

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ ПОЛЯ УПРУГИХ КОЛЕБАНИЙ В НЕЛИТИФИЦИРОВАННЫХ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОДАХ

А.Г. Скворцов

Институт криосферы Земли СО РАН, 117982, Москва, ул. Вавилова, 30/6, к. 74а, Россия

В работе рассмотрены основные факторы и условия, формирующие сейсмогеокриологический разрез в массивах нелиитифицированных многолетнемерзлых пород и дана классификация основных его типов. Для каждого типа разреза на основании экспериментальных данных и теоретических расчетов рассмотрены основные особенности структуры сейсмического поля продольных и поперечных волн. Выполненный анализ позволил сделать вывод о перспективности использования отраженных поперечных *SH*- и *SV*-волн для повышения эффективности сейсмических методов при геокриологических исследованиях.

Сейсмогеокриологический разрез, поле упругих колебаний, инверсные границы, продольные волны, поперечные волны

FEATURES OF THE STRUCTURE OF ELASTIC OSCILLATION FIELD IN NON-LITHIFIED FROZEN GROUND

A.G. Skvortsov

Earth Cryosphere Institute SB RAS 117982, Moscow, Vavilov st., 30/6, room 74a, Russia

The study is concerned with major factors and conditions forming seismic-geocryological section of non-lithified permafrost. Classification of its main types is given. Main features of seismic field structure of longitudinal and share waves are appointed for each type of seismic-geocryological section on the basis of theoretical accounts and experimental data. The analysis performed allows a conclusion that the reflected share *SH*- and *SV*-waves can be used to increase the efficiency of seismic methods in geocryological researches.

Seismic-geocryological section, elastic oscillation field, inverse boundaries, longitudinal waves, share waves

СЕЙСМОГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИЙ РАЗРЕЗ И ЕГО ТИПЫ

Достоверная информация о структуре поля упругих колебаний является основой эффективного использования сейсмических методов при изучении строения массивов горных пород. Изучение структуры поля упругих колебаний предусматривает получение данных о сейсмогеологическом строении исследуемого массива, выявление существующих в его пределах типов и классов волн и определение их кинематических и динамических характеристик.

В нелиитифицированных многолетнемерзлых породах (ММП) структура поля упругих колебаний характеризуется рядом специфических особенностей. Они определяются высокими значениями и большим диапазоном изменения скоростей упругих волн, относительно слабым их поглощением, широким частотным спектром регистрируемых колебаний, присутствием в разрезе большого количества контрастных и инверсных границ, наличием особой породы и породообразующего компонента — льда, невыдержанностью строения сейсмогеологического разреза, значительным количеством неоднородностей различного масштаба и генезиса, а также прост-

ранственно-временной изменчивостью сейсмогеологического разреза за счет сезонного изменения температуры в верхней части геокриологического разреза. Перечисленные особенности формируют особый тип сейсмогеологического разреза — сейсмогеокриологический.

При геокриологических исследованиях глубина исследований редко превышает 500 м, а в большинстве случаев составляет первые десятки метров и даже первые метры. Этот диапазон глубин соответствует глубинности исследований в инженерной сейсморазведке [*Применение...*, 1992 и др.].

В инженерной сейсморазведке основным методом исследований является метод преломленных волн (МПВ). Вне пределов развития ММП благоприятным условием для широкого использования МПВ является то обстоятельство, что в верхней части геологического разреза, как правило, соблюдаются условия нормального скоростного разреза. Такой тип разреза характеризуется увеличением скорости распространения упругих волн с глубиной по тому или иному закону.

В нелитифицированных ММП условия нормального скоростного разреза соблюдаются лишь в отдельных благоприятных случаях. Присутствие в разрезе ММП значительного количества инверсных границ, на которых происходит уменьшение скорости упругих волн, создают условия для формирования инверсного скоростного разреза. По степени инверсности можно выделить два вида скоростного разреза — частично инверсный и полностью инверсный.

