DOI: *10.18454/PMI.2017.1.30*

УДК 550.834

ВОЗМОЖНОСТИ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ ПРИ ИЗУЧЕНИИ КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ФУНДАМЕНТА

А.Н.ТЕЛЕГИН
Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

Рассматриваются возможности сейсмических методов отраженных (МОВ) и преломленных (МПВ) волн для детального изучения строения кристаллического фундамента. Изучение глубины залегания и строения фундамента играет большую роль при поисках месторождений различных полезных ископаемых. С осадочным чехлом обычно связаны скопления нефти и газа. В породах фундамента формируются рудные месторождения, с разломами фундамента и структурой его поверхности генетически связаны месторождения не только рудных, но и нефтяных полезных ископаемых. Сейсморазведка МОВ является основным сейсмическим методом по изучению структурного плана осадочной толщи, прогнозированию ее вещественного состава и возможных залежей углеводородов. Однако при изучении кристаллического фундамента ее возможности ограничены. На основе многолетнего опыта сейсмических работ МОВ и физического моделирования установлено, что реальная шероховатость поверхности фундамента ограничивает получение от нее отраженных волн. Возможности МОВ по изучению строения фундамента в большой степени связаны с изучением разрывных нарушений как объектов дифракции на основе использования дифрагированных волн. Метод преломленных волн с современной методикой работ и обработкой материалов с получением динамических сейсмических разрезов имеет важное значение при изучении фундамента, особенно при картировании его поверхности и в меньшей степени при изучении разрывных нарушений. Комплексирование сейсмических методов МОВ и МПВ при изучении строения фундамента повышает надежность прогнозирования его геологического строения, в частности, его поверхность хорошо определяется по результатам МПВ, а зоны разрывных нарушений выделяются по объектам дифракции, по материалам как МОВ, так и МПВ. В результате использования сейсмических методов МОВ и МПВ появляется возможность детального изучения строения фундамента и прогнозирования его нефтегазоносности.

***Ключевые слова*:** отраженные и преломленные волны, обработка сейсмических материалов, определение поверхности фундамента, изучение разрывных нарушений

***Как цитировать эту статью*:** Телегин А.Н. Возможности сейсморазведки при изучении кристаллического фундамента // Записки Горного института. 2017. Т. 223. С. 30-36. DOI: 10.18454/PMI.2017.1.30

Введение. Фундамент обычно сложен метаморфизованными сложно дислоцированными породами, образованными в доплатформенный этап образования земной коры, а его поверхность является денудационным срезом консолидированной коры. Строение фундамента часто осложнено многочисленными интрузиями разного состава, зонами разломов и разрывными нарушениями. Структура верхней части фундамента близка к модели вертикальной среды с разрывными нарушениями.

Круг геологических задач, требующих изучения фундамента, достаточно широк. Сюда входит картирование его поверхности, прогнозирование вещественного состава и условий формирования рудных месторождений, выделение разрывных нарушений и зон разломов, определение мощности осадочного чехла и оценка перспектив его нефтегазоностности.

В последние годы происходят открытия залежей нефти в трещинах и разрывах кристаллического фундамента [3, 5, 6, 14]. В связи с этим важно оценить возможности сейсморазведки по изучению строения кристаллического фундамента и поиску в нем залежей нефти.

Применение метода отраженных волн. Основным сейсмическим методом при нефтепоисковых работах в осадочных отложениях является метод отраженных волн (МОВ). Методика работ, обработка материалов и интерпретация результатов хорошо разработаны для изучения строения осадочных отложений и прогнозирования в них залежей нефти и газа [1, 7, 13].

При интерпретации результатов сейсмических работ МОВ используются кинематические (время прихода) и динамические (амплитуда) параметры отраженных волн. Использование кинематики и динамики отраженных волн основано на многократных наблюдениях (метод общей глубинной точки – ОГТ), т.е. возможности получать динамику волн, обусловленную изменением упругих свойств на отражающей границе – на эффективной отражающей площадке, при различных положениях источника и приемника. Кинематика волн позволяет определить геометрию возможных ловушек для образования залежи, а динамика – по изменению упругих свойств прогнозировать существование залежи. При этом возможности динамики волн для определения упругих свойств пород и прогнозирования залежей нефти и газа быстро расширяются. В последние 50 лет ни одна скважина в мире на нефть и газ в осадочных отложениях не бурится без предварительного проведения сейсмических работ МОВ.

