



ИЗУЧЕНИЕ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИЙ МНОГОВОЛНОВОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ В ПРИМЕНЕНИИ К ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ РАЗРЕЗА

В.М. Кузнецов¹, А.П. Жуков¹, Е.О. Никонов², Д.И. Буров², Т.Н. Гафаров², А.В. Кусевич²

¹ООО “Геофизические системы данных”,

117198, Москва, Ленинский пр-т, 113/1, оф. Е-313, Россия, e-mail: info@gds.ru

²ООО “Газпром Георесурс”, 117149, Москва, ул. Болотниковская, 18/2, Россия, e-mail: georesurs-office@mail.ru

В статье приведены результаты многоволновой малоуглубинной сейсморазведки по изучению строения верхней части разреза (до 200 м) в зоне развития вечномерзлых пород. Результаты получены при 3С регистрации с ударным возбуждением в вертикальном (Z) и горизонтальном (Y) направлениях для PP -, PS - и SH -волн. Наиболее надежные результаты для данного района получены путем формирования изображений из записей Yy компоненты волнового поля, содержащей отраженные SH -волны. Близость частотного состава SH -волн к частотному составу PP -волн при существенно более низких значениях скоростей (в 4–5 раз) объясняет реально наблюдаемую высокую разрешенность волновых полей на поперечных монотипных волнах при изучении верхней части разреза.

Вечномерзлые породы, многоволновая сейсморазведка

NEAR-SURFACE MULTI-WAVE SEISMIC IN PERMAFROST STUDY

V.M. Kuznetsov¹, A.P. Zhukov¹, E.O. Nikonov², D.I. Burov², T.N. Gafarov², A.V. Kusevich²

¹Geophysical Data Systems, LLC, Russia, Moscow, Leninskiy av., 113/1, E-313, 117198, e-mail: info@gds.ru

²Газпром Георесурс, LLC, Russia, Moscow, Bolotnikovskaya st., 18/2, 117149, e-mail: georesurs-office@mail.ru

This paper is an overview of the results derived from shallow multicomponent seismic (down to 200 m) within the near-surface permafrost interval. The results were obtained using 3C receivers, vertical (Z) and horizontal (Y) impact excitation, and PP -, PS -, and SH -waves. The most reliable results for the study area were generated by processing the Yy data for SH -reflections. The close similarity between SH - and PP -wave spectra, coupled with much lower (by a factor of 4 to 5) velocities, explains the high resolution of non-converted shear wave images in the shallow subsurface intervals.

Permafrost, multiwave seismic

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

На протяжении всего периода освоения месторождений Крайнего Севера остро стояла задача снижения рисков возникновения технологических разрушений при строительстве разного рода инженерных объектов, включая скважины, сооружения, трубопроводы и другие объекты инфраструктуры месторождений, в условиях образования зон растепления в верхней части разреза (ВЧР) многолетнемерзлых пород (ММП). Особенно актуальной эта проблема становится в настоящее время в связи с увеличением объемов и темпов работ в северных регионах страны.

Известно, что технологические разрушения в областях развития ММП чаще всего возникают в зонах резкого изменения физических свойств грунтов, вызванного температурными изменениями сезонного и техногенного характера. Талики, жильные льды, линзы льда, криопэги и прочие неоднородности в толще ММП представляют серьезную опасность для инженерных сооружений ввиду изменения физических свойств грунтов под воздействием различных факторов (температура, нагрузка и т. п.).

Залежи подземных льдов значительной мощности встречаются на глубинах до 50 м. Плотность льда в

крупных залежах изменяется от 0.800 до 0.908 г/см³ (без пузырьков воздуха), в значительной степени отличаясь от плотности вмещающих пород. В рыхлых ММП льды присутствуют не только как составная часть мерзлых пород, но и в виде чистых образований разной формы и размеров. Такой лед рассматривается как мономинеральная ММП. Для сейсмических исследований также важно оценивать локализацию подземных льдов, представленных пластовыми телами и ядрами больших бугров пучения. Мощность пластовых льдов может достигать первых десятков метров, а площади распространения – нескольких квадратных километров.

Противоположной разновидностью неоднородностей ВЧР являются зоны растеплений, или талики (сквозные и сезонные), приуроченные к гидрографическим особенностям рельефа участка или зоны исследований. Зимой сквозные талики с поверхности промерзают, мощность сезонномерзлых пород над ними может достигать 5.0 м. В летнее время к подрусловым таликам за счет теплового воздействия водных потоков присоединяются значительные зоны сезоннотальных пород. Площадь их распространения и объем

все время изменяются: в течение лета увеличиваются, а с началом осени сокращаются вплоть до полного исчезновения.

Геокриологическими исследованиями [Методические рекомендации..., 1977; Применение..., 1992; Седов, 1988; Скворцов, 2005; Скворцов и др., 2011; Мельников и др., 2010] установлен достаточно резкий (скачкообразный) переход мерзлых пород в талые на границе талик–мерзлота. Следует отметить, что граница между мерзлыми и талыми породами, отличаясь известной плавностью, может иметь самые различные углы наклона вплоть до вертикальных по отношению к земной поверхности и часто претерпевает разрывы сплошности. Объемы сезоноталых и мерзлых пород в зависимости от ряда факторов, например, от среднемесячных температур, количества осадков, могут существенно изменяться. Все это позволяет относить границы, разделяющие мерзлые и талые породы, к высокоподвижным. Поведение грунтов при изменении внешних (сезонных, технологических) факторов воздействия невозможно прогнозировать без оценки петрофизических параметров – скоростей продольных и поперечных волн.

К настоящему времени выполнен большой объем исследований по определению акустических свойств мерзлых грунтов [Мельников и др., 2010; Седов, 1988; Скворцов и др., 2011]. Данными исследованиями установлено, что в крупнозернистых породах (песок, песчаник) скорость продольных сейсмических волн при переходе через 0° (от положительной температуры к отрицательной) увеличивается скачком в 2 раза и более, а при наличии в породе тонкодисперсных частиц (глина, глина с песком) увеличение скорости составляет только 20–30 % от скорости распространения волн. Таким образом, при замерзании различных горных пород увеличивается скорость распространения волн в них, и изменение скоростной дифференциации зависит от гранулометрического состава пород. Результаты исследований позволяют сделать заключение о том, что для мерзлых пород характерны anomalно высокая скорость и anomalно высокая внутримерзлотная дифференциация по акустической жесткости.

Если обобщить данные по петрофизической модели криолитозоны, то критерии построения методики для ее изучения можно сформулировать следующим образом:

- возможность локализации малоамплитудных и малоразмерных объектов (20–50 м) по площади и глубине (0–50 м), выделяющихся по своим упругим свойствам;

- возможность проследить верхнюю и нижнюю границы криолитозоны (0–400 м) и межзональные границы в ней;

- разделять объекты с различным литологическим составом и консолидацией породного материала.