Частично инверсный скоростной разрез соответствует такому распределению скорости упругих волн с глубиной, когда верхний слой подстилается более низкоскоростным слоем, ниже которого залегает слой (или слои), скорость волн в котором выше чем в верхнем слое. Подобный тип сейсмогеокриологического разреза может быть сформирован при определенном литологическом строении массива ММП, а также явиться следствием развития геокриологических процессов, в результате которых происходит формирование промежуточного слоя [Шур, 1988]. Особенно отчетливо частично инверсный разрез за счет присутствия промежуточного слоя проявляется в тонкодисперсных глинистых породах. Впервые кардинальное влияние промежуточного слоя на структуру поля упругих колебаний в верхней части разреза ММП было показано в [Горяинов и др., 1991; Изучение..., 1992].

В условиях частично инверсного скоростного разреза возможна регистрация на дневной поверхности преломленных волн от кровли высокоскоростных горизонтов, залегающих на некоторой глубине. Однако за счет эффекта экранирования, создаваемого промежуточным слоем, ошибки в определении положения этих преломляющих границ без привлечения дополнительной информации по наблюдениям во внутренних точках среды могут составлять десятки и достигать сотни процентов.

Полностью инверсный скоростной разрез наблюдается в условиях, когда скорость распространения упругих волн в верхнем слое ММП является максимальной по сравнению со скоростью в нижележащих горизонтах. В этой ситуации формирование преломленных волн невозможно принципиально.

Таким образом, широкое развитие в нелитифицированных ММП инверсного скоростного разреза ограничивает использование преломленных волн. Единственной контрастной преломляющей границей для всех типов геокриологического разреза является подошва сезонного слоя (СТС).

В этих условиях информация о строении сейсмогеокриологического разреза может быть получена с помощью отраженных волн. Благоприятным условием для использования данного типа волн является достаточно высокая частота

региструемых колебаний. Это обеспечивает получение высокой разрешенности сейсмической записи и соответственно возможность регистрации отраженных волн от границ, расположенных на небольшой глубине.

Изучение структуры волнового поля в нелитифицированных ММП практически стало возможным с появлением нового поколения специализированной высокочастотной компьютеризированной сейсмической аппаратуры.

Целенаправленные исследования по изучению структуры волнового поля были начаты нами во второй половине 80-х гг. и проводились как самостоятельно, так и совместно с Геологической службой Канады [Skvortsov и др., 1992; Гальперин, 1994; Бернс и др., 1995].

Относительно небольшая глубина исследований предъявляет повышенные требования к детальности изучения структуры волнового поля и надежности геокриологической идентификации выделенных волн.

Для достижения этой цели был выбран путь комплексного натурального изучения особенностей структуры волнового поля с помощью наблюдений во внутренних точках среды по методике вертикального сейсмического профилирования (ВСП) и наблюдений на дневной поверхности. При этом наблюдения по методике ВСП являются основными. Они несут главную информацию о структуре волнового поля. Наземные наблюдения призваны подтвердить сделанные выводы и продемонстрировать практическую возможность использования тех или иных типов и классов волн для изучения строения сейсмогеокриологического разреза. Геокриологическая идентификация выделенных при ВСП волн в случае необходимости осуществляется путем теоретического расчета поля упругих колебаний на основании реальных данных о скоростном разрезе исследуемого массива.

Для проведения ВСП был разработан и сконструирован трехкомпонентный сейсмический зонд прижимного типа с ортогональным расположением сейсмоприемников DF-7. Был также предложен и успешно опробован оригинальный способ возбуждения сейсмических колебаний, обеспечивающий одновременную генерацию как продольных, так и поперечных волн вертикальной (SV-волны) и горизонтальной (SH-волны) поляризации.

Исследования проводились главным образом в северных районах Западной Сибири в летний период при наличии СТС. С целью получения наилучшей разрешенности сейсмической записи возбуждение сейсмических колебаний осуществлялось ударным способом по кровле ММП.

