

**ФЛЮИДЫ В КЛАССИФИКАЦИИ РАЗРЫВНЫХ НАРУШЕНИЙ.
ОТОБРАЖЕНИЕ ФАЗОВОГО СОСТАВА ФЛЮИДА В ЗОНАХ РАЗРЫВНЫХ
НАРУШЕНИЙ В ПАРАМЕТРАХ СЕЙСМИЧЕСКОГО ПОЛЯ
Часть 2**

А.М. Кузин
ИПНГ РАН, e-mail: amkouzin@yandex.ru

Фазовый состав флюида в классификации разрывных нарушений. Отображение в сейсмическом поле разрывных нарушений с различным фазовым составом флюида

К основным параметрам пористых и трещиноватых сред, слагающих зоны разрывных нарушений (РН), относятся: плотность пор и трещин, раскрытость трещин, проницаемость, флюидонасыщенность, фазовое состояние наполнителя, напряженное состояние. Они имеют основополагающее значение в изучении РН. Данные сейсмических наблюдений – это мгновенный образ состояния среды. На него наибольшее влияние оказывает флюид, потому что с флюидом связаны самые значительные изменения в параметрах и характеристиках сейсмического поля, особенно в зонах разрывных нарушений.

В многочисленных классификациях РН, как правило, отсутствует систематизация их по открытости и залеченности, по проницаемости для флюида и его фазовому составу. О большом значении разделения РН по фазовому составу флюида и генезису отмечено в работе [Летников, Балышев, 1991]. В этой работе выделено две зоны, в которых флюиды по-разному влияют на процессы в РН. В первой зоне вода находится в жидкой фазе, что ведет к снижению прочности пород и энергии активации химических элементов в них, увеличению скорости рекристаллизации. Во второй зоне флюид представляет собой смесь газов. Отсюда, авторами выделяется два типа преобразований в тектонитах. Первый тип преобразований характеризуется перекристаллизацией с образованием ориентированной текстуры, упорядоченной относительно поля напряжений, но без фазового изменения состава пород. К этому типу относятся процессы формирования тектонитов по кварцитам, мраморам, расщепление гранитов в гнейсы. Второй тип преобразований характеризуется изменением минерального состава – это синтетектонические метасоматиты, развитие которых сопровождается привнесением и выносом петрогенных и рудных компонентов, образованием сложной структуры среды. Эти два типа преобразований горных пород составляют первую геологическую систематизацию РН по особенностям протекания флюидного процесса.

В классификации РН, помимо их генезиса, не менее существенными являются соотношения внутреннего строения РН с присутствием флюида и его фазовый состав, проницаемость, возможность миграции или конвекции.

По этим параметрам можно предложить следующий вариант классификации РН по отношению к возможности фильтрации (миграции) в нем флюида (рис. 1):

I – РН, залеченные минеральными растворами. Такие РН могут быть разделены на:

- фрагментарно проницаемые (флюид может присутствовать в незначительном объеме, фильтрация или инфильтрация флюида практически отсутствуют);
- полностью закрытые (газо-жидкие включения находятся в отдельных порах и трещинах, не сообщающихся между собой);

II – Открытые РН. Они подразделяются на активные, экранированные и пассивные, а также по преимущественному фазовому составу (газ, вода).

Активные РН можно разделить на следующие:

- с миграцией флюида (в основном, это отдельные РН с фильтрацией или инфильтрацией флюида);
- с конвекцией флюида (в них присутствует нисходящая и восходящая фильтрация флюида).

Экранированные РН с конвекцией находятся в одной или нескольких интервалах между экраном. Они относятся к промежуточному типу между активными и пассивными РН. Эти РН перекрыты на отдельных интервалах пластами непроницаемых пород. В этом типе РН может происходить конвекция флюида. Одним из примеров экранированного РН может служить РН, примыкающее со стороны подошвы к залежи углеводородов.

Пассивные РН характеризуются отсутствием миграции (фильтрации) флюида. В качестве примера пассивных РН можно привести горизонтальные РН, зафиксированные в сверхглубоких скважинах (Кольской, Уральской, Аралсорской). В них, помимо инфильтрационных вод, были обнаружены древние застойные воды. Результаты глубокого бурения свидетельствуют о возможности длительного периода существования заполненных водой зон разрывных нарушений в породах консолидированной коры. Следует подчеркнуть, что существование незалеченных и экранированных РН возможно только в жестких (более упругих, чем вмещающая среда) блоках земной коры.

