

ОПРЕДЕЛЕНИЕ АНИЗОТРОПИИ СКОРОСТЕЙ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ ЗЕМНОЙ КОРЫ ПО ДАННЫМ КМПВ И ЛАБОРАТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ГОРНЫХ ПОРОД ИЗ СКВАЖИН ПРИ ВЫСОКИХ ТЕРМОБАРИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

И.Б.Сафаров¹, О.К.Новрузов², Т.М.Имамалили¹

¹ Институт геологии и геофизики, НАНА

² SOCAR, Управление Геофизики и Геологии

Ключевые слова: импульсный ультразвуковой метод; магматические и метаморфические породы; упругая анизотропия; скорость; продольные волны; установка высокого давления; скважина; проницаемость

Аннотация. Импульсным ультразвуковым методом в модифицированной твердофазной установке высокого давления до 1,5 ГПа, определена упругая анизотропия магматических и метаморфических горных пород. Анизотропия определялась из скоростей продольных волн. Для магматических и метаморфических горных пород оценены максимальные величины коэффициента упругой анизотропии в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Для изучения упругой анизотропии в полевых условиях и на образцах горных пород были выбраны скважины, расположенные в Припятской впадине Белоруссии. Вначале, на основе сейсморазведочных работ по методике КМПВ (корреляционные методы преломленных волн), была обнаружена и изучена анизотропия скоростей упругих волн верхнего слоя земной коры. Из скважин в районах работ были отобраны образцы магматических и метаморфических горных пород и изучены в них анизотропия скоростей упругих волн при высоких термобарических условиях. Исследованные метаморфические горные породы характеризуются высокой упругой анизотропией. А что касается магматических горных пород, они обладают невысокой упругой анизотропией. В магматических горных породах, коэффициент анизотропии для скорости продольных волн, при высоких давлениях до 1,5 ГПа, составляет – 0,6 - 2,6%, а для метаморфических горных пород от 6,9% до 13,5%.

Введение. Важной практической задачей ряда наук о Земле является разработка научного прогнозирования месторождений минеральных полезных ископаемых. В настоящее время месторождения нефти и газа разведываются и разраба-

тываются до глубины 5 - 6 км. Поэтому закономерен большой интерес геологов к составу и строению более глубоких частей земной коры.

Применение геофизических методов удешевляет и ускоряет процесс геологоразведочных работ, позволяет открывать и изучать месторождения полезных ископаемых на больших глубинах, недоступных для других видов геологических исследований. Одним из таких геофизических методов является исследование анизотропии физических свойств недр Земли.

За последние годы различными методами сейсмологии и сейсморазведки проведено много исследований, которые показали существование анизотропии сейсмических волн в земной коре материков и океанов. В сейсморазведке данные об упругой анизотропии скоростей используются при построении скоростной модели среды, миграции и инверсии сейсмических записей, геосейсмическом моделировании, при поисках глубокозалегающих месторождений полезных ископаемых и т. п. Результаты обработки и интерпретации данных сейсмики с учетом анизотропных свойств среды свидетельствуют о высокой эффективности применения этого параметра [4, 9, 10, 15, 16, 17].

Методика проведения экспериментов. Эксперименты проводились в твердофазной установке высокого давления типа цилиндр - поршень по методике, разработанной ранее [Воларович М.П. и др., 1974; Сафаров И.Б. 2011]. Эта методика предусматривает одновременное определение скоростей упругих волн, а также плотности в процессе одного опыта на одном образце горных пород при высоких термобарических

режимах. Скорости упругих волн в образцах горных пород измерялись нами импульсным методом ультразвукового прозвучивания.

Для преобразования ультразвуковых колебаний на поверхность наковальной камеры высокого давления, наклеены датчики из пьезокерамики ЦТС с собственной частотой колебаний 1 - 2 МГц. Для исследования анизотропии скоростей упругих волн при высоких давлениях, из горных пород, было подготовлено по два образца, вырезанных во взаимно перпендикулярных направлениях.

Для экспериментов образцы горных пород изготавливаются в виде цилиндров длиной 20 мм и диаметром 17,5 мм. Скорости упругих волн и плотность образцов определяются вначале при атмосферном давлении. Затем образцы помещаются в свинцовую оболочку и вставляются в цилиндрический канал камеры высокого давления между поршнями.

