

**ФЛЮИДЫ В КЛАССИФИКАЦИИ РАЗРЫВНЫХ НАРУШЕНИЙ.
ОТОБРАЖЕНИЕ В ПАРАМЕТРАХ И ХАРАКТЕРИСТИКАХ СЕЙСМИЧЕСКОГО
ПОЛЯ ФАЗОВОГО СОСТАВА ФЛЮИДА В ЗОНАХ РАЗРЫВНЫХ НАРУШЕНИЙ
Часть 3**

А.М. Кузин
Институт проблем нефти и газа РАН, г. Москва,
e-mail: amkouzin@yandex.ru

**Результаты полевых сейсмических наблюдений в зонах залеченных разрывных
нарушений**

Сейсмической моделью залеченного минеральными растворами разрывного нарушения (РН) в общем случае является тонкослоистый пласт с различной степенью шероховатости (h) границ и неконтрастной неоднородной зональностью упругих свойств. В РН V_p понижена приблизительно на 7–10% относительно ненарушенных вмещающих пород, а V_s может быть как понижена, так и повышена [Кузин, 2014a].

Продольные волны в зонах РН. Самый большой объем фактических данных по распространению сейсмических волн в РН накоплен по продольным волнам. Все залеченные РН являются резервуарами для залежей рудной минерализации и в ряде случаев находятся в обрамлении нефтяных залежей. Залеченные РН заполнены гидротермально-метасоматически измененными породами. Изменения скорости (V_p) в зонах гидротермально-метасоматических пород колеблются в интервале 7–15% от средних значений скорости в неизменных породах. Такой диапазон значений V_p объясняется различной степенью плотности незалеченных минеральными растворами трещин и пор, а также тем, что сам гидротермальный раствор представляет собой гетерогенную фазовую систему.

В общем виде скорости преломленно-рефрагированных волн в залеченных РН будут представлены неконтрастными ее аномалиями и соответственно низкими значениями коэффициентов отражения. На рис. 1 представлены коэффициенты отражения продольных волн от пород в зонах гидротермально измененных пород, полученные по данным петрофизических измерений. Большинство коэффициентов отражений характеризуются низкими значениями. При таких значениях коэффициентов отражения и сложной структуре поверхности границ зон гидротермально измененных пород отраженные волны от РН будут слабоинтенсивными, со значительной рассеянной

составляющей (рис. 2). Поэтому вероятность их регистрация при наблюдениях на поверхности Земли незначительна.

На временных разрезах МОГТ даже при высокой кратности накопления сигнала залеченные РН обычно представлены зонами малоинтенсивной и хаотической сейсмической записи. Исключение составляют отражения от контакта пород с резким различием упругих свойств, например, месторождения на контакте с основными и ультраосновными породами в Печенгском рудном районе [Караев, Рабинович, 2000]. При скважинных наблюдениях залеченные РН могут регистрироваться как отдельные короткие отражения, трассирующие наиболее резкие по упругим свойствам контакты пород.

Доминирующим типом волн для залеченных РН являются рассеянные или в общем случае дифрагированные волны. Поэтому выделение зон гидротермально-метасоматических изменений возможно на основе накопления рассеянной компоненты волнового поля [Гельчинский и др., 1978; Караев, Рабинович, 2000; Караев, 2013]. Граница между РН и вмещающей средой (как указывалось выше) аппроксимируется границей с различной степенью шероховатости. Преимущественно газонасыщенные и водонасыщенные РН могут быть разделены на основе результатов экспериментов, полученных в ходе лабораторных исследований рассеяния упругих волн на сухих и влажных шероховатых границах. При смачивании шероховатой границы резко уменьшаются ее рассеивающие свойства [Г. Ушаков, М. Ушаков, 1993]. Это способствует увеличению интенсивности продольной проходящей и отраженной волн. Тем же эффектом объясняется действие водной укупорки заряда взрывчатого вещества в скважине при сейсморазведочных работах. Особенно это заметно проявляется, когда возбуждение упругих волн осуществляется в рыхлых (осадочных) и плотных (метаморфических и кристаллических) породах.

К залеченному типу РН следует отнести алмазоносные трубки взрыва (рис. 3–6). Трубки взрыва не имеют выраженной слоистости, границы с вмещающей средой размытые, что свидетельствует об отсутствии вертикальных смещений. При визуальном анализе в карьерах трубок взрыва (Мир, Удачная, Сытыканская) не было обнаружено их концентрического обрамления зонами трещиноватости ни непосредственно у контактов, ни на некотором от них удалении [Люхин, Серокуров, Калмыков, 2003]. Возможной причиной отсутствия следов ударного воздействия здесь может являться проработка

вмещающей среды легкими газами, водородом и гелием. В условиях горизонтального растяжения коры водород и гелий способствовали формированию тонкой вертикальной трещиноватости – каналов миграции флюида. Эту гипотезу подтверждают данные полевых измерений. В кимберлитовой трубке «Удачная» (в скважине № 42) дебит водорода составлял 10^5 м³/сутки [Гаврилов, 1986].

Интерпретация алмазонасных трубок взрыва как залеченных РН подтверждается при сопоставлении значений скорости продольных волн в долеритах, терригенных отложениях верхнего протерозоя и кимберлитах на глубинах больше 600 м (см. табл. 1), наличием на временных разрезах реликтовой слоистости осадочных пород в теле трубки (рис. 7–8) и, кроме того, отсутствием зеркальной компоненты отраженной волны для крутонаклонных или субвертикальных границ.

Таблица 1

**Скорости продольных волн в кимберлитах и вмещающих их породах
[Караев, Рабинович, 2000]**

Горные породы	V _p , км/сек	
	Диапазон изменения	Среднее значение
Карбонатно-терригенные отложения (верхоленская свита кембрия)	1,9–3,8	2,78
Карбонатно-терригенные отложения (метегерская свита кембрия)	3,9–6,7	5,12
Карбонатные отложения (чарская свита кембрия)	4,2–7,0	5,46
Галиты	4,0–5,1	4,49
Доломиты и известняки (олекминская свита кембрия)	5,4–6,9	6,08
Терригенные отложения верхнего протерозоя	3,0–5,2	4,47
Карбонатные отложения протерозоя	5,4–7,3	6,56
Долериты	2,5–6,4	4,95
Кимберлиты на глубине, м:		
до 200	2,4–3,6	2,95
200–600	3,0–4,5	3,65
600–1000	3,6–5,1	4,25
глубже 1000	3,5–4,8	4,33

На временных разрезах трубки взрыва представлены вертикальными областями хаотической сейсмической записи, интенсивным рассеянием отраженных волн.

Накапливание рассеянной компоненты отраженных волн (рис. 5–6) позволяет определить контуры трубки взрыва в пространстве и соответственно делать заключения о процессах, способствующих образованию таких структурных форм. В данном случае очевидной причиной образования трубок взрыва является вторжение в земную кору флюида с преобладающим содержанием газовой фазы.

Подобие волновых картин (рис 2–3, 7) дает основание предполагать общий источник их формирования. В данном случае преобразование среды происходит под действием флюида. При анализе волновых картин хорошо заметно увеличение рассеянной составляющей поля отраженных волн в области рудной залежи и алмазоносной трубки взрыва в нижних частях временных разрезов. При этом сохраняются значительные по размерам фрагменты отражающих горизонтов осадочного разреза, в особенности это характерно для трубок взрыва. Именно это позволяет рассматривать образование Джезказганского месторождения меди и алмазоносную трубку взрыва как результат процесса гидротермально-метасоматического преобразования вмещающих пород.

Присутствие воды, помимо различной степени деформируемости пород, объясняет различие в интенсивности рассеянных волн трубок взрыва на временных разрезах (рис. 7–8). Если в породах осадочного чехла наличие воды может быть связано с инфильтрацией [Кузин, 2011], то в нижней и средней частях консолидированной коры (рис.5) – еще и вследствие реакции водорода с кислородом. Интенсивная сейсмическая запись на малых временах регистрации ($T_0 \leq 0,4$ сек) свидетельствует о развитии процесса инфильтрации поверхностных вод (рис. 4, 7–8).

Поперечные волны в зонах РН. Скорость поперечных волн характеризует жесткость связи между структурными элементами. Поэтому V_s преломленно-рефрагированных волн в залеченных РН может быть больше, чем в неизменной гидротермально-метасоматическими процессами породе [Кузин, 2012]. Более уверенно области гидротермально-метасоматических изменений в зонах РН выделяются по относительно пониженным значениям V_p/V_s , которые соответствуют повышенным или постоянным значениям V_s (при пониженных значениях V_p).

Поле отраженных поперечных волн в зонах залеченных РН по интенсивности отличается от поля продольных волн. Это объясняется не только неодинаковой реакцией волн на упругие неоднородности горных пород, но и различием дисперсии скорости S - и

P–волн. Интенсивность, частотный диапазон и состав отраженных волн при наблюдениях во внутренних точках среды обычно превосходят результаты наземных наблюдений.

В отдельных случаях по результатам наземных наблюдений совместно с данными ВСП можно сделать оценку проницаемости залеченного РН по густоте отражающих площадок, их положению в пространстве, а также детальному распределению скорости. В общем случае дать прогнозную оценку проницаемости залеченного РН по данным наземных сейсмических наблюдений крайне затруднительно.

В региональных исследованиях комплексирование ГСЗ (МОВЗ) с МОГТ позволяет делать прогнозные оценки изменений в фазовом составе флюида с глубиной. На рис. 9 представлен разрез ГСЗ, проходящий через Мирнинское поле алмазоносных трубок взрыва.

На сейсмическом разрезе четко фиксируется вертикальная зональность параметров V_p , V_s и V_p/V_s . Мирнинскому алмазоносному полю отвечает подъем кристаллического фундамента, которому соответствуют пониженные значения граничной скорости Р–волны ($V_g = 6,0–6,1$ км/с). По отношению граничных скоростей Р– и S–волн (V_p/V_s) в пределах изучаемой площади коэффициент Пуассона меняется в диапазоне 0,237–0,257, достигая максимальных значений на рудном (кимберлитовом) поле [Караев, Рабинович; 2000]. При этом увеличению коэффициента Пуассона на поверхности кристаллического фундамента, в осадочном чехле, отвечают пониженные значения коэффициента Пуассона.

Ниже по разрезу залегает граница K_1 . Наблюдается корреляция рельефа этой границы и значений V_p/V_s (на поднятии значения V_p/V_s меньше 1,74). Пониженные V_p/V_s (1,74) отмечаются на всем участке погружения коры в районе рудного поля, вплоть до границы Мохоровичича [Караев, Рабинович; 2000]. По данным В.Д. Суворова [1993], понижение значений V_p/V_s объясняется изменением скорости S–волн. Наиболее вероятной причиной низких значений V_p/V_s здесь является повышенное содержание в горных породах газа. Этим фактором может быть интерпретирован опережающий рост значений скорости S–волн во всем диапазоне глубин земной коры (в зоне между сквозькоровыми разломами) при относительно пониженных значениях скорости Р–волн в средней и нижней частях коры.

Влиянием газа объясняются пониженные значения V_p/V_s под озером Байкал ($H \approx 9–12$ км). Эта область пониженных значений V_p/V_s коррелируется с тепловой аномалией, вызванной остывающей интрузией [Кузин, 2012]. Повышенные значения V_s , кроме того,

показывают, что расплав находится в резервуаре, в котором сохраняются жесткие (упругие) связи между элементами структуры. Наличие в осадочном чехле фрагментов границ осадконакопления в рудной залежи и алмазоносных трубках взрыва также свидетельствует о сохранении жесткого структурного каркаса в резервуаре.

Между сейсмическим разрезом ГСЗ (рис. 9) и временными (мигрированными) разрезами МОГТ (рис. 5) отмечается корреляция между структурой и скоростью, с одной стороны, и амплитудой рассеянных волн – с другой.

Осадочный чехол ($H \approx 1,7\text{--}3$ км) совпадает с горизонтальным слоем ($T_0 \approx 2$ сек), купольное поднятие на глубине 8 км (граница K_1) – с центральной частью области интенсивной записи (T_0 около 3 сек), а все облако интенсивной записи ($T_0 \approx 2,7\text{--}5,0$ сек) коррелируется с зоной распространения волновода, выделенного по данным магнитотеллурических зондирований [Поспеева, 2003]. Поэтому совпадение области интенсивной записи и зоны волновода дает основание для интерпретации этого явления присутствием флюида в преимущественно жидкой фазе.