Активные и пассивные РН могут быть разделены по преимущественному фазовому составу флюида. Гидрофильность и гидрофобность каналов миграции ведет к отдельной

фильтрации жидкой и газообразной фаз [Эфрос, 1963]. Жидкая фаза фильтруется по тонким трещинам, газовая – по более крупным трещинам.

Следовательно, различие внутреннего строения зон РН по упруго-деформационным свойствам обуславливает возможность дифференциации в них флюида и, соответственно, влияния на сейсмические свойства РН.

Изменения параметров и характеристик сейсмического поля под воздействием флюида

В рудной геологии газовая фаза флюида – это специфический долгоживущий в геологическом времени след рудообразования [Фридман, 1970]. Данное положение является одним из базовых для интерпретации данных сейсмических методов в рудных районах. Присутствие значительной доли газов установлено для различных типов рудных месторождений. Одной из причин образования здесь аномалий V_p/V_s может являться газовая «дистилляция», когда в процессе двухфазной фильтрации происходит закономерное гидродинамическое расщепление фаз с обогащением фронтальных частей флюидных потоков газовой фазой [Кошемчук и др., 1998]. С газовой «дистилляцией», видимо, связано существование газовых струй, обогащенных инертными газовыми компонентами (азотом, гелием и т.п.). В верхних частях гетерофазных флюидных систем должна формироваться «газовая шапка», обогащенная слабо взаимодействующими с водой газами. В экранированных РН со слабопроницаемыми экранами возможно длительное квазистационарное присутствие «газовой шапки». В тонкопористых средах в экспериментах наблюдалась пространственная и временная осцилляции газонасыщенности, а также интенсивности потоков флюидных фаз, что, по-видимому, связано с задержкой и накоплением газовой фазы. Это явление (коалесценции газовых пузырей и оттеснение жидкой фазы) позволяет объяснить возможность длительного существования блоков пород с поровым пространством, преимущественно газового заполнения. Тем самым подтверждается правомерность интерпретации повышенных и пониженных значений V_p/V_s влиянием фазового состава флюида в тектонических блоках коры.

Накопление газовой фазы флюида (точнее, сепарация жидкой и газообразной фаз) наиболее интенсивно может происходить в пределах субгоризонтальных зон глубинных разрывных нарушений – волноводов. В работе [Казанский, Лобанов, 2004] приведены сейсмотомографические разрезы V_p , V_s и V_p/V_s по профилю «Суша–Море» (интерпретация Э.В. Исаниной, Н.В. Шарова), проходящему через Печенгскую структуру

и Кольскую сверхглубокую скважину на шельф Баренцева моря. В интервале глубин 18–20 км высокие значения V_p/V_s (равные 1,80–1,90) формируют субгоризонтальную зону, выше которой параллельно расположена зона пониженных значений V_p/V_s , уходящая на 80–90 км на шельф. Учитывая, что в архейских породах СГ–3 были выявлены флюидонасыщенные зоны, пониженные значения V_p/V_s могут интерпретироваться как область существования на глубинах 8–15 км волновода с зональным распределением фаз флюида области перехода Суша–Море.

Для глубинных горизонтов земной коры (преимущественно в ее нижней части) накопление газообразной фазы флюида еще может быть связано с перманентным локальным образованием и разрушением экранов на пути флюидных потоков за счет вариаций объема массивов пород, вызванных изменением концентрации легких газов [Гуфельд, 2007]. Вполне вероятно, что поток легких газов в ряде случаев обеспечивает длительное по геологическим меркам функционирование глубинных разломов.

Значительные изменения упругих свойств РН в зависимости от фазового состава флюида позволяют на качественном уровне по данным сейсмических наблюдений делать прогнозную оценку преимущественного фазового наполнения зон РН. На рис. 2–3 соответственно приведены расчетные зависимости V_p от пустотности (пористости и трещиноватости) и V_s/V_p . Как видно из рис. 2, с увеличением пустотности V_p падает, приближаясь в пределе к V_p в заполнителе пустот, при этом в газе падение скорости больше, чем в воде. Еще большее различие фазового состава флюида наблюдается на графиках для V_s/V_p (рис. 3). Отсюда следует, что параметры V_s/V_p совместно с V_s и V_p позволяют прогнозировать фазовый состав флюида.