После обжатия в камере высокого давления образец с оболочкой и уплотнительными кольцами составляет сплошной цилиндр, полностью занимающий объем канала камеры между поршнями. После опыта образец осторожно вынимается из камеры высокого давления и измеряется его длина в свинцовой оболочке. Относительная ошибка измерения физико - механических свойств горных пород, при высоких термобарических условиях, соответственно, не превышает 1,2 - 1,8 %.

Результаты исследований и их обсуждение.

Анизотропию верхней части кристаллического фундамента земной коры объясняют влиянием ряда факторов: тектонической особенностью изучаемого района, сланцеватостью пород, трещиноватостью, напряженным состоянием массива. Указанные факторы разномасштабные, а величина коэффициента анизотропии в разных блоках массива различна, вследствие чего нельзя механически переносить результаты, полученные при одном масштабе на другие. Изучая влияние масштабного фактора на упругую анизотропию (на образцах и в полевых условиях), удается оценить роль разных причин [11, 13, 14].

Исследование земной коры, продвинутое в последнее время прямыми методами получения образцов горных пород из больших глубин посредством сверхглубоких скважин, позволяет уточ-

нить наши представления о структуре геопространства, вскрытого разрезами Саатлинской СГ - 1 и Кольской СГ - 3, по крайней мере, в пределах до 8 - 12 км.

Поэтому имеется острая необходимость исследования сейсмической анизотропии в верхних частях земной коры, поскольку эти зоны являются наиболее перспективными для поиска более глубокозалегающих месторождений углеводородных месторождений и полезных ископаемых. При этом было показано, что для реальных сред возможно применение теории сейсмической квазианизотропии. Рассматривается природа сейсмической анизотропии верхней части континентальной земной коры [5, 7, 9, 10].

а) Припятская впадина. Аналогичные исследования были проведены для изучения упругой анизотропии верхней части консолидированной земной коры в Белоруссии, где были выбраны два участка докембрийского фундамента кристаллического массива [8].

Фундамент на участках сейсмических наблюдений залегает практически горизонтально на глубинах 250 - 300 м и характеризуется однородностью вещественного состава верхней его части и отсутствием тектонических напряжений.

Работы проводили с использованием сейсморазведочной аппаратуры «Поиск - 1 - 48» КМПВ (корреляционный метод преломленных волн) по методике, которая была положена в основу метода, описанного в работе [6, 7, 9], а именно измерение скорости проводилось на системах различно ориентированных по азимуту продольных профилей с учетом горизонтальной неоднородности среды (*рис. 1*).

На первом участке исследований (Гродненская обл.) анизотропия скорости упругих волн не была обнаружена. Как выяснилось, верхняя часть кристаллического фундамента этого участка сложена преимущественно гранито - гнейсами.

б) Брестская область. На втором участке установлена существенная анизотропия скорости упругих волн. Азимут направления максимальной скорости на данном участке ~ 300 СВ. Различие скоростей в двух взаимно перпендикулярных направлениях составляет 600 м/с. Коэффициент анизотропии скорости продольных АР волн достигает величины – 9,8% [8].