Граница K_2 совпадает с конусовидной областью расширения интенсивной сейсмической записи ($T_0 \approx 8,5\text{--}9,0$ сек). Сходство картин отраженных волн на рис. 5 и рис. 10 дает основание предположить, что природа пережима флюидного потока на границе K_2 (по аналогии с пережимом флюидного потока в осадочном чехле Западно-Сибирской платформы) может быть объяснена наличием относительно тонкого жесткого пласта. Только для трубки взрыва процесс активной миграции флюида завершился, тогда как для иллюстрируемого временного разреза в Западной Сибири он продолжается в настоящее время. Подобие волновых картин служит подтверждением флюидного генезиса трубки взрыва. Косвенным аргументом флюидного вторжения может служить присутствие валообразных поднятий в нижней и верхней частях коры без разрыва корреляции отраженных и преломленных волн. В верхней части высокоскоростное валообразное поднятие, вероятно, служило резервуаром для накопления флюидов. В то же время присутствие во всем интервале временного разреза интенсивных рассеянных волн (рис. 10) показывает, что этот экран впоследствии прорыва флюида стал проницаем. Примером «замороженного» флюидного потока сквозь экранирующую зону РН служит временной разрез на рис. 11. Сгущения областей рассеивания указывают на присутствие нескольких промежуточных камер накопления флюида. Сама зона РН представляет собой, судя по картине распределения рассеивающих областей, очень неоднородную (по

проницаемости) и гигантскую дизъюнктивную структуру (временной диапазон от 3 до 12 сек).

В отличие от экранирующего РН, на рис. 11 геологическая природа тонкого пласта на границе K_2 пока непонятна. Жесткие неоднородности в средней части коры отмечены на рудных полях Архангельской алмазоносной провинции [Кутинов, Чистова, 2004]. Границы в консолидированной коре на разных глубинах отличаются упруго-деформационными свойствами [Корытов, 1974]. Граница K_2 в схеме реологии разрушения континентальной коры рассматривается как смена режима прерывистого скольжения на псевдопластическое течение [Николаевский, 1984]. Вероятно, область развития псевдопластических деформаций (катаклиз) ниже границы K_2 служит резервуаром для накопления флюида. Подобные очаги флюидонасыщенных катаклазированных пород (с аномально низкими значениями V_p/V_s) были установлены на Украинском кристаллическом щите (в частности, Кировоградский тектонический блок), они связаны с областями развития натриевых метасоматитов. Для натриевых метасоматитов основным типом деформаций пород является катаклиз, часто называемый «массовым» или «объемным» [Геологические структуры эндогенных..., 1986]. Он отличается тем, что минералы и их обломки обычно практически не испытывают перемещений или вращений относительно друг друга. Контуры участков проявления катаклаза укладываются в границы ореолов натриевых метасоматитов, а сами катаклазиты наиболее контрастно выражены среди метасоматитов внутренней зоны (альбититов). Альбититы макроскопически представляют собой монолитную и очень прочную породу, сохранившую текстурные особенности исходных пород. Натриевые метасоматиты характеризуются принадлежностью к зонам глубинных разломов мантийного заложения, содержанием в заметных количествах водорода и углеводородов, изометричной или эллипсоидной в плане и нередко воронкообразной (или каплевидной) формой в разрезе альбититовых тел [Геологические структуры эндогенных..., 1986]. К этому нужно еще добавить, что Кировоградский блок является перспективным для поисков месторождений коренных алмазов.

Результаты полевых сейсмических наблюдений в зонах открытых разрывных нарушений

Продольные волны. Аномально низкие значения скорости продольных преломленно-рефрагированных волн в зонах РН (относительно вмещающих пород) являются достоверным индикатором открытого РН. Наибольшие диапазоны уменьшения

скорости наблюдаются между ненарушенными и сильно трещиноватыми породами в зоне дробления. По данным [Алешин и др., 2005; Алешин, 2010], в зонах разрывных нарушений V_p и V_s могут уменьшаться до 40%, а плотность – не более чем на 5%.

При газонасыщении РН сейсмическая запись преломленных волн в породах кристаллического фундамента, залегающих на небольшой глубине (до первых сотен метров) часто имеет относительно более высокий частотный состав и хаотичный характер записи, чем в случае водонасыщения. Этот эффект обычно хорошо просматривается для преломляющих границ на возвышенностях.

В поле отраженных волн наличие газа в РН наиболее четко видно на временном разрезе горизонтально залегающих осадочных пород (рис. 10). На временном разрезе присутствие газа в РН дает представление о распределении проницаемых зон, позволяет трассировать существующие в настоящее время каналы миграции флюида.

Чем больше газонасыщенность трещиноватой среды, тем интенсивнее поле рассеянных волн. В области диффузионного рассеяния наблюдается захват трещиноватой средой упругой энергии, что приводит к эффекту кажущегося понижения скорости. Этот эффект проиллюстрирован на рис. 12. При обработке по методу параметрической развертки отображений [Кондрашков, Анискович, Богданов, 1998] происходит накапливание как зеркальной, так и рассеивающей компонент волнового поля. В породах фундамента зона волновода четко выделяется низкими значениями интервальной скорости, которую при стандартной обработке по МОГТ выделить практически очень трудно.

В данном случае сложная конфигурация зоны волновода дает основание предполагать несущественную роль горизонтальной составляющей поля тектонических напряжений, вызвавших формирование такой структуры РН. Очень вероятно, что образование этого субгоризонтального РН было вызвано дегидратацией пород вследствие их перегрева [Киссин, 1996, 2006], от магматического канала и камеры при зарождении вулкана. Палеовулкан был ранее выделен в палеозойских отложениях центральной части профиля по комплексу геолого-геофизических методов и бурения. Появление рассеянных отраженных волн от границ этого волновода может интерпретироваться последующим заполнением его газообразным флюидом. Следовательно, для выявления газонасыщенных или газосодержащих геологических тел, в том числе РН, необходима обработка

сейсмических данных с возможностью выделения рассеянной компоненты волнового поля.

В последние десятилетия вихреобразные структуры были установлены в зонах вертикальных разрывных нарушений осадочного комплекса пород. В работе [Гринь Н., Гринь Д., 2008] приведен пример такой вихревой структуры на Черноморском шельфе, выделенной по данным амплитудной обработки отраженных волн (рис. 13). Вихревая картина распределения неоднородностей свидетельствует о структуроформирующей роли флюида в зонах РН.

Для продольной отраженной волны следует, что динамически интенсивный характер записи и уверенная корреляция на временном разрезе предполагает: 1 – высокие значения коэффициента отражения (рис. 1); 2 – относительную гладкость сейсмической границы. Эти свойства могут возникнуть при наличии в зоне дробления РН поверхности сместителя, а также воды, уменьшающей рассеяние [Г. Ушаков, М. Ушаков, 1993]. На временных разрезах, обработанных с сохранением истинного соотношения амплитуд, достаточно давно привлекают внимания РН, представленные динамически интенсивными вертикальными областями сейсмической записи. В ряде случаев эти (часто конусообразные) области интенсивной сейсмической записи, прослеживаются до средней части консолидированной коры (рис. 14). В отличие от трубок взрыва, внутри этих областей обычно хорошо видна слоистость, границы между соседними трассами отличаются в основном только интенсивностью амплитуд. Нередко они бездоказательно рассматривались как зоны вертикальной восходящей миграции флюида.

Такие области с повышенной интенсивностью амплитуд еще в 1973 г. были описаны в работе [Азими, Калинин и др., 1973] под названием «звучащей записи» при проведении сейсмоакустического профилирования. В качестве отличительных признаков такой записи были выделены следующие особенности: квазисинусоидальный характер записи, резко повышенная интенсивность, четкое разграничение начала и конца участков по простиранию профиля. Природа такой сейсмической записи может быть объяснена инфильтрацией воды и ее растворов в фундамент [Кузин, 2011]. В качестве подтверждения реальности этого вывода могут служить результаты математического моделирования [Гарагаш, Николаевский, Степанова, 1992]. Оказалось (рис. 15), что в вертикальной области, лежащей под месторождением, поровое давление выше литостатического, это свидетельствует об изоляции коллектора от окружающего водного

бассейна. По данным расчетов зона аномально низкого литостатического давления уходит на глубину порядка 18 км. В таких условиях трещинные системы вертикальных разрывных нарушений, заполненных водой, могут оставаться открытыми до глубин перехода от упругих деформаций к пластичным. Механизмы инфильтрации перечислены и охарактеризованы в работах [Абукова, 2007; Кузин, 2011; 2015б].

Наиболее вероятными путями горизонтальных перетоков флюида в консолидированной коре и верхней мантии считаются волноводы и астеносферные слои. В работе [Кузин, 2014б] для них был предложен более общий термин – горизонт инверсии упругих свойств, охватывающий весь диапазон глубин от осадочного чехла до мантии включительно и объединяющий зоны разрывных нарушений и зоны трещиноватости. Как отмечалось выше, данные сверхглубокого бурения позволили определить не только природу слоев пониженной скорости, но и установить присутствие в них экранированных флюидов.

В современных глубинных исследованиях методы ГСЗ и МОВЗ комплексируются с электромагнитными методами. Соотношение между значениями электрической проводимости и уменьшением скорости продольных волн позволяет оценить природу аномально низкой проводимости глубинных горизонтов консолидированной коры, вызванной содержанием графита или флюида. При совместном анализе характерных особенностей сейсмической записи, затухания, скорости продольных и поперечных волн и электрической проводимости удастся прогнозировать проницаемость и флюидонасыщенность глубинных горизонтов коры. В частности для зоны сочленения Скифской плиты со структурами Главного Кавказского хребта удельное электрическое сопротивление понижается более чем на порядок, амплитуды обменных волн – в 5 раз, скорости продольных волн – до 6%, что позволяет интерпретировать этот волновод флюидосодержащим [Белявский и др., 2007].

Поперечные волны. Для поперечной преломленно-рефрагированной волны, как и для продольной преломленно-рефрагированной волны, аномально низкие значения скорости являются верным признаком открытого РН. При этом скорость поперечных волн – более надежный признак такого РН, чем скорость продольной волны. Это объясняется тем, что скорость поперечной волны значительно чувствительнее к жестким связям в структуре породы и, соответственно, к их разрушению. По результатам лабораторных исследований [Волярович и др., 1979], уменьшение V_s связано с проскальзыванием волны

на смоченных жидкостью контактах образцов горных пород. К тому же, диапазон изменения значений V_s в горных породах меньше относительно V_p волны. По данным [Караев, Рабинович, 2000], интервал изменений V_s для сейсмического диапазона в зонах дробления уменьшается до 35% от средних значений, в акустическом диапазоне – до 50%. Для V_p этот интервал более чем в 1,5 раза шире.

Те же общие физические закономерности в распространении S–волн не только определяют возможность регистрации поперечных волн, отраженных от РН, но еще и позволяют оценить преобладающий фазовый состав флюида в РН. На рис. 16 представлены сейсмограммы из общего пункта взрыва, полученные при детальном сейсморазведочных работах на Лелековском рудном поле (Кировоградский тектонический блок, Украинский кристаллический щит). В первых вступлениях регистрируется преломленная Р–волна, к ней примыкает отражение от наклонного (угол падения приблизительно 55°) РН. В последующих вступлениях следом за преломленной Р–волной прослеживается преломленная S–волна, претерпевшая обмен с S– на Р–волну на границе чехла и фундамента. К ней (аналогично с отраженной Р–волной) примыкает S–волна, отраженная от той же границы. По восстанию выход этой отражающей границы попадает в дельту мелкой речки. Как известно, в рельефе обводненные РН являются активными, открытыми РН. На рис. 17 показан фрагмент аэрофотоснимка, иллюстрирующий различные проявления активных РН в рельефе и гидросети. На приподнятых тектонических блоках активные РН трассируются вытянутыми озерами, в опущенных блоках – располагаются в речных долинах [Орлов, 2006]. В гидрогеологии русла рек обычно рассматриваются как области инфильтрации поверхностных вод, это позволяет с большой долей вероятности интерпретировать РН, совпадающие с долинами рек как зоны инфильтрации воды. Отсюда, комплексирование результатов аэрокосмических и сейсмических методов предоставляет возможность классифицировать РН на изучаемых территориях по восходящей и нисходящей миграции флюидных потоков.

В качестве примера восходящей и нисходящей фильтрации флюида из структур центрального типа можно привести Калужскую кольцевую структуру. Процесс зарождения этих структур, по-видимому, начинается с восходящей вихревой миграции легких газов, водорода и гелия. На рис. 18 приведены результаты гелиевой съемки в районе расположения Калужской кольцевой структуры. Аномалии гелия совпадают с положением кольцевых разрывных нарушений. Калужская кольцевая структура в течение

всего фанерозоя имела повышенную геодинамическую и флюидную активность. Ее развитие началось с образования куполовидного поднятия докембрийского фундамента, которое предшествовало взрывному этапу формирования трубки взрыва [Собисевич, 2012]. В центральной части структуры, в узлах пересечения кольцевых и линейных разломов, обнаружены надфоновые концентрации водорода, радона и торона [Козлова и др., 1999], свидетельствующие о современной геодинамике Калужской кольцевой структуры. На радиальном профиле была проведена сейсмическая съемка по методу микросейсмического зондирования. Ее результаты (рис. 19а) показали хорошее совпадение вертикальной области низких значений V_s с зоной субвертикального РН (рис. 19б), в свою очередь совпадающей с гелиевой аномалией (рис. 18).

Как известно, во второй половине 19-го века произошло резкое обмеление р. Оки, которое, в первую очередь, возможно было связано с инфильтрацией воды. Приведенные выше данные свидетельствуют о современной флюидогеодинамической активизации древней кольцевой структуры.