В таблицах 1–2 представлены результаты лабораторных измерений, соответственно скорости и упругих параметров в зависимости от газо- и водонасыщения [Физические свойства..., 1984].

Для всех представленных в таблицах пород водонасыщение приводит к относительному увеличению скорости и коэффициента Пуассона, при этом диапазоны значений V_p почти для всех видов пород перекрываются. Кроме того, наблюдаются значительные вариации V_s , V_p и V_s/V_p в зависимости от фазового состава флюида даже при значениях пористости в ненарушенных кристаллических и метаморфических породах. Причем, литологический состав пород имеет подчиненное значение.

Таблица 1

**Скорость распространения продольных волн (в км/с) в кристаллических породах
(по Н.Б. Дортман и М.Ш. Магиду) при различном газо- и водонасыщении
[Физические свойства..., 1984]**

Порода	Газо- насыщенная порода	Водо- насыщенная порода		σ , г/см ³	η , %
	$V_{p\min} - V_{p\max}$	$V_{p\min} - V_{p\max}$	$V_{p\text{сред}}$		
Гранит биотит-амфиболитовый	2,3–4,2	4,9–5,4	5,2	2,61–2,66	1,4–3,0
Мигматит-плагиогранит	3,0–5,3	5,45–6,3	5,8	2,63–2,68	0,4–1,1
Гнейс амфиболит-биотитовый*	1,9–3,6	4,7–5,2	5,0	2,59–2,65	1,2–4,5
Гнейс амфиболит-биотитовый*	3,15–5,65	5,5–6,3	5,8	2,64–2,72	0,3–0,9
Гнейс кианит-гранит-биотитовый*	2,6–3,8	4,3–5,0	4,7	2,69–2,76	1,6–2,8
Гнейс кианит-гранит-биотитовый*	4,0–5,4	5,65–6,1	5,8	2,74–2,80	0,4–1,5
Гранулит плагиоклазовый	4,4–5,6	5,45–6,0	5,75	2,80–2,88	—
Сиенит нефелиновый	3,3–4,45	5,4–6,2	5,8	2,62–2,67	0,5–1,5
Сиенит	4,8–5,4	6,0–6,5	6,2	2,69–2,78	0,3–0,9
Гнейсо-диорит гиперстеновый	4,1–5,85	5,9–6,4	6,2	2,79–2,83	0,2–0,7
Диорит гиперстеновый	5,4–5,7	6,2–6,65	6,5	2,86–2,89	0,1–0,3
Габбро-норит	—	6,1–6,81	6,5	2,86–2,95	0,2–0,6
Норит	6,3–7,0	6,65–7,1	6,8	2,89–3,0	0,1–0,5
Пироксенит	7,1–8,2	7,7–8,51	8,1	3,29–3,33	0,1–0,5

* – образцы пород взяты из обнажений, остальные из скважин

Таблица 2

**Упругие модули в кристаллических породах в газонасыщенном (I)
и водонасыщенном (II) состоянии (по М.Ш. Магиду) [Физические свойства..., 1984]**

Порода	Динамический метод						Статистический метод			
	E, ГПа		G, ГПа		σ		E, ГПа		σ	
	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II
Гранит биотитовый	54,5	71	23,4	29,0	0,20	0,24	71,4	70,3	0,22	0,27
Диорит гиперстеновый	79,0	92	31,0	38,5	0,23	0,24	84,0	84,2	0,24	0,25
Габбро-норит	120,5	134	49,5	54,0	0,20	0,23	122,0	117,2	0,27	0,29
Биотитовый гнейс	46,8	57	17,0	22,0	0,20	0,29	56,6	58,5	0,17	0,26

Трещины и поры оказывают неодинаковое влияние на сейсмические волны (рис. 4), трещины существенно больше снижают V_p , при этом возрастает различие между газо- и водонасыщением. Следовательно, чем больше в породе трещин и пор, тем больше будет различие между упругими параметрами газо- и водонасыщенных пород.

Поскольку главным отличительным свойством пород в зонах РН является значительное количество пор и трещин, флюид будет играть основную роль в формировании контрастных неоднородностей волнового поля и, соответственно, появляется принципиальная возможность классифицировать зоны РН по фазовому составу флюида.

