

Верхняя часть разреза и ее роль при проведении сейсморазведочных работ

■ Крылатков С.М., Крылаткова Н.А., Крылевская А.Н., УГГУ, г. Екатеринбург

Введение

Верхняя часть разреза (ВЧР) представляет собой наиболее сложную для изучения сейсмическим методом область геологической среды. В этой части разреза наблюдаются значительные изменения упругих параметров среды как по вертикали, так и по латерали.

В ВЧР наблюдаются горизонтальные, наклонные и почти вертикальные геологические границы, разделяющие эту область на слои и на блоки. Кроме того, практически повсеместно здесь присутствует так называемая зона малых скоростей (ЗМС). Такое строение верхней части разреза приводит к значительному искажающему влиянию ее на характер сейсмических записей от глубоких горизонтов.

В силу многообразного влияния зоны малых скоростей на регистрируемое волновое поле, при выполнении сейсмических работ проводятся специальные исследования для изучения ее строения. Недоучет влияния верхней части разреза на сейсмические материалы приводит к ошибкам и некачественным результатам. В то же время полноценный и объективный учет влияния ВЧР на регистрируемое волновое поле позволяет существенно повысить итоговое качество результатов сейсмических работ. Пример учета влияния ВЧР при получении временного разреза в МОГТ показан на рис.1.

При выполнении инженерно-сейсмических работ, целью которых является детальное изучение верхней части разреза, сложное строение ВЧР приводит к трудностям в выделении полезных волн и появляются погрешности и неодно-

значности в определении упругих свойств горных пород в этой части геологической среды.

Сейсмогеологическая характеристика ВЧР

Верхней частью сейсмогеологического разреза принято называть толщу песчано-глинистых отложений, возможно с прослоями карбонатных пород, которая залегает между поверхностью земли и первой сильной отражающей или преломляющей границей в коренных породах [2].

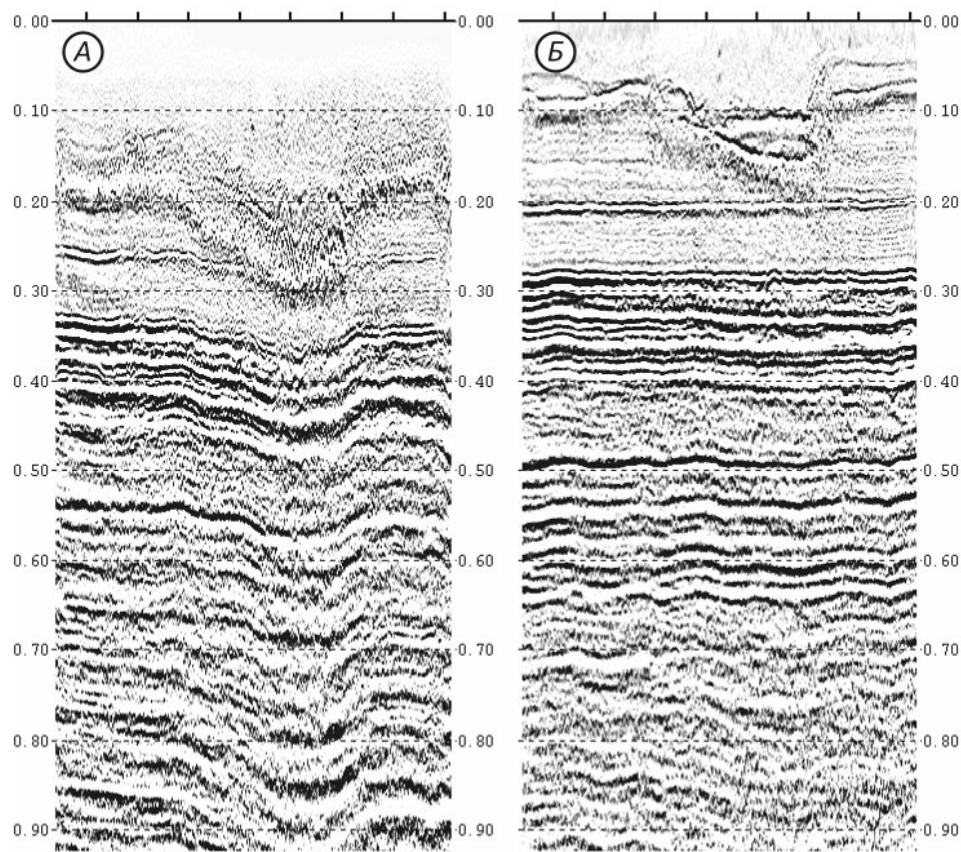
Мощность этой толщи в различных районах изменяется от первых метров до нескольких сотен (600-800) метров. Она характеризуется большой изменчивостью упругих свойств слагающих ее пород как в вертикальном, так и в горизонтальном направлении, а также наличием сильных сейсмических границ. При сейсмических исследованиях влияние этих факторов приводит к значительным искажениям полезной информации. Сейсмические параметры отдельных слоев ВЧР в целом зависят от глубины залегания, литологического состава, пористости, степени водонасыщения и возраста пород.

