

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ КРИОЛИТОЗОНЫ

УДК 551.341+550.834

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИЗУЧЕНИЯ  
СЕЙСМОГЕОКРИОЛОГИЧЕСКОГО РАЗРЕЗА

А.Г. Скворцов, А.М. Царев, М.Р. Садуртдинов

Институт криосферы Земли СО РАН, 625000, Тюмень, а/я 1230, Россия, [agskvortsov@mail.ru](mailto:agskvortsov@mail.ru)

Рассматриваются особенности применения сейсмических методов при изучении сейсмогеокриологического разреза. Эти особенности определяются спецификой структуры волнового сейсмического поля в толще мерзлых пород. На основе многолетних исследований делается вывод о целесообразности и эффективности использования поперечных волн горизонтальной поляризации для изучения надмерзлотных таликов и особенностей строения толщи мерзлых пород. Для оценки свойств и состояния многолетнемерзлых пород необходимо использовать информацию о скорости распространения продольных и поперечных волн.

ВВЕДЕНИЕ

Структура поля упругих колебаний в многолетнемерзлых породах (ММП), особенно в нелитифицированных ММП, характеризуется рядом специфических особенностей. Они определяются невыдержанностью строения сейсмогеологического разреза, его пространственно-временной изменчивостью за счет сезонных колебаний температуры и рядом других факторов. На структуру волнового поля значительное, иногда принципиальное, влияние оказывает присутствие в разрезе контрастных и инверсных границ. Нередко в разрезе присутствует приповерхностный маломощный слой с высокими значениями скорости распространения упругих волн. Роль такого слоя могут выполнять слой сезонного промерзания, слой мерзлых крупнодисперсных грунтов, а в пределах городских застроек и промышленных площадок – бетонные и асфальтовые покрытия. За счет такого слоя образуется инверсный скоростной разрез [Скворцов, 2005], в условиях которого кардинальным образом изменяется структура поля поперечных *SH*-волн с вектором поляризации в горизонтальной плоскости. Указанные особенности формируют особый тип сейсмогеологического разреза — сейсмогеокриологический [Скворцов, 1997]. Специфика сейсмогеокриологического разреза определяет и специфику сейсмических работ при геокриологических исследованиях. Знание и учет особенностей этого разреза являются основой для рационального выбора методов и методик исследований и залогом их эффективного применения.

Круг решаемых при геокриологических исследованиях задач весьма широкий [Мельников и др.,

2010; Melnikov et al., 2010]. Их можно объединить в три основные группы: задачи определения положения кровли толщи мерзлых пород (ТМП), изучения особенностей строения ТМП и оценки свойств и состояния ММП.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ КРОВЛИ  
ТОЛЩИ МЕРЗЛЫХ ПОРОД

Исследования выполняются в основном при определении конфигурации и мощности надмерзлотных таликов естественного и техногенного происхождения. Мощность их может составлять несколько десятков метров.

На суше в условиях нормального скоростного разреза хорошими возможностями для решения этой задачи обладает классический для малоуглубинной сейсморазведки метод преломленных волн (МПВ) [Скворцов, 1997]. Предпочтение в этом случае следует отдавать преломленным поперечным *SH*-волнам [Пономарева, Скворцов, 2006], поскольку при использовании продольных волн возможно проявление эффекта выпадения слоя [Царев и др., 2010]. Роль такого слоя часто выполняет зона полного водонасыщения. В результате при использовании продольных волн возможны значительные (до 40 % и более) ошибки в определении мощности таликов (рис. 1, а).

Альтернативой методу преломленных волн при определении положения кровли ММП является методика высокоразрешающей сейсморазведки на поперечных волнах (ВСПВ) [Скворцов, 2005]. Методика разработана в ИКЗ СО РАН и основана на использовании отраженных поперечных