В зонах РН фазовый состав флюида оказывает существенное влияние на соотношение рассеянной и зеркальной компонент волнового поля, а также на соотношение V_p и V_s этих компонент. Поскольку по своей природе РН является геологическим телом, рассеивающим сейсмические волны, рассеянные волны вносят значительный вклад в результирующее поле от РН. Отсюда его сейсмической моделью РН может служить отдельная шероховатая граница или пласт с шероховатыми границами. В общем случае трещиноватая среда является азимутально-частотным фильтром [Бугаевский, 1987; Талонов, Тулинов, 1989; Урупов, Трушников, 1992]. Для сравнительно узкополосного сигнала, в зависимости от соотношения l/λ (λ – длина волны), среда может представлять собой фильтр низких частот, фильтр высоких частот или режекторный фильтр (в том случае, когда частота максимума спектра близка к собственной частоте среды).

Как показывают результаты экспериментальных исследований, параметры и характеристики поля рассеянных волн позволяют делать прогнозную оценку фазового состава флюида в зонах РН. В работе [Ушаков Г.Д., Ушаков М.Г., 1993] приведены результаты изучения изменений коэффициентов отражения продольной и поперечной волн на контакте с различной степенью шероховатости (h) контакта при статическом давлении и наличии жидкости на нем. Рассеяние энергии упругой волны на шероховатой границе определяется в основном углом скольжения падающей волны по отношению к поверхности границы и отношением высоты выступа поверхности к длине волны. Чем больше длина волны и меньше угол скольжения, тем менее значительным будет влияние шероховатости границы на отражающие свойства волны, соответственно, тем меньше разность фаз между отражениями на отдельной неровности шероховатой границы (от

подошвы и вершины неровности). Согласно [Басс, 1972]: $q = 2Ph \sin \alpha$, где $P = 2p/l$, α – угол скольжения, l – длина волны, h – высота неровности. Эксперименты проводились на сухой и смоченной маслом границе раздела (с шероховатостью $h = 0,008$ мм), сформированной слоями из медной заготовки. На сухой границе происходит существенное отражение энергии с высоким уровнем амплитуд временных импульсов (и, соответственно, их амплитудно–частотных спектров, рис. 5).

При смачивании границы раздела маслом амплитуды импульсов Р-волн исчезают и сейсмотрасса преобразуется в прямую линию. Дальнейшие опыты показали, что при уменьшении акустической прозрачности (h/l) границы коэффициенты отражения Р-волн увеличиваются. Следовательно, для продольных волн наличие влаги на границе слоев нивелирует эффект рассеяния и тем самым сглаживает влияние неоднородностей. Уменьшение рассеянной составляющей (по сравнению с зеркальной компонентой отражения) способствует уменьшению затухания волны.

Совсем иной характер изменения амплитуд наблюдается для S-волн. На той же границе, смоченной маслом, амплитуды отражений возрастают (рис. 5Г). При увеличении статического давления на сухой и смоченной границе раздела различие между значениями амплитуд уменьшается, а при давлении 8,6 МПа – полностью исчезает. Особенностью отраженных S-волн является то, что коэффициенты отражения на смоченной границе раздела всегда больше, чем на сухой. Также было установлено, что давление весьма неоднозначно изменяет коэффициенты отражения продольных и поперечных волн при разных показателях акустической прозрачности (h/λ) и фазового состава данной границы.

Физическое моделирование позволило выявить в трещиноватой среде механизм захвата упругой энергии [Гельчинский и др., 1978; Караев, 1982; Виноградов и др., 1992]. Область диффузионного рассеяния ($l/l = 1$) с высокой плотностью трещин и большими углами падения характеризуется захватом упругой энергии трещиноватой средой [Виноградов, Троицкий, Соловьева, 1992]. Этот механизм проявляется в увеличении длительности волнового пакета (коды колебаний) и увеличении длительности трасс, которые зависят от количества рассеянной энергии (диффузное рассеяние), что, в свою очередь, приводит к кажущемуся падению скорости сейсмических волн. Это свойство позволяет по падению скорости волн не только выделять область трещиноватости, но и обосновать возможность присутствия преимущественно газовой фазы флюида в зоне РН.