Поверхность фундамента на участке исследо-

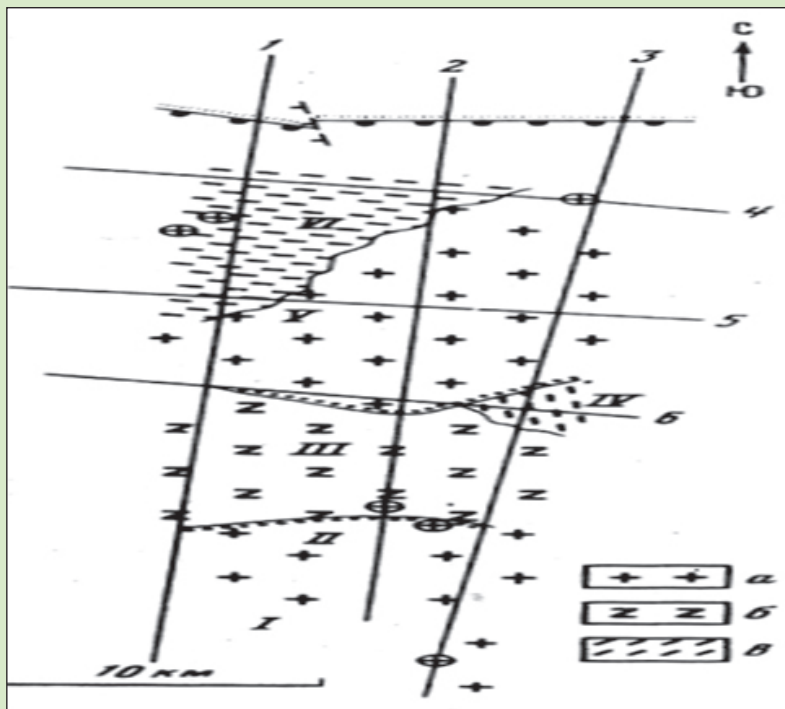


Рис. 1. Схема вещественного состава Припятской впадины. Породы кристаллического фундамента:
а – граниты, б – диориты, в – гнейсы; I – VI – блоки, выделенные по сейсмическим данным; 1 – 6 – сейсмические профили; *кружки – местоположение скважин

вания площадью 700 км² залегает на глубинах 1,6 - 4,5 км, сильно дислоцирована, разбита многими сбросами, преимущественно широтного направления. На данном участке проведены три сейсмических профиля примерно меридионального направления и три широтного направления; расстояние между профилями 3,5 - 6 км (для меридиональных) и 9 - 12 км (для широтных).

В результате сейсмических исследований по значениям скоростей упругих волн и их зависимости от направлений было выделено шесть блоков. При пересечении профилей 3 и 6 было замечено различие скоростей упругих волн (блок IV): по меридиональному профилю скорости продольных V_p волн больше (6,20 - 6,40 км/с), чем по широтному (5,90 - 6,10 км/с). Коэффициент анизотропии $\sim 5\%$.

В блоке VI зависимость скорости от направления наблюдалась на пересечении профилей 1 и 4; 2 и 4, а также 1 и 5. По меридиональным профилям скорости продольных V_p волн составляют – 5,80 - 6,10 км/с, а по широтным – 6,20 - 6,50 км/с. Коэффициент анизотропии скорости продольных волн равен – 6,5 - 6,9%. В других блоках пересече-

кающиеся профили не выявили анизотропии скорости упругих волн. Оказалось, что фундамент на выбранном участке сильно дифференцирован по скоростям упругих волн.

в) Из скважин в районах работ были отобраны образцы горных пород и изучены в них скорости упругих волн при высоких давлениях до 1,5 ГПа. Приведенные скорости продольных V_p волн показали, что в гранитах, гранито-гнейсах и габбро почти не зависят от направления измерения и коэффициент анизотропии скорости продольных AP волн, при давлениях до 1,5 ГПа, для них составляет 0,6 - 2,6%. Коэффициент анизотропии скорости продольных AP волн, при давлениях до 1,5 ГПа, для сланцев варьирует от 3,0 до 13,5%, а для кварцита - гнейсов – от 2,8 до 6,9% [1, 12, 13].

Следовательно, сейсмическая анизотропия кристаллического фундамента Урала может быть связана с ориентацией кристаллических сланцев и гнейсов, а также с анизотропией скорости которых связана с наблюдаемой в массиве сейсмической анизотропией. На основании изучения скоростей сейсмических волн в горных породах и их ориентации может решаться и обратная задача, определение вещественного состава того или иного участка по сейсмическим данным [6, 12].

Такая задача была поставлена в работе, где объектом исследования был фундамент Припятской впадины. Для определения вещественного состава были использованы результаты обобщения скоростей продольных V_p волн для различных горных пород: гранитов, гнейсов, гранодиоритов, диоритов, диабазов, амфиболитов, сланцев и габбро (*рис. 1*) [3].