DOI: *10.18454/PMI.2017.1.30*

При изучении поверхности кристаллического фундамента и его тектоники (разрывных нарушений, опущенных и поднятых блоков) результаты МОВ ограничены. На основе многолетнего опыта сейсмических работ методами отраженных и преломленных (МПВ) волн и физического моделирования установлено, что шероховатость поверхности фундамента ограничивает возможности МОВ, т.е. от его поверхности часто не удается зарегистрировать отраженные волны, в то же время преломленные волны регистрируются. На практике обычно считается, что поверхность фундамента находится «ниже последней отражающей границы» в осадочных отложениях.

Это происходит по двум причинам: во-первых, отраженные волны более высокочастотные по сравнению с преломленными волнами и, соответственно, более чувствительны к шероховатости границ, во-вторых, образование и распространение отраженных и преломленных волн различается. На отражение от поверхности фундамента влияет его шероховатость – происходит рассеивание волн, а преломленные волны распространяются в преломляющем пласте и выходят через его поверхность. Для оптимальной регистрации отраженных волн в осадочных отложениях достаточно использовать максимальные удаления источник – приемник, примерно равные общей мощности перспективного разреза. При используемых системах наблюдений МОВ для изучения осадочных отложений преломленные волны от подстилающего осадки фундамента обычно не регистрируются [11, 12].

Возможности МОВ по изучению строения фундамента в большой степени связаны не с волнами, отраженными от его поверхности, а с дифрагированными волнами и определением разрывных нарушений как объектов дифракции. При этом необходимо проводить специальную обработку сейсмических материалов на основе миграции исходных записей для относительного усиления объектов по дифрагированным волнам по сравнению с отражающими границами. В качестве примера рассмотрим результаты обработки сейсмических материалов, полученных при физическом моделировании горизонтальных отражающих границ, нарушенных вертикальной зоной неоднородностей, в виде коротких круто наклоненных отражающих площадок (рис.1).

Зона разрыва моделируется круто наклоненными отражающими площадками (рис.1, *а*), от самих наклонных площадок отражения не регистрируются, но их верхние и нижние кромки являются объектами дифракции, от которых регистрируются относительно сильные дифрагиро-