Выше уже отмечалось, что амплитуда отраженной поперечной волны при смачивании границы всегда возрастает за счет проскальзывания волны на контактах пород [Г. Ушаков, М. Ушаков, 1993]. Это позволяет объяснить появление интенсивной отраженной поперечной волны присутствием воды в зоне РН. Таким образом, образование отраженной S-волны от РН характеризует его как открытый и водонасыщенный разлом.

На рис. 20 представлен фрагмент временного разреза общего пункта взрыва с продольной (PPP) и обменной (PPS) волнами, отраженными от общей наклонной границы, при этом преобладающая частота PPP-волны – 90 Гц, а волны PPS – 85 Гц. Толща пород, лежащая выше отражающей границы, – высокоскоростная (средняя скорость $V_p = 6000$ м/с), ниже залегающая – характеризуется значительно более низкой средней скоростью ($V_p = 5000$ м/с). Отражающая граница может рассматриваться как шов надвига. Область выхода этой отражающей границы (РН) на поверхность наблюдения совпадает с островком леса в степи и непосредственно с участком, на котором расположено несколько источников родниковой воды. Следовательно, для открытого обводненного РН можно ожидать образование не только высокочастотной продольной отраженной волны, но и отраженной высокочастотной обменной волны.

Высокая частота обменной отраженной волны служит дополнительным аргументом для отдельной обработки данных региональных наблюдений МОГТ с целью выделения обменных и поперечных волн в породах консолидированной коры.

Ранее признаки открытого РН, выделенного по сейсмическим данным, были описаны в работе [Гамбурцев, Кондратьев, 1987]. От поверхности шва "живущего" Карасуйского надвига были зарегистрированы продольные, поперечные и обменные отраженные волны. Шовная зона представлена крупной трещиной, заполненной влажной глиной трения, с линзами сильно разрушенного известняка и алевролита. Так же, как и проскальзывание поперечной волны на смоченных контактах частиц породы, скоростную контрастность по Р- и S-волнам увеличивает присутствие в зоне РН влажной глины трения.

На следующем рис. 21 приведен пример регистрации отраженных Р- и S-волн от наклонного РН в Шокпакской мульде (Северный Казахстан). Выход этой отражающей границы на поверхность наблюдения совпадает с заболоченным участком местности. На разрезе с высокочастотной фильтрацией отраженная S-волна практически исчезает, что указывает на значительное влияние зоны малых скоростей на частотный состав отраженных поперечных волн. Признаком открытого, живущего разлома, как уже было замечено выше, является обводненность прилегающей к нему территории. Следовательно, регистрация отражения от РН на Р- и S-волнах дает основание интерпретировать такие РН как открытые и обводненные.

При наземных сейсмических наблюдениях на вертикальных сейсмоприемниках преломленные и отраженные S-волны от границ в консолидированной коре регистрируются, прежде всего, при условии высоких значений коэффициента обмена на границе зоны малых скоростей, что встречается не так часто. Поэтому для составления объективной картины о распределении упругих параметров в среде и о фазовом составе флюида в зонах РН необходимы многоволновые сейсмические наблюдения.

Результаты многоволновых зондирований МОВ на Z-, X- и Y-компонентах в районе Кировоградского блока Украинского кристаллического щита показаны на рис. 22. Сразу же обращает на себя внимание присутствие большого количества регулярных отражений на X- и Y-компонентах. Это в основном объясняется тем, что преобладающие частоты продольных и поперечных волн незначительно отличаются друг от друга, а скорости их разнятся почти в два раза. Значения средней скорости в кристаллическом

фундаменте: $V_p \approx 6000$ м/с; $V_s \approx 3500$ м/с. Поэтому разрешенность по поперечным волнам в примерно 1,5 раза выше, чем по продольным волнам.

По данным измерения амплитуд преломленных и отраженных волн, полученных при возбуждении ненаправленными взрывами в скважинах, пробуренных до границы чехла и кристаллического фундамента, на X– и Y–компонентах отраженная S–волна прослеживается лучше, чем на Z–компоненте (см. табл. 2). При этом амплитуда отраженной волны на Y–компоненте превосходит амплитуду на X–компоненте (рис. 22), а дисперсия амплитуд преломленных волн на Y–компоненте меньше, чем на X–компоненте, что свидетельствует о стационарном возбуждении поперечных волн (рис. 23).

Таблица 2

Значения амплитуд продольных и поперечных волн по данным полевых измерений

№ профиля	Значения амплитуд, полученные при регистрации одновременно от одного взрыва					
	на горизонтальных (X) и вертикальных (Z) сейсмоприемниках				на горизонтальных (Y, X) сейсмоприемниках	
	A_x^{sss} / A_x^{ss}	A_z^{ppp} / A_z^{pp}	A_z^{ssp} / A_z^{sp}	A_z^{ppp} / A_z^{ssp}	A_x^{sss} / A_x^{ss}	A_y^{sss} / A_y^{ss}
102	0,033	0,060	0,027	2,20	0,033	0,045
8	0,032	0,080	0,036	2,60	0,033	0,048

Примечание: средние значения амплитуд – преломленной продольной (A_z^{pp}) и поперечной (A_x^{ss}) волн; преломленных обменных (A_z^{sp} , A_x^{ps}) волн; отраженных продольной (A_z^{ppp}) и поперечных (A_x^{sss} , A_y^{sss}) волн; отраженной обменной (A_z^{ssp}) волны на границе чехла и фундамента.

В первых вступлениях, в отличие от X–компоненты, на Y–компоненте обменная преломленная волна PS фактически не прослеживается (рис. 21), при том, что поперечные волны на Y–компоненте отличаются меньшей дисперсией значений амплитуд (рис. 23). Это позволяет рассматривать Y–компоненту как возможный инструмент идентификации отраженных S–волн, претерпевших обмен на границе чехла и фундамента. Следовательно, по данным только однократных многоволновых наблюдений можно определить природу отраженных волн на малых удалениях от пункта возбуждения и при малых углах наклона отражающей границы.

В сейсморазведочном частотном диапазоне многоволновые наблюдения проводятся в ограниченном объеме, зато данные наблюдений многоволновых методов ГСЗ и МОВЗ охватывают большую часть территории Северной Евразии. В результате было установлено различие в распределении скорости продольных и поперечных волн в разрезе консолидированной коры [Булин, Егоркин, 2000].

В обработке и интерпретации данных наблюдений ГСЗ, как правило, не используются короткие оси синфазности докритических отражений, которые могут значительно расширить представления о внутреннем строении и характере флюидонасыщенности РН и существенно сблизить результаты МОГТ и ГСЗ. Пример крутонаклонных зон РН, выделенных по данным построений докритических отражений, представлены в работах [Кузин, 2015а, 2015б].

Приблизительная оценка на качественном уровне проницаемости зоны РН для флюида по данным ГСЗ или МОВЗ может быть сделана по контрастности распределения сейсмических параметров V_p , V_s и V_p/V_s . Чем контрастнее на границе скоростные параметры, тем больше вероятность его проницаемости для флюида. Параметр V_p/V_s функционально связан с коэффициентом Пуассона, который характеризуется соотношением продольной и поперечной деформаций. Контакт тектонических блоков с резким различием значений коэффициентов Пуассона может свидетельствовать о присутствии незалеченных минеральными растворами зон трещиноватости.

Перспективным направлением в совершенствовании методик прогноза фазового состава флюидов в зонах РН, возможно, будет использование пассивных сейсмических методов. В настоящее время пассивные сейсмические методы нашли применение в инженерной геологии, разведке месторождений. Главным преимуществом этих методов является возможность регистрации изменений упругих свойств геосреды во времени и пространстве. Как было показано выше, флюид оказывает наиболее сильное влияние на упругие свойства и на рассеивающие свойства геосреды. Поэтому разработка комплексных полевых систем наблюдений, активных и пассивных сейсмических методов, алгоритмов и программ обработки сейсмических данных, направленных на изучение миграции глубинных флюидов с различным фазовым составом, может явиться новым направлением в геоэкологии, прогнозе землетрясений и многих других исследованиях, связанных с геологической средой.

Выводы

1. Предложена классификация разрывных нарушений, основанная на особенностях флюидного воздействия на геологическую среду и фазового состава флюида. Классификация охватывает диапазон глубин от верхней мантии до рыхлых отложений. Она может способствовать унификации изучения геологического строения.

2. Согласно предложенной классификации разрывных нарушений рассмотрены возможности прогноза содержания флюида и его фазового состава по данным сейсмических наблюдений.

3. Предложенная классификация разрывных нарушений может найти практическое применение при прогнозе землетрясений, в инженерной геологии и геоэкологии, глубинных поисках месторождений полезных ископаемых.

ЛИТЕРАТУРА

Абукова Л.А. Модели и механизмы нисходящей миграции УВ из осадочного чехла в приподнятые блоки фундамента // Нефтегазовая гидрогеология на современном этапе (теоретические проблемы, региональные модели, практические вопросы). М.: ГЕОС, 2007. С. 191–209.

Азими Ш.А., Калинин А.В., Калинин В.В., Ковальская И.Я., Пивоваров Б.Л. Результаты акустического профилирования в среднем течении реки Оби // Разведочная геофизика. М.: Недра, 1973. Вып. 57. С. 74–80.

Алешин А.С. Сейсмическое микрорайонирование особо ответственных объектов. М.: Светоч Плюс, 2010. 304 с.

Алешин А.С., Анциферов А.В., Компанец А.И., Туркель М.Г. Изучение массива горных пород с использованием сейсмоакустических методов при изысканиях для строительства тоннеля // Физика Земли. 2005. № 11. С. 84–91.

Белявский В.В., Егоркин А.В., Солодилов Л.Н., Ракитов В.А., Яковлев А.Г. Некоторые результаты применения методов естественных электромагнитных и сейсмических полей на Северном Кавказе // Физика Земли. 2007. № 4. С. 4–14.

Будин Н.К., Егоркин А.В. Региональный прогноз нефтегазоносности недр по глубинным сейсмическим критериям. М. Центр ГЕОН, 2000. 194 с.

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

Гаврилов В.П. Происхождение нефти. М.: Наука, 1986. 176 с.

Гамбурцев А.Г., Кондратьев О.К., Максаков В.С. Опыт выделения отраженных волн в зонах разломов // Сейсмические волновые поля в зонах разломов / Под ред. А.В. Николаева. М.: Наука, 1987. С. 145–154.

Гарагаш И.А., Николаевский В.Н., Степанова Г.С. Миграция и критерии аккумуляции углеводородов в системе тектонических разломов // Докл. РАН. 1992. Т. 324, № 6. С. 1169–1174.

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.

Геологические структуры эндогенных урановых рудных полей и месторождений. М.: Недра, 1986. 231 с.

Гринь Н.Е., Гринь Д.Н. Затухание сейсмических волн и прогнозирование путей движения флюидов // Дегазация Земли: геодинамика, геофлюиды, нефть, газ и их парагенезисы: Материалы Всерос. конф. М.: ГЕОС, 2008. С. 134–237.

Караев Н.А., Биезайс Я.Я., Борис Е.И., Максимкина Л.В. Транскоровая сейсмогеологическая модель Накынского кимберлитового поля Якутской алмазоносной провинции // Проблемы прогнозирования, поисков и изучения месторождений полезных ископаемых на пороге XXI века: Сб.ст. Воронеж: Изд-во Воронежск. гос. ун-та. 2003. С. 293–296.

Караев Н.А. Сейсмическая гетерогенность сложнопостроенных сред // Актуальность идей Г.А. Гамбурцева в геофизике XXI века. М.: Янус-К, 2013. С. 81–119.

Караев Н.А., Рабинович Г.Я. Рудная сейсморазведка. М.: ЗАО «Геоинформмарк», 2000. 366 с.

Киссин И.Г. Метаморфогенная дегидратация пород земной коры как фактор сейсмической активности // Докл. РАН. 1996. Т. 351, № 5. С. 679–682.

Киссин И.Г. Современный флюидный режим земной коры и геодинамические процессы // Флюиды и геодинамика. М.: Наука, 2006. С. 85–104.

Козлова Н.С., Рудаков В.П., Шулейкин В.Н., Войтов Г.И., Баранова Л.В. Эманиационные и электрические эффекты в атмосфере подпочв над Калужской импактной кольцевой структурой // Рос. журнал наук о Земле. 1999. Т. 1, № 6. С. 503–510.

Кондрашков В.В., Анискович Е.М., Богданов А.Н. Метод параметрической развертки отображений: от концепции до обрабатывающей системы // Геофизика. 1998. № 4. С. 21–29.

Корытов Ф.Я. О критических уровнях механических напряжений в литосфере // Механика литосферы. М.: Наука, 1974. С. 37–46.

Кузин А.М. Некоторые особенности интерпретации волновых полей в зонах разрывных нарушений // Геофизика. 1999. № 5. С. 3–15.