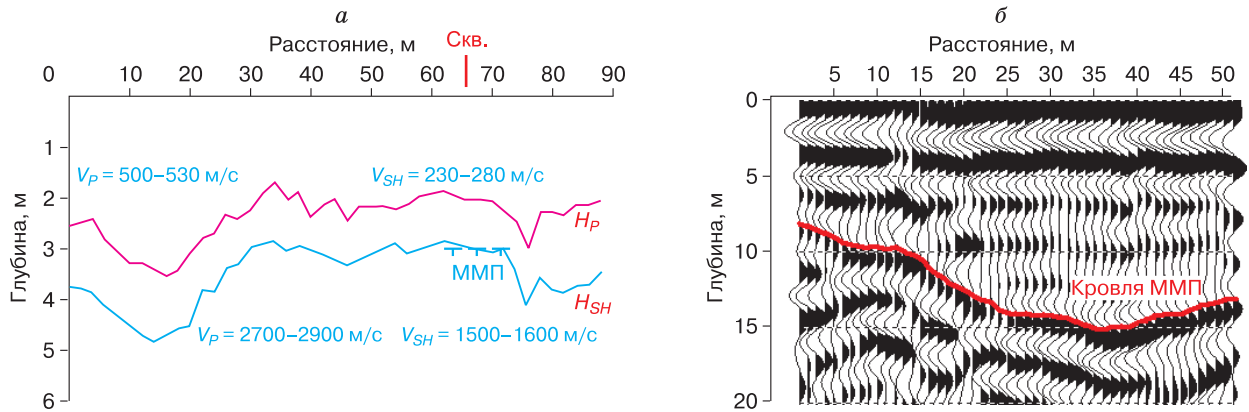


Рис. 1. Примеры определения конфигурации техногенных таликов с помощью преломленных (а) и отраженных (б) *SH*-волн.

а – г. Мирный; б – г. Норильск;  $H_p, H_{SH}$  – глубина до кровли толщи мерзлых пород, определенная с помощью продольных и поперечных преломленных волн соответственно;  $V_p, V_{SH}$  – скорости продольных и поперечных *SH*-волн соответственно.

*SH*-волн. Благоприятным условием для применения методики ВСПВ является наличие инверсного скоростного разреза. В условиях этого скоростного разреза возможна регистрация разрешенных отраженных поперечных *SH*-волн от кровли ТМП, расположенной на глубине в несколько метров [Snegirev et al., 2003].

Примеры использования МПВ и методики ВСПВ в пределах суши для определения конфигурации и мощности техногенных таликов приведены на рис. 1.

В последние годы в связи с интенсивным освоением шельфа арктических морей становится актуальным изучение таликов в мелководной его части и переходной зоне суша–море. До недавнего времени не существовало методик для проведения сейсмических исследований в подобных условиях.

Исследования в этом направлении начали проводиться в ИКЗ СО РАН в 2006 г. [Скворцов и др., 2007а, б; Садуртдинов и др., 2009]. Было установ-

лено, что в приливной зоне шельфа ниже грунтовой поверхности присутствует достаточно мощный слой с неполным водонасыщением пород. Он формируется за счет заземленного воздуха в породах. Мощность этого слоя очень непостоянна и может достигать 2 м и более. В подобных условиях использование продольных волн часто оказывается невозможным. Уверенная регистрация продольных волн, как правило, возможна лишь за пределами приливной зоны. Накопленный к настоящему времени опыт показывает, что аналогичные ограничения для использования продольных волн существуют также в пределах речных и озерных акваторий, в том числе и вне зоны распространения ММП.

Показано также, что уверенно определять положение ТМП в пределах мелководных акваторий можно с помощью поперечных *SH*-волн. При незначительной глубине этой границы исследования могут выполняться с помощью преломленных волн (рис. 2, а). При увеличении

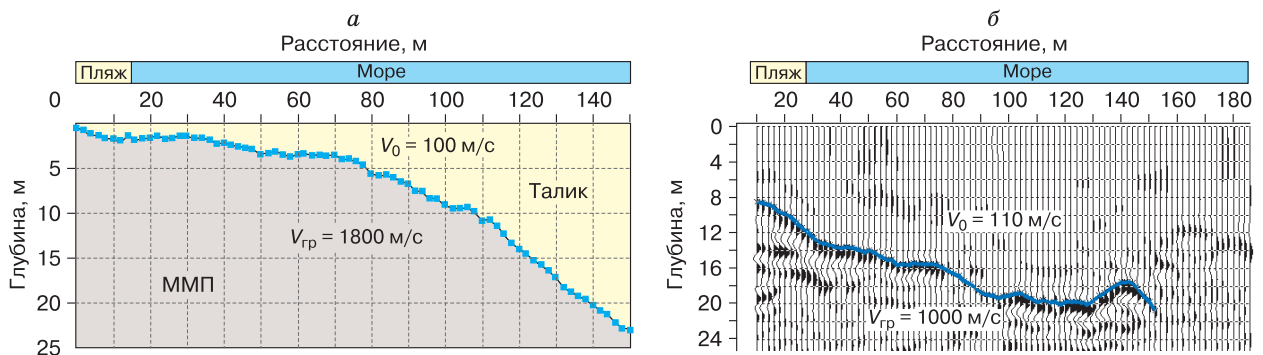


Рис. 2. Примеры использования преломленных (а) и отраженных (б) поперечных *SH*-волн для изучения таликов в пределах мелководной части шельфа.

а – Ямал, мыс Каменный; б – устье Печоры, стационар Болванский;  $V_0$  – скорость поперечной *SH*-волны в талом слое;  $V_{гр}$  – граничная скорость поперечной *SH*-волны по кровле толщи мерзлых пород.