В задачу геофизики входит прогноз и локализация по площади зон, в которых потенциально возможно изменение упругих свойств по сравнению с вмещающими отложениями. Такого рода информацию при масштабных (по площади) и натурных (естественных, а не лабораторных) наблюдениях можно получить только используя технологии многоволновой сейсморазведки (МВС), позволяющие оценить не только структурный план, но и скорости продольных и поперечных волн и коэффициент Пуассона.

Ранее при инженерных исследованиях в районах развития ММП в основном использовались преломленные волны с применением схем нагоняющих географов [Методические рекомендации..., 1977; Седов, 1988]. Преломленные волны позволяют получить более точную (по сравнению с отраженными) оценку скорости продольных волн в мерзлом слое. Вместе с тем волны этого класса не всегда хорошо прослеживаются в условиях инверсионной приповерхностной зоны, имеют значительные ограничения при структурных построениях. Следует отметить значительные сложности с прослеживанием преломленных волн для сдвиговых компонент волнового поля.

В настоящее время все большее число сейсмических исследований ММП проводятся на отраженных волнах [Мельников и др., 2010; Скворцов и др., 2011]. Для включения в обработку и интерпретацию отраженных волн требуется использовать системы многократных перекрытий и, соответственно, увеличивать канальность регистрирующей аппаратуры. Отраженные волны являются более эффективными для структурных построений в связи с тем, что на границах талых и мерзлых пород модуль коэффициентов отражения продольных волн может варьировать от 0.14 до 0.33, а для поперечных волн еще выше. Опыт инженерных работ на отраженных волнах разного типа имеется для различных сейсмогеологических условий. Многими авторами [Скворцов, 2005; Andre et al., 2013] отмечается, что максимум информации получается, как правило, по поперечным волнам, что связано с их большим разрешением для ВЧР. Таким образом, использование *S*-волн для изучения верхней и нижней границ мерзлоты может существенно дополнить информацию по продольным волнам в силу того, что мерзлая толща более контрастно дифференцирована в поле поперечных волн.

Для удовлетворения требований изучения объектов в пределах толщи ММП следует ориентироваться на следующую методику сбора сейсмической информации:

- сбор данных по системе МОГТ с максимальным выносом ПВ–ПП 150–300 м;

- регистрация данных на три компоненты (*X*, *Y*, *Z*) с шагом ПП 1–5 м;

- возбуждение упругих колебаний при вертикальном воздействии (*Z*) на грунт и направленном горизонтальном ортогонально профилю (*Y*) воздействии при интервале между пунктами возбуждения 1–5 м.

Такая методика позволяет регистрировать шесть компонент волнового поля (т. е. использовать отраженные волны *PP*, *SH*, обменные *PSV*). Кроме того, по возможности могут быть использованы преломленные волны *PPP* и волны Рэлея. Регистрация волн разных типов и классов позволяет:

- проводить структурные построения по тем типам волн, которые наиболее хорошо коррелируются и динамически выражены для данного типа разреза;

- прогнозировать изменение упругих свойств грунтов и их литологического состава при условии качественного отождествления волн разных типов с одними и теми же отражениями;

- снизить риск отсутствия информации по целевой зоне на одном из типов волн из-за сейсмогеологических условий на основе получения этой информации по другим типам волн.

При этом малый шаг (максимум 5 м) обеспечивает достаточную детальность для обнаружения локальных, аномальных по своим акустическим свойствам, объектов.

МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ

Реализовать совокупность обозначенных выше требований возможно при использовании центральной электроники с минимальным (около 200) количеством каналов, трехкомпонентных сейсмоприемников и источника упругих колебаний, позволяющего производить направленное воздействие на грунт с возможно более высокочастотным спектром излучаемого сигнала.

Опытное опробование методики изучения ММП на основе комплексирования волн разных типов и классов было осуществлено нами на одном из газовых месторождений, принадлежащих ОАО "Газпром". Работы проводились по следующей методике:

– возбуждение упругих колебаний ударным способом (кувалда) при вертикальном (Z) воздействии на грунт и направленном (с помощью борны-подставки) горизонтальном ортогонально профилю (Y) воздействию. Интервал между пунктами возбуждения (ПВ) составлял 5 м. Количество накоплений для каждого вида воздействий – 4;

– прием упругих колебаний осуществляется трехкомпонентными датчиками в едином корпусе GS-3С. Интервал между пунктами приема (ПП) 5 м. Минимальное удаление ПВ–ПП – 0 м, максимальное удаление в начале и конце профилей – 350 м, на основной части профилей – 175 м (рис. 1). Количество активных каналов – 213 (71 трехкомпонентная установка).

В качестве регистрирующей аппаратуры использовалась телеметрическая станция "Прогресс-Т2". Длина записи 1 с, шаг дискретизации 1 мс.

Объем работ составил два профиля длиной по 2500 м с пересечением в центре. Пикетаж через 5 м (рис. 2). Количество ф. н. – 2000 (на каждом профиле по 1000 ф. н., из них Z -возбуждение 500 ф. н., Y -возбуждение 500 ф. н.). Работы были выполнены за 12 дней.

Предварительная обработка полевых данных включала задание геометрии системы наблюдений, анализ первичных записей с отбраковкой каналов с низким соотношением сигнал/помеха, ориентацию компонент записи в компоненты волнового поля. На этом этапе оценивалась правильность заданных координат для точек возбуждения и регистрации. Фактически при двух направлениях возбуждения (Z и Y) и трех компонентах регистрации (x , y , z) требовалось задать геометрию для шести компонент регистрации

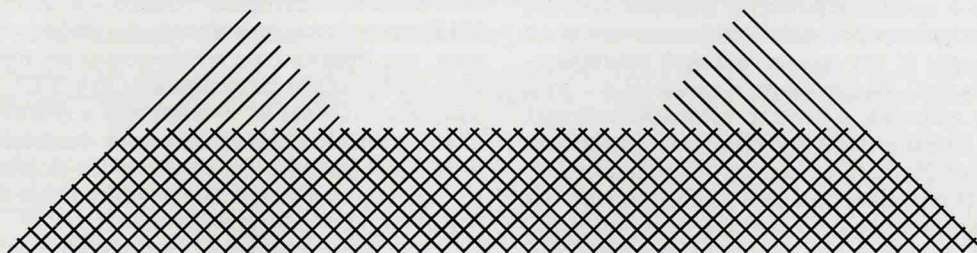


Рис. 1. Схема отработки профилей МВС-ВЧР.