Кузин А.М. Пространственно-фазовая локализация месторождений углеводородов и отображение конвергентности процессов флюидизации в геологической среде по сейсмическим данным // Дегазация Земли и генезис нефтяных месторождений: Сб. ст. к 100-летию со дня рождения академика П.Н. Кропоткина. М.: ГЕОС, 2011. С. 276–301.

Кузин А.М. О возможной природе относительно низких значений параметра V_p/V_s рудных залежах флюидного генезиса // Геофизика. 2012. № 2. С. 7–15.

Кузин А.М. О сейсмической модели залеченного и «живущего» разрывного нарушения // Сборник научных трудов УкрГГРИ. 2014а. № 1. С. 99–109.

Кузин А.М. Горизонты инверсии упругих свойств геологической среды в данных сейсмических наблюдений // Геофизические исследования. 2014б. Т. 15, № 3. С. 71–82.

Кузин А.М. О некоторых общих свойствах флюида в геологических процессах, явлениях и закономерностях (к обоснованию единой системы геолого-геофизического изучения недр). Часть 1 [Электронный ресурс] // Георесурсы, геоэнергетика, геополитика: Электрон. науч. журн. 2015а. Вып. 2(12). 12 с. – Режим доступа: <http://www.oilgasjournal.ru> (Дата обращения 21.02.2016).

Кузин А.М. О некоторых общих свойствах флюида в геологических процессах, явлениях и закономерностях (к обоснованию единой системы геолого-геофизического изучения недр). Часть 2 [Электронный ресурс] // Георесурсы, геоэнергетика, геополитика: Электрон. науч. журн. 2015б. Вып. 2(12). 29 с. – Режим доступа: <http://www.oilgasjournal.ru> (Дата обращения 21.02.2016).

Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б. Иерархический ряд проявлений щелочно-ультраосновного магматизма Архангельской алмазоносной провинции. Их отражение в геолого-геофизических материалах. Архангельск: ОАО «ИПП «Правда Севера», 2004. 284 с.

Люхин А.М., Серокуров Ю.М., Калмыков И.В. Отражение кимберлитовых тел Далдынского поля в материалах аэро- и космических съемок // Проблемы прогнозирования, поисков и изучения месторождений полезных ископаемых на пороге XXI века: Сб.ст. Воронеж: Изд-во Воронежск. гос. ун-та, 2003. С. 536–538.

Николаевский В.Н. Механика пористых и трещиноватых сред. М.: Недра, 1984. 232 с.

Орлов В.И. Динамическая география / Науч. ред. Г.В. Добровольский. М.: Науч. мир, 2006. 594 с.

Поспеева Е.В. Глубинное строение юга Восточной Сибири по результатам магнитотеллурических зондирований // Проблемы прогнозирования, поисков и изучения месторождений полезных ископаемых на пороге XXI века: Сб.ст. Воронеж: Изд-во Воронежск. гос. ун-та, 2003. С. 326–330.

Собисевич А.Л. Избранные задачи математической геофизики, вулканологии и геоэкологии. М.: ИФЗ РАН. 2012. Т. 1. 512 с.

Суворов В.Д. Глубинные сейсмические исследования в Якутской кимберлитовой провинции. Новосибирск: Наука, 1993. 234 с.

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

ПРИЛОЖЕНИЕ



Рис. 1. Коэффициенты отражения для пород, подвергнувшихся гидротермально-метасоматическим изменениям. Коэффициенты отражения рассчитаны для нормального падения волны [Кузин, 1999]. Виды гидротермально-метасоматически измененных пород: А–Н, литологический тип пород: 1–12

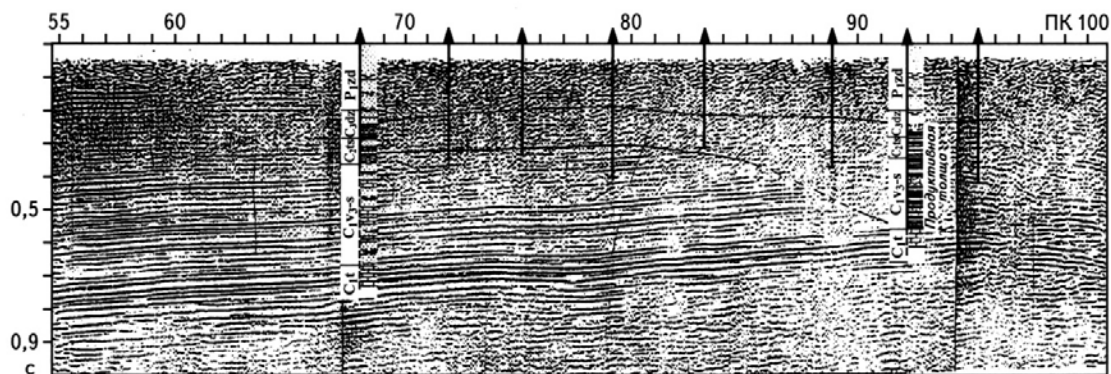


Рис. 2. Временной разрез МОГТ по профилю, проходящему через зону медистых песчаников (по Ф.А. Хабибулину) [Караяев, Рабинович, 2000]

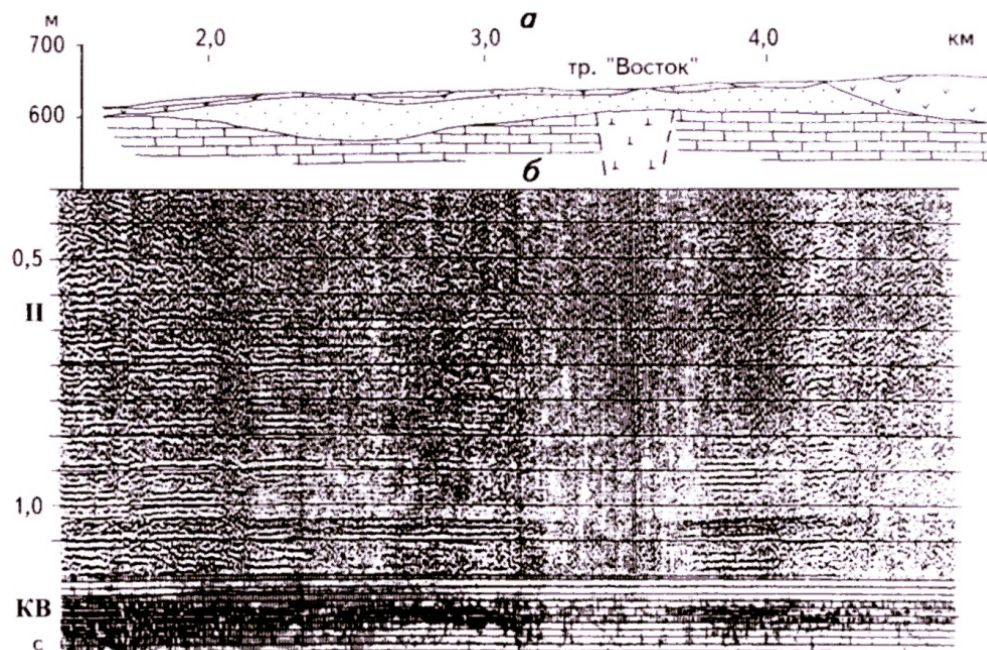


Рис. 3. Схематический геологический (а) и временной (б) разрезы по профилю, пересекающему кимберлитовую трубку «Восток» (по О.И. Калинину) [Караев, Рабинович, 2000]



Рис. 4. Пример проявления аномальных эффектов в поле отраженных волн от неглубоких горизонтов в районе трубки «Сытыканская» (по О.И. Калинину) [Караев, Рабинович, 2000]

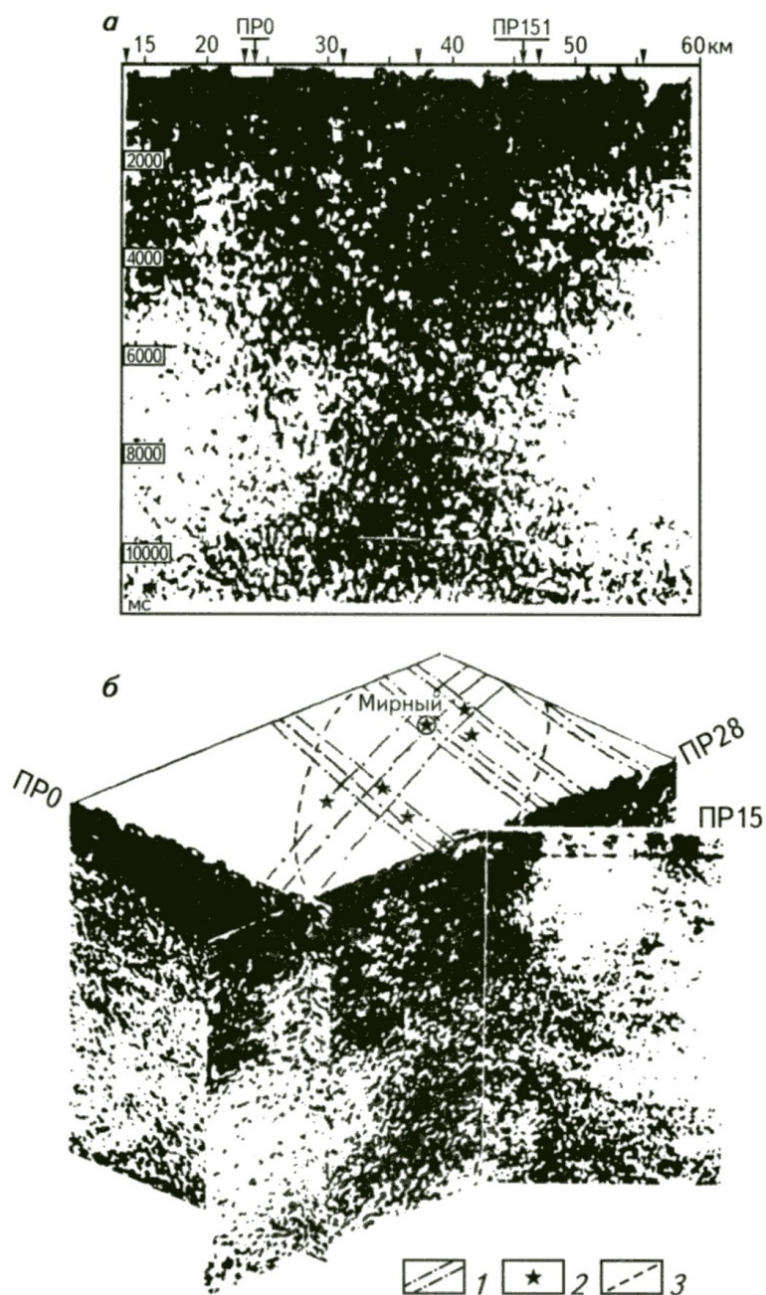


Рис. 5. Мигрированные разрезы по региональным профилям через Мирнинское поле трубок (наблюдения проведены с использованием взрывных источников возбуждения): *а* – широтный профиль 28; *б* – профили 0, 28, 151 в аксонометрической проекции (результаты обработки ЦНИГРИ АО «Алроса») [Караев, Рабинович, 2000].
 1 – выходы глубинных разломов на поверхность; 2 – кимберлитовые трубки; 3 – контур Мирнинского поля трубок

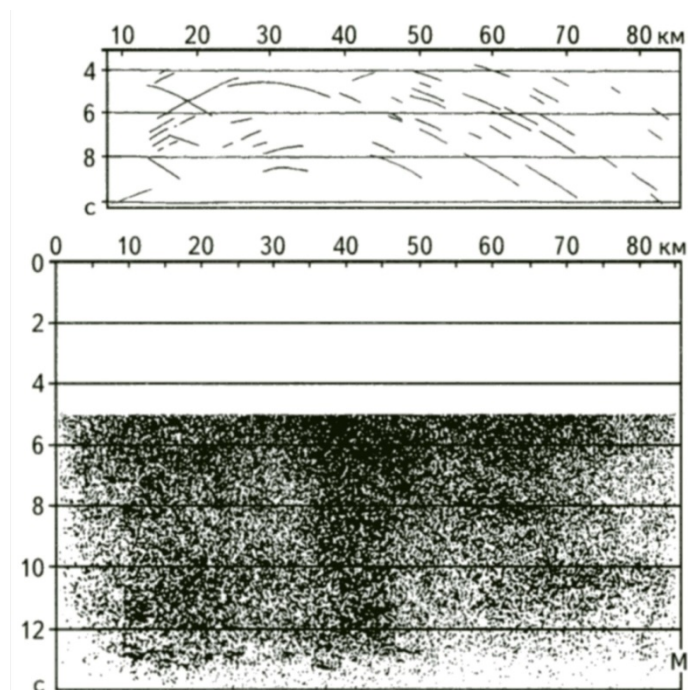


Рис. 6. Поле годографов рассеянных волн и соответствующий мигрированный разрез по региональному профилю II через Мирнинское поле трубок (результаты вибросейсмических наблюдений) [Караев, Рабинович, 2000]