Верхний слой ВЧР, образованный слабо сцементированными, рыхлыми отложениями, называют зоной малых скоростей (ЗМС). При большой мощности этой зоны в его нижней части принято выделять зону пониженных скоростей (ЗПС).

Именно эти две зоны оказывают наибольшее влияние на характер наблюдаемого сейсмического волнового поля при изучении среды различными методами сейсморазведки.

Рис. 1.
Временной
разрез, в котором
проявляются
искажения,
обусловленные
сложным строением
ВЧР (а).

Временной
разрез по тому же
участку профиля (б),
полученный с учетом
поправок за ВЧР[1]



Зона малых скоростей (ЗМС) (в англоязычной литературе - **Low Velocity Layer - LVL**) находится в области современного геологического выветривания и накопления рыхлых четвертичных отложений и является резко гетерогенной средой. Процессы денудации образуют в ней поры и трещины, заполненные атмосферным воздухом, газами, водяными парами и водой. Эта зона, как правило, имеет мощность от 2 - 5 до 50 - 80 м. Для наиболее часто используемых в сейсморазведке продольных волн значения их скоростей в ЗМС обычно лежат в диапазоне от 0,08-0,1 до 1,5-1,7 км/с. С повышением степени увлажнения горных пород скорости продольных волн в них увеличиваются.

Согласно [2, 3] такие породы в ЗМС, как сухие пески, почва, торф, придонные иловатые отложения рек и озер, которые находятся на небольших глубинах, имеют сверхмалые значения скоростей про-

дольных волн (от 50 до 300 м/с). Ниже лежащие в разрезе увлажненные пески, супеси, суглинки, глины, галечники, илы, сильно выветренные коренные породы обладают малыми значениями скоростей упругих волн (от 300 до 1100 м/с). Влажные пески, песчано-глинистые породы, галечники, илы, выветренные коренные породы имеют пониженные значения скоростей (от 1100 до 1600 м/с). Наконец, пески, глины, галечники, ниже уровня грунтовых вод, коренные терригенные, карбонатные, метаморфические изверженные породы различной степени выветривания имеют большие значения скоростей продольных волн, которые превышают 1600 м/с.

Скорости продольных и поперечных упругих волн могут меняться в разрезе в зоне малых скоростей как плавно, так и скачкообразно. В наиболее рыхлых и сухих песчано-глинистых породах ЗМС скорость распространения продольных

волн (V_p) лежит в интервале 0,2-0,5 км/с, скорость распространения поперечных волн (V_s) - 0,1-0,3 км/с, отношение этих скоростей ($\gamma = V_s / V_p$) составляет 0,4-0,6. При переходе к водонасыщенным породам скорость продольных волн возрастает скачкообразно до 0,7-1,5 км/с, тогда как скорость поперечных волн увеличивается относительно плавно. Поэтому в нижней части ЗМС параметр γ уменьшается до 0,15-0,2. В водонасыщенных породах скорость V_s увеличивается быстрее, чем скорость V_p . Одновременно быстрее, чем при небольшом водонасыщении, увеличивается и отношение γ , достигая значения, приблизительно равного 0,4. В более глубоких частях разреза при скорости продольных волн свыше 2,5 км/с, отношение стабилизируется, достигая примерно 0,5.