Изучение V_s и V_p при различных вариациях жесткости и пористости показало прямую зависимость V_s от жесткости матрицы материала при различных значениях пористости [Гаранин, 1973]. Данные, полученные при определении упруго-деформационных свойств образцов осадочных и кристаллических пород (при насыщении их водой), позволили сделать следующие выводы. В насыщенных образцах осадочных пород в большинстве случаев значения V_p/V_s сначала уменьшаются, затем возрастают или остаются постоянными. При насыщении образцов водой общей тенденцией для V_s является ее неизменность или уменьшение, при этом V_p может как увеличиваться, так и уменьшаться. Уменьшение V_s при насыщении всегда больше, чем V_p [Воларович и др., 1979].

Влияние давления при водонасыщении пород на скорость продольных и поперечных волн всегда выше или остается в пределах ошибки измерения, по сравнению с сухими образцами. В кристаллических породах влияние водонасыщения на зависимости скоростей от давления качественно одинаково: величины dV_s/dp и dV_p/dp при каждом значении давления (p) всегда меньше в водонасыщенных образцах. С позиции интерпретации данных отраженных волн это означает, что водонасыщенные породы осадочного чехла и консолидированной коры меньше рассеивают упругую энергию.

Водонасыщение для гранитоидов оказывает существенное влияние на V_p/V_s . В атмосферных условиях V_p/V_s в сухих породах составляет 1,55–1,73, в водонасыщенных – 1,76–1,83. У всех гранитоидов кривые зависимостей V_p/V_s от давления для насыщенных образцов лежат выше, чем для сухих. Увеличение V_p/V_s при испытании образцов кристаллических пород объясняется [Воларович и др., 1979] тем, что в исследованных породах отсутствуют минералы, способные к относительно быстрому взаимодействию с водой, например, глинистые минералы. V_p после насыщения может только возрастать. Ни в одной породе не было зарегистрировано уменьшение V_p после насыщения ее водой, и для гранитоидов характерной чертой оказалось ее увеличение после насыщения вплоть до 22% [Воларович и др., 1979].

При колебаниях геодинамического поля происходит изменение объема порово-трещинного пространства и, соответственно, насыщение среды водой. Характер изменения V_p при водонасыщении может быть объяснен на основе контактной модели. На начальной стадии происходит заполнение капилляров и микротрещин, что приводит к увеличению площади контактов и заметному росту V_p . При дальнейшем (неполном)

насыщении жидкость заполняет поровое пространство, площадь контактов увеличивается медленно, V_p растет плавно. Полное насыщение приводит к резкому увеличению контактной поверхности, V_p увеличивается до значений в двухфазной среде [Петкевич, 1976]. Рост V_p означает, что происходит уменьшение количества и эффективного размера неоднородностей, препятствующих распространению волны.

Поровое пространство пород разделяется на щелевидные поры и объемные поры. Поэтому присутствие воды может оказывать двойное влияние на V_s . С одной стороны, насыщение водой способствует увеличению скорости этих волн за счет сдвиговой упругости связанной воды в щелевых порах, с другой – возбуждение дополнительной массы вещества в щелевых и объемных порах уменьшает V_s . Отмеченные выше физические особенности распространения S-волн служат важнейшим фактором при прогнозировании фазового состава флюида в зонах РН.

Таким образом, результаты физического моделирования доказывают возможность разделения волновых полей по фазовому составу флюида данных полевых сейсмических наблюдений.

Выводы

Предлагаемая классификация РН на основе учета проницаемости РН (фильтрации и инфильтрации) очень важна при геодинамической, тектонофизической, сейсмологической и других характеристиках геологического строения территорий.

Флюид может увеличивать и уменьшать акустическую контрастность РН. Прогноз и систематизация РН по фазовому составу флюида может значительно повысить эффективность геофизических исследований глубинного строения недр, в том числе при поисках месторождений полезных ископаемых.

ЛИТЕРАТУРА

Басс Ф.Г., Фукс И.М. Рассеяние на статистически неровной поверхности. М.: Наука, 1972. 406 с.

Бугаевский А.Г. Два метода оценки эффективных модулей упругости трещиноватых сред // Физика Земли. 1987. № 2. С. 3–7.

Виноградов С.Д., Троицкий П.А., Соловьева М.С. Изучение распространения упругих волн в среде с ориентированной трещиноватостью // Физика Земли. 1992. № 5. С. 42–56.

Воларович М.П., Томашевская И.С., Будников В.А. Механика горных пород при высоких давлениях. М.: Наука, 1979. 152 с.

Гаранин В.А. Особенности распространения продольных и поперечных волн в консолидированных пористых средах // Прикладная геофизика. М.: Недра, 1973. Вып. 71. С. 23–28.