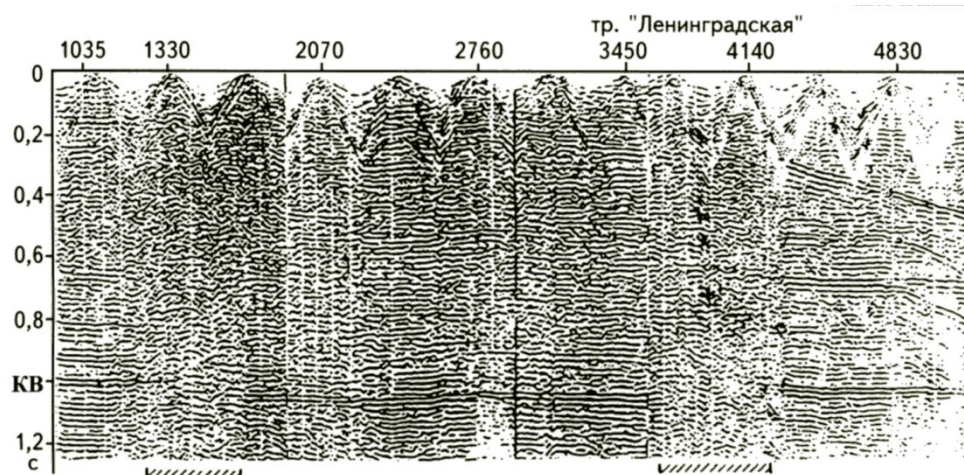


Рис. 7. Пример выделения области развития кимберлитовых трубок (заштриховано) по anomalно высокому затуханию отражения от горизонта КВ в сочетании с интенсивным полем рассеянных волн от локальных неоднородностей трубки и околотрубного пространства (по О.И. Калинину) [Караев, Рабинович, 2000]

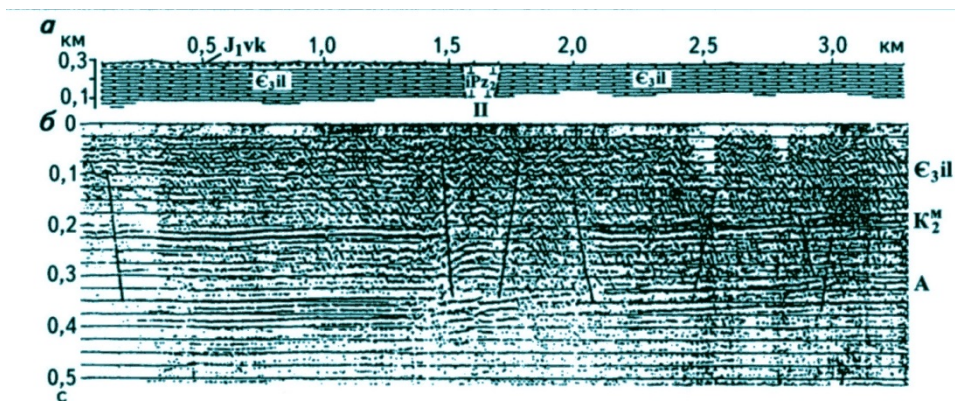


Рис. 8. Геологический (а) и временной ОГТ (б) разрезы при пересечении трубки «Таежная», приуроченной к зоне регионального разлома [Караев, Рабинович, 2000]

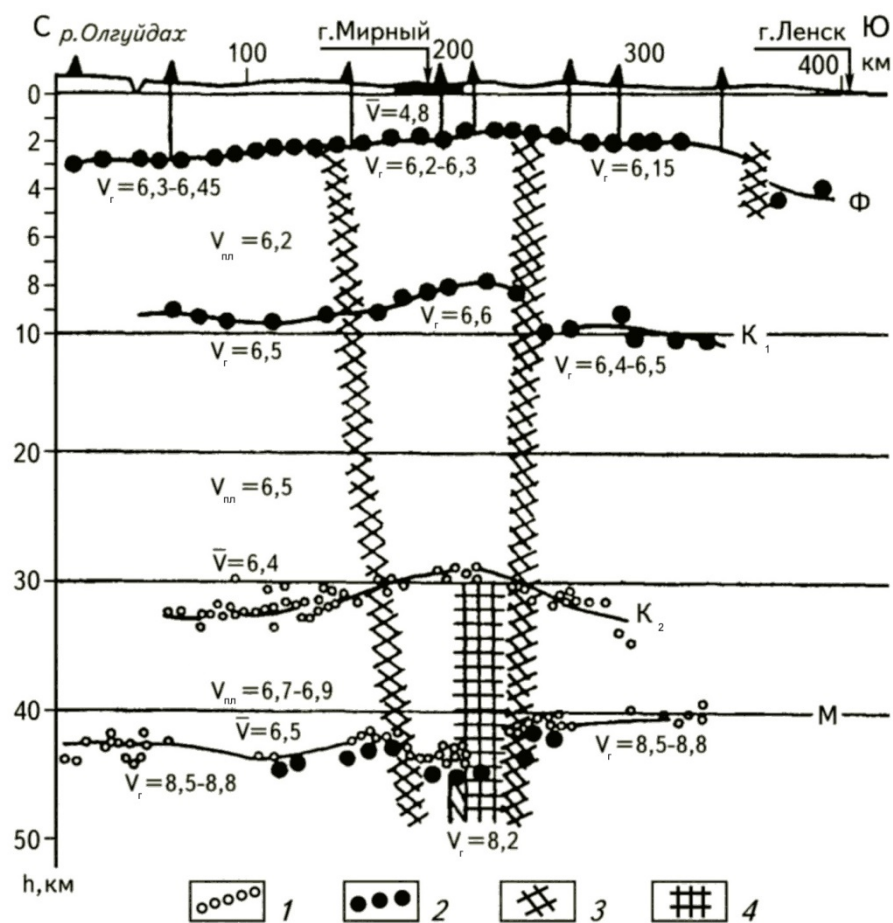


Рис. 9. Разрез земной коры через Мирнинское поле трубок по данным наблюдений способом дифференциальных зондирований [Суворов, 1993]: 1 – глубины по данным отраженных волн; 2 – глубины по данным преломленных волн; 3 – разломы; 4 – коромантийная неоднородность [Караев, Рабинович, 2000]

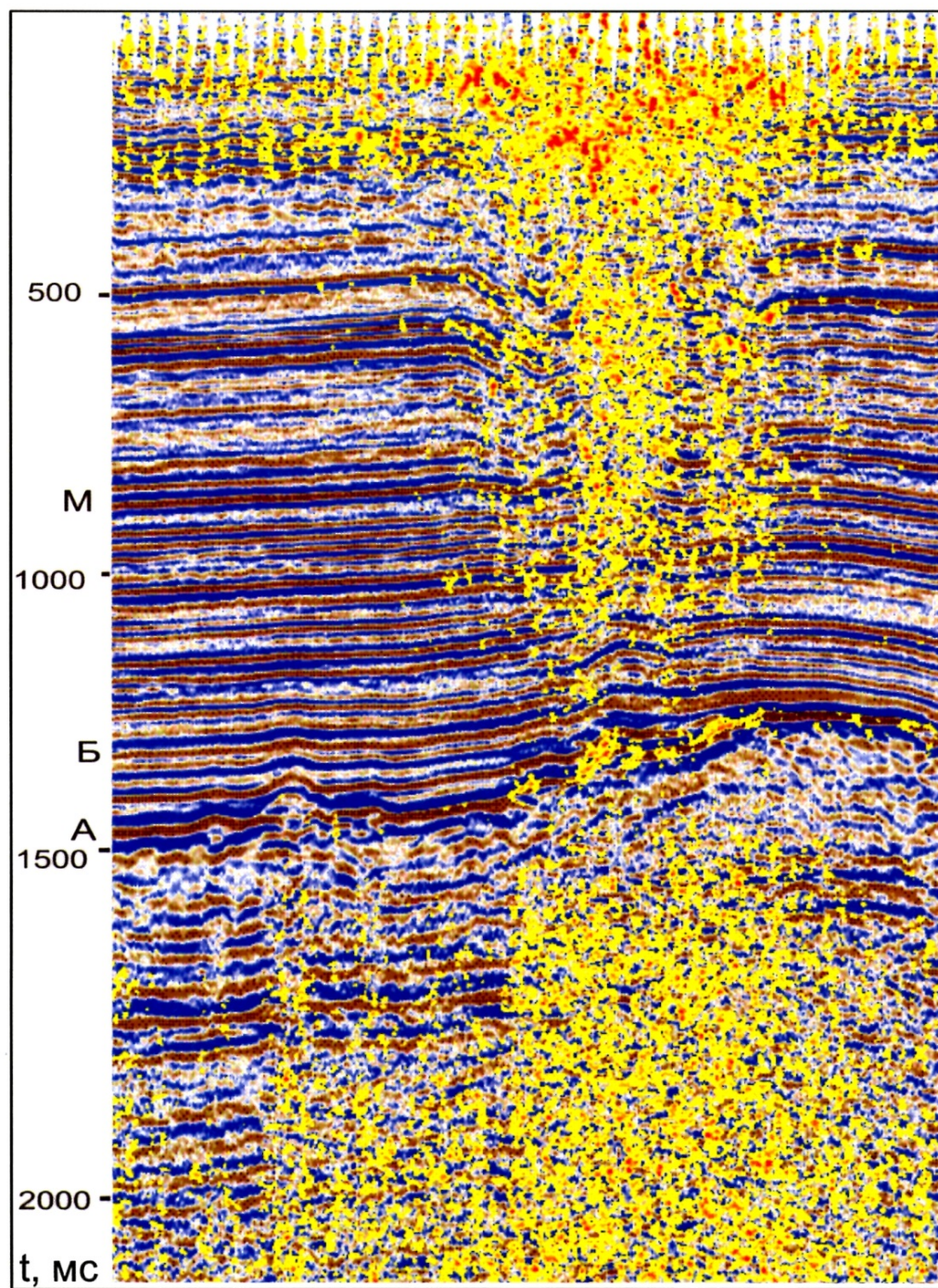


Рис. 10. Временной разрез. Типы возможных каналов вертикальной миграции флюидов (Западная Сибирь, Приуральская НГО, Краснотенский свод, нефтегазоконденсатное месторождение). Динамически слабоинтенсивная аномалия сейсмической записи (По материалам С.Р. Бембеля, 2011)

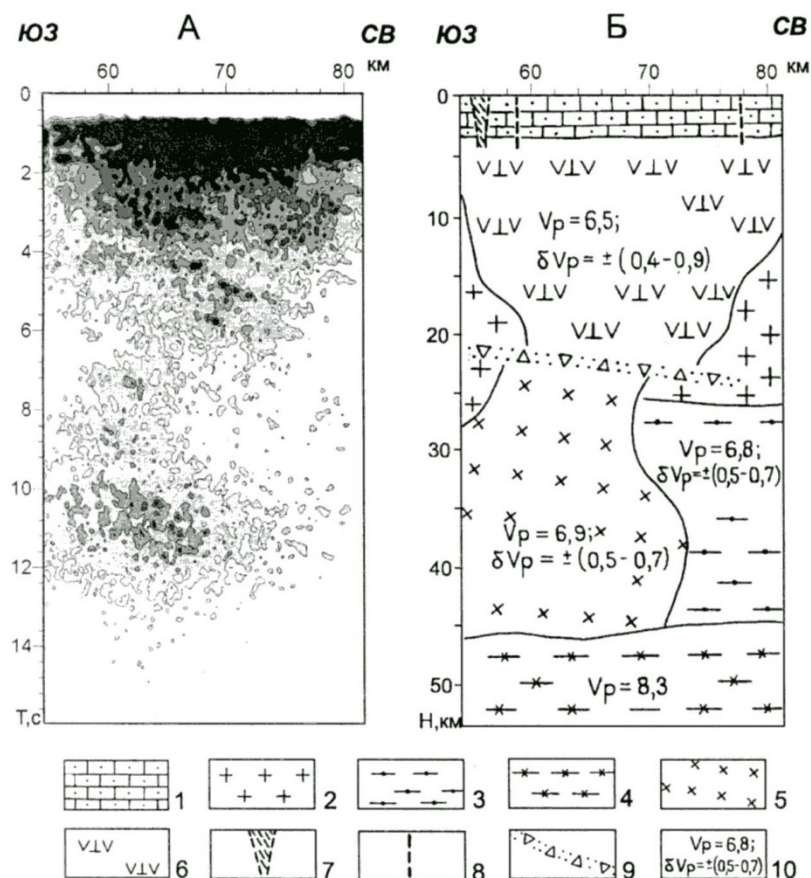


Рис. 11. Структура волнового поля по данным региональных исследований МОВ, МОГТ (А) и сейсмогеологическая модель земной коры Накынского кимберлитового поля (Б): 1 – терригенно-карбонатные образования платформенного чехла; 2 – гранито-гнейсовый комплекс; 3 – гранулит-базитовый комплекс; 4 – образования верхней мантии; 5 – породы-мантийно-корового диапира базит-ультрабазитового состава; 6 – базит-кимберлитовые породы тектоно-магматической зоны; 7 – кимберлитовые трубки; 8 – разрывные нарушения платформенного чехла и фундамента; 9 – предполагаемая деструктивная граница между мантийно-коровым диапиром и тектоно-магматической зоной; 10 – значения скорости продольных волн и величина их флуктуаций в м/с [Караев и др., 2003]