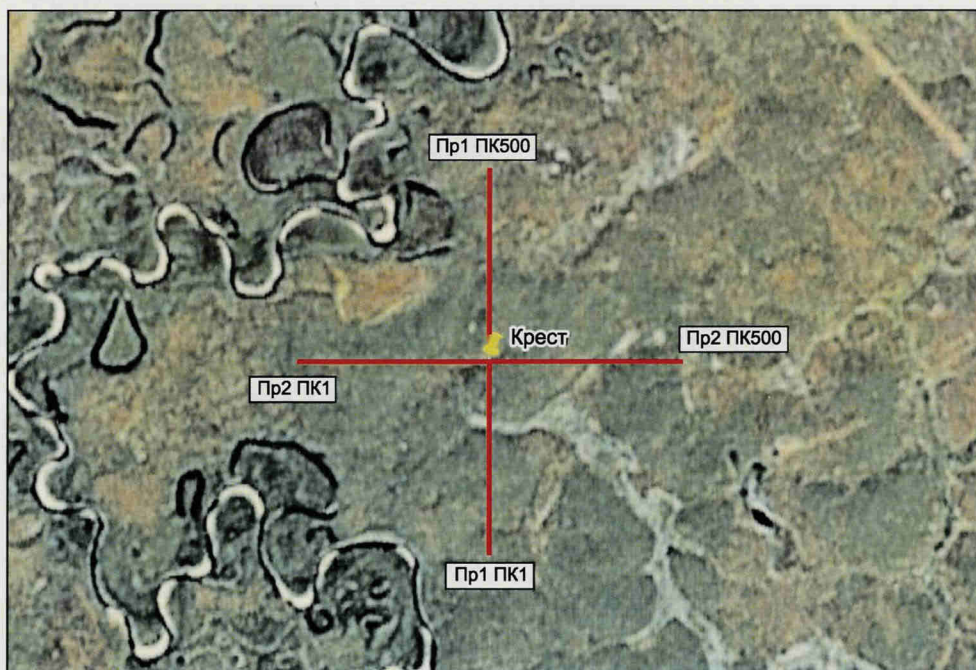


Рис. 2. Взаимное расположение профилей МВС-ВЧР.

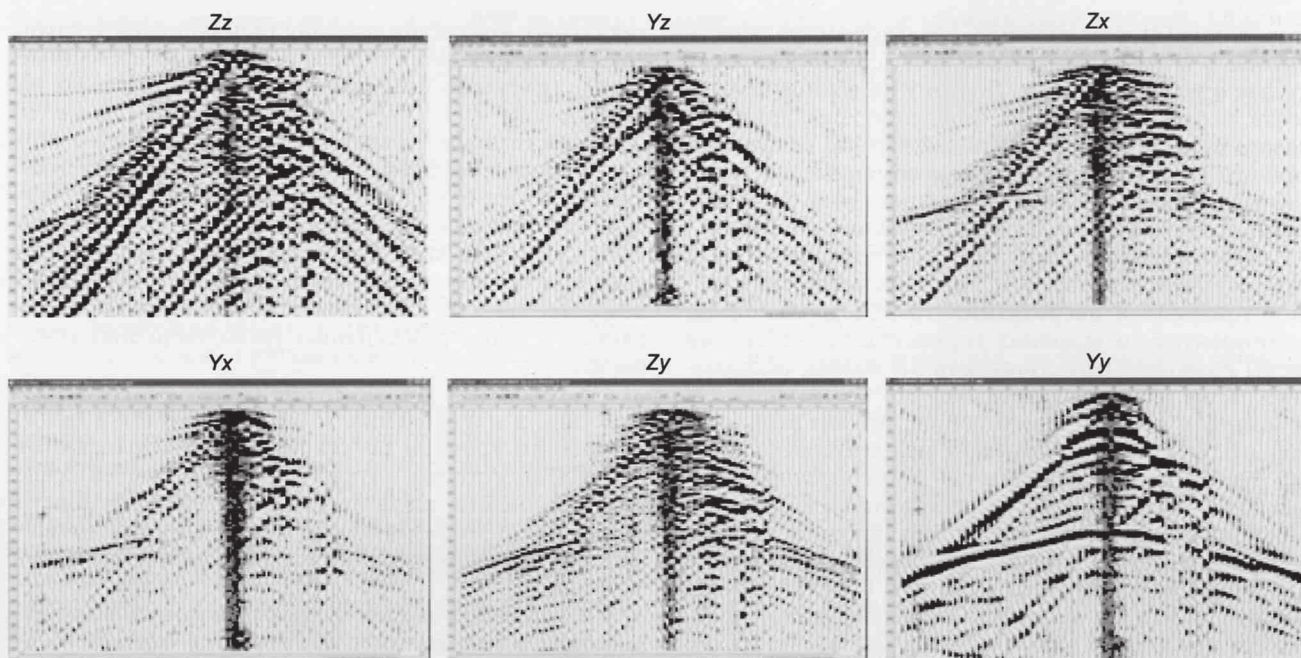


Рис. 3. Первичная запись шестикомпонентного волнового поля.

Прописными символами обозначен тип возбуждения, строчными – компонента приема.

(Z_x , Z_y , Z_z , Y_x , Y_y и Y_z). После отбраковки и коррекции зашумленных каналов осуществлялся поворот компонент регистрации в компоненты волнового поля. Эта процедура необходима для корректировки направленности ПВ–ПП (в случае значимых отклонений профиля от прямолинейности), учета отрицательных выносов для смены знака отраженных обменных волн. После этого все компоненты обрабатывались отдельно. Для корректного построения графа дальнейшей обработки потребовался детальный анализ волнового поля на всех его компонентах.

Особенности волновых сейсмических полей при возбуждении колебаний разнонаправленными источниками. Пример первичных сейсмограмм приведен на рис. 3. Сразу следует отметить энергетически выраженные, хорошо коррелируемые отражения SH (компонента Y_y). Аналоги этих отражений на PP -волнах (компонента Z_z) имеют гораздо меньшую выразительность и, в основной своей части, интерферируют с короткопериодными модами волны Рэлея. Интересно, что их частотный состав незначительно отличается от SH -волн. Это и объясняет гораздо большую разрешенность для SH -волн – при значительно меньших скоростях длина волны для них заметно меньше.

На компонентах Z_x и Z_y можно отметить высокочастотный аналог отражения SH , который, скорее всего, связан с волной PSS (обменная в промежуточном верхнем, инверсионном по скорости слое). К сожалению, нам не удалось получить по волнам данного типа внятных разрезов, что связано, по-видимому, с латеральной неоднородностью данного слоя. На компонентах Z_z и Y_y выделяются также дифрагированные объекты одноименной геологической природы.

Компонента записи Z_z в условиях спокойного залегания пород позволяет увидеть волновую картину, симметричную относительно ПВ. На малых временах

регистрации в первых вступлениях прослеживается волна с кажущейся скоростью ($V_{\text{каж}}$), равной 1400–1600 м/с, за которой на больших временах следует волна с $V_{\text{каж}}$, равной 950–1150 м/с. Эти волны могут быть отражениями от первых резких границ, расположенных под дневной поверхностью.