На рис. 2. приведены графики изменения средних скоростей продольных V_p волн с давлением для разных пород. После математической обработки результатов большого количества образцов каждого типа пород были получены средние значения скоростей. Кривые V_p разделены на

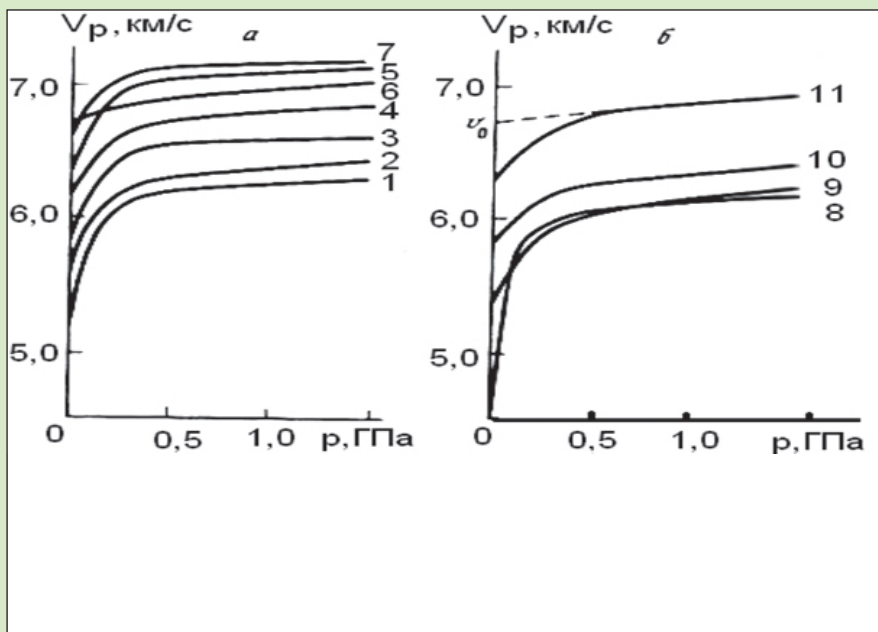


Рис. 2. Графики зависимости средних скоростей продольных V_p волн от давления в образцах пород: 1 – граниты, 2 – гранито-гнейсы, 3 – гранодиориты, 4 – диориты, 5 – амфиболиты, 6 – диабазы, 7 – габбро, 8 – гнейсы, 9 – сланцы, 10 – гнейсы (II), 11 – сланцы (II); пунктир - экстраполяция кривой $V_p(p)$, определение V_0 дано на примере кривой 11

две группы пород: а – не обладающие значительной анизотропией скорости (габбро, диабазы, граниты, диориты, гранодиориты), б – с анизотропией скорости (гнейсы, сланцы).

Анизотропия скоростей продольных V_p волн в сланцах и гнейсах обусловлена тонкой слоистостью этих пород и составляет ~ 3 - 14%. По геологическим данным слоистость пород в Припятской впадине часто близка к вертикальной или крутонаклонной, а поверхность фундамента близка к горизонтальной, поэтому на различно ориентированных профилях скорости различаются. При расположении профиля вдоль слоистости будет измерена скорость V_p (II), в крест V_p .

При бурении скважин на этом участке были вскрыты разные породы. Результаты бурения подтвердили выводы, полученные на основании проведенных исследований. Сопоставление граничных скоростей пород фундамента, вскрытых при бурении скважин, и значений скоростей продольных волн в образцах пород данного состава приведено в работе [1].

Диапазоны измерения граничных скоростей V_g в блоках и доверительные интервалы скорости

V_0 в образцах близки, различие в основном не превышает 200 м/с. Прогноз вещественного состава по блокам с использованием сейсмических данных и скоростей в образцах приведен на рис. 2. Разными обозначениями показаны прогнозируемые породы.

Определено направление слоистости в гнейсах. В блоке IV оно близко к меридиональному, в блоке VI – к широтному. Хорошее соответствие значений V_g и пород, вскрытых скважинами на участке исследований, позволяет предполагать, что выполненный прогноз не очень далек от истины. Наиболее вероятной причиной различий по разным направлениям в блоках IV и VI является наличие

пород с анизотропными свойствами.

В целом, совместные исследования лабораторных и реальных данных (в скважинах) по изучению анизотропии позволяют более достоверно определить эти свойства горных пород верхней части кристаллического фундамента земной коры. Как показано в работах [1, 13], тонкая горизонтальная слоистость, вероятно, больше подходит для объяснения анизотропии скоростей верхней части кристаллического фундамента земной коры.