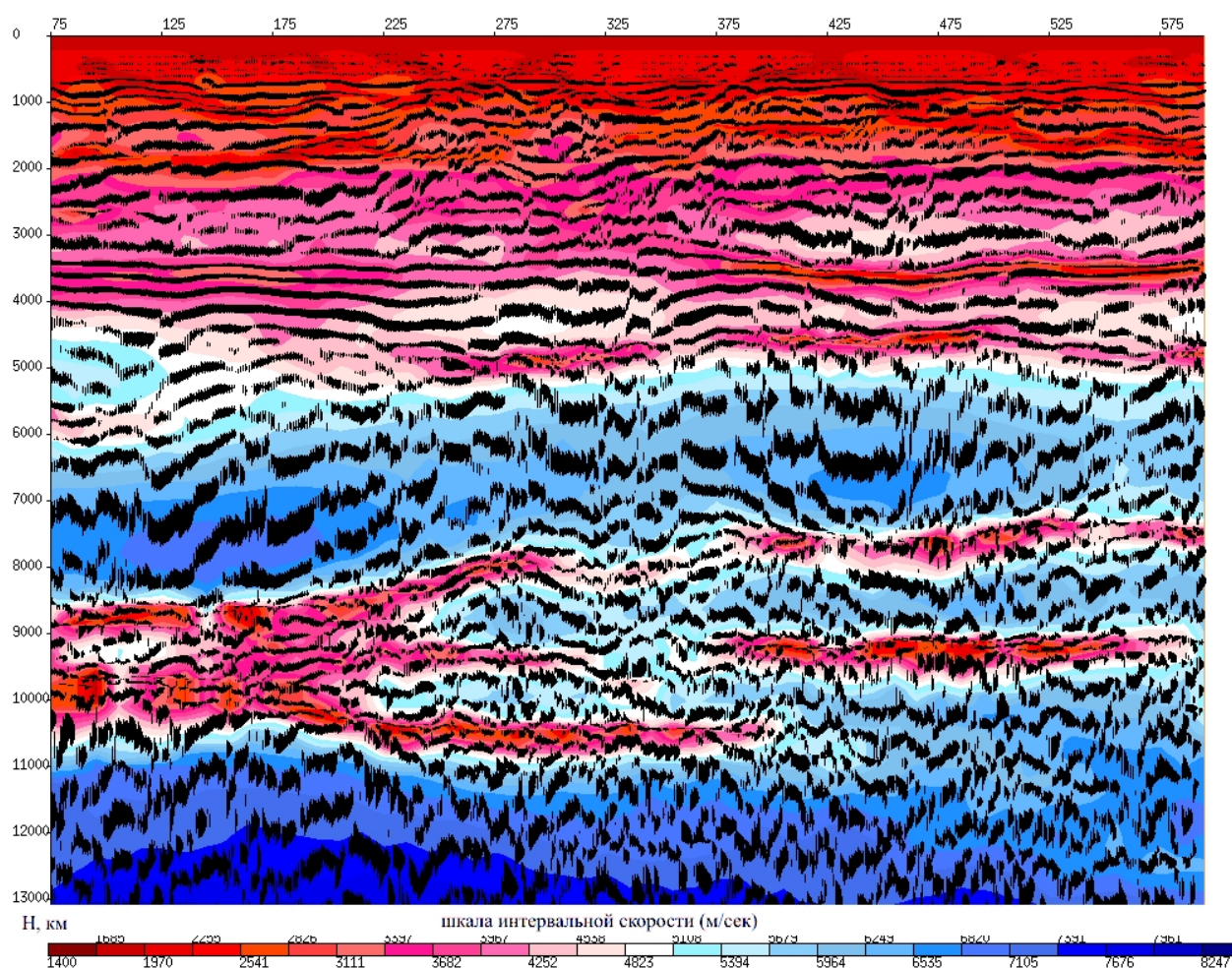


Рис. 12. Профиль № 8 МОГТ (Ханты-Мансийская площадь). Обработка по методу параметрической развертки отображений. Разрез интервальной скорости в глубинном масштабе. Фильтрация полосовая 3-5-7-10 Гц, осреднение по зоне Френеля 1.4 (по материалам автора)

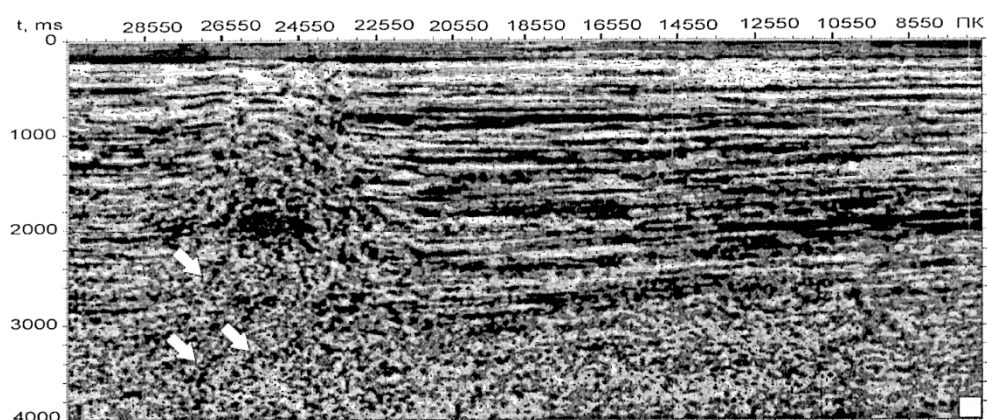


Рис. 13. Временной разрез логарифмических декрементов затухания по профилю 17. Структура Голицина, Черноморский шельф [Н. Гринь, Д. Гринь, 2008]

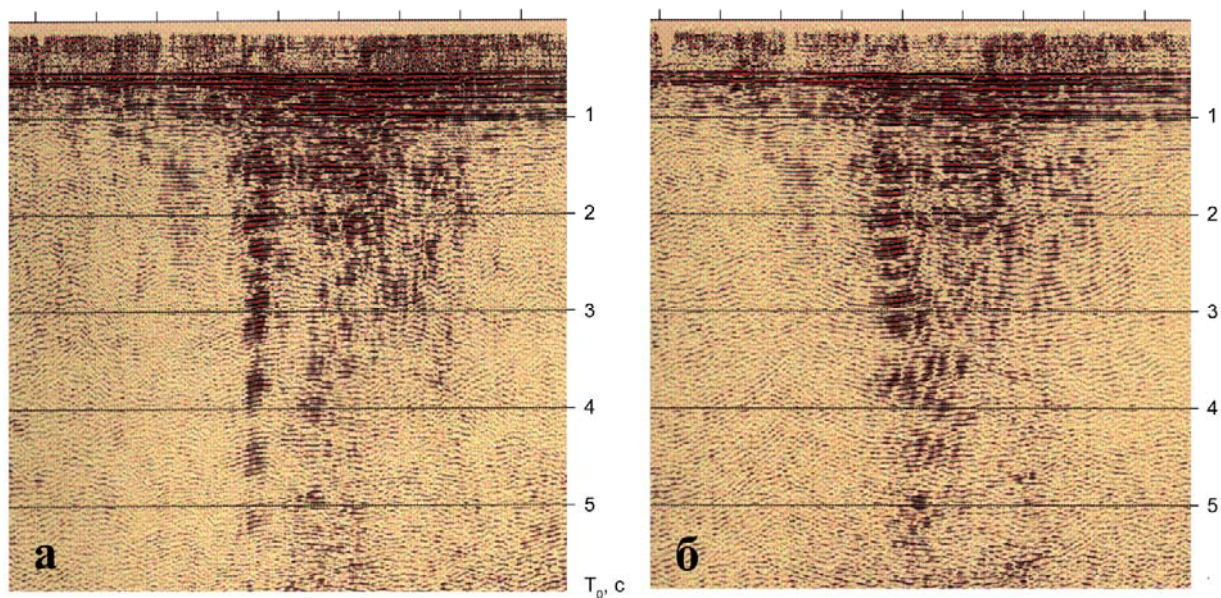


Рис. 14. Вертикальная область интенсивной сейсмической записи. Фрагмент временного разреза геотраверса МОГТ «Татсейс» (обработка ИГиРГИ, 2005 г., по данным автора)

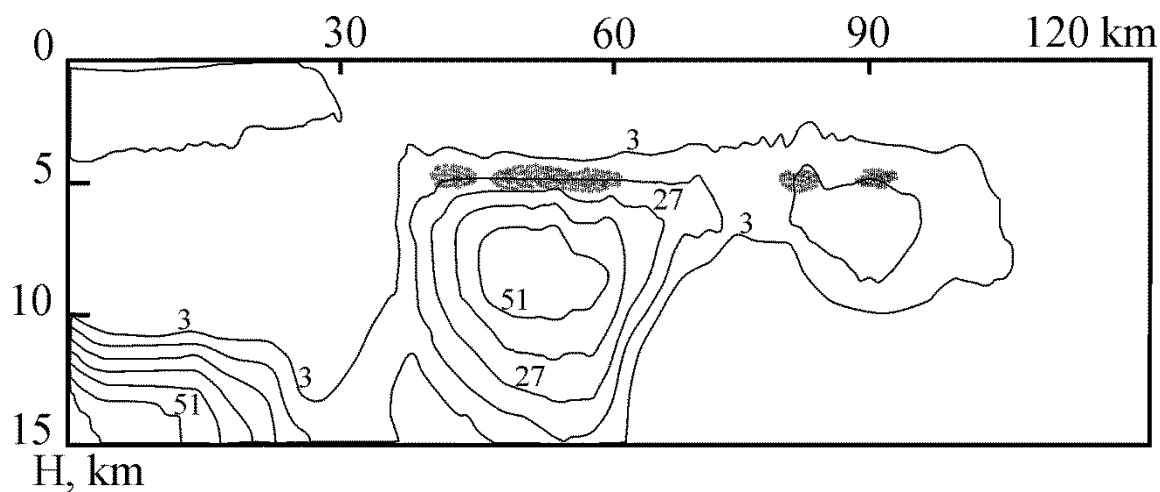


Рис. 15. Низкие литостатические давления под месторождением Тенгиз, рассчитанные на основе сейсмических и гравитационных полей. Числа около изолиний соответствуют дефициту давления, в атмосферах; нефтяные залежи показана точками [Гарагаш и др., 1992]

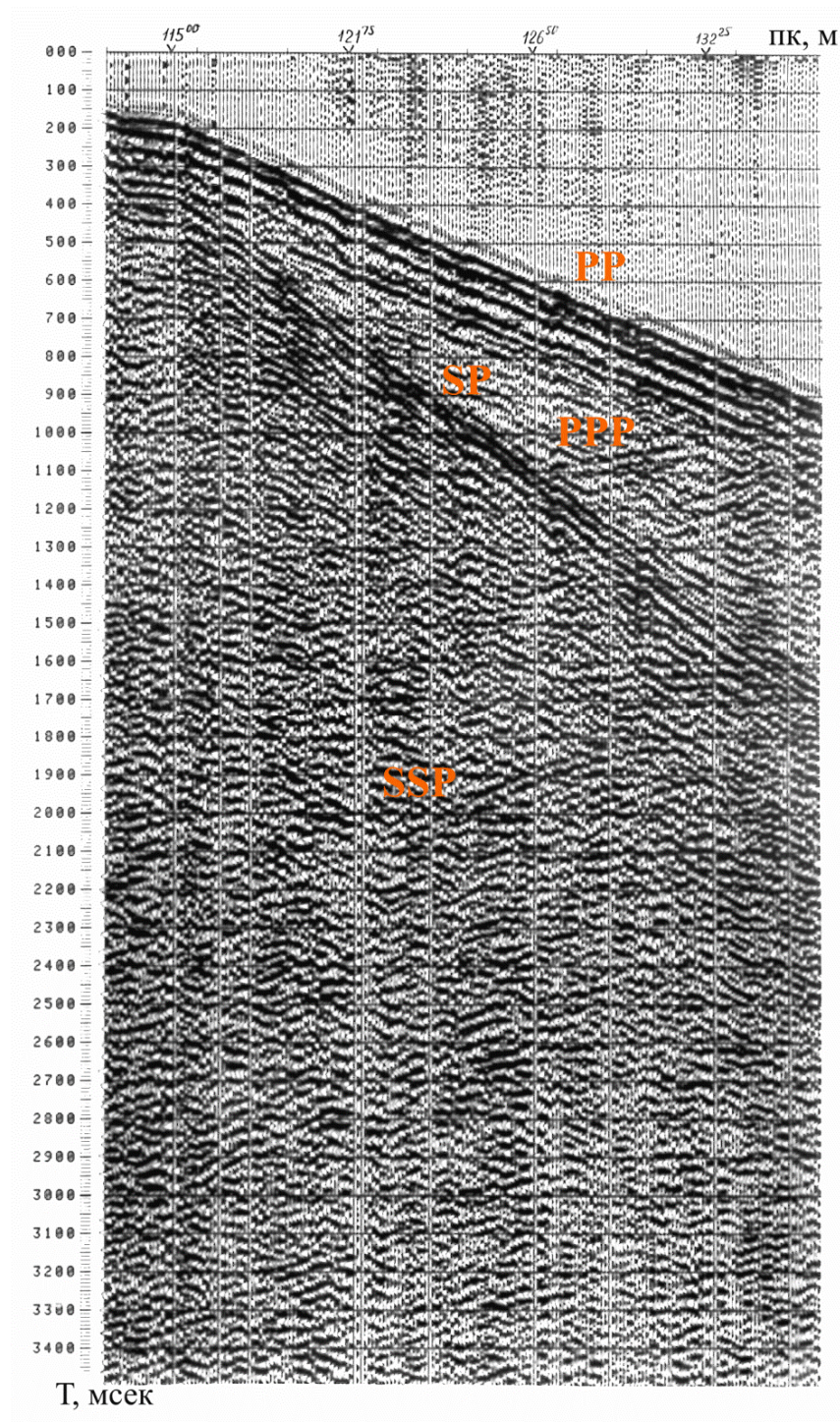


Рис. 16. Сейсмограммы МОВ (Кировоградский тектонический блок, Украинский кристаллический щит). Полосовая фильтрация 20–70 Гц. PP – преломленная продольная волна на поверхности фундамента; PPP – отраженная продольная волна от разрывного нарушения; SP – преломленная обменная волна по поверхности фундамента, в чехле распространяется как продольная волна; SSP – отраженная обменная волна от разрывного нарушения, в чехле распространяется как продольная волна (по материалам автора)