На больших временах устойчиво прослеживаются низкоскоростные волны, кажущиеся скорости которых расположены в диапазоне 200–355 м/с. Среди этих волн преобладающими по интенсивности являются прямая, поверхностная и звуковая волны.

На сейсмограммах Z_z часто отмечается скачкообразное уменьшение интенсивности PP -волн по латерали. Резкое изменение интенсивности записей в пределах одной и той же расстановки сопровождается иногда изменением их частотного состава.

Компонента записи (Z_x), полученная при вертикальном (Z) воздействии и приеме радиальной (x) компонентой, характеризуется присутствием объемных (продольных и обменных) и поверхностных рэлевских волн. При этом существенной особенностью данной компоненты является противоположная полярность волн по разные стороны от ПВ. На аномальных объектах, в качестве которых могут выступать контакты различающихся по физическим свойствам пород, а также короткие контрастные интервалы профиля, ведущие себя как волноводы, возникают дифрагированные волны, также уверенно наблюдаемые на записях данной компоненты.

Компонента записи Z_y , полученная при вертикальном (Z) воздействии и регистрации трансверсальной (y) компонентой, отличается большей простотой по сравнению с описанными выше. В условиях горизонтально-слоистых азимутально-изотропных сред на этой компоненте вообще не должно быть регулярных волн. Однако в описываемых результатах это оказа-

лось не так. Одна из причин – это негоризонтальность границ, о которой свидетельствует асимметрия годографов отраженных волн. Поэтому на данной компоненте, нередко называемой “побочной компонентой”, можно отчетливо проследить регулярные волны различного типа (главным образом обменные), а также дифрагированные волны, сформированные на вертикальных контактах пород с различными свойствами.

Компонента записи (Y_u) при горизонтальном воздействии в направлении, ортогональном направлению профиля и регистрации трансверсальной (y) компонентой, в условиях горизонтально-слоистой среды позволяет регистрировать SH -волны, обладающие рядом известных преимуществ по сравнению с объемными волнами другого типа. Анализ этой компоненты показал, что волны на ней достаточно хорошо разрешены. Можно видеть, что поперечная отраженная волна уверенно прослеживается вдоль всей расстановки, даже в пределах блока шириной порядка 30 м, являющегося аномальным объектом. От одного из вертикальных контактов данного блока с окружающими породами отчетливо прослеживается поперечная отраженная волна (указана на рис. 4). На обведенном эллипсом участке видно, как импульс отраженной волны расщепляется на два импульса после выхода из зоны интерференции, образованной отражениями от кровли и подошвы слоя, мощность которого возрастает справа налево. Обращает на себя внимание сдвиг минимума годографа отраженной волны влево, свидетельствующий о вздымании отражающей границы в этом направлении.

Высокая разрешенность и устойчивая корреляция SH -волн вкуче с отсутствием волн Лява позволяет уверенно выделять практически все контакты, разделяющие между собой участки однородности в пределах расстановки сейсмоприемников. На границах однородных участков, имеющих характер субвер-

тикальных контактов, распространяющихся в глубину среды, формируются поперечные дифрагированные волны, отчетливо наблюдаемые на сейсмограммах на протяжении всего профиля. Иногда участки неоднородности имеют прихотливую форму, причем они могут быть перекрыты неглубоко залегающей устойчивой границей, под которой наблюдается резкое нарушение прослеживаемости волн. Волноводы, о которых речь шла выше, на поперечных волнах также выделяются аномальным поведением волнового поля: возрастанием его интенсивности и резонансным характером плохо разрешенных низкочастотных колебаний.

Компонента записи Y_z при горизонтальном воздействии в направлении Y характеризуется довольно низким уровнем регулярных волн. Появляются эти волны, которых в горизонтально-слоистой среде не должно быть, из-за неидеальной направленности источника, негоризонтального залегания сейсмических границ и анизотропии среды в окрестности источника.

Компонента записи Y_x при горизонтальном воздействии в направлении Y отличается гораздо большей информативностью, чем описанные выше записи z -компоненты при воздействии Y (Y_z), где достаточно высок фон волн Рэлея.

Анализ представленных данных показывает, что для мерзлых и талых водонасыщенных пород существует широкая область перекрытия значения скорости для продольных волн. К поперечным волнам это относится в меньшей степени. Это накладывает определенные ограничения на использование значения скорости продольных волн для идентификации в разрезе геокриологических границ. Особенно затруднительным становится использование скорости продольных волн в случае присутствия в разрезе песчано-глинистых водонасыщенных толщ.

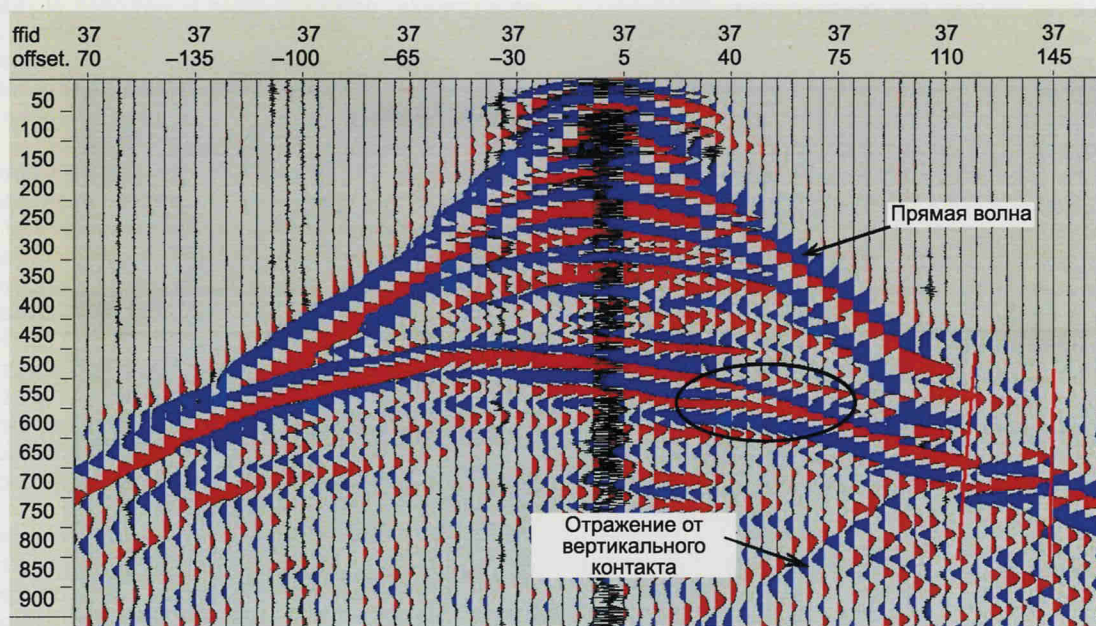


Рис. 4. Сейсмограмма Y_u .