Выводы.

1. Показано, что полученные в лабораторных условиях данные об анизотропии скоростей упругих волн в горных породах при высоких термобарических условиях, подтверждают наблюдаемую сейсмическую анизотропию в верхних частях кристаллического фундамента земной коры, которую следует учитывать при интерпретации геофизических данных.

2. Отмечается, что в условиях земной коры повышенная упругая анизотропия при пониженных величинах скорости, нетипичных для конкретных пород, должна служить критерием возникнове-

ния разуплотненной зоны.

3. Установлено, что сейсмическая анизотропия горных пород земной коры обусловлена седиментационной слоистостью, макро - и микротрещиноватостью как первичной, так и индуцированной современным напряженным состоянием. Это необходимо учитывать при планировании сейсморазведочных работ в практике поисково-разведочных работ.

4. Обосновано, что полученные в лабораторных условиях при высоких термобарических параметрах и реальные данные об анизотропии скоростей упругих волн в метаморфических породах подтверждают наблюдаемую сейсмическую анизотропию в верхних частях земной коры.

5. Доказано, что в метаморфических породах, величина и характер изменения анизотропии скоростей упругих волн, при высоком давлении зависит от величины и направления слоистости пород.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Баюк Е.И., Волярович М.П., Левитова Ф.М. Упругая анизотропия горных пород при высоких давлениях. – М., Наука, 1982, 170 с.
2. Волярович М.П., Баюк Е.И., Левыкин А.И., Томашевская И.С. Физико-механические свойства горных пород и минералов при высоких давлениях и температурах. – М., Наука, 1974, 223 с.
3. Волянец Л.Н., Волярович М.П., Баюк Е.И. Метод математической обработки экспериментальных значений скорости упругих волн в горных породах при высоких давлениях. – Изв. АН СССР, физика Земли, 1979, № 5, с. 101- 103.
4. Гальперин Е.И. Вертикальное сейсмическое профилирование (2-е изд. доп. и перераб.). – М., Недра, 1982, 344 с.
5. Гамбурцев Г.А., Ризниченко Ю.В., Берзон И.С. и др. Корреляционный метод преломленных волн. – М., Изд. АН СССР, 1952, 240 с.
6. Епинатьева А.М., Александрова Т.А., Баюк Е.И. и др. Прогноз вещественного состава верхней части кристаллического фундамента по величинам граничных скоростей. – Изв. АН СССР, физика Земли, 1980, № 5, с. 42- 55.
7. Невский М.В. Квазианизотропия скоростей сейсмических волн. – М., Наука, 1974, 179 с.
8. Невский М.В. Анизотропия скорости в кристаллическом фундаменте. В кн.: Неоднородность кристаллического фундамента по сейсмическим данным. – М., Наука, 1977, с. 40- 55.
9. Ризниченко Ю.В. О сейсмической квазианизотропии. – Изв. АН СССР, сер. геогр. и геофиз., 1949, 13, № 6.
10. Ризниченко Ю.В. Сейсморазведка слоистых сред. – М., Недра, 1985, 184 с.
11. Савич А.И., Яценко З.Г. Исследование упругих и деформационных свойств горных пород сейсмоакустическим методом. М., Недра, 1979, 214 с.
12. Сафаров И.Б. Петрофизические модели литосферных плит материков и океанов. – Баку, Элм, 2011, 306 с.
13. Сафаров И.Б., Агаев Х.Б., Шахмарданов К.В. Пример изучения упругой анизотропии осадочных пород при лабораторных условиях и в реальной среде. Международный научно-технический, информационный журнал "Нефть и газ Грузии". – Тбилиси, 2009, № 25, с. 14- 24.
14. Safarov I. B., Agaev H.B., Shakhmardanov K.B. How to investigate elastic anisotropy of sedimentary rocks in laboratory and real circumference. – Scientific- technical information- international journal 'GEORGIAN OIL AND GAS', Tbilisi, 2009, № 25, p. 25- 29.
15. Thomsen L. Understanding seismic anisotropy in exploration and exploitation the SEG/ EAGE distinguished instructor short course, Lecture notes, Soc. Expl. – Geoph., Tulsa, 2002, № 5, 240 p.
16. Thomsen L. Weak anisotropic reflection. Offset depended reflectivity- Theory and Practice of AVO Analysis / Ed. by Castagna J.P., Backus M.M. SEG Investigations in Geophysics. 1997, v.8, p.103- 114.
17. Winterstein D.F., and Paulsson B.N.P. Velocity anisotropy in shale determined from cross hole seismic and vertical seismic profile data. – Geophysics, 1990, 55, p. 470 – 479.