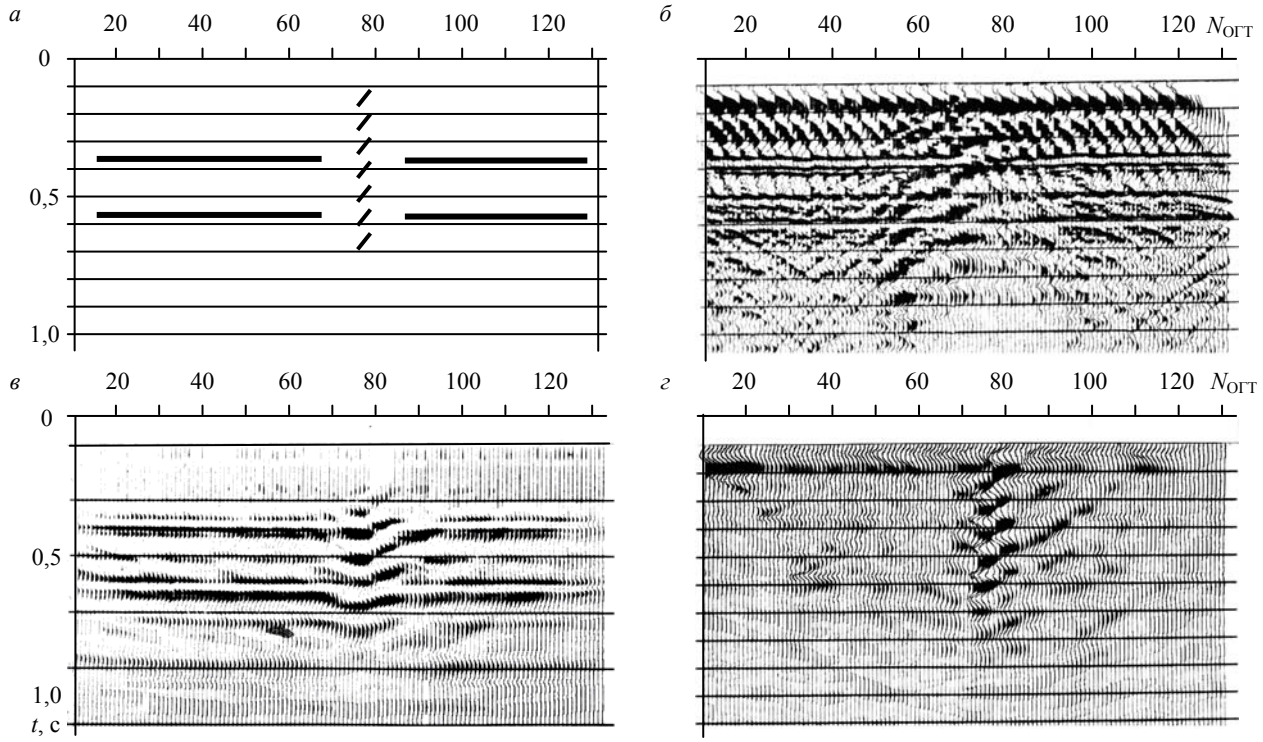


Рис.1. Специальная обработка записей МОВ физического моделирования для выделения объектов дифракции: *а* – физическая модель разрывного нарушения; *б* – временно́й разрез ОГТ; *в* – миграция разреза ОГТ; *г* – разрез после обработки, направленной на выделение объектов дифракции. Все разрезы представлены в масштабе вертикального времени распространения волн. $N_{ОГТ}$ – номер точки

DOI: *10.18454/PMI.2017.1.30*

ванные волны. При обычной миграции временного разреза выделяются горизонтальные отражающие границы и слабые объекты дифракции (рис.1, *в*). В случае специальной миграции временного разреза, направленной на выделение объектов дифракции, при относительном ослаблении отражающих границ, зона разрывного нарушения фиксируется очень четко (рис.1, *г*) – фактически видны торцы всех наклонных площадок модели (ср. рис.1, *а* и 1, *г*).

Предложенный способ миграции может быть использован для выделения различных локальных объектов в геологическом разрезе и применялся для поиска кимберлитовых трубок как зон неоднородности в пологозалегающих осадочных отложениях [8]. Он может быть использован при обработке записей МОВ для выделения разрывных нарушений в осадочных отложениях и фундаменте.

Таким образом, по материалам сейсморазведки МОВ поверхность фундамента и ее положение обычно не определяются, но возможно уверенное выделение разрывных нарушений и зон разломов фундамента как объектов его неоднородности.

Применение метода преломленных волн. Перед оценкой возможностей изучения кристаллического фундамента методом преломленных волн рассмотрим особенности их распространения в преломляющем пласте.

Физической основой МПВ является существование в геологической среде пластов с повышенной скоростью распространения сейсмических волн по сравнению с вышележащими породами. Методика работ МПВ отличается от таковой в МОВ в связи с особенностями возникновения и распространения преломленных волн. В частности, для регистрации преломленных волн необходимы удаления источник – приемник, в 5-10 раз превышающие глубину залегания преломляющих границ, при регистрации отраженных волн достаточны удаления источник – приемник, примерно равные глубине отражающего горизонта.

Из-за специфики образования и распространения преломленных волн нельзя получить выход преломленной волны под различными углами, отличающимися от критического угла, чтобы использовать многократные наблюдения аналогично способу ОГТ в МОВ, хотя многократные системы наблюдений в МПВ позволяют ослабить различные волны-помехи (в частности, закритические отражения и интерференцию самих преломленных волн от различных преломляющих границ) [9, 10, 15]. Кроме того, для однозначной обработки получаемых материалов обязательно получение встречных записей преломленных волн, что не обязательно в МОВ.

Преломленные волны всегда слабее отраженных, поскольку их интенсивность, прежде всего, определяется частью энергии падающих на преломляющую границу волн в плоскости телесного критического угла за вычетом энергии на образование отраженных волн в этой области. В реальных геологических средах, из-за особенностей распределения упругих свойств и существования явления рефракции преломленных волн, усложняется связь их кинематики и динамики с упругими свойствами изучаемой среды.