Эллипсом показан участок поперечной отраженной волны с расщеплением импульса, вызванным увеличением мощности слоя. Справа показан вертикальный слой и отражение от одной из его границ.

Основная обработка данных МВС–ВЧР включала корректировку сигналов полезных волн (фильтрация, деконволюция и т. д.), вычитание волн-помех (двухкомпонентная адаптивная), детальный скоростной анализ по вертикали, дополняемый анализом горизонтальных спектров, подбор линии приведения и скорости замещения, суммирование по CDP для монотипных волн (*PP* и *SS*) и по АССР для обменных волн, построение скоростной модели по разным типам и классам волн.

Уровень приведения выбирался, с одной стороны, достаточно высоким для корректного изображения неглубоких приповерхностных геологических объектов, с другой стороны, его значение ограничивалось во избежание больших величин временных сдвигов, негативно влияющих на определение скоростей суммирования. Скорость замещения выбиралась для оптимального учета влияния рельефа на геометрию структур. Уровень приведения и скорости замещения выбиралась после тестирования. Единый уровень приведения для волн всех типов – 40 м. Скорости замещения для продольных волн – 1700 м/с, для поперечных волн – 600 м/с.

Скоростная модель уточнялась по горизонтальным спектрам скоростей. Дополнительно скорости продольных волн оценивались по преломленным волнам (по поперечным волнам это сделать трудно в силу размытости первых вступлений *SH*-волн).

Подбор для асимптотического бинирования при анализе скоростей обменных волн в значительной

мере отличается от стандартного подхода. Обычно при асимптотическом бинировании для работ МВС используется отношение $V_p/V_s = 2$, в случае малоуглубинной МВС это отношение для верхней части разреза может варьировать от 3 до 8.

РЕЗУЛЬТАТ

На рис. 5, 6 приведены временные разрезы шести компонент волнового поля. Разрезы *Zz* и *Yz* получены со скоростями *PP*-волн, разрезы *Yy* и *Yx* – со скоростями *SS*-волн, разрезы *Zx* и *Zy* – по методике обработки *PS*-волн.

Сопоставление данных, полученных во временной области для отраженных продольных *PP* (компонента *Zz*) и поперечных *SH* (компонента *Yy*) волн, показывает, что в данных конкретных условиях (наличие высокоскоростного маломощного слоя сезонного промерзания) использование *SH*-волн является предпочтительным. На данных *SH*-волн отмечается более четкая прослеживаемость границ, выделяется большее количество границ и т. д. Наименее выразительная картина получена для обменных *PS*-волн (компоненты *Zx* и *Zy*), что объясняется худшей динамикой, разрешением и коррелируемостью продольных волн, которые служат источником обмена для *PS*-волн. Наличие слабых, спорадически прослеживаемых отражений на побочных горизонтальных компонентах соответствующего типа (*Yx* и *Zy*) можно было бы расценивать как присутствие азимутальной анизотропии. Но синфазность соответствующих отраже-

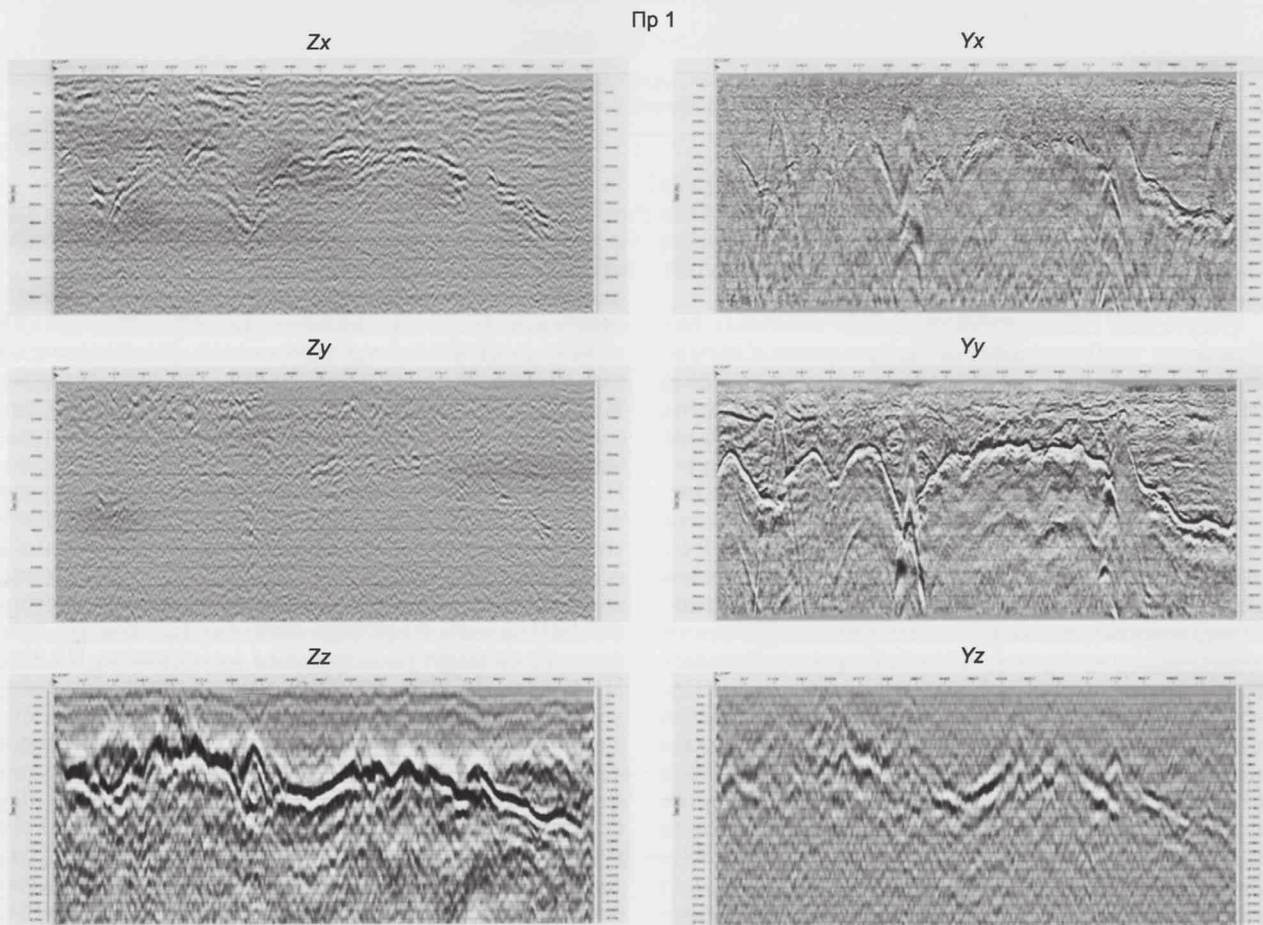


Рис. 5. Временные разрезы *PP*-, *PS*- и *SS*-волн по профилю 1.

