебаний поперечных волн служили горизонтальные инверсионные ± воздействия, которые были реализованы в виде горизонтального удара по торцу шпалы, пригруженной передним мостом автомобиля для лучшего контакта с грунтом. Направление *X*-воздействия совпадало с направлением профиля, а *Y*-воздействие производилось в перпендикулярном направлении. Ориентация направлений воздействия и приема показаны на рис. 4.

На каждом ПВ производились повторные воздействия, количество которых зависело от диапазона удалений источник–приемник и уровня помех, для возможности проведения накоплений в процессе обработки. Отметка момента воздействия осуществлялась с помощью контрольного прибора, который устанавливался в месте падения груза для *Z*-воздействия, и в середине шпалы для горизонтальных воздействий.





ОПИСАНИЕ ВОЛНОВОЙ КАРТИНЫ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ МПВ

Обработка данных проводилась с использованием обрабатывающей системы ВСП «VSPLab», разработанной в Институте нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН [Горшкалев и др., 2009].

Первым шагом обработки было накопление повторных воздействий с целью увеличения соотношения сигнал/помеха и уменьшения влияния неидентичности ударных воздействий.

Для описания волновой картины логично использовать две сейсмограммы с профиля 1 с выносом источника относительно линии наблюдения (0 и –160 м). На рисунке 5 представлены сейсмограммы *Z*-воздействия с этих ПВ. В обозначении компонент волнового поля используется следующая индексация: *Zx*, где прописным символом обозначается направление воздействия, а строчным – направление приема.

Из головных волн, зарегистрированных при *Z*-воздействии с ПВ 0, в первых вступлениях доминирующую интенсивность имеет головная волна типа *PPP*, которая регистрируется на *Zz*-компоненте волнового поля. На этой же компоненте регистрируются кратные головные волны *PPP*, которые теряют высокие частоты при дополнительном двукратном пересечении слабо сцементированного верхнего слоя четвертичных отложений, но имеют одинаковые с однократной головной волной кажущиеся скорости.

На компоненте *Zx* наблюдается интенсивный интерференционный цуг закритически отраженных продольных волн, асимптотой которых является скорость *P*-волны в верхнем слое. Ввиду того что мощность этого слоя составляет около 10 м, вектора смещения этих волн имеют большую горизонтальную составляющую, и их интенсивность выше, чем на компоненте *Zz*.

На времени около 200 мс регистрируется головная волна *PSS*. При падении на кровлю анизотропного слоя под критическим углом преломленная *S*-волна расщепляется на *S*₁ и *S*₂, которые имеют одинаковую форму импульса, взаимно ортогональные поляризации и различные скорости распространения. Каждая из этих волн генерирует свою головную волну. В результате на горизонтальных компонентах *x* и *y* регистрируются импульсы, представляющие интерференцию этих волн. Форма этого интерференционного импульса и его амплитуда определяются задержкой Δt между волнами *S*₁ и *S*₂.

Следует заметить, что в изотропной горизонтально-слоистой среде при симметричном *Z*воздействии на *y*-компоненте мы бы имели нулевую амплитуду всех волн. Это является однозначным свидетельством наличия азимутальной анизотропии палеозойского фундамента. На ближних удалениях интенсивность головных волн преобладает на *x*-компоненте, но в интервале 120–145 м их интенсивности на обеих горизонтальных компонентах выравниваются. При существенном увеличении удалений (на 160 м, рис. 5б) интенсивность этих волн на *y*-компоненте начинает преобладать.

Такие вариации интенсивности вызваны изменением формы интерференционного импульса с ростом задержки между волнами S_1 и S_2 при увеличении удаления источник–приемник. Поскольку поляризация волн S_1 и S_2 взаимно ортогональна, при Δt , соответствующем целому числу основных периодов сигнала, импульсы будут складываться на *x*-компоненте и вычитаться на *y*-компоненте. При увеличении сдвига на половину периода, наоборот, импульсы будут складываться на *y*-компоненте. Аналогичные вариации амплитуды можно наблюдать на синтетических сейсмограммах (рис. 6), полученных моделированием полного волнового поля в анизотропной верхней части разреза в модели, представленной в табл. 1.



Рис. 5. Трехкомпонентные сейсмограммы при вертикальном *Z*-воздействии: а – ПВ 0, б – ПВ –160. Профиль 1.