мощности таликовой зоны для решения данной задачи эффективным и целесообразным является использование отраженных поперечных *SH*-волн (см. рис. 2, б).

Для проведения сейсмических наблюдений на акватории разработаны основы методики и технологии донных сейсмических исследований.

### ИЗУЧЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ СТРОЕНИЯ ТОЛЩИ МЕРЗЛЫХ ПОРОД

При решении этой задачи следует учитывать особенности сейсмогеокриологического разреза, заключающиеся в наличии большого количества контрастных и инверсных границ, в том числе и вблизи кровли ТМП. Это часто затрудняет или делает невозможным использование преломленных волн. В данной ситуации работы целесообразно выполнять с помощью отраженных волн [Малкова и др., 2008; Скворцов и др., 2009; Skvortsov et al., 1992]. Предпочтение должно быть отдано использованию отраженных поперечных *SH*-волн. Структура поля этих волн является более простой за счет отсутствия обменных волн. В результате получаемая с помощью поперечных *SH*-волн сейсмическая информация оказывается более достоверной [Скворцов, 2001].

Попытки изучения строения толщи ММП в летних условиях сопряжены с большими трудностями. Наличие сезонноталого слоя (СТС), особенно если его мощность кратна длине волны, вызывает появление в структуре волнового поля интенсивных многофазных волн реверберационного типа [Скворцов, 2002]. Это затрудняет или делает невозможным регистрацию отраженных волн от сейсми-

ческих границ в пределах ММП. При незначительной мощности СТС регистрация отраженных волн возможна, если источник сейсмических колебаний размещается на кровле ММП [Skvortsov et al., 1992]. При изучении строения толщи ММП сейсмические работы целесообразно проводить в зимний период при отсутствии слоя СТС. Наземные исследования по возможности следует сопровождать скважинными наблюдениями по методике вертикального сейсмического профилирования (ВСП).

Пример использования методики ВСП для изучения особенностей строения ММП в интервале глубин до 100 м приведен на рис. 3. Достоверность наземных сейсмических работ подтверждена результатами ВСП [Скворцов, 2005].

### ОЦЕНКА СВОЙСТВ И СОСТОЯНИЯ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД

Для оценки упругих, прочностных и деформационных свойств ММП необходима информация о значениях скоростей продольных и поперечных волн.

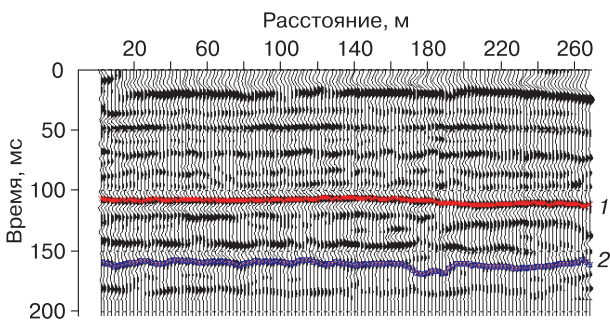
При проведении геокриологических исследований возникает специфическая задача, связанная с изучением качества мерзлого состояния пород (“вялости” мерзлоты). Для решения этой задачи был предложен подход, основанный на анализе пространственного распределения значений коэффициента Пуассона [Мельников и др., 2010].

Известно, что в мерзлых песчано-глинистых породах при незначительной минерализации порового раствора коэффициент Пуассона зависит от дисперсности пород, и значения его находятся в диапазоне 0,25–0,40. В водонасыщенных талых песчано-глинистых породах они составляют 0,47–0,50. Таким образом, высокие значения коэффициента Пуассона свидетельствуют о “вялости” мерзлоты, причиной которой является большое количество незамерзшей воды.

Полученные результаты показывают, что при совместном анализе распределения скоростных характеристик и коэффициента Пуассона возможна надежная оценка степени физической “вялости” мерзлоты. Предложенный подход может быть использован для выделения в разрезе криопэгов и зон с повышенной минерализацией порового раствора.

### ВЫВОДЫ

Выбор методик и методов сейсмических работ и их специфика должны базироваться на всестороннем анализе волнового поля в пределах района проведения исследований.



**Рис. 3. Временной разрез, полученный по методике высокоразрешающей сейсморазведки на поперечных волнах, вблизи кимберлитовой трубки в Якутии.**

1 – отраженная волна от кровли глинистых отложений юрского возраста, расположенной на глубине около 55 м; 2 – кровля известняков ордовика на глубине 80–90 м с локальным понижением, потенциально являющимся ловушкой для россыпных алмазов.

Сейсмические методы при изучении надмерзлотных таликов, в том числе на мелководных акваториях, при нормальном скоростном разрезе следует проводить, как правило, с использованием преломленных поперечных *SH*-волн. В условиях инверсного скоростного разреза наиболее достоверные данные могут быть получены с помощью отраженных волн этого типа.