Мощность ЗМС во многих случаях определяется положением уровня грунтовых вод, который иногда рассматривается как подошва ЗМС. При глубоком залегании первого водоупорного горизонта или при его отсутствии в зоне малых скоростей обычно существует переходная зона с непрерывным изменением скорости.

В районах, где ЗМС представлена мощной верхней рыхлой толщи (более 30-40 метров), в ней дополнительно выделяется зона пониженных скоростей со значениями V_p в диапазоне от 1,1 до 1,6 км/с. В этих случаях ЗМС рассматривают как двухслойную или трехслойную среду со скачкообразным увеличением скорости на границах внутри нее и это учитывается при интерпретации.

Эффекты, возникающие в ВЧР

Относительно малые значения скоростей упругих волн в ЗМС приводят к значительным запаздываниям времен прихода глубинных волн и, в связи с этим, требуется введение поправок в годогра-

фы этих волн. Неоднородность упругих свойств в вертикальном и горизонтальном направлениях обуславливает необходимость непрерывного изучения распределения скоростей в ЗМС для введения поправок, индивидуальных для каждого приемника и пункта возбуждения

Резкое различие скоростей вблизи подошвы ЗМС вызывает сильное преломление на этой границе, поэтому при переходе волны из области коренных пород в зону малых скоростей лучи объемных волн приобретают почти вертикальное направление, смещение частиц в продольных волнах становится вертикальным, в волнах поперечных - горизонтальным. Интенсивное отражение волн от подошвы ЗМС приводит к возникновению волн-спутников, кратных отражений и обменных волн.

Большие коэффициенты поглощения, наблюдаемые в горных породах, слагающих ЗМС, являются причиной сильного ослабления интенсивности сейсмических волн. По этой причине происходит изменение их спектрального состава за счет более сильного поглощения зоной малых скоростей высокочастотных компонент волнового поля. Это приводит к тому, что возникают неблагоприятные условия для возбуждения и приема сейсмических колебаний. Это проявляется в изменении формы и длительности возбуждаемого источником импульса, а также вызывает низкочастотную фильтрацию при прохождении волнами зоны малых скоростей.

Как правило, при проведении сейсморазведки МОГТ с взрывными источниками взрыв заряда производится вблизи или ниже подошвы ЗМС. При этом происходит нарушение сферической симметрии очага взрыва – из-за неоднородности горных пород вблизи него и наличия

свободной поверхности. В силу этих причин, как отмечается в [4], значительная часть энергии источника в скважине расходуется на образование более или менее интенсивных поперечных, а также поверхностных волн. Еще менее эффективно положение источника на поверхности.

В ВЧР с большим числом разнообразных сейсмических границ образуется множество вторичных волн различных типов. В области последующих вступлений вблизи источника происходит их сложная интерференция. Среди интерференционных волн доминируют поверхностные волны псевдорелеевского типа - это низкоскоростные волны-помехи, характеризующиеся низкими значениями кажущихся скоростей и видимых периодов и обладающие свойствами частотной дисперсии.

В верхней части разреза происходит искажение поляризации колебаний, а также проявляется анизотропия скоростей.

Различия в строении ВЧР на разных территориях приводят к тому, что сейсмические работы на разных площадях проводятся в существенно различных поверхностных сейсмогеологических условиях, оказывающих основное влияние на соотношение интенсивности полезных волн и помех и их частотный состав.

Верхняя часть сейсмического разреза на море отличается от ВЧР на суше тем, что в ней присутствует слой воды, который обеспечивает постоянство условий возбуждения и приема сейсмических колебаний. В тоже время этот водный слой выступает как источник кратных волн. Их интенсивность и кратность зависят от глубины моря и плотности донных отложений. Кратные волны создают серьезные затруднения при

обработке материалов и далеко не всегда могут успешно подавляться.