Рис. 6. Моделирование полного волнового поля. Горизонтальные компоненты при вертикальном *Z*-воздействии



Рис. 7. Сопоставление сейсмограммы *Xx* для (+) воздействия (серым цветом) и (-) воздействия (коричневым цветом). Профиль 1

Важным этапом обработки для горизонтальных воздействий является вычитание разнонаправленных ± воздействий [Лебедева и др., 1965], которое позволяет выделить поле волн, обладающих фазовой инверсией, и подавить излучаемые источником волны, которые возникают в источнике от эффектов не чисто реализованного горизонтального воздействия. Любой взрывной источник поперечных волн генерирует нисходящую продольную волну. Работа [Лебедева и др., 1965] дала возможность подавлять эту продольную волну, исходящую из источника и осложняющую волновое поле продольными и обменными *PS*-волнами, за счет вычитания разнонаправленных воздействий.

На рисунке 7 представлены сейсмограммы *Xx* для (+) воздействия (серым цветом) и (–) воздействия (коричневым цветом) с профиля 1. На них хорошо заметна поперечная головная волна типа SSS, характеризующаяся временем около 250 мс и более низкой, в сравнении с головными продольными волнами, кажущейся скоростью. Видна практически точная противофазность импульсов этой волны при воздействиях разного знака. Процедура вычитания воздействий позволила существенно очистить поле отраженных от головных поперечных волн.

Тем не менее эта процедура не предназначена для подавления всех продольных волн. Источник типа горизонтальной силы, направленной вдоль линии наблюдения (*X*-воздействие), генерирует интенсивную продольную волну в направлении профиля, которая при ± воздействиях обладает фазовой инверсией и выделяется процедурой вычитания этих воздействий. Очевидно, что в этом случае вычитание разнонаправленных воздействий не приведет к подавлению продольной волны, поскольку она тоже обладает фазовой инверсией.

На рисунках 8 и 9 приведены трехкомпонентные сейсмограммы с профиля 1 при *X*- и *Y*воздействии, соответственно. Индекс Δ перед индексом компоненты означает, что сейсмограмма получена в результате вычитания разнонаправленных воздействий. На сейсмограммах ΔXz прослеживаются головные продольные волны, что свидетельствует о том, что они тоже обладают фазовой инверсией. На сейсмограмме с выносного ПВ –160 в первых вступлениях головные *PPP* волны уверенно регистрируются только на ближних к ПВ точках наблюдения. При увеличении удаления их интенсивность становится соизмеримой с фоном помех. Однако с задержкой около 40 мс регистрируется интенсивная ось синфазности с кажущейся скоростью продольной головной волны. Следовательно, вдоль границы преломленная волна распространяется как продольной головной волны. Следовательно, вдоль границы преломленная волна распространяется как продольной. Таким образом, эта волна является головной волной типа *SPP* (рис. 8). Эта волна по своей амплитуде в пять раз превышает амплитуду монотипной волны *PPP*, что объясняется уменьшением критического угла при обмене *SP*, в результате чего проекция вектора смещения *S*-волны на вектор смещения преломленной *P*-волны становится больше, чем у монотипной волны. С задержкой около 130 мс регистрируется кратная головная волна того же типа.

Головные волны SSS имеют сопоставимые амплитуды на горизонтальных компонентах, что однозначно свидетельствует о наличии азимутальной анизотропии палеозойского фундамента. Так как преломленные S-волны расщепляются на S₁ и S₂, то интерференционный импульс головных волн изменяет свою форму в зависимости от удаления и происходит перекачка энергии их суммарных сигналов с одной горизонтальной компоненты на другую.

Наиболее интенсивными импульсами на сейсмограммах являются импульсы закритически отраженных продольных волн от первой границы на *Xx*-компоненте, т. к. они обладают фазовой инверсией при этом типе воздействия, и волны Релея на *x*- и *y*-компонентах.

26



Рис. 8. Трехкомпонентные разностные сейсмограммы при горизонтальном *X*-воздействии. а – ПВ 0, б – ПВ –160. Профиль 1



Рис. 9. Трехкомпонентные разностные сейсмограммы при горизонтальном У-воздействии. а – ПВ 0, б – ПВ –160. Профиль 1.