По физическим особенностям образования и распространения преломленных волн их время и амплитуда более сложным образом связаны с упругими свойствами геологических пластов по сравнению с МОВ. В частности, амплитуда преломленной волны зависит от ее распространения в покрывающей среде и преломляющем пласте, а также от коэффициентов преломления в точках входа в преломляющий пласт и выхода из него. Наибольший интерес представляет изменение динамики преломленных волн, обусловленное входом в преломляющий пласт и выходом из него, т.е. связь амплитуды преломленной волны с изменением упругих свойств на преломляющей границе.

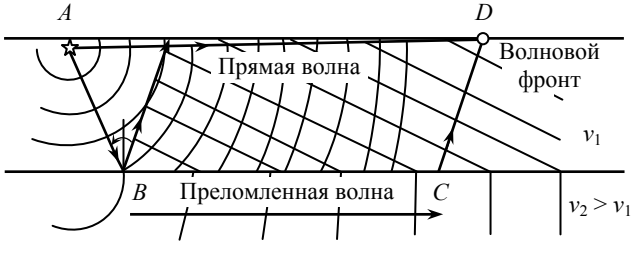


Рис.2. Схема распространения преломленной волны в высокоскоростном пласте

В русскоязычной литературе рассматривается распространение преломленных волн как «головных» – по поверхности преломляющего пласта [2, 4]. Это противоречит физическим основам распространения сейсмических волн. Поверхность пласта имеет нулевую мощность, и по ней распространяется нулевая энергия, реальное распространение преломленных волн происходит в преломляющем пласте с выходом энергии через его кровлю (рис.2).