Наличие мерзлоты в разрезе создает как на суше, так и на море необходимость тщательного учета ее свойств. Особенно это важно в тех районах, где в верхней части разреза наблюдается наличие зон многолетнемерзлых пород, имеющих значительные вариации глубины залегания, простираения и мощности, чередующихся с зонами растепления. Основные трудности учета ВЧР сводятся, по сути, к тому, что многолетнемерзлые породы характеризуются более высокими скоростями распространения продольных волн по сравнению с вмещающими породами. Так значения V_P в песках и глинах, залегающих вблизи поверхности земли, возрастают при промерзании от 1,7 - 2,0 до 3,5 - 4 км/с. Это приводит к резкому преломлению лучей на кровле и подошве мерзлой толщи. Увеличение реального времени пробега луча за счет преломления приводит к образованию в поле времен ложных аномалий, ассоциирующихся с положительными структурами, на которых могут планировать расположение скважин разведочного бурения.

Мощность замерзших пород может достигать нескольких сотен метров. Их наличие и неравномерное распределение по площади исследований усложняет проведение полевых сейсморазведочных работ, ухудшает качество получаемого материала и, что самое главное, существенно осложняет интерпретацию результатов наблюдений.

Учет факторов, возникающих за счет наличия ВЧР

Факторы, влияющие на сейсмические записи за счет наличия ВЧР, разнообразны. Часть из них оказывает искажающее действие на кинематические параметры записи, часть - на динамические. Сегод-

ня основным направлением учета этих факторов является использование кинематических принципов и устранение, главным образом, кинематических факторов.

Общепринятым средством учета влияния ВЧР на сейсмическое волновое поле в методе общей средней точки является определение для точек приема и возбуждения специальных временных поправок — статических поправок, которые частично решают задачу устранения влияния сдвигов в сейсмических трассах, вызванных наличием переменной по сейсмическим свойствам ЗМС, рельефа дневной поверхности, различия в глубинах помещения заряда и т.п. Задача эта решается при наличии целого рода упрощающих предположений.

Поправки представляют собой расчетные времена прохождения сейсмических волн через верхнюю часть разреза от источника или приемника до выбранной условной поверхности или линии приведения. Считается, что среда ниже линии приведения уже не создает таких значительных эффектов, как верхняя часть разреза. Для расчета поправок требуются сведения о геометрических параметрах системы наблюдений и о законе изменения скоростей по глубине от поверхности до линии приведения.

Сведения о строении верхней части среды получают путем ее изучения при проведении сейсмических работ. В настоящее время для изучения строения ЗМС: используют результаты специальных (дополнительных) сейсморазведочных работ, либо материалы основных сейсмических работ.

Первый подход имеет достаточно много преимуществ, среди которых — возможность выбирать и настраивать систему наблюдений для более эффективного изучения строения ВЧР. В то же

время подход ограничен тем, что таким образом возможно получение представления о строении ВЧР лишь по отдельным сейсмозондированиям или на отдельных небольших участках профилей основных сейсмических наблюдений.

Этот подход может быть реализован различными способами. Первый из способов основан на получении данных о скоростном строении разреза по сети неглубоких (30-100 м) скважин на площади работ. Данные о скоростях в каждой скважине получают по технологии микросейсмокаротажа.

Вторым способом является проведение специальных работ методом преломленных волн обычно с малокаанальной аппаратурой и с небольшим шагом между приемниками (5-15 м) для более детального определения сейсмических характеристик неглубоких слоев.

Возможно также изучение ЗМС путем проведения работ МОГТ, получая отражения от мелких горизонтов и составляя временной разрез для небольших времен и глубин. Однако при этом есть проблема определения скоростного закона и ввода статических поправок в получаемые таким образом временные разрезы.

Еще одним способом изучения строения ЗМС является использование информации о дисперсии поверхностных волн для получения скоростных разрезов по продольным и поперечным волнам. Получаемые разрезы не обладают высокой детальностью, что обусловлено значительной длиной волны поверхностных волн.