Рис. 10. Сейсмограммы, полученные при вычитании + и – воздействий на профиле 2 на пункте возбуждения 0 при *X*-и У-воздействиях. Красной линией изображен фазовый годограф поперечной головной волны

На Ху-компоненте наиболее интенсивными являются импульсы закритически отраженных поперечных волн, асимптотой которых является скорость поперечной волны в верхнем слое. Это тоже

является свидетельством азимутальной анизотропии фундамента, т. к. в изотропной горизонтальнослоистой среде их интенсивность была бы равна нулю.

При У-воздействии доминирующей по интенсивности является волна Лява, которая регистрируется на у-компоненте (рис. 9).

Менее интенсивной и регулярной является запись этой волны на x- и z-компонентах, но сам этот факт был бы невозможен в изотропной среде. Самое большое удивление вызывает интенсивная волна *SPP*, которой не могло бы существовать в изотропной среде. Единственным объяснением этого экспериментального факта является существенная проекция падающей поперечной волны на вектор смещения преломленной продольной, который в азимутально-анизотропной среде не совпадает с направлением распространения этой продольной волны.

Головные поперечные волны типа SSS, как и при *X*-воздействии, регистрируются на обеих горизонтальных компонентах. Их импульсы, которые носят интерференционный характер, по своей интенсивности преобладают на *у*-компоненте.

На профиле 3 (рис. 2) характер волновой картины аналогичен описанному на профиле 1.

Совершенно иной характер поляризации головных волн SSS наблюдается на профиле 2. Этот профиль перпендикулярен профилю 1 и, по поверхностным условиям (рис. 2), длина линии наблюдения составляет 115 м. При этом нет возможности реализации выносных ПВ, поскольку один край профиля упирается в лес, а другой – в обрывистый берег.

На рисунке 10 приводятся разностные сейсмограммы горизонтальных воздействий на профиле 2. Из фона интенсивных помех головные волны SSS выходят в интервале наблюдений 90–115 м. При этом они регистрируются только на основных компонентах (*Xx* и *Yy*), т. е. на компонентах, параллельных направлению воздействия. На побочных компонентах (*Xy* и *Yx*) регулярных записей этих волн не наблюдается.

Это свидетельствует о том, что наблюдения проведены в плоскости симметрии анизотропной среды, поскольку при У-воздействии генерируется только волна *S*₁, а при *X*-воздействии только *S*₂. Разница времен достигает 10 мс. При этом и кажущаяся скорость волны *S*₁ оказывается выше, а вектор смещения является субмеридиональным, как и при ВСП.

Поскольку на ортогональном направлении (профиль 1) поляризация этих волн является сложной, то очевидно, что анизотропная среда имеет только одну вертикальную плоскость симметрии, что соответствует моноклинной симметрии анизотропной среды, которая описывается 13 независимыми упругими постоянными.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ

Обработка сейсмограмм производилась в обрабатывающем пакете «VSPLab» [Горшкалев и др., 2009]. На первом этапе обработки осуществлялось накопление повторных воздействий на каждом ПВ с целью увеличения соотношения сигнал/помеха и подавления случайных шумов.

После этой процедуры осуществлялась корреляция и построение годографов первых вступлений, по которым определялись невязки во взаимных временах для сейсмограмм из ПВ, расположенных на линии наблюдения. Процедура минимизации невязок по совокупности восьми сейсмограмм позволила

30

избавиться от погрешностей в определении момента ударного воздействия. После нее все невязки не превышали 1 мс.

На рисунке 11 приведена совокупность этих годографов после увязки. Обработка годографов осуществлялась в Excel.

По годографам прямой волны определялась скорость в верхнем слое, она усреднялась по встречным годографам. Значения скоростей в верхнем слое изменялось от 400 до 340 м/с по мере увеличения пикетов профиля.

Точки излома годографов первых вступлений определялись по разнице нагоняющих и нагоняемых годографов. На рисунке 11 черным выделены интервалы прослеживания первой головной волны на всех годографах, которые использовались для составления сводных годографов.

Для определения скоростной модели среды использовался метод t'_0 [Hagedoorn, 1959], подробно изложенный в [Гурвич, Боганик, 1980]. Годографы для определения скоростей и построения границ приведены на рис. 12 и 13. В результате были построены сводные годографы (прямой и встречный) первой головной волны. Ввиду того что скорость в первом слое вдоль профиля изменяется, коэффициент

$$k = rac{V_{
m rp}^2 V_{
m cp}^2}{2 \sqrt{V_{
m rp}^2 - V_{
m cp}^2}}$$
 для определения эхо-глубин преломляющей границы тоже меняется вдоль профиля.