DOI: *10.18454/PMI.2017.1.30*

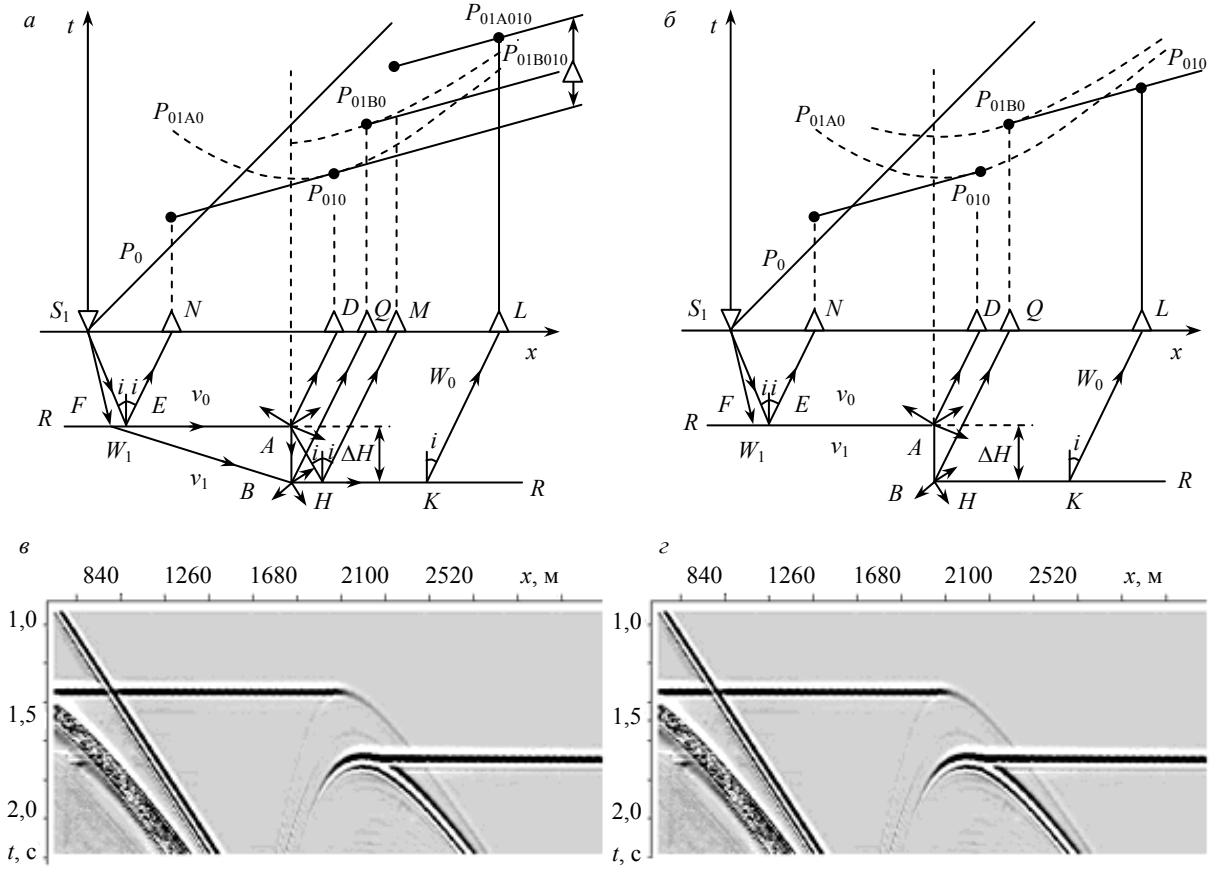


Рис.3. Кинематика и динамика преломленных волн для уступа (сброса): *а* – кинематика в представлении «головных» волн, распространяющихся по кровле («голове») пласта [3, 5]; *б* – реальное распространение преломленной волны в пласте; *в*, *г* – волновая картина при моделировании сброса (редукция со скоростью в преломляющем пласте). Пунктиром показаны годографы преломленно-дифрагированных волн

Предположение о распространении «головной» волны по кровле пласта аналогично представлению об образовании отраженной волны от точки на границе, энергия в этом случае также нулевая. Хорошо известно, что реальное отражение происходит не от точки на границе, а от эффективной отражающей площадки, размер которой зависит от глубины горизонта и формы импульса [1].

Особенности распространения преломленных волн подтверждаются также моделированием волновой картины над уступом (сбросом) преломляющей границы (рис.3).

На волновой картине, полученной при моделировании (рис.3, *б*-*г*), нет дополнительной «головной» волны 01*A*010, образующейся от дифрагированной волны из угловой точки дифракции *A*. От точки *A* возникает только относительно слабая дифрагированная волна, причем более сильная дифрагированная волна возникает от точки *B*. Различие времени прихода преломленной волны от опущенного блока, по сравнению с приподнятым блоком, на величину Δt соответствует однократному прохождению преломленной волны смещения границы ΔH: $\Delta t = \Delta H / v_0$. Это принципиально для определения природы распространения преломленных волн, т.е. преломленная волна в опущенном блоке образуется за счет ее распространения в преломляющем пласте (см. рис.2).

В методе преломленных волн упругие свойства геологических сред могут изучаться с помощью преломленных и преломленно-дифрагированных волн различного типа: продольных, поперечных и обменных, но используются в основном продольные преломленные и преломленно-дифрагированные волны, а все прочие регулярные и случайные сейсмические колебания относят к помехам.

Сложное строение верхней части фундамента определяет специфическую запись преломленной волны, обусловленную фундаментом и отличающуюся изменениями формы и амплитуды волны (повторяющимися при нагоняющих системах наблюдений), резким изменением границ-

DOI: 10.18454/PMI.2017.1.30

ной скорости и существованием дифрагированных волн за счет тектонической нарушенности фундамента и его горизонтальной неоднородности.

Оптимальная методика сейсмических работ МПВ для изучении изменения упругих свойств фундамента по кинематическим и динамическим свойствам преломленных волн отличается от МОВ и выбирается индивидуально для конкретной площади по предполагаемому диапазону глубины преломляющих горизонтов и значениям скорости. Основные параметры методики работ МПВ, обеспечивающие непрерывное прослеживание преломленных волн от фундамента, следующие: максимальное удаление источник – приемник, взаимно увязанные встречные системы наблюдений МПВ и оптимальная кратность прослеживания горизонтов. При этом необходимо учитывать, что в МОВ оптимальная кратность наблюдений выбирается для отражающего горизонта на максимальной глубине исследований, а реальная кратность прослеживания отражающих границ снижается с уменьшением глубины. В МПВ, наоборот, при выбранной оптимальной кратности для максимальной глубины преломляющего горизонта реальная кратность прослеживания с уменьшением глубины преломляющих горизонтов увеличивается. При изучении фундамента реальная кратность его прослеживания будет меняться относительно расчетной в зависимости от изменения глубины: уменьшаться с ее увеличением и возрастать с уменьшением.