Следует отметить двоякое влияние СТС на качество получаемых результатов. При незначительной его мощности он обладает определен-

ными демпфирующими свойствами в отношении прямых волн. Это улучшает возможность регистрации на дневной поверхности высокочастотных колебаний от сейсмогеокриологических границ. Однако если мощность СТС достаточно велика и составляет примерно половину длины волны начинают сказываться резонансные явления. На волновой записи они проявляются в виде интенсивных многофазных волн реверберационного типа, которые существенно осложняют выделение и прослеживание полезных волн. Особенно сильно это явление наблюдается при использовании поперечных волн.

СТРУКТУРА ПОЛЯ ПРОДОЛЬНЫХ И ПОПЕРЕЧНЫХ SV-ВОЛН В УСЛОВИЯХ НОРМАЛЬНОГО СКОРОСТНОГО РАЗРЕЗА

На рис. 1 представлены результаты сейсмического каротажа и ВСП в „сухой“, необсаженной скважине (п-ов Ямал). Мощность СТС составляет около 0,5 м. На скоростном разрезе (см. рис.1, Б) присутствие промежуточного слоя проявляется очень слабо, поэтому данный тип разреза вполне обоснованно может быть отнесен к нормальному типу сейсмогеокриологического разреза.

Структура волнового поля, зарегистрированная вертикальным сейсмоприемником с пункта удара, удаленного на 7,6 м от устья скважины, представлена на рис.1, А. При таком

удалении на вертикальном профиле возможно присутствие как отраженных, так и преломленных волн от кровли пластового льда. Формирование преломленных волн на подошве льда в условиях данного скоростного разреза невозможно.

На волновой записи уверенно выделяются падающие продольная $t_p^{пр}$ и поперечная SV-волны $t_s^{пр}$, а также отраженные волны: продольная $t_p^{отр}$ и поперечная $t_s^{отр}$.

Обращают на себя внимание высокие частоты всех выделенных волн. Преобладающая частота продольных волн составляет около 1000 Гц, а поперечных SV-волн 500 Гц и более, что обеспечивает получение разрешенной сейсмической записи со столь малых глубин и возможность практической их регистрации при наземных наблюдениях.

Второе важное обстоятельство заключается в том, что при регистрации волнового поля сейсмоприемником с вертикальным расположением оси максимальной чувствительности интенсивность поперечных SV-волн значительно выше, чем продольных волн.

Следующая особенность структуры волнового поля состоит в том, что поперечные волны более детально характеризуют особенности сейсмогеокриологического разреза. Проявляется это, в частности, в том, что на волновой записи в интервале глубин 5—10 м уверенно прослеживается отраженная поперечная волна от подошвы