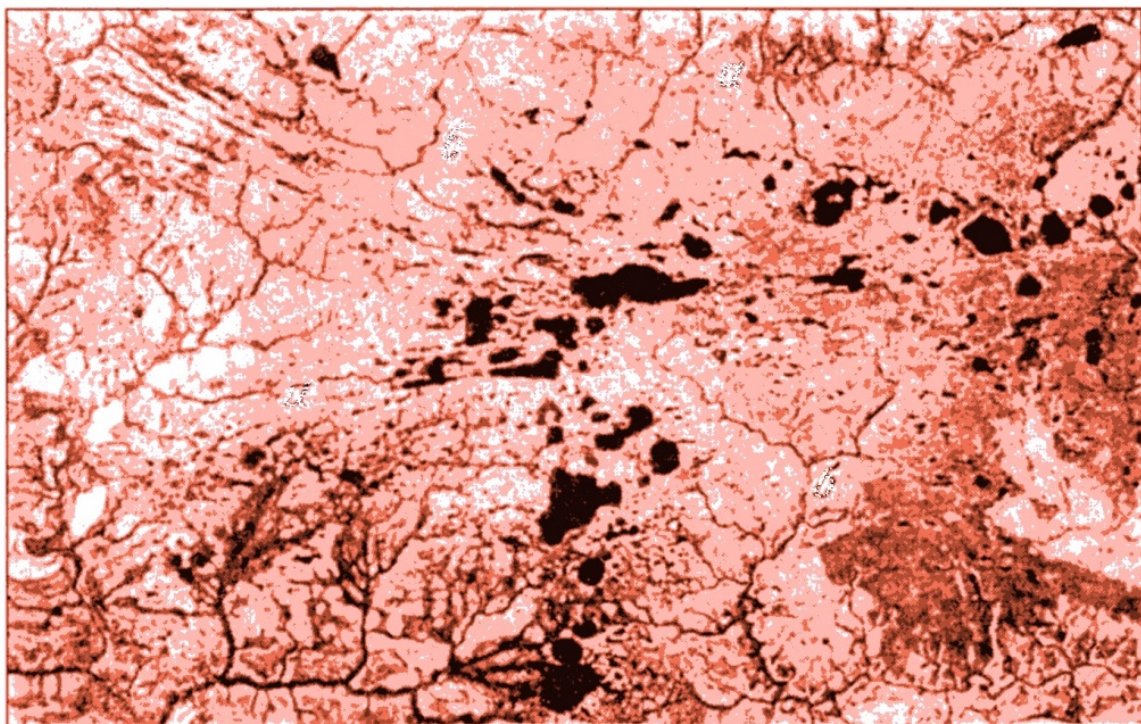


Рис. 17. На фрагменте аэрофотоснимка (северный участок Надымской равнины) зафиксированы следы тектонических нарушений активной геологической структуры. [Орлов, 2006]. Наиболее приподнятые участки разломов фиксируются своеобразными вытянутыми озерами

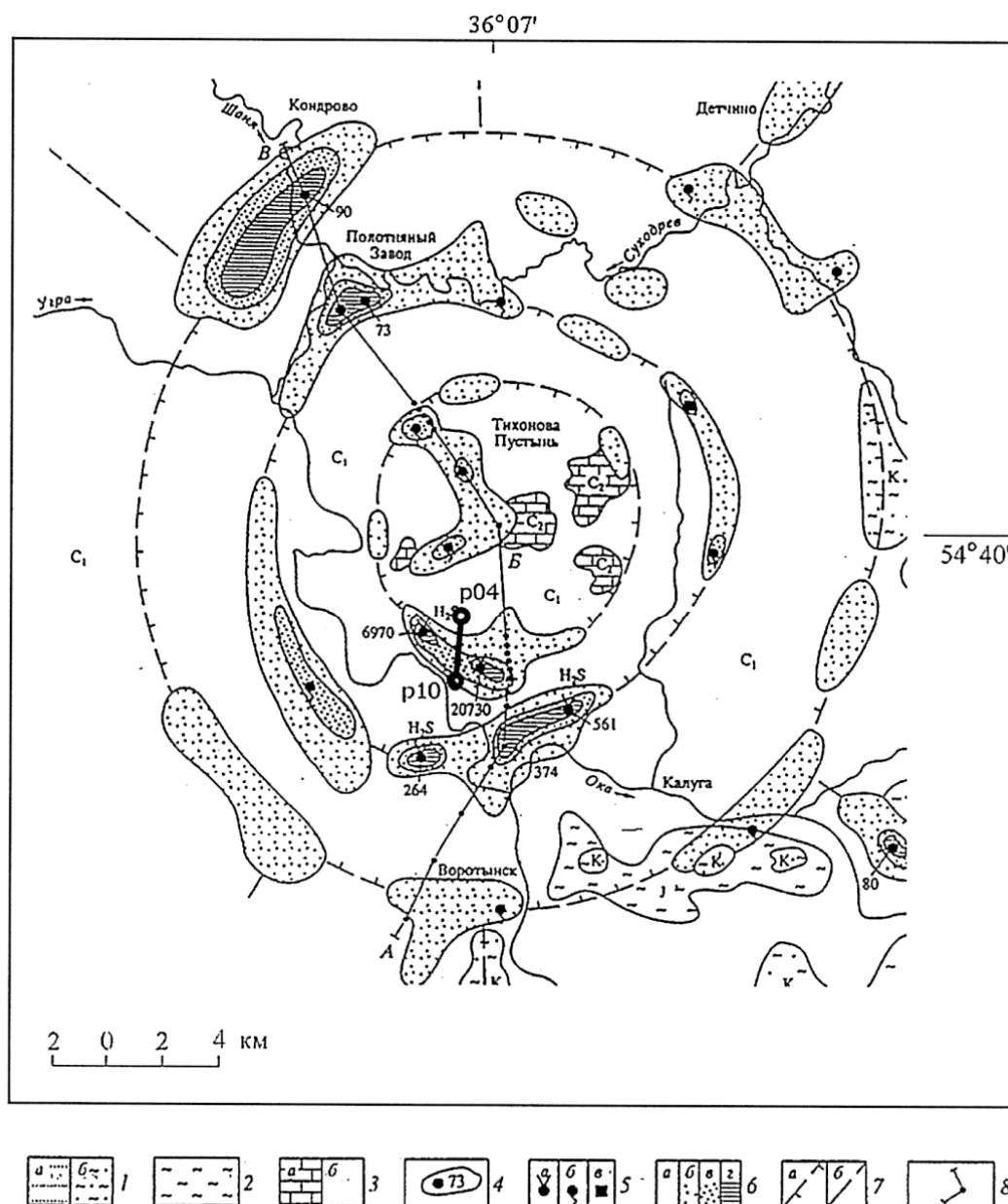


Рис. 18. Схема геологического строения Калужской кольцевой структуры с характеристикой распределения приповерхностного поля гелия
 1 – пески неогена (а) и глины, пески мела (б); 2 – юрские глины; 3 – известняки, доломиты среднего карбона (а) и глины, алевролиты нижнего карбона (б); 4 – контуры волногелиевых аномалий и концентрация гелия в их эпицентрах (10–5 мл/л); 5 – гелиевоносные самоизливающиеся скважины с сероводородом (а), родники (б) и колодцы (в); 6 – шкала концентраций гелия в подземных водах (10–5 мл/л): а – менее 10, б – 10–20, в – 21–40, г – более 40; 7 – кольцевые (а) и линейные (б) активные глубинные разломы; 8 – линии геологического разреза (А-В-В) с его опорными скважинами. Линией (р10 – р04) показан геофизический профиль 2009 г. [Собисевич, 2012]

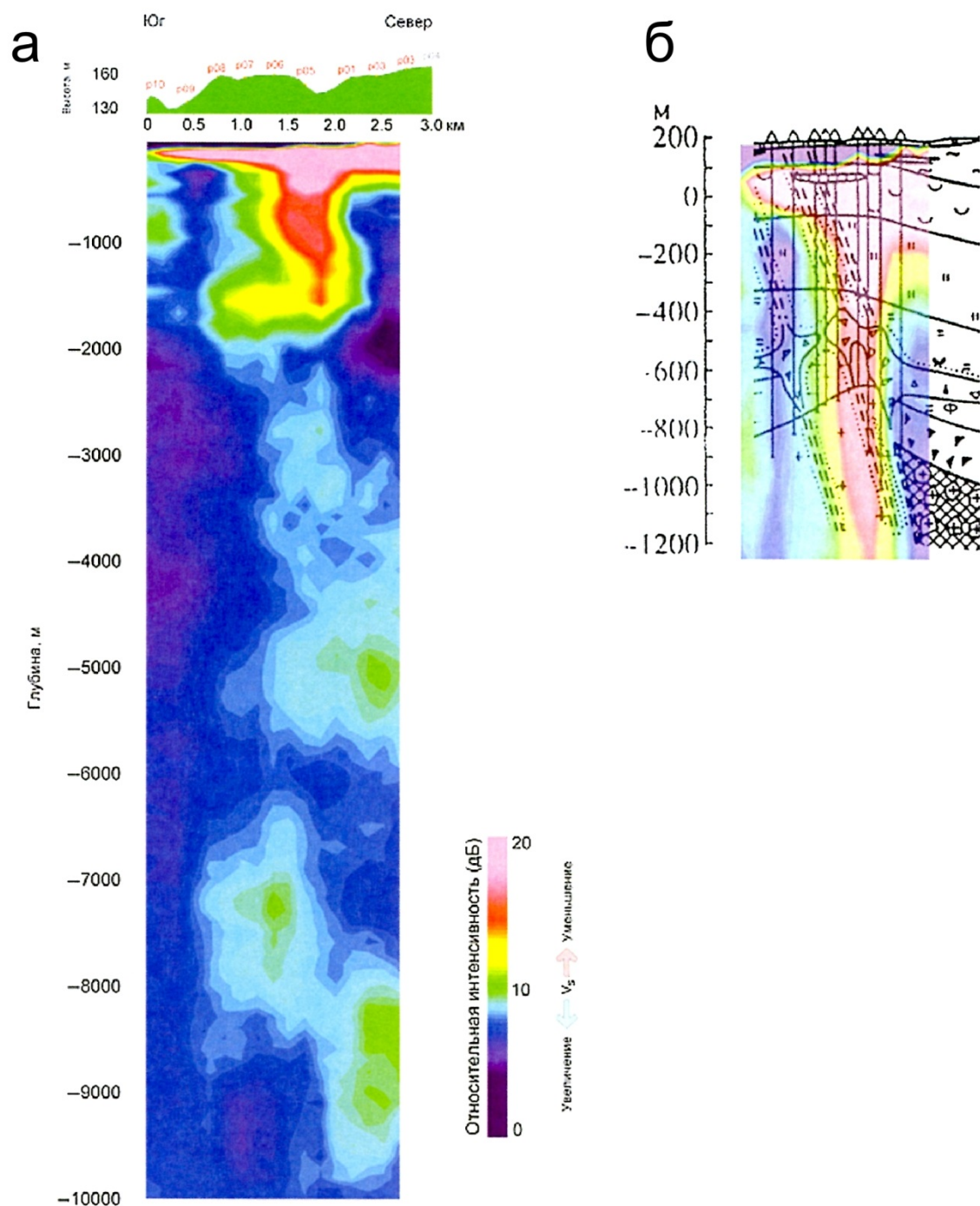


Рис. 19. Данные геолого-физического изучения Калужской кольцевой структуры: а – вертикальный сейсмический разрез вдоль профиля низкочастотного микросейсмического зондирования 2009 г. Флюидопроницаемые субвертикальные структуры удастся проследить до глубин 5–9 км. Тоновая шкала показывает относительную интенсивность реакции среды по разрезу на порождение рэлеевских микросейсмических волн с различной глубиной проникновения. Увеличение интенсивности реакции среды соответствует пониженным значениям скорости (более теплый цвет), уменьшение реакции – повышенным значениям скорости S-волн (более холодный цвет) [Собисевич, 2012]; б – Сопоставление данных профильных сейсмических наблюдений 2009 г. (цветовая шкала аналогичная рис. а) с разрезом, построенным по данным разведочного бурения до глубин 1200 м [Собисевич, 2012]