В настоящее время выполняется в основном кинематическая обработка сейсмических записей преломленных волн, т.е. в обработке используется время их прихода; амплитуда – динамика волн, необходима только для корреляции волн и определения времени. Вся дальнейшая обработка проводится только по времени регистрации преломленных волн [1, 4, 13]. При детальном изучении строения фундамента необходимо проведение динамической обработки преломленных волн с получением динамических разрезов, аналогичных построенным методом отраженных волн.

В последнее время опробуются динамические варианты обработки сейсмических записей МПВ, но их практическое применение пока ограничено. Нами предложен и развивается способ динамической обработки сейсмических записей МПВ на основе миграции преломленных волн, он аналогичен динамической обработке записей отраженных волн [8-11].

При получении динамических сейсмических разрезов по записям преломленных волн необходимо выполнить ряд операций.

1. Определить скорости распространения упругих волн в преломляющем пласте динамическими способами по встречным записям преломленных волн. В основе динамического способа определения скорости в преломляющем пласте лежит совпадение углов наклона преломляющих границ при переборе скоростей миграции встречных записей преломленной волны. Способ аналогичен кинематическому варианту определения скоростей в преломляющем пласте методом построения полей времен при различных удалениях источник – приемник [1, 13].

2. В процессе обработки сейсмических записей преломленных волн учесть изменение их динамики при распространении в покрывающей среде и в преломляющем пласте. Учет затухания (геометрического расхождения) сейсмических волн при распространении в покрывающей среде происходит за счет формы годографа дифрагированной волны, по которому происходит суммирование при миграции. Учет затухания преломленных волн при распространении в преломляющем пласте осуществляется на основе известной зависимости амплитуды волн от пройденного пути [11, 13].

3. Выполнить миграцию сейсмических записей преломленных волн на основе интеграла Кирхгофа. При этом учитывается затухание преломленных волн с изменением глубины преломляющего горизонта. Разрезы мигрированных записей преломленных волн встречных систем наблюдений суммируются по общим вертикалям – по сопряженным точкам (общим точкам на границе). Их амплитуды обусловлены коэффициентами выхода волн из преломляющего пласта и полной амплитудой взаимных записей. Для обращенных систем наблюдений амплитуды волн обусловлены коэффициентами входа волн в преломляющий пласт.

4. Ослабить различные волны-помехи и интерференцию самих преломленных волн от преломляющих границ на разной глубине за счет многократности используемой системы наблюдений, аналогично суммированию по общим отражающим точкам в МОВ.

Разрезы мигрированных записей преломленных волн суммируются по общим вертикалям – по сопряженным точкам (общим точкам на границе). Их амплитуды обусловлены коэффициентами выхода волн из преломляющего пласта и полной амплитудой взаимных записей. Для обращенных систем наблюдений амплитуды волн обусловлены коэффициентами входа волн в пре-

DOI: 10.18454/PMI.2017.1.30

ломляющий пласт. Динамические разрезы МПВ аналогичны разрезам МОВ, получаемым в результате миграции исходных записей в МОВ.

Получаемые динамические разрезы преломленных волн могут быть использованы при любых работах МПВ для решения различных геологических задач: от малоглубинных исследований до изучения земной коры на опорных профилях. Особое значение получение динамических разрезов МПВ имеет при изучении фундамента, в частности его поверхности и разрывных нарушений.

В результате обработки амплитуды динамических разрезов МПВ должны соответствовать коэффициенту выхода преломленной волны из преломляющего пласта (или входа в него при обращенной системе наблюдений) и характеризуют перепад упругих свойств в точке выхода (на эффективной преломляющей площадке) при постоянной точке входа преломленной волны в пласт, что позволяет использовать кинематические и динамические свойства преломленных волн для оценки изменения упругих свойств фундамента.