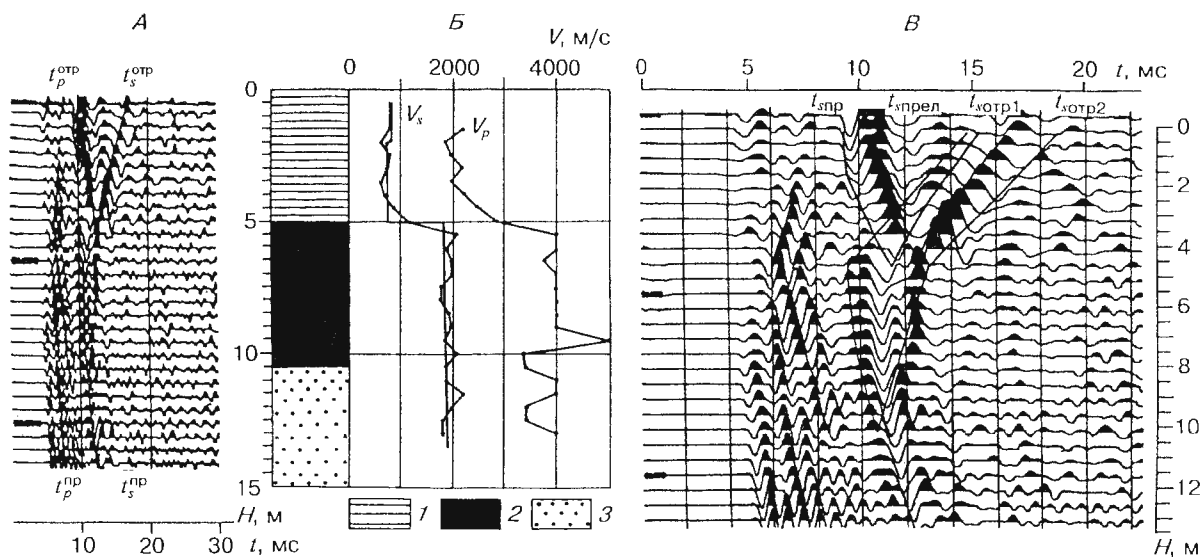


Рис. 1. Структура поля продольных и поперечных SV-волн в условиях нормального скоростного разреза.

А — результаты неперодного ВСП с пункта возбуждения колебаний (ПВ) 7,6 м; Б — геокриологический разрез и результаты сейсмического каротажа; В — сопоставление данных неперодного ВСП и результатов теоретических расчетов. 1 — суглинок, 2 — лед, 3 — песок, $t_p^{пр}$, $t_p^{отр}$ — падающая и отраженная продольные волны, $t_s^{пр}$, $t_s^{отр}$ — падающая и отраженная поперечные SV-волны; $t_s^{пр}$, $t_s^{прел}$, $t_s^{отр1}$, $t_s^{отр2}$ — теоретические годографы поперечных SV-волн: падающей, преломленной и отраженных от кровли и подошвы льда.

пластового льда. Отраженная продольная волна от этой границы на временном разрезе в явном виде отсутствует.

Последнее, что необходимо отметить — практическое отсутствие кратных объемных волн обоих типов. Это создает дополнительные чрезвычайно благоприятные условия для практического использования отраженных волн при изучении строения массивов нелитифицированных ММП, в том числе самой верхней их части.

На рис.1, В представлены те же данные ВСП в сопоставлении с результатами теоретического расчета поля упругих колебаний для поперечных SV-волн. Используемый при расчете скоростной разрез показан на рис.1, Б сплошной линией. Расчет выполнен для падающей волны $t_{s\text{пр}}$, годограф которой имеет разрыв непрерывности на границе суглинок—лед, для преломленной волны $t_{s\text{прел}}$ от кровли льда и отраженных волн от кровли $t_{s\text{отр1}}$ и подошвы $t_{s\text{отр2}}$ льда.

Нетрудно видеть, что рассчитанные годографы падающей волны, отраженной волны от кровли льда, а также отраженной волны от подошвы льда в интервале глубин 5—10 м хорошо согласуются с фактическими данными. Проведенное сопоставление позволило надежно идентифицировать интенсивную отраженную волну, выходящую на дневную поверхность, как волну, отра-

женную от кровли льда. Не нашла пока своего окончательного объяснения слабая интенсивность отраженной от подошвы льда волны в интервале 0—5 м.

Сравнение теоретических расчетов и реальной волновой записи показывает также, что интенсивность преломленной поперечной волны от кровли льда существенно ниже интенсивности отраженной волны от той же границы. В результате ее прослеживание на вертикальном профиле оказывается практически невозможным.

СТРУКТУРА ПОЛЯ ПОПЕРЕЧНЫХ SH-ВОЛН В УСЛОВИЯХ ЧАСТИЧНО ИНВЕРСНОГО СКОРОСТНОГО РАЗРЕЗА

Пример изучения структуры волнового поля в условиях частично инверсного скоростного разреза представлен на рис.2. Как и в первом случае исследования проводились в „сухой“ необсаженной скважине, расположенной в 80 м от предыдущей. Мощность СТС равна 0,5 м. Удаление пункта удара от устья скважины составляет 5 м.