I.B.Safarov, O.K.Novruzov, T.M.Imamalili

YÜKSƏK TERMOBARİK ŞƏRAİTDƏ QUYU SÜXURLARI ÜZƏRİNDƏ APARILAN LABORATORİYA ÖLÇÜLƏRİ VƏ SDKÜ MƏLUMATLARINA GÖRƏ YER QABIĞININ YUXARI HİSSƏSİNDƏKİ SEYSMİK DALĞA SÜRƏTLƏRİNİN ANİZOTROPİYASININ TƏYİNİ

XÜLASƏ

1,5 HPa qədər yüksək təzyiqli modifikasiyalı bərk fazalı qurğuda implus ultrasəs üsulu ilə maqmatik və metamorfik süxurların elastik anizotropiyası təyin olunmuşdur. Anizotropiya uzununa dalğaların sürətinə görə təyin olunmuşdur. Maqmatik və metamorfik süxurlar üçün elastiki anizotropiya əmsalının maksimal qiymətləri iki qarşılıqlı perpendikulyar istiqamətdə qiymətləndirilmişdir. Çöl şəraitində və nümunələr üzərində elastiki anizotropiyanı öyrənmək üçün Belarusiyanın Pripyatsk çökəkliyində yerləşən quyular seçilmişdir. Əvvəlcə seysmik kəşfiyyat işlərinin əsasında SDKÜ (sınımış dalğaların korrelyasiya üsulu) metodikası ilə yer qabığının üst qatının elastiki dalğalarının sürətinin anizotropiyası aşkar edilmiş və öyrənilmişdir.

İş aparılan rayonlardakı quyulardan seçilən maqmatik və metamorfik süxur nümunələri üzərində yüksək termobarik şəraitdə elastiki dalğaların anizotropiyası öyrənilmişdir. Tədqiq olunan metamorfik süxurlar yüksək elastik anizotropiya ilə xarakterizə olunur. Maqmatik süxurlara gəldikdə isə onlar aşağı elastiki anizotropiyaya malikdirlər. 1,5 HPa qədər yüksək təzyiqlərdə uzununa dalğaların sürətləri üçün maqmatik süxurlarda anizotropiya əmsalı - 0,6 - 2,6 % metamorfik süxurlarda isə 6,9 %-dən 13,5 %-ə qədər təşkil edir.

I.B.Safarov, O.K.Novruzov, T.M.Imamalili

EVALUATION OF ANISOTROPY OF SEISMIC WAVE VELOCITIES IN UPPER PORTION OF THE EARTH CRUST BASED ON REFRACTION-WAVE METHOD AND LABORATORY TESTS OF ROCKS ACQUIRED FROM WELLS UNDER HIGH THERMAL AND PRESSURE CONDITIONS

ABSTRACT

Elastic anisotropy of igneous and metamorphic rocks was determined by pulse ultrasound in a solid-phase device with high pressure modification up to 1.5 HPa. Anisotropy is defined as the velocity of longitudinal waves. The maximum values of the elastic anisotropy coefficient for magmatic and metamorphic rocks were estimated in two mutually perpendicular directions. To study elastic anisotropy in the field and at the laboratory the core samples from wells in the Pripyatsk depression of Belarus were selected. First, on the basis of seismic surveys, the anisotropy of elastic waves velocity through the upper portion of the Earth's crust was studied by use of the method of refracted waves.

The anisotropy of elastic waves under high thermobaric conditions was studied on magmatic and metamorphic rock samples acquired from wells in the study area. The metamorphic rocks studied are characterized by high elastic anisotropy. As for magmatic rocks, they have low elastic anisotropy. The anisotropy coefficient for longitudinal wave velocities at up to 1.5 HPa high pressures is -0.6 -2.6% in magmatic rocks and from 6.9% to 13.5% in metamorphic rocks.