Скорость прямой волны входит в коэффициент как $V_{
m cp}$. Далее были построены разностный годограф и линия t_0' .

140 120 100 물 80 Время, г 60 40 20 0 20 40 100 120 140 0 60 80 Расстояние по профилю, м

Рис. 11. Совокупность годографов первых вступлений после увязки во взаимных временах. Черным выделены интервалы прослеживания первой головной волны на всех годографах, которые использовались для составления сводных годографов



Рис. 12. Совокупность годографов для построения первой границы

Граничная скорость для первой границы, определенная по аппроксимации прямой разностного годографа, составила 2535 м/с. Эхо-глубины вычислялись как $h_1 = k t_0'$. В результате была построена первая граница с эхо-глубинами от 11.5 до 9 м.

Для построения второй границы использовалась совокупность годографов, приведенных на рис. 13. Граничная скорость для второй границы, определенная по аппроксимации прямой разностного годографа, составила 3982 м/с. Эффективные скорости до второй границы были получены по точкам излома годографов, соответствующих смене в первых вступлениях первой головной волны на вторую, соответствующих пунктам возбуждения ПВ 0 и ПВ 145, значения которых составили 977 и 955 м/с соответственно. Полученные скорости были отнесены к середине базы, на которой они были рассчитаны. Между этими точками проводилась интерполяция эффективных скоростей, а на краях профиля эти скорости оставались постоянными.

Эхо-глубины на первом этапе были рассчитаны с использованием этих эффективных и граничной скорости. Поскольку вместо средних скоростей для построения второй границы использовались эффективные, которые заведомо выше, то глубина второй границы оказалась завышена относительно ее действительного положения. Для того чтобы сделать разрез более близким к реальности были посчитаны средние скорости в каждой точке профиля по уже известным глубинам границ и переменным скоростям. С их использованием были снова пересчитаны глубины границы. Такая процедура повторялась пять раз, после чего глубина границы практически перестала меняться.

Итоговый разрез эхо-глубин представлен на рис. 14.





Рис. 13. Совокупность годографов для построения второй границы



Рис. 14. Итоговый разрез эхо-глубин и значения пластовых скоростей

Следует заметить, что глубины границ по данным головных волн и данным ВСП [Горшкалев, Карстен, 2020] хорошо совпадают, несмотря на то что альтитуда устья скважины ниже на 4–5 м.

На профилях 2 и 3 обработка данных по продольным волнам осуществлялась аналогичным образом. Отличие от профиля 1 заключалось только в возможности реализации выносных источников возбуждения. Так, на профиле 3 в сторону отрицательных пикетов максимальный вынос источника составил только 40 м, а на профиле 2 даже длина расстановки приборов составила только 115 м. Это обстоятельство привело к тому, что на профиле 3 граничные скорости были определены не на полной длине расстановки, а на профиле 2 не удалось получить встречные годографы второй головной волны.

Сопоставление скоростей продольных головных волн на профилях и полученных по данным ВСП [Горшкалев, Карстен, 2020] приведены в табл. 2.

Таблица 2

Номер профиля	Скорость <i>Р</i> -волны во 2 слое	Скорость <i>Р</i> -волны в 3 слое
1	2535 м/с	2982 м/с
2	2522 м/с	-
3	2244 м/с	3225 м/с
	22.12	0.450 /
BCII	2318 м/с	3456 м/с

Сопоставление скоростей Р-волн по разным направлениям

При проведении наблюдений на профилях (рис. 2) скорости определялись по головным волнам и, следовательно, они соответствуют горизонтальным скоростям в направлении профиля. Минимальные значения скоростей продольных волн были получены на профиле 3, а максимальные на профиле 1. Их отношение V_{P_1}/V_{P_3} для верхнего анизотропного слоя составляет 1.13, а для второго анизотропного слоя 1.23. Скорости в вертикальном направлении, полученные по ВСП, занимают промежуточное значение. Следует отметить, что коэффициент $k = V_{S_1}/V_{S_2}$, полученный по данным ВСП, в этих слоях хорошо совпадает с максимальным отношением скоростей продольных волн на профилях.