Частичная инверсность разреза определяется присутствием в верхней части разреза промежуточного слоя мощностью около 3,5 м. По данным продольного ВСП (сейсмического каротажа) скорости продольных и поперечных волн в этом слое в 1,5—1,7 раза выше, чем в нижележащей

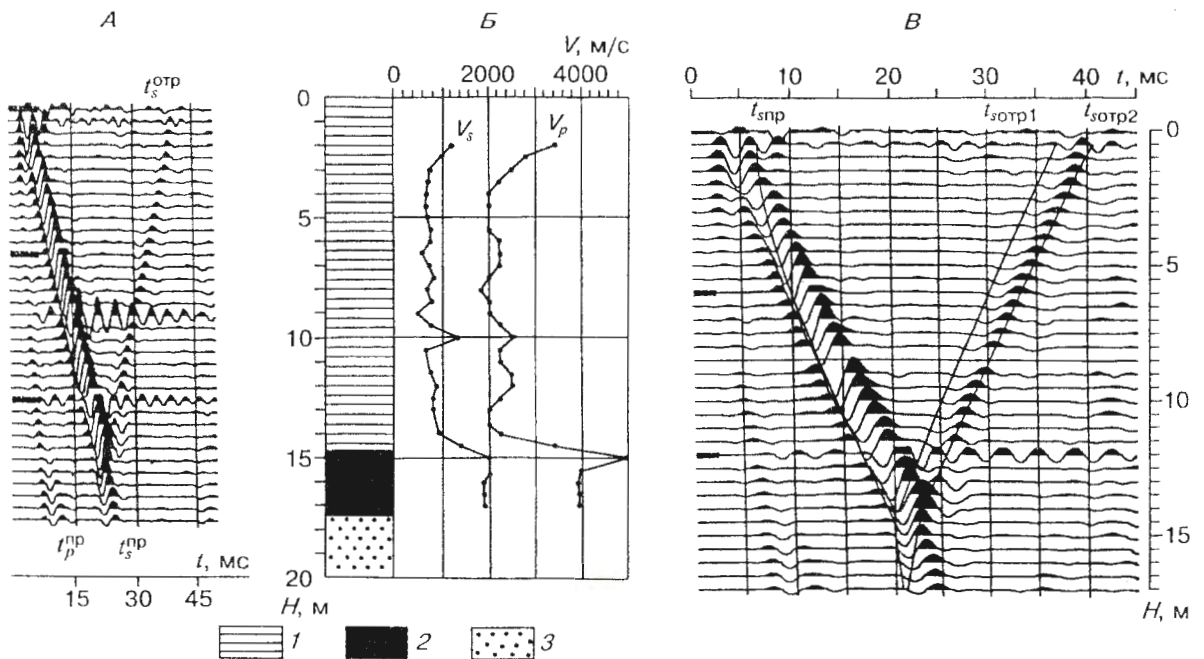


Рис. 2. Структура поля поперечных SH-волн в условиях частично инверсного скоростного разреза.

А — результаты неперодного ВСП с ПВ 5 м; Б — геокриологический разрез и результаты сейсмического каротажа; В — сопоставление данных неперодного ВСП и результатов теоретических расчетов. 1 — суглинок, 2 — лед, 3 — песок, $t_p^{\text{пр}}$ — падающая продольная волна, $t_s^{\text{пр}}$, $t_s^{\text{отр}}$ — падающая и отраженная поперечные SH-волны; $t_{s\text{пр}}$, $t_{s\text{отр1}}$, $t_{s\text{отр2}}$ — теоретические годографы поперечных SH-волн — падающей и отраженных от кровли и подошвы льда.

толще суглинков, однако ниже, чем во льду (см. рис. 2, Б).