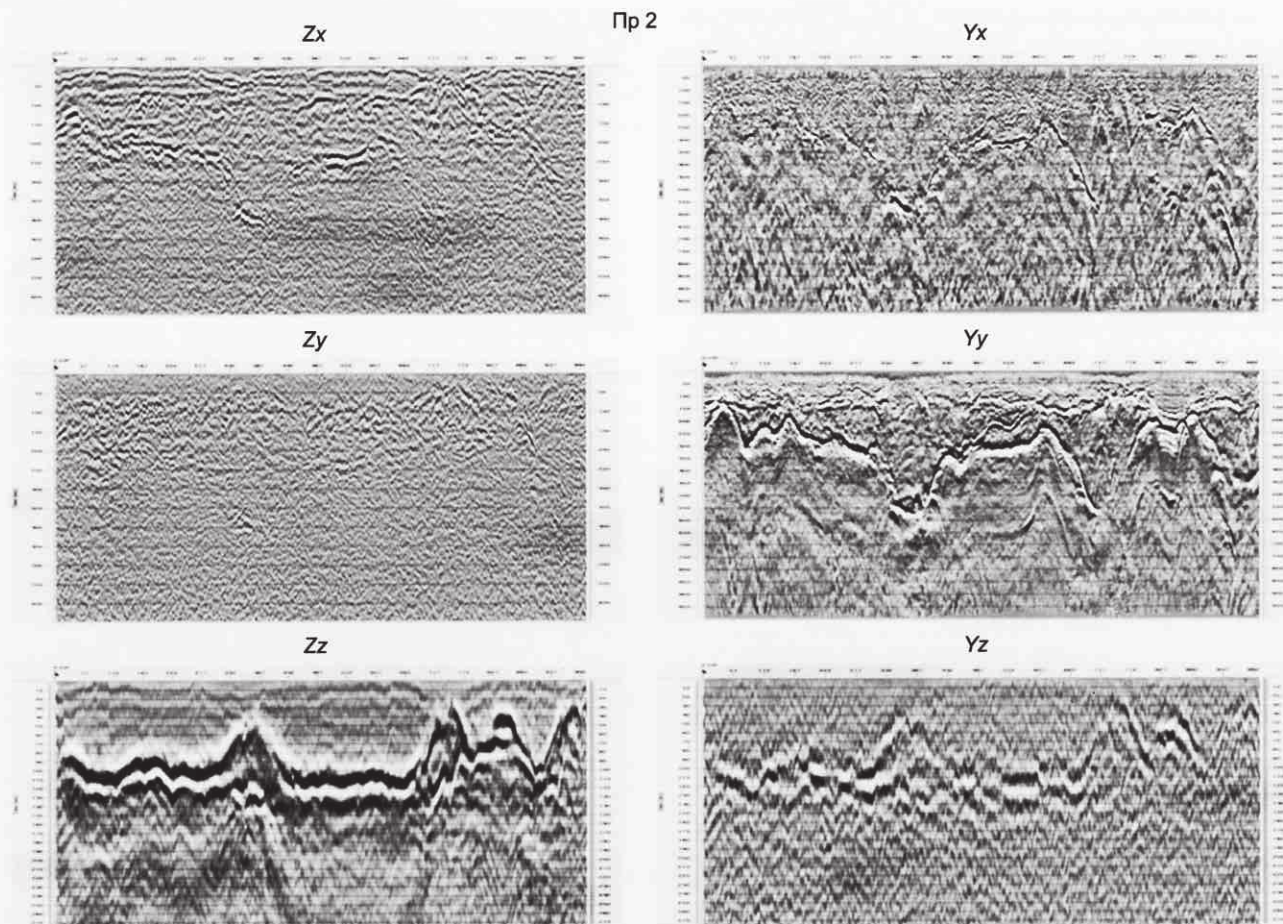


Рис. 6. Временные разрезы *PP*-, *PS*- и *SS*-волн по профилю 2.

ний с отражениями на основных компонентах (Zx и Yy) свидетельствует скорее о наклоне отражающих границ и несовпадении азимута профиля с азимутном наклона.

Отсутствие скважинной привязки волновых полей вызвало необходимость отождествления и интерпретации выделенных интервалов временных разрезов по полученным скоростным характеристикам (скорости преломленных волн и скорости суммирования) и данным ВСЕГИНГЕО по геокриологическому стационару, расположенному в ~15–20 км от места работ. Была принята следующая модель разреза. Верхняя его часть, средняя мощность которой составляет ~8 м, сложена неводонасыщенными песчано-глинистыми породами. Второй слой сложен тальми влажными породами, которые, однако, не находятся в состоянии полного водонасыщения. Нижней границей талых пород является кровля многолетнемерзлых пород.

Глубинные разрезы по *SH*-волнам с учетом рельефа местности и с выделением отражающих границ приведены на рис. 7. Они имеют достаточно сложную структуру. Граница 1 в целом имеет горизонтальное залегание. Нередко ее выделение затруднено присутствием на глубинном разрезе других границ (выклинивания, врезы и т. п.).

Кровля ММП (граница 2) прослеживается на глубинных разрезах наиболее четко. Глубина ее изменя-

ется от 20 до 100 м. Опускание кровли мерзлоты отмечается на участках с пониженными формами рельефа дневной поверхности.

Структура глубинного разреза осложнена присутствием большого количества дифрагированных волн от локальных неоднородностей, расположенных как вблизи дневной поверхности, так и на глубине. Имеется ряд контрастных дифракционных объектов, связанных с кровлей ММП. Они, как правило, наблюдаются на участках, где кровля ММП понижена. Их хорошо видно, например, на профиле 1 вблизи пикетов 920, 1880, а на профиле 2 – в районе пикета 1040. Характерно, что именно в этих точках граница 2 перестает прослеживаться. Это позволяет достаточно обоснованно предположить наличие в исследуемом геокриологическом разрезе сквозных таликов. На профиле 1 они могут располагаться в интервалах ПК900–ПК1000 и ПК1880–ПК1980, а на профиле 2 – в интервалах ПК900–ПК1000 и ПК1760–ПК1900. Обоснованность этого предположения подтверждается и данными работы [Седов, 1988]. В ней приведена информация о наличии большого количества глубоких и сквозных таликов на территории Пур-Надымского междуречья. Кроме того, подошва мерзлых пород, установленная по данным бурения вблизи района работ, располагается на глубине 121 м, что сопоставимо с глубиной расположения дифракционных объектов