Второй подход предполагает возможность использования стандартных полевых сейсмограмм МОГТ для выделения первых вступлений прямой и головных волн. Достоинствами этого подхода

являются возможность непрерывного изучения ВЧР по профилю и отсутствие необходимости проведения специальных дополнительных работ. Однако большой шаг между приемниками или группами не обеспечивает выделения прямых волн и точек пересечения осей синфазности различных головных волн, что приводит к потере границ или осреднению параметров многослойных толщ.

Нельзя не отметить еще один способ учета искажающего влияния ВЧР на записи отраженных волн. Это использование в качестве частичной поправки вертикального времени, определяемого в процессе выполнения взрывных работ.

Недостаточно детальные сведения о строении ВЧР, получаемые с помощью всех названных способов, приводят к необходимости введения статических поправок в несколько этапов и применения процедур их автоматической коррекции. Всеобъемлющий обзор по методикам учета ВЧР в сейсморазведке МОГТ приводится в работе [5].

Изучение ВЧР при инженерно-геологических изысканиях

Изучение ВЧР является одной из задач, решаемых при проведении сейсмических работ при инженерно-строительных изысканиях. Однако при этом, в отличие от задачи изучения ВЧР для ввода статических поправок, решаются другие, более сложные геологические задачи. Поэтому имеются отличия в методике исследований, параметрах систем наблюдений, способах обработки и интерпретации результатов.

Высокие требования к детальности исследований в инженерной сейсморазведке диктуют необходимость использовать высокочастотные модификации методов. В то же время значительная степень поглощения в верхней части геологического разреза энергии упругих

волн определяет необходимость использования плотных систем наблюдения и работ, выполняемых на малых базах наблюдения.

При этом главная информация для решения инженерно-геологических задач сейсмическим методом получается путем определения кинематических характеристик - скоростей распространения сейсмических волн. Наряду с этим важную информацию несут динамические характеристики (амплитуды волн, затухание, частота и т.д.). Они более тонко отражают изменение состояния среды, чем кинематические, но обычно не учитываются при обработке, так как требуют более сложных методов обработки.

Сейсмические методы исследования геологического разреза играют существенную роль при выполнении инженерно-геологических изысканий. Они позволяют решать задачи изучения геологического строения верхней части разреза (ВЧР), а также задачи определения физико-механических свойств грунтов и сейсмического микрорайонирования участка работ.

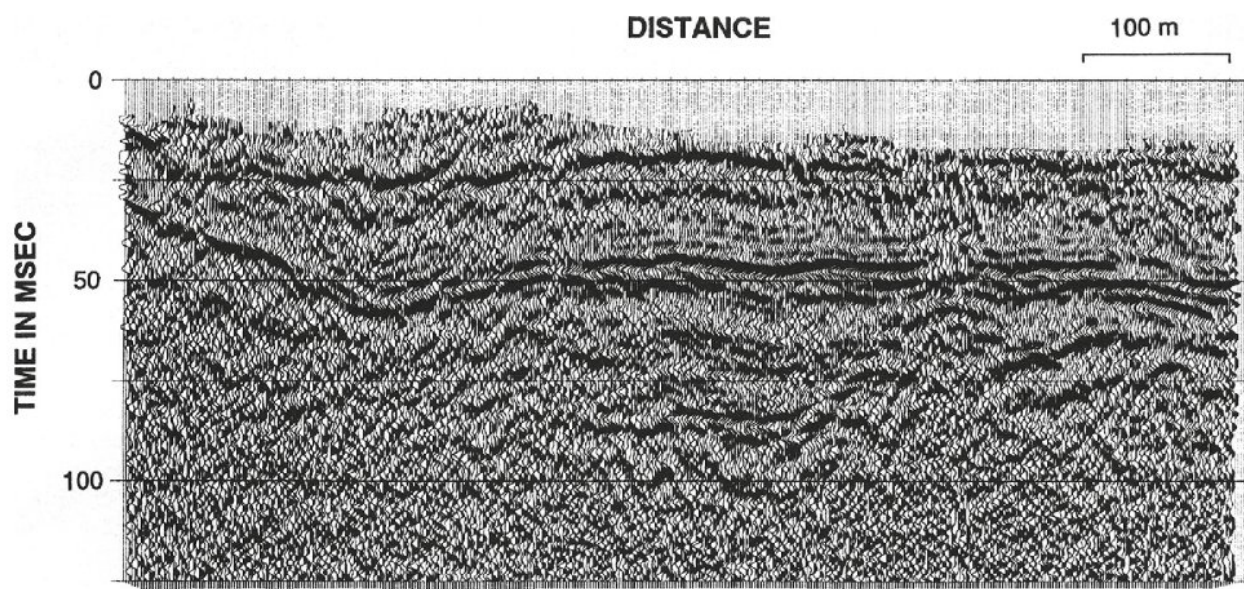
Современный арсенал методов и методик инженерной сейсморазведки, получивших высокую оценку и популярность на производстве, значительно расширился за последние два десятилетия. Но при этом главным методом малоглубинных сейсмических исследований, особенно для изучения обширных территорий и протяженных трасс, остается сейсморазведка методом преломленных волн (МПВ). В этом методе интерпретируются в основном данные, полученные на основе записей продольных (Р) или поперечных (SH) волн. Эти волны имеют свои особенности возбуждения и регистрации. Для Р - волн реализуется система возбуждения-приема zz (в