Исследования проводились с целью изучения структуры волнового поля поперечных SH -волн. Для этого регистрация сейсмических колебаний осуществлялась сейсмоприемниками с горизонтально ориентированной осью максимальной чувствительности. Представленные вертикальные сейсмические разрезы получены при использовании цифровой фильтрации в полосе частот 125—375 Гц.

При выбранном удалении пункта возбуждения колебаний в структуре волнового поля существование преломленных волн от кровли льда невозможно с физической точки зрения. Здесь присутствуют (см. рис. 2, А) падающие волны — продольная $t_p^{пр}$ и поперечная $t_s^{пр}$, а также отраженная поперечная волна $t_s^{отр}$, вероятнее всего сформировавшаяся на кровле пластового льда. В интервале глубин 12—14 м достаточно уверенно прослеживается волна, предположительно отраженная от подошвы льда.

Как следует из рассмотрения приведенных результатов при использовании поперечных SH -волн структура регистрируемого волнового поля значительно упрощается. Интенсивность SH -волн существенно выше интенсивности продольной волны и с их помощью оказывается возможным получение высокой разрешенности сейсмической записи и регистрация волн этого типа на поверхности.

Обращает на себя внимание фактическое отсутствие отраженных продольных волн в структуре волнового поля. В этой связи необходимо отметить, что при использовании поперечных SH -волн продольные волны являются фактически волнами-помехами. Добиться их устранения на волновой записи возможно с помощью несложных методических и технологических приемов, что в свою очередь дополнительно упростит структуру регистрируемого волнового поля.

Необходимо, как и в случае с поперечными SV -волнами, подчеркнуть фактическое отсутствие кратных объемных волн.

Сопоставление полученных сейсмических данных с результатами теоретического расчета годографов падающей $t_p^{пр}$ и отраженных от кровли $t_{s\text{ отр}1}$ и подошвы $t_{s\text{ отр}2}$ льда отраженных SH -волн представлено на рис. 2, Б. При расчетах угол наклона кровли льда был принят равным $5,7^\circ$, а его подошвы 0° . Эти данные были получены при бурении.

Как и в предыдущем случае интенсивная отраженная волна четко идентифицируется как волна от кровли льда. Волна, отраженная от подошвы льда, в интервале глубин 0—12,5 м прослеживается неуверенно, что может являться

следствием интерференции двух волн в результате незначительной мощности льда и наклона его кровли.

Представляет интерес кажущееся несоответствие теоретического годографа и оси синфазности падающей волны в верхней части разреза. Оно связано с интерференцией падающей объемной SH -волны и волны-помехи, распространяющейся по стволу скважины. Источником этой волны-помехи является продольная падающая волна в момент прихода ее к устью скважины [Гальперин, 1994; Бернс и др., 1995].

Данные ВСП послужили основанием для проведения наземных сейсмических наблюдений с использованием отраженных SH -волн. В результате удалось детально определить конфигурацию кровли пластового льда [Skvortsov и др., 1992; Бернс и др., 1995; Canada-Russian..., 1992].

Рассмотренные выше результаты ВСП получены в процессе исследований, выполненных совместно с Геологической Службой Канады [Canada-Russian..., 1992], с использованием сейсмостанции EG&G Geometrics ES-2401.

СТРУКТУРА ПОЛЯ ПОПЕРЕЧНЫХ SH -ВОЛН В УСЛОВИЯХ ПОЛНОСТЬЮ ИНВЕРСНОГО СКОРОСТНОГО РАЗРЕЗА

Характер структуры поля упругих колебаний для условий полностью инверсного скоростного разреза иллюстрируют данные, представленные на рис. 3. Исследования выполнялись в скважине, расположенной в северной части Уренгойского месторождения. Скважиной было пройдено $2/3$ мощности ММП. Глубина скважины 230 м. Она обсажена стальными трубами и залита дизельным топливом. Мощность СТС в момент проведения исследований составляла около 2 м. Наблюдения выполнялись с сейсмостанцией Nimbus-1210F.

Разница в 3 м между положением сейсмогеологических и литологических границ является следствием неправильной привязки последних при бурении.