Гельчинский Б.Я., Караев Н.А., Бейлькин Г.Я., Коган Л.Д. Теоретико-модельные исследования полей, образующихся на структурах разрыва // Сейсмические волновые поля в зонах разломов / Под ред. А.В. Николаева. М.: Наука, 1978. С. 60–78.

Горяинов Н.Н., Ляховицкий Ф.М. Сейсмические методы в инженерной геологии. М.: Недра, 1979. 143 с.

Гуфельд И.Л. Сейсмический процесс. Физико-химические аспекты. Королев: ЦНИИМАШ, 2007. 160 с.

Казанский В.И., Лобанов К.В. Глубинное строение и рудоносность древней континентальной земной коры (по результатам исследований Кольской сверхглубокой скважины) // Проблемы рудной геологии, петрологии, минералогии и геохимии. М.: ИГЕМ РАН, 2004. С. 34–52.

Караев Н.А. Волновые поля, формируемые на гетерогенных зонах // Вопросы динамической теории распространения сейсмических волн. Л., 1982. Вып. XXII. С. 110–131.

Кошемчук С.К., Магомедов М.А., Алехин Ю.В., Лакиштанов Л.З. Двухфазная фильтрация в системах вода-газ. Экспериментальное и теоретическое исследование // Экспериментальное и теоретическое моделирование процессов минералообразования. М.: Наука, 1998. С. 279–296.

Летников Ф.А., Бальшев С.О. Петрофизика и геоэнергетика тектонитов. Новосибирск: Наука, 1991. 148 с.

Петкевич Г.И. Информативность акустических характеристик неоднородных геологических сред. Киев: Наукова Думка, 1976. 214 с.

Талонов А.В., Тулинов Б.М. Упругие волны в среде, ослабленной трещинами // Физика Земли. 1989. № 4. С. 33–41.

Урупов А.К., Трушников Э.Б. Двухмерное ультразвуковое моделирование распространения продольных волн в среде с одной системой трещин // Физика Земли. 1992. № 11. С. 29–53.

Ушаков Г.Д., Ушаков М.Г. Экспериментальное изучение рассеивания упругих волн на шероховатой границе раздела // Геология и геофизика. 1993. № 2. С. 103–111.

Физические свойства горных пород и полезные ископаемые (петрофизика).
Справочник геофизика / Под ред. Н.Б. Дортман. М.: Недра, 1984. 455 с.

Фридман А.И. Природные газы рудных месторождений. М.: Недра, 1970. 192 с.

Эфрос Д.А. Исследование фильтраций неоднородных систем. Л.: ОНТИЗ, 1963.
351 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ



Рис 1. Классификация разрывных нарушений в зависимости от проницаемости для флюида и его фазового состава

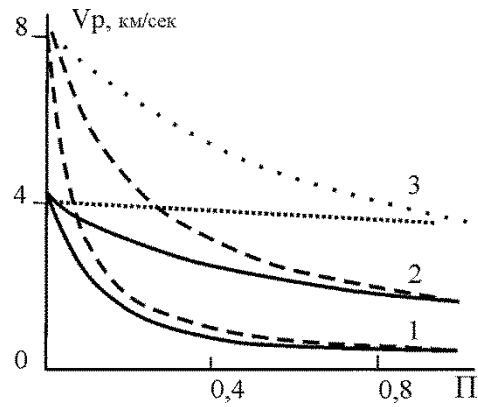


Рис. 2. Зависимость скорости продольных волн от пустотности при заполнении пор воздухом (1), водой (2) и льдом (3) [Горяинов, Ляховицкий, 1979]