Гораздо сложнее оказалась волновая картина на поперечных головных волнах. Если на первой границе при преломлении S-волны в первый анизотропный слой образуются волны S_1 и S_2 , то, соответственно, возникают головные волны $S^1S_1^2S^1$ и $S^1S_2^2S^1$, где верхний индекс обозначает номер слоя, а нижний – тип волны. При образовании головных S-волн на второй границе их число удваивается. Образуются четыре головных волны $S^1S_1^2S_1^3S_1^2S^1$, $S^1S_2^2S_1^3S_2^2S^1$, $S^1S_1^2S_2^3S_1^2S^1$ и $S^1S_2^2S_2^3S_2^2S^1$. Годографы головных волн, рассчитанные по скоростной модели ВСП, приведенной в табл. 1, представлены на рис. 15.

Следует заметить, что каждая из четырех головных волн будет иметь свою поляризацию и интенсивность. Наиболее интенсивными должны быть головные волны $S^1S_1^2S_1^3S_1^2S^1$ и $S^1S_2^2S_2^3S_2^2S^1$, поскольку они не меняют свой тип при переходе через границу, а коэффициенты прохождения при переходе $S_1 \rightarrow S_2$ и наоборот должны быть существенно меньше. Однако при столь сильной анизотропии эти коэффициенты могут быть значимыми и осложнять поляризацию суммарного сигнала.

Авторы не приводят на рис. 15 годографы третьих головных S-волн, которые имеют бо́льшее время и удаление в точках головления и бо́льшие кажущиеся скорости. Заметим, что таких головных волн будет уже восемь. Все их годографы будут пересекать годографы головных волн от двух вышележащих границ. При их добавлении на рис. 15 он станет нечитаемым. Что касается интенсивности головных S-волн, то наиболее интенсивными должны быть волны $S^1S_1^2S_1^3S_1^4S_1^3S_1^2S^1$ и $S^1S_2^2S_2^3S_2^4S_2^3S_2^2S^1$.



Рис.15. Годографы головных волн, рассчитанные по скоростной модели ВСП

Таким образом, пересечение годографов всех головных S-волн приводит к очень сложной интерференционной картине, в которой все способы поляризационного анализа, успешно работающие в ВСП, становятся неработоспособными.

Единственным способом уменьшения интерференции является переход на большие удаления, при которых группы головных волн от разных границ разделятся во времени регистрации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты обработки данных на Быстровском вибросейсмическом полигоне однозначно свидетельствуют о наличии существенной азимутальной анизотропии палеозойского фундамента. По данным ВСП была получена скоростная модель по трем типам волн и выделено четыре азимутально анизотропных слоя в пределах фундамента, на границах которых изменяются значения скоростей и коэффициентов анизотропии. При этом тип симметрии этих слоев не меняется с глубиной. Коэффициент $k = V_{S_1}/V_{S_2}$, полученный по данным ВСП, составил 11 для верхнего слоя фундамента и 1.2 для нижних слоев. Азимут вектора смещения волны S_1 составил 185°. Данный факт свидетельствует об эффективности метода ВСП для решения этой задачи.

При проведении наблюдений на профилях скорости определялись по головным волнам и, следовательно, они соответствуют горизонтальным скоростям в направлении профиля. Минимальные

значения скоростей продольных волн были получены на профиле 3, а максимальные на профиле 1. Их отношение V_{P_1}/V_{P_3} для верхнего анизотропного слоя составляет 1.13, а для второго анизотропного слоя 1.23. Для продольных волн такое изменение скоростей в зависимости от азимута распространения является очень существенным и говорит об очень сильной анизотропии фундамента.

Множество головных поперечных волн, возникающих на всех границах, и их сложная интерференция не позволили провести поляризационный анализ этих волн и определить степень их изменения в зависимости от азимута. Разработанные на настоящий момент способы поляризационного анализа не позволяют решить задачу разделения волн *S*₁ и *S*₂ в такой сложной модели среды в методе головных волн. Таким образом, проведенные эксперименты показали необходимость разработки новых способов поляризационного анализа и дали новое направление развития способов обработки.

Однако на профиле 2, который находится в вертикальной плоскости симметрии анизотропной среды, удалось зарегистрировать в чистом виде головные волны от второй границы, которые генерируются преломленной волной *S*₁ (на сейсмограмме ΔYy) и волной *S*₂ (на сейсмограмме ΔXx). Вектор смещения быстрой волны перпендикулярен профилю, время ее регистрации меньше на 10 мс, а кажущаяся скорость имеет бо́льшее значение. Поскольку профиль проходит в широтном направлении, то поляризация этой волны имеет меридиональное направление, что совпадает с данными ВСП.