вертикальной плоскости), а для SH- волн – система yy (в горизонтальной плоскости перпендикулярно базе наблюдений). Однако практика показывает, что вне зависимости от системы регистрации на записях часто присутствуют волны и того, и другого типа. Достаточно часто прослеживаются и волны с другими типами поляризации – обменные, поверхностные.

Достоинством МПВ является возможность определять значения скоростей упругих волн в верхней части разреза. Эти значения используются в дальнейшем для определения физико-механических параметров (ФМС) грунтов и получения информации о структурно-вещественном строении изучаемой среды. Главным недостатком метода является наличие ограниченного класса интерпретационных моделей, представленных моделями с нормальным (неубывающим) характером изменения упругих характеристик с глубиной. Другим недостатком МПВ является необходимость работать с большими базами регистрации. Длина получаемого годографа для

слабо градиентных слоистых сред должна превышать глубину исследований в 5-8 раз в зависимости от конкретных геосейсмических условий, а для сильно градиентных сред – в 2.5 и более раз. Эти обстоятельства затрудняют проведение исследований МПВ на застроенных территориях, где отсутствует пространство, необходимое для размещения сейсмического оборудования. Кроме того, на участках с интенсивными механическими и электрическими помехами возникают сложности, связанные с неудовлетворительным соотношением сигнал/помеха на удаленных от пункта возбуждения каналах.

Вторым методом, весьма быстро завоевывающим признание при инженерно-геологических изысканиях, особенно в сложных условиях, является метод отраженных волн. С одной стороны его развитие и внедрение – это итог научно-технического прогресса в области сейсмической аппаратуры, оборудования и технологий обработки и интерпретации, позволяющих работать в высокочастотном варианте, а с другой – оно



▲ Рис. 2. Пример временного сейсмического разреза, полученного по методу ОГТ на основе применения плотной системы наблюдений и высокочастотного вибрационного источника сейсмических волн [6]

вызвано необходимостью давать геофизические прогнозы в пределах участков малых размеров, когда невозможно выдержать параметры системы наблюдений, применяемые при работах МПВ.

Сегодня с помощью современных средств возбуждения и регистрации высокочастотных волн, удается получать сведения об отражающих границах, залегающих на глубинах, начиная от 5-10 м, при малом шаге между пунктами возбуждения (1 м). Пример временного разреза, полученного с помощью портативного электромагнитного вибратора, приводится на рис.2.

В инженерной сейсморазведке методом МОГТ на первое место ставятся задачи детализации геологического строения и обнаружения неоднородностей. В некоторых условиях, например, когда под четвертичными отложениями залегают осадочные образования характерной чертой которых является слоистость, МОГТ может решать задачи прослеживания отражающих горизонтов, приуроченных к границам напластований, выделять эрозионные срезы и несогласия, определять положение скоростных неоднородностей и тектонических нарушений, секущих отражающие горизонты.