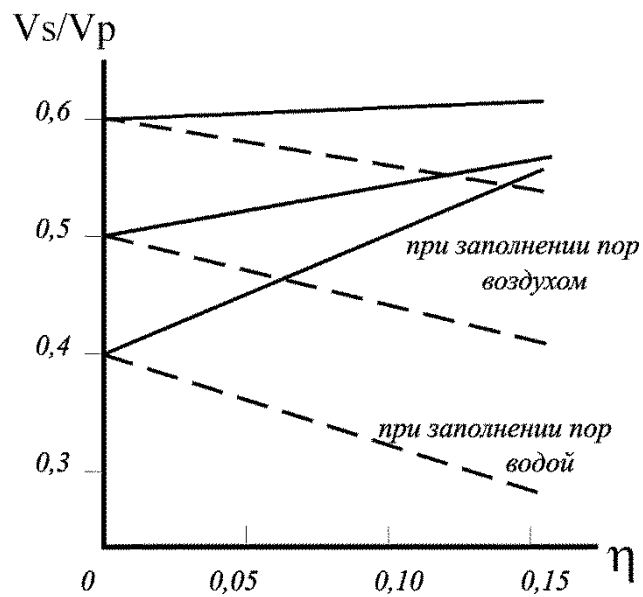


Рис. 3. Зависимость отношения скорости поперечных и продольных волн от пористости при заполнении пор воздухом (сплошная линия) и водой (пунктирная линия) для значений V_s/V_p в твердой фазе породы, равных 0,6; 0,5; 0,4 [Горяинов, Ляховицкий, 1979]

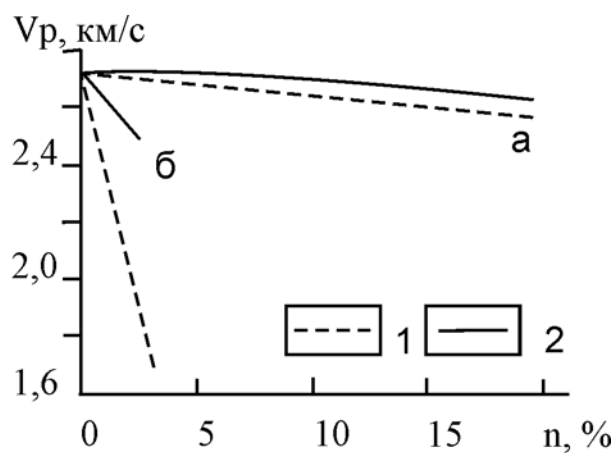


Рис. 4. Скорость продольных волн в моделях с порами (а) и в моделях с поровыми плоскостями (б). Заполнитель порового пространства: 1 – воздух, 2 – вода (по М.Ш. Магиду) [Физ. свойства..., 1984]

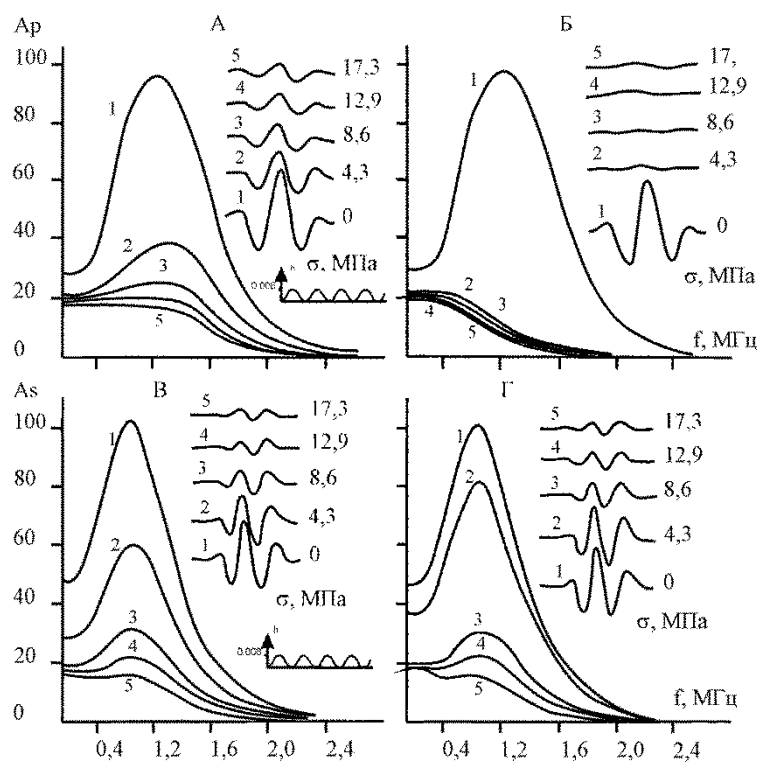


Рис. 5. Временные импульсы отраженных Р- и S-волн и их амплитудно-частотные спектры на границе раздела медь-медь с шероховатостью $h = 0,008$ мм при разных давлениях: А – на сухой границе; Б – на смоченной маслом границе [Ушаков Г.Д., Ушаков М.Г., 1993]