

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗУЧЕНИЯ ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ АРКТИЧЕСКИХ