Эффективным инструментом исследования особенностей строения толщи мерзлых пород является методика высокоразрешающей сейсморазведки на поперечных волнах, которая основана на использовании отраженных поперечных *SH*-волн.

Достоверная оценка свойств и состояния многолетнемерзлых пород должна базироваться на информации о скорости распространения продольных и поперечных волн. Выполненные исследования показали, что для количественной оценки мерзлого состояния ММП перспективным является использование коэффициента Пуассона.

Исследования выполнены при поддержке РФФИ (проекты 05-05-64215-а, 06-05-79071-к), грантов Тюменской губернской академии, программ РАН № 20 и ОНЗ РАН № 11, программы СО РАН № 122.

### Литература

**Малкова Г.В., Сворцов А.Г., Садуртдинов М.Р., Царев А.М.** Изучение таликов на побережье Печорской губы с помощью сейсморазведки // Криогенные ресурсы полярных и горных регионов. Состояние и перспективы инженерного мерзлотоведения: Материалы междунар. конф. Тюмень, Экспресс, 2008, с. 311–313.

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

**Пономарева О.Е., Сворцов А.Г.** Методы и результаты изучения экзогенных геологических процессов в Надымском районе Западной Сибири // Теория и практика оценки состояния криосферы Земли и прогноз ее изменения: Материалы конф. Тюмень, ТюмГНГУ, 2006, т. 1, с. 272–274.

**Садуртдинов М.Р., Сворцов А.Г., Царев А.М.** Изучение строения верхней части геологического разреза в пределах мелководных акваторий с помощью сейсмических методов // Инженерная и рудная геофизика 2009: Материалы 5-й Междунар. науч.-практ. конф. Геленджик, 2009, 2 с. (Электрон. версия).

**Сворцов А.Г.** Особенности структуры поля упругих колебаний в нелигифицированных многолетнемерзлых породах // Криосфера Земли, 1997, т. I, № 3, с. 66–72.

**Сворцов А.Г.** Структура поля сейсмических колебаний в верхней части геокриологического разреза на территории Накынского кимберлитового поля (Якутия) // Консервация и трансформация вещества и энергии в криосфере Земли: Материалы междунар. конф. Пушино, ОНТИ, 2001, с. 130–131.

**Сворцов А.Г.** Причины и следствия экстремальных условий формирования поля сейсмических колебаний в верхних горизонтах криосферы // Экстремальные криогенные явления: Фундаментальные и прикладные аспекты: Материалы междунар. конф. Пушино, ОНТИ, 2002, с. 170–171.

**Сворцов А.Г.** Высокорастворимая сейсморазведка на поперечных волнах при изучении верхней части геологической среды // Инженерная геофизика: Сб. материалов междунар. конф. М., Изд-во Моск. ун-та, 2005, с. 16–18.

**Сворцов А.Г., Дроздов Д.С., Малкова Г.В. и др.** Сейсмогеокриологические условия территорий нефтегазоносных провинций в северных регионах России // Тюмень-2009: Тезисы докл. конф. 2009, 4 с. (Электрон. версия).

**Сворцов А.Г., Малкова Г.В., Дроздов Д.С. и др.** Сейсмогеокриологические условия прибрежной части арктических морей // Инженерная и рудная геофизика 2007: Материалы 3-й Междунар. науч.-практ. конф. Геленджик, 2007а, с. 196–198.

**Сворцов А.Г., Малкова Г.В., Садуртдинов М.Р., Царев А.М.** Геокриологические условия прибрежной части шельфа Печорской губы в районе стационара Болванский по данным сейсморазведки // Криогенные ресурсы полярных регионов: Материалы междунар. конф. Салехард, ТюмГНГУ, 2007б т. 1, с. 170–173.

**Царев А.М., Сворцов А.Г., Садуртдинов М.Р.** Опыт использования сейсмических методов при инженерно-геокриологических исследованиях // Инженерная и рудная геофизика 2009: Тезисы докл. 5-й Междунар. науч.-практ. конф. Геленджик, 2010, 4 с. (Электрон. версия).

**Melnikov V.P., Skvortsov A.G., Malkova G.V. et al.** Seismic studies of frozen ground in Arctic areas // Russ. Geol. and Geophys., 2010, No. 51, p. 134–142.

**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 // 62nd Annu. Intern. SEG Meeting. New Orleans, USA, 1992, p. 382–383.

**Snegirev A.M., Velikin S.A., Istratov V.A. et al.** Geophysical monitoring in permafrost areas // Permafrost: 8th Intern. conf. on permafrost. Zurich, ICOP, 2003, p. 1079–1084.

*Поступила в редакцию  
8 февраля 2011 г.*