В методическом плане, для решения задачи определения упругих постоянных палеозойского фундамента в пределах полигона необходима очень детальная система наблюдений, с обязательным использованием ВСП. Оптимальным решением являлось бы бурение скважины глубиной 100–120 м, расположенной на пересечении профилей и просвечивании ее с ПВ, расположенных на разных удалениях в различных азимутах. Бурение этой скважины с отбором керна позволило бы не только определить эффективные упругие постоянные среды, но и соотнести их с параметрами трещиноватости данного объекта исследования.

ЛИТЕРАТУРА

Гурвич И.И., Боганик Г.Н. Сейсмическая разведка. – М.: Недра, 1980. – 552 с.

Горшкалев С.Б., Карстен В.В. Результаты изучения методом ВСП азимутальной анизотропии палеозойского фундамента на Быстровском вибросейсмическом полигоне // Геофизические технологии. – № 4. – 2020. – С. 42–49, doi: 10.18303/2619-1563-2020-4-42.

Горшкалев С.Б., Карстен В.В., Полухин Л.Г. Свидетельство государственной регистрации программы для ЭВМ № 2009613124 "VSPLab", 2009.

Лебедева Г.Н., Лебедев К.А., Пузырев Н.Н. Селекция сейсмических волн по признаку поляризации для источников с горизонтальной направленностью // Методика сейсморазведки. – М.: Наука, 1965. – С. 127– 135.

Hagedoorn J. The plus-minus method of interpreting seismic refraction sections // Geophysical prospecting. – 1959. – Vol. 7 (2). – P. 158–182, doi: 10.1111/j.1365-2478.1959.tb01460.x.

Crampin S., Lovell J.H. A decade of shear-wave splitting in the Earth's crust: what does it mean? What use can we make of it? And what should we do next? // Geophysical Journal International. – 1991. – Vol. 107 (3). – P. 387–407, doi: 10.1111/j.1365-246X.1991.tb01401.x.

REFERENCES

Crampin S., Lovell J.H. A decade of shear-wave splitting in the Earth's crust: what does it mean? What use can we make of it? And what should we do next? // Geophysical Journal International. – 1991. – Vol. 107 (3). – P. 387–407, doi: 10.1111/j.1365-246X.1991.tb01401.x.

Gorshkalev S.B., Karsten W.V. Results of studying the azimuthal anisotropy of the Paleozoic basement with VSP technique at the Bystrovka vibroseismic test site // Russian Journal of Geophysical Technologies. – 2020. – Vol. 4. – P. 42–49. doi: 10.18303/2619-1563-2020-4-42.

Gorshkalev S.B., Karsten W.V., Polukhin L.G. State Registration Certificate for the Computer Program № 2009613124 VSPLab, 2009.

Gurvitch I.I, Bogannik G.N. Seismic prospecting [in Russian]. - Moscow: Nedra, 1980. - 551 p.

Hagedoorn J. The plus-minus method of interpreting seismic refraction sections // Geophysical Prospecting. – 1959. – Vol. 7 (2). – P. 158–182, doi: 10.1111/j.1365-2478.1959.tb01460.x.

Lebedeva G.N., Lebedev K.A., Puzyrev N.N. Seismic waves selection using the polarization criterion for horizontal directional sources // Seismic prospecting techniques [in Russian]. – Moscow: Nauka. – 1965. – P. 127– 135.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

ГОРШКАЛЕВ Сергей Борисович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории многоволновых сейсмических исследований ИНГГ СО РАН. Основные научные интересы: сейсмическая анизотропия, поляризационный анализ, ВСП, инверсия сейсмических данных.

КАРСТЕН Владимир Викторович – научный сотрудник лаборатории многоволновых сейсмических исследований ИНГГ СО РАН. Основные научные интересы: сейсмическая анизотропия, ВСП, инверсия сейсмических данных.

ДЕРГАЧ Петр Александрович – научный сотрудник лаборатории динамических проблем сейсмики ИНГГ СО РАН. Основные научные интересы: локальный сейсмический мониторинг, инженерная сейсморазведка, создание и тестирование регистрирующей аппаратуры.

> Статья поступила в редакцию 17 марта 2021 г., принята к публикации 17 августа 2021 г.