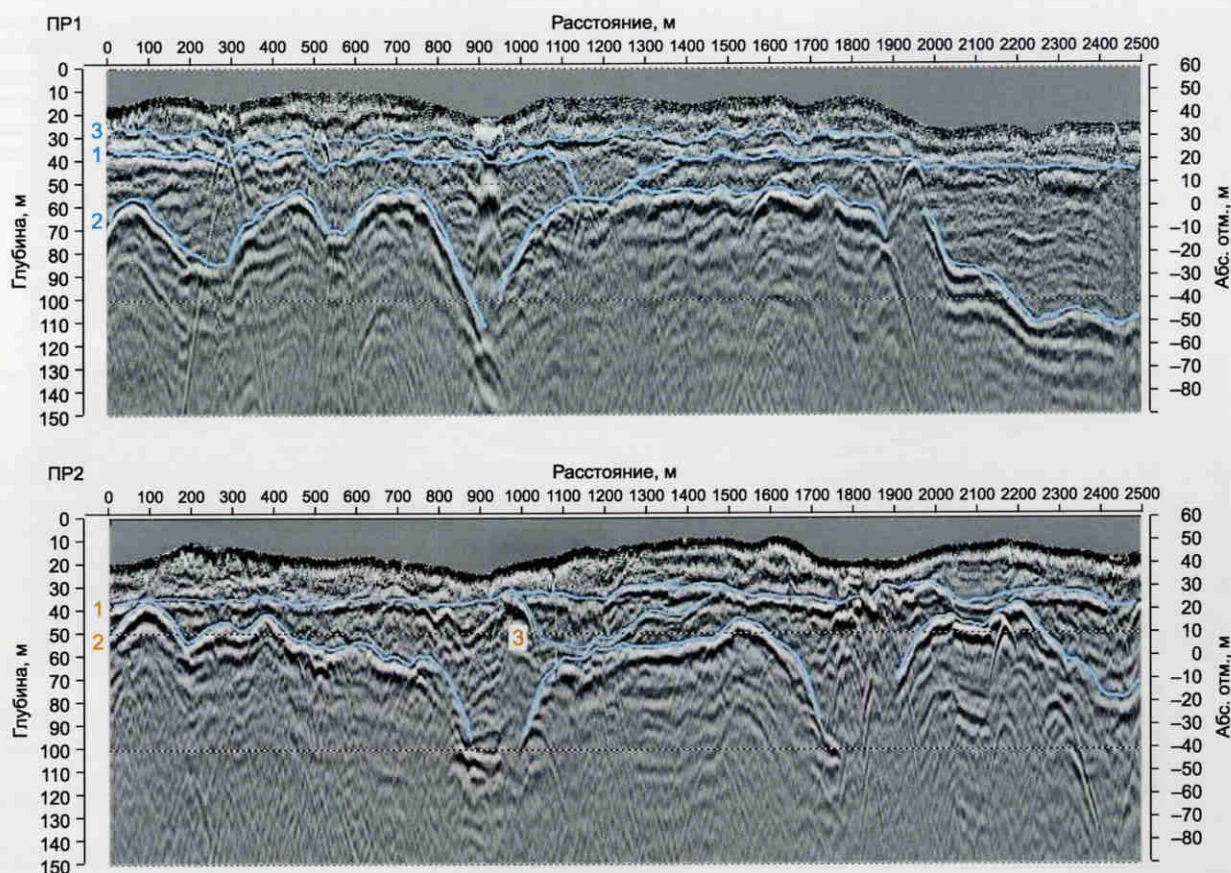


Рис. 7. Глубинные разрезы по профилям 1 и 2 (поперечные SH -волны) с выделением основных сейсмических границ. 1 – литологическая граница, 2 – кровля ММП, 3 – подошва погребенной долины.

на глубинных разрезах. В этом случае дифракционным объектом может являться вертикальный контакт в месте прерывания мерзлых пород.

Дифракционные объекты присутствуют и в пределах талой толщи пород. Так, на профиле 1 вблизи ПК1160 и ПК1220 дифракционными объектами являются места выклинивания на кровле ММП промежуточной литологической границы, являющейся подошвой погребенной долины. На этом же профиле в районе ПК1949 – интенсивная дифракционная волна, приуроченная к месту резкого изменения глубины границы 1.

Кроме основных границ 1 и 2, на глубинных разрезах выделена еще одна, хорошо прослеживаемая, литологическая граница 3 (на ПР 1 в интервале ПК1100–ПК1400). Возможно, она является подошвой погребенной долины. Границы 2 и 3 вблизи ПК1950 выделены с учетом их положения в разрезе и наличия здесь интенсивной дифракционной волны.

Поскольку для продольных и поперечных волн была идентифицирована кровля вечномерзлых пород, появляется возможность оценки коэффициента Пуассона для интервала талика (рис. 8). Достоверная интерпретация литологического состава и флюидонасыщения без соответствующих скважинных и петрофизических исследований в данном районе представляется не совсем корректной. Поэтому можно предположить (учитывая результаты, полученные для

других районов), что пониженные коэффициенты Пуассона приурочены к менее водонасыщенным и более уплотненным грунтам (глины).

ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Основной вывод, который следует из анализа особенностей волновых полей, полученных в ходе полевого эксперимента на разных компонентах при разнонаправленных воздействиях на грунт, состоит в следующем: наиболее надежные результаты при последующей обработке для данного района получены путем формирования изображений из записей Y_u , содержащих отраженные SH -волны. Близость частотного состава SH -волн к частотному составу PP -волн при существенно более низких (в 4–5 раз) значениях скоростей объясняет реально наблюдаемую высокую разрешенность волновых полей на поперечных монотипных волнах при изучении ВЧР. Исследуемый район не является в этом смысле исключением. Аналогичные результаты в условиях инверсного скоростного разреза, который формируется в зимний период в результате сезонного промерзания приповерхностного слоя, неоднократно получались в других районах РФ и за рубежом в различных сейсмогеологических условиях. Тем не менее в иных приповерхностных сейсмогеологических условиях более информативными могут оказаться другие компоненты волнового поля.