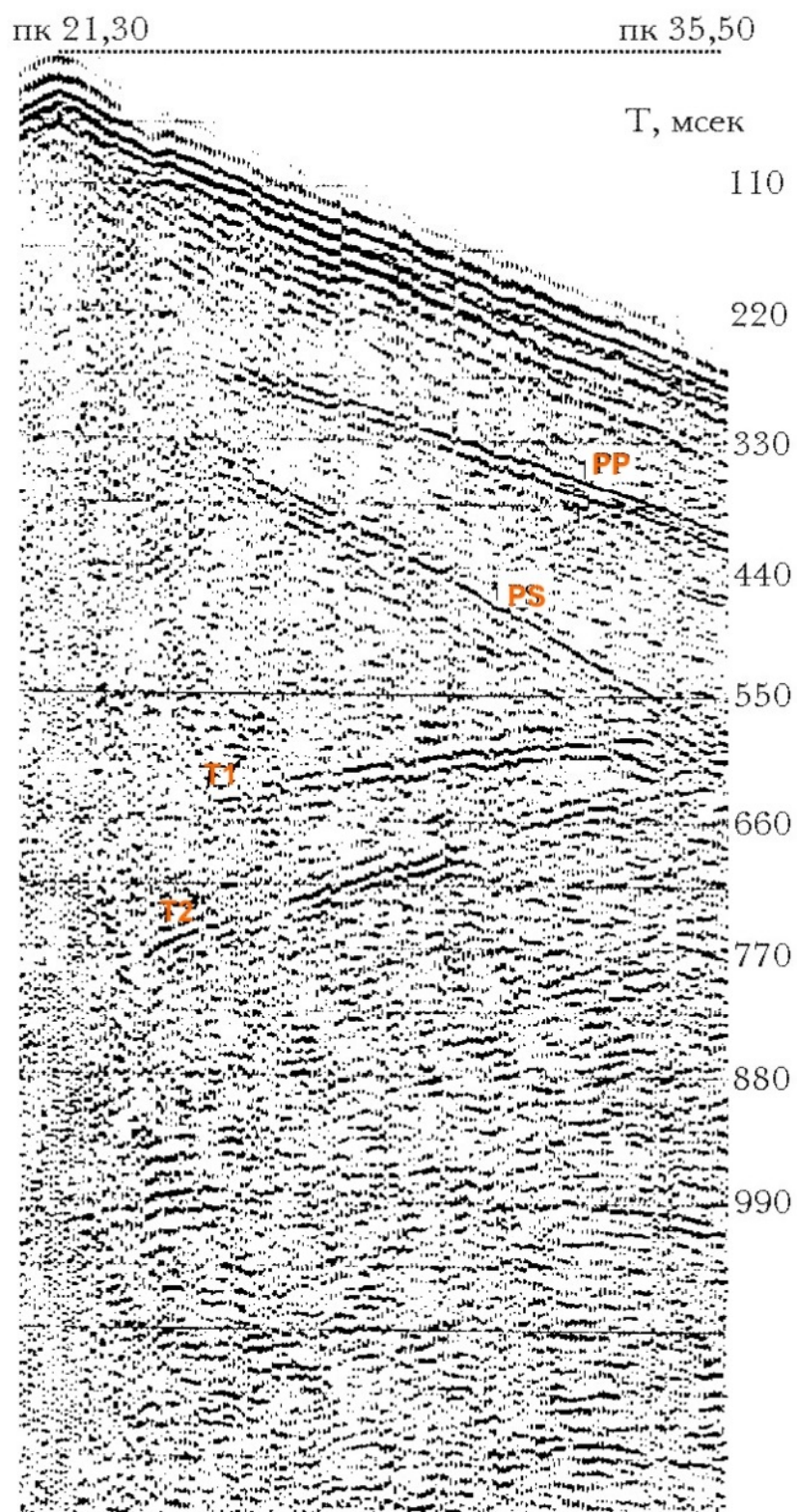


Рис. 20. Сейсмограммы с высокочастотными продольной (PP) и обменной (PS) отраженными волнами. Полосовая фильтрация 60–70–300–400 Гц (Северный Казахстан) [Кузин, 1999]

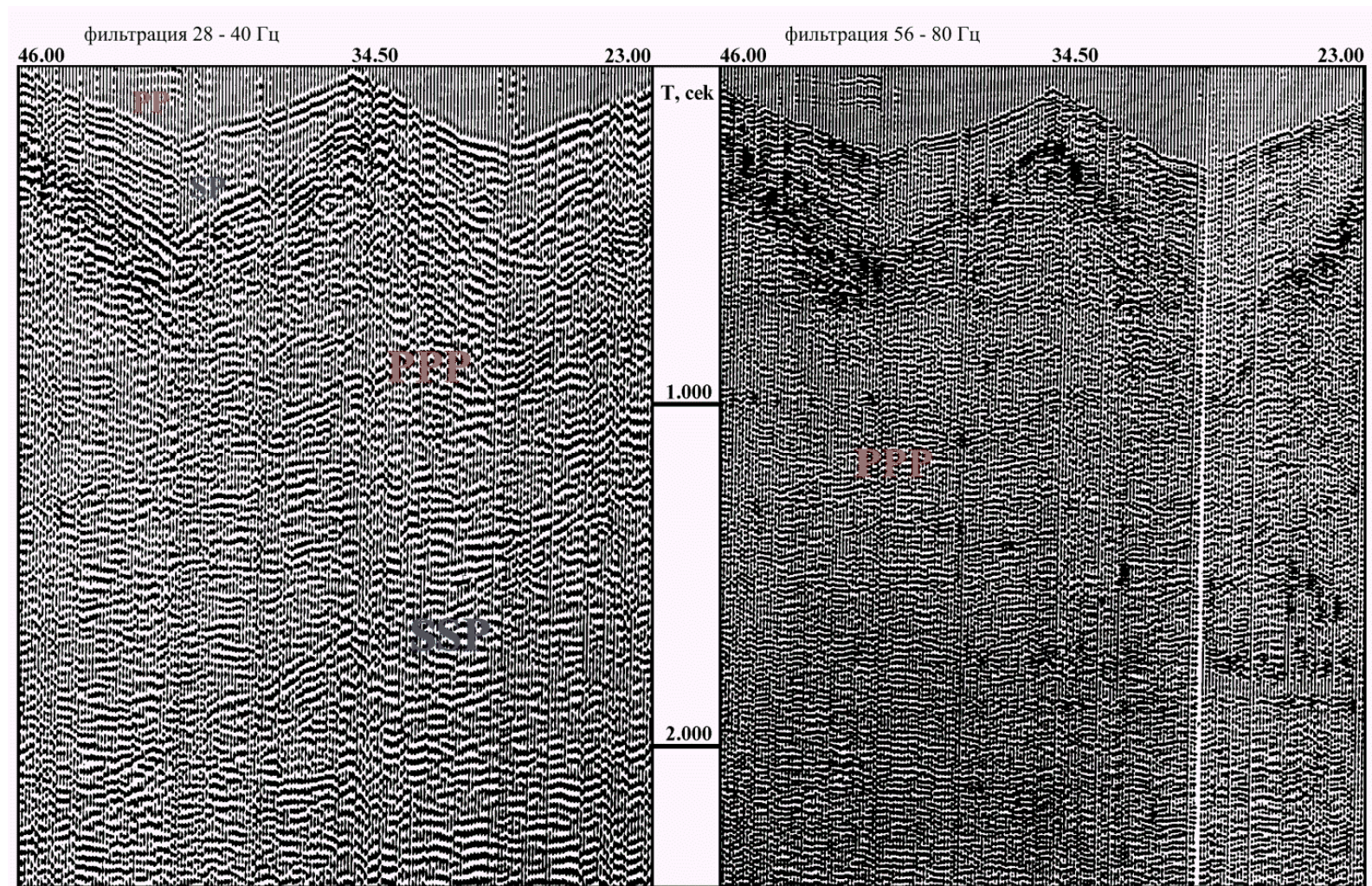


Рис. 21. Сейсмограммы МОВ после полосовой фильтрации 28–40 Гц и 56–80 Гц. (Северный Казахстан). Отраженные продольная и поперечная волны от наклонного разрывного нарушения (по материалам автора)

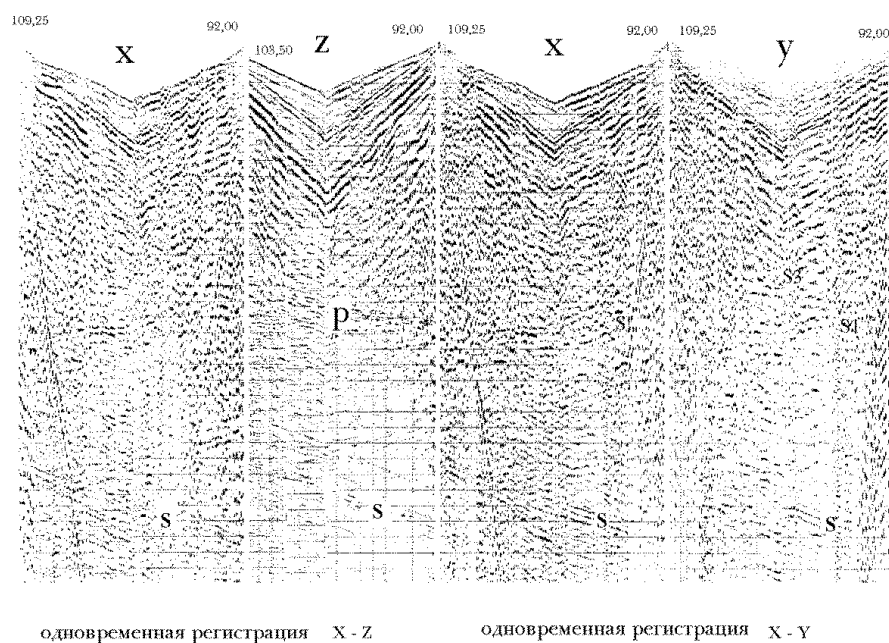


Рис. 22. Сейсмограммы, полученные из встречных пунктов взрыва. Одновременная регистрации X- и Z-компонент, одновременная регистрация X- и Y-компонент. Украинский Кристаллический Щит, Кировоградский тектонический блок [Кузин, 1999]

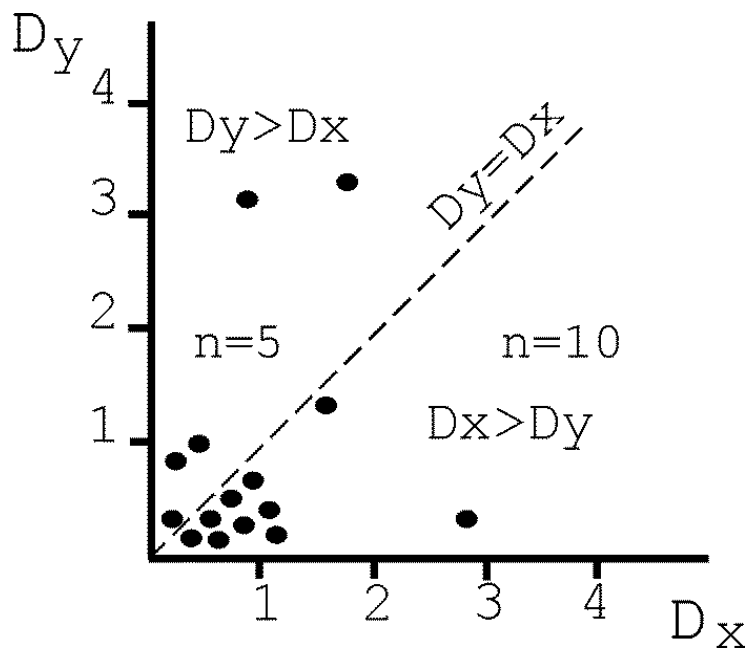


Рис. 23. Распределение дисперсий амплитуд X и Y-компонент преломленных поперечных волн (Украинский Кристаллический Щит). Точками обозначены значения дисперсий амплитуд для фиксированной расстановки [Кузин, 1999]