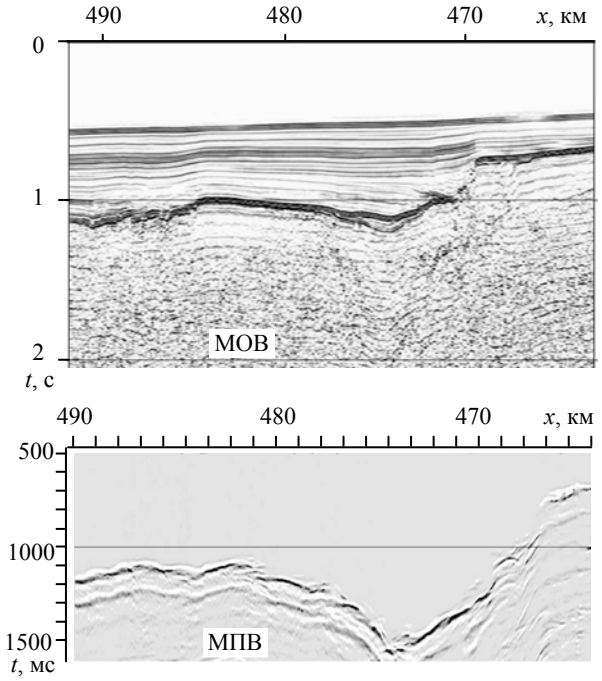


Рис.4. Фрагменты сейсмических разрезов: МОВ в обычной обработке и МПВ по профилю 2-ДВ в северной части Охотского моря

Совместное использование динамики отраженных и преломленных волн повышает возможности определения изменения упругих свойств. По динамическим разрезам отраженных волн устанавливается изменение упругих свойств отражающих границ в осадочных отложениях, их конфигурация и скорости распространения волн. По динамическим разрезам преломленных волн фиксируется изменение упругих свойств преломляющих границ, особенно важно изучение поверхности фундамента, кроме того, определяются скорости в преломляющем пласте. Совместные результаты сейсмических исследований МОВ и МПВ позволяют надежно прогнозировать глубину и рельеф поверхности фундамента и его строение (рис.4).

По сейсмическим материалам отраженных волн выполнена обычная обработка без специального подчеркивания объектов дифракции, поэтому на разрезе МОВ выделение зон разрывов в фундаменте не однозначно. Хорошо видимы отражающие горизонты в осадочном разрезе.

Получение динамических разрезов МПВ имеет особое значение при изучении фундамента, в частности его поверхности и разрывных нарушений. На динамическом сейсмическом разрезе хорошо выделяются: поверхность кристаллического фундамента, его блоковое строение и разрывные нарушения. Фактически фундамент разбит на отдельные блоки размером 1,2-2,0 км. Левая часть сейсмического разреза МПВ в более крупном масштабе показана на рис.5.

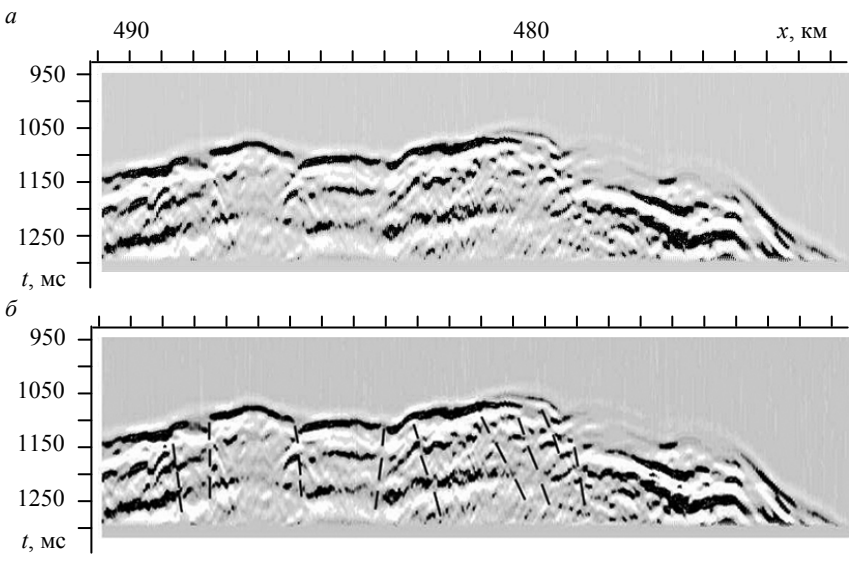


Рис.5. Фрагмент динамического сейсмического разреза МПВ по профилю 2-ДВ в северной части Охотского моря (*а*) и вариант выделения по нему разрывных нарушений в фундаменте (*б*)

Выводы. Для практического применения предлагаемого комплекса сейсмических нефтепоисковых работ в фундаменте необходимо предварительно провести опытные

DOI: *10.18454/PMI.2017.1.30*

сейсмические работы МПВ на разбуренной хорошо изученной площади с глубиной залегания поверхности фундамента 2,0-2,5 км, на которой проведены сейсмические работы МОВ. Совместное рассмотрение результатов работ МОВ и МПВ позволит оценить эффективность результатов МОВ для выделения зон разрывов фундамента, а также выбрать оптимальную методику работ МПВ для изучения рельефа поверхности фундамента.