За рубежом в последние годы получили значительное развитие активные и пассивные методы изучения ВЧР на основе получения записей поверхностных волн (волн релеевского типа, реже - волн Лява), позволяющие на основе данных о дисперсии поверхностных волн изучать скорости поперечных волн в разрезе. Значения же скоростей поперечных волн играют большую роль при оценке прочностных показателей грунтовых массивов. Эти методы известны в двух модификациях: многоканальный (MASW) и одноканальный (SASW). Одна-

ко следует помнить, что в 70-80 гг. в Советском Союзе активно разрабатывались и внедрялись методики расчета скоростных разрезов поперечных волн как по фазовым скоростям поверхностных волн, так и дисперсионным кривым [7].

Выводы

ВЧР - сложно построенная часть геологической среды, наличие которой всегда сопровождает проведение сейсморазведочных работ. Закономерности ее строения на одной территории трудно переносимы на другие площади исследований. ВЧР выступает в роли источника значительного количества волн помех, искажает форму создаваемого источником сейсмического импульса. В ней происходит поглощение значительной части сейсмической энергии. Прохождение волн через эту часть разреза обедняет запись высокочастотными составляющими, приводит к понижению разрешающей способности, вносит нерегулярные временные задержки, что создает искажения на записях полезных волн и приводит к ошибкам в результатах сейсморазведки.

Основные средства для устранения возмущающего влияния этой области геологического разреза на сейсмическое волновое поле непрерывно развиваются и опираются на все более глубокое понимание ее строения. Это происходит на основе детального изучения природы и структуры возникающих в ВЧР искажающих факторов. Совершенствуется как сейсморазведочная аппаратура и оборудование, так и методические приемы и способы изучения и учета влияния ВЧР.

Достаточно большой опыт и арсенал средств для изучения ВЧР имеется в инженерной сейсморазведке. Успешно решаются задачи детального изучения геологического строения ВЧР, определе-

ния основных упругих характеристик среды, физико-механических параметров грунтов и горных пород, решаются задачи картирования областей с пониженными прочностными характеристиками.

Совместный анализ методик, приемов и результатов изучения ВЧР в глубинной сейсморазведке и при проведении инженерно-сейсмических работ может дать новые идеи для качественного и оперативного изучения верхней части геологического разреза.

Литература

1. Yilmaz Oz. Seismic Data Analysis. – Tulsa, SEG. 2001. V.1. 1000 p.
2. Сейсморазведка: Справочник геофизика. т.IV. Сейсморазведка.- М.:Недра,1966, 762 с.
3. Сейсморазведка: Справочник геофизика. В двух книгах/Под.ред. В.П. Номоконова. Книга первая. - М.: Недра, 1990. -336 с.
4. Боганик Г.Н., Гурвич И.И. Сейсморазведка. - Тверь: Изд-во АИС, 2006. 744 с.

5. Козырев В.С., Жуков А.П., Коротков И.П., Жуков А.А., Шнеерсон М.Б. Учет неоднородностей верхней части разреза в сейсморазведке. Современные технологии. – М.: ООО “Недра-Бизнесцентр”, 2003. -227 с.

6. Ghose R., Nijhof V., Brouwer J., Matsubara Y., Kaida Y. and Takahashi T. Shallow to very shallow, high-resolution reflection seismic using a portable vibrator system GEOPHYSICS, VOL. 63, NO. 4 (JULY-AUGUST 1998); PP. 1295-1309

7. Бондарев В.И. Сейсмический метод определения физико-механических свойств нескальных грунтов. Екатеринбург: Изд-во УГГГА, 1997.-220с.

Подробнее об авторах



Крылатков
Сергей Михайлович

профессор кафедры
геофизики нефти и газа
Уральского государственного
горного университета,
к.г.-м.н.



Крылаткова
Надежда Анатольевна

доцент кафедры
геофизики нефти и газа
Уральского государственного
горного университета,
к.г.-м.н.



Крылевская
Анна Николаевна

ассистент кафедры
геофизики нефти и газа
Уральского государственного
горного университета,
аспирант