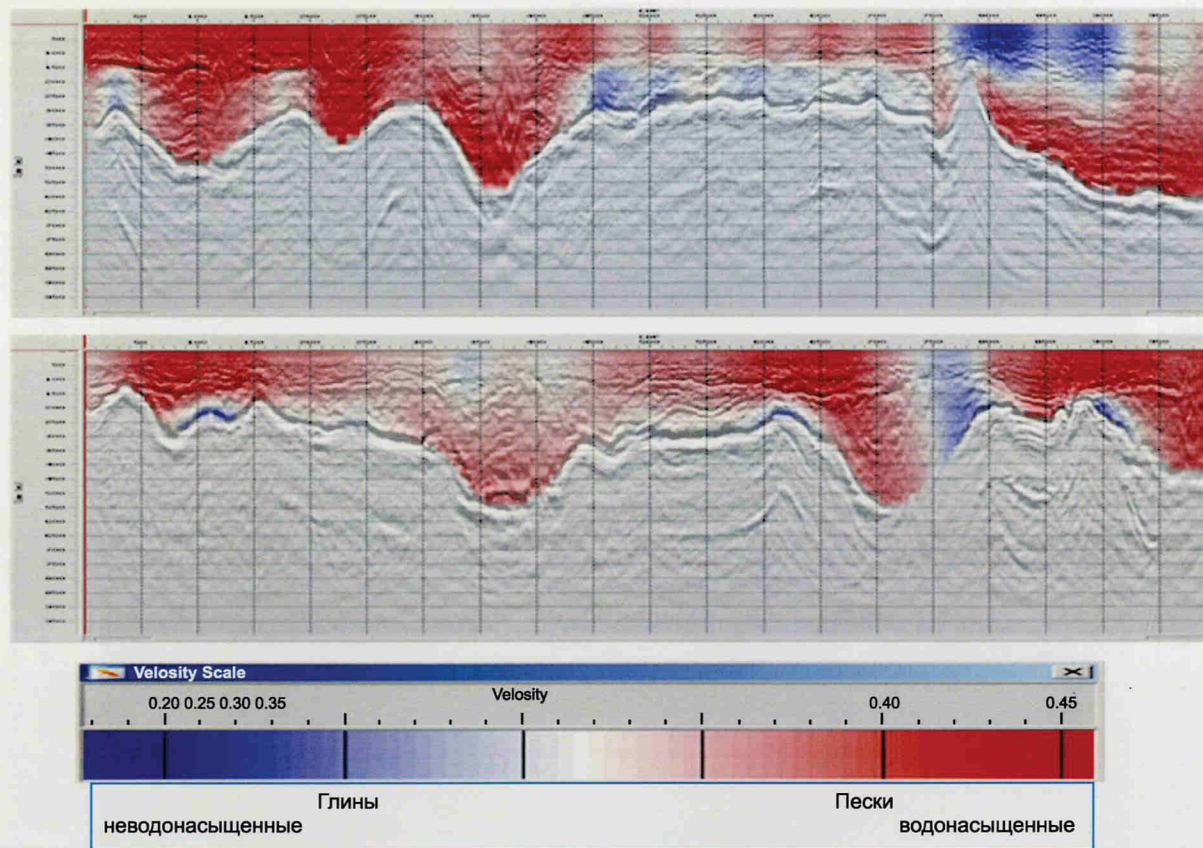


Рис. 8. Оценка коэффициента Пуассона для ВЧР по ПР 1 и 2.

Это является основанием для утверждения, что при проведении такого рода работ необходимо использовать комплексирование волн разных типов и классов. В частности, в данных работах, несмотря на существенно ограниченные возможности отраженных продольных волн для изучения строения разреза в этих условиях, использование преломленных продольных волн позволило детально изучить строение и состояние пород в водонасыщенной и мерзлой частях разреза.

Технологию изучения криолитозон с использованием МВС с целью снизить геологические риски, связанные с разрушением объектов от воздействия геокриологических условий при выборе площадок строительства различных объектов, обеспечивающих разведку, добычу и транспортировку углеводородного сырья, необходимо развивать и совершенствовать в следующих направлениях:

- повышение пространственного охвата систем сбора данных (опробование элементов 3D, сгущение сетки профилей и т. п.);

- повышение производительности и детальности работ (увеличение количества линий приема и канальности приемной расстановки, опробование других технологических решений для реализации двухкомпонентного возбуждения упругих колебаний с расширением частотного состава излучаемых колебаний в сторону высоких частот);

- комплексирование сейсмических работ с бурением и микро-ВСП в мелких скважинах в точках критических изменений сейсмических разрезов.

Несомненно, использование сухопутных костриммеров с трехкомпонентными приемниками [Andre et al., 2013] значительно повышает производительность инженерных работ. Однако в этом случае теряется хороший контакт сейсмоприемник–почва, что особенно важно для сдвиговых колебаний. В большей степени это касается условий работ с устойчивым снежным покровом. Во всяком случае, данный вопрос представляет исследовательский интерес.

Авторы выражают глубокую признательность руководству ООО “Газпром Георесурс” за возможность публикации данных, полученных при проведении работ по заказу компании. Особую благодарность авторы выражают А.Г. Скворцову (Институт криосферы Земли СО РАН) за помощь и консультации при обработке и интерпретации полученных данных, Г.А. Шехтману (ВНИИГеофизика) за помощь в анализе компонент волнового поля.

Литература

Мельников В.П., Скворцов А.Г., Малкова Г.В. Результаты изучения геокриологических условий арктических территорий с помощью геофизических методов // Геология и геофизика. 2010. Т. 51, № 1. С. 169–177.

Методические рекомендации по применению сейсмоакустических методов при изучении инженерно-геологических условий на БАМе. М., 1977.

Применение сейсмоакустических методов в гидрогеологии и инженерной геологии / Под ред. Н.Н. Горяинова. М.: Недра, 1992. 264 с.

Седов М.Б. Сейсмические исследования в районах многолетней мерзлоты. М.: Наука, 1988. 184 с.

Скворцов А.Г. Высокоразрешающая сейсморазведка на поперечных волнах при изучении верхней части геологической среды // Инженерная геофизика: сб. материалов Междунар. науч. конф. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2005. С. 16–18.

Скворцов А.Г., Царев А.М., Садуртдинов М.Р. Методические особенности изучения сейсмогеокриологического разреза // Криосфера Земли. 2011. Т. XV, № 4. С. 110–113.

Andre J., Pugin M., Brewer K. et al. Near surface S-wave seismic reflection profiling – new approaches and insights // First Break. 2013. February. V. 31.

*Поступила в редакцию 20 января 2014 г.,
в окончательном варианте – 4 февраля 2014 г.*

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

КУЗНЕЦОВ Василий Маркович – кандидат технических наук, заместитель директора по науке ООО “Геофизические системы данных”.

E-mail: vaskuznt@gds.ru; тел. +7(495)2342794 (доб. 107)

ЖУКОВ Александр Петрович – доктор технических наук, профессор, директор ООО “Геофизические системы данных”.

НИКОНОВ Евгений Олегович – сотрудник ООО “Газпром Георесурс”.

БУРОВ Дмитрий Игоревич – начальник управления разведочной геофизики ООО “Газпром Георесурс”.

E-mail: d.burov@gazpromgeofizika.ru

ГАФАРОВ Тимур Наильевич – сотрудник ООО “Газпром Георесурс”.

КУСЕВИЧ Александр Вадимович – начальник супервайзерского отдела ООО “Газпром Георесурс”.

E-mail: a.kusevich@gazpromgeofizika.ru