Заключение. При поисках месторождений нефти и газа основным геофизическим методом является сейсморазведка МОВ. Для оценки нефтегазоносности фундамента результатов одного метода недостаточно. Комплексирование сейсмических методов МОВ и МПВ при изучении строения фундамента повышает надежность прогнозирования геологического строения фундамента, в частности, его поверхность хорошо определяется по результатам МПВ, а зоны разрывных нарушений выделяются по объектам дифракции с использованием материалов как МОВ, так и МПВ.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Боганик Г.Н.* Сейсморазведка / Г.Н.Боганик, И.И.Гурвич. Тверь: Изд-во «АИС», 2006. 744 с.

2. *Голошубин Г.М.* Комбинированный метод сейсмической разведки / Г.М.Голошубин, А.М.Епинатьева. М.: Недра, 1994. 206 с.

3. *Журавлев Е.Г.* Проблемы нефтегазоносности фундамента осадочных бассейнов // XV Губкинские чтения: Материалы конференции. М.: РГУ нефти и газа, 1999. С. 52-53.

4. Метод преломленных волн / А.М.Епинатьева, Г.М.Голошубин, А.Л.Литвин и др.; под ред. А.М.Епинатьевой. М.: Недра, 1990. 297 с.

5. Нефтегазоносность фундамента различных регионов мира / Е.Г.Арешев, В.П.Гаврилов, В.В.Поспелов и др. // Горный вестник. 1998. № 3. С. 8-15.

6. *Попков В.И.* Модель резервуара нефтегазовой залежи в гранитном массиве / В.И.Попков, А.А.Рабинович, Н.И.Туров // Геология нефти и газа. 1986. № 8. С. 27-30.

7. *Притчет У.* Получение надежных данных сейсморазведки. М.: Мир, 1999. 448 с.

8. *Телегин А.Н.* Возможности сейсморазведки МОВ при поисках кимберлитовых трубок / А.Н.Телегин, И.М.Тихонова // Геология и геофизика. 1991. № 8. С. 131-137.

9. *Телегин А.Н.* Построение динамических разрезов по сейсмическим записям преломленных волн / А.Н.Телегин, И.М.Тихонова // Доклады Академии наук. 1992. Т. 326. № 6. С. 989-993.

10. *Телегин А.Н.* Обработка сейсмических записей преломленных волн на основе миграции/ А.Н.Телегин, И.М.Тихонова, Т.С.Сакулина // Доклады Академии наук. 2003. Т. 390. № 1. С. 106-108.

11. *Телегин А.Н.* Сейсморазведка методом преломленных волн. СПб: Изд-во Санкт-Петербургского ун-та, 2004. 187 с.

12. *Телегин А.Н.* Методика и технология сейсморазведочных работ методом отраженных волн: Учеб. пособие / Санкт-Петербургский государственный горный ин-т (технический университет). СПб, 2010. 83 с.

13. *Шерифф Р.* Сейсморазведка / Р.Шерифф, Л.Гелдарт. М.: Мир, 1987. Т. 1. 447 с.; т. 2. 400 с.

14. *Шустер В.Л.* Нефтегазоносность кристаллического фундамента // Геология нефти и газа. 1997. № 8. С. 17-19.

15. *Telegin A.N.* Opportunities use of dynamics of the refracted waves / A.N.Telegin, S.N.Tabyrtsa. 6th Saint-Petersburg international conference and exhibition on Geosciences – 2014. 10 April 2014. St Petersburg: EAGE. P. 770-774.

Автор **А.Н.Телегин**, *д-р геол.-минерал. наук*, *профессор*, *an_telegin@mail.ru* (*Санкт-Петербургский горный университет*, *Санкт-Петербург*, *Россия*).

Статья принята к публикации 01.08.2016.