Как показывают данные сейсмического каротажа (см. рис. 3, А) в пределах исследуемой толщи наблюдается общее уменьшение скорости для обоих типов волн. Поэтому формирование преломленных волн ни на одной из сейсмогеологических границ невозможно.

Пункт возбуждения колебаний при непродольном ВСП располагался в 25 м от устья скважины. Целью исследований являлось изучение структуры поля колебаний поперечных SH -волн. Результаты непродольного ВСП в интервале глубин 0—59 м приведены на рис. 3, Б (фильтрация 175—450 Гц) и рис. 3, В (фильтрация 90—250 Гц).

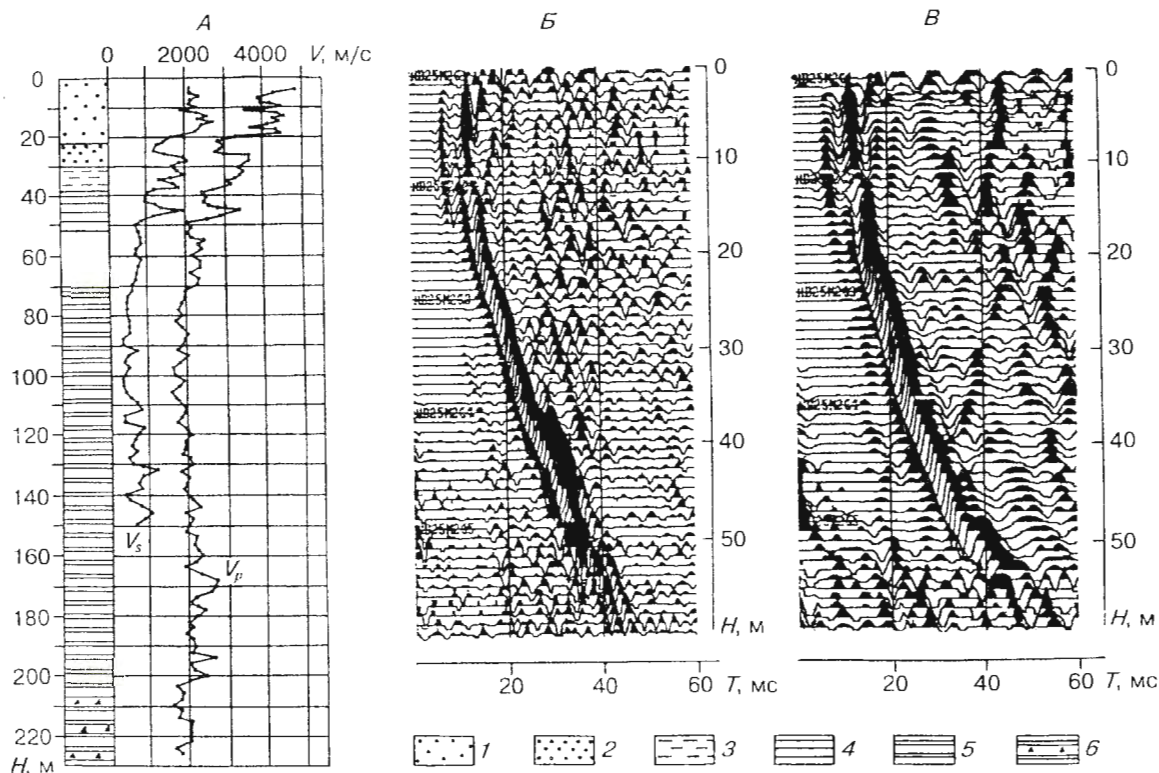


Рис. 3. Структура поля поперечных SH -волн в условиях полностью инверсного скоростного разреза.

A — сейсмогеокриологический разрез и результаты сейсмического каротажа; B — данные ВСП с ПУ 25 м при фильтрации 175—450 Гц; B — то же с фильтрацией 90—250 Гц. 1 — песок; 2 — пылеватый песок; 3 — переслаивание песка и суглинка; 4 — суглинок; 5 — глина; 6 — глина опоковидная.

Особенность, отличающая представленные волновые записи от рассмотренных ранее, состоит в более сложной структуре волнового поля. Она обусловлена наличием на волновой записи волн с осями синфазности примерно параллельными падающей SH -волне. Вопрос о природе этих волн остается открытым. Возможно, они связаны с более сложной конструкцией скважины. Источником этих волн могут также являться интенсивные реверберационные волны в мощном СТС.

В структуре волнового поля присутствует интенсивная падающая поперечная SH -волна и ряд отраженных SH -волн. Перед падающей волной расположена слабая продольная волна. Она уверенно прослеживается лишь до глубины 20 м. Падающая SH -волна характеризуется заметной частотной дисперсией, отражающей особенность строения сейсмогеокриологического разреза. В верхней песчаной части разреза частота ее составляет 300—400 Гц. В глинистых породах на глубине более 60 м преобладающая частота колебаний не превышает 60—70 Гц.

Частотная дисперсия сейсмогеокриологического разреза определяет и частотный состав отра-

женных волн. Так, в полосе частот 175—450 Гц уверенно прослеживается отраженная волна от кровли пылеватого песка с глубины 20 м и менее четко — волна от его подошвы с глубины 26 м. На фоне волн-помех выделяется также отраженная волна с глубины 37 м от кровли суглинков. Отраженная волна с глубины 47 м от границы суглинок-глина наиболее четко выделяется в диапазоне 90—250 Гц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненный анализ особенностей структуры волнового поля в нелигифицированных ММП позволяет сделать обоснованный вывод о перспективности и целесообразности использования отраженных волн для изучения строения массивов ММП, особенно в условиях инверсного скоростного разреза. При этом приоритет должен быть отдан исследованиям с использованием поперечных волн и в первую очередь SH -волн.

Работа выполняется при поддержке РФФИ (грант 97-05-65609).

Литература

- Бернс Р.А., Горяинов Н.Н., Скворцов А.Г. и др. Результаты совместных российско-канадских геофизических исследований многолетней мерзлоты на полуострове Ямал // Геофизические исследования криолитозоны. Науч. тр. Вып.1. М., 1995, с. 63—72.
- Гальперин Е.И. Вертикальное сейсмическое профилирование: опыт и результаты. М., Наука, 1994. 320 с.
- Горяинов Н.Н., Скворцов А.Г., Царев А.М. Использование специализированных сейсмостанций для изучения геокриологических условий и картирования подземных льдов на полуострове Ямал // Применение геофизических методов для решения геокриологических задач. М., ВСЕГИНГЕО, 1991, с. 77—88.
- Изучение инженерно-геокриологических и гидрогеологических условий верхних горизонтов пород в нефтегазоносных районах криолитозоны: Методич. руководство / Под ред.
- Е.С.Мельникова, С.Е.Гречищева, А.В.Павлова. М., Недра, 1992, 289 с.
- Применение сейсмоакустических методов в гидрогеологии и инженерной геологии / Под. ред. Н.Н.Горяинова. М., Недра, 1992, 264 с.
- Шур Ю.Л. Верхний горизонт толщи мерзлых пород и термокарст. Новосибирск, Наука, 1988, 213 с.
- Canada-Russia Geotechnical Studies of Permafrost Bovonenkovo Test Site Yamal Peninsula, Western Siberia July 1991 / Ed. P.J. Kurfurst. Geol. Sur. Can. Open File Report 2546. July 1992, p. 402.
- Skvortsov A.G., Hunter J.A., Goriainov N.N. et al. High-Resolution Shear-Wave Reflection Technique for Permafrost Engineering Applications: New Results from Siberia // 62-nd Annual International SEG Meeting. New Orlean, 1992, p. 382—383.

Поступила в редакцию
17 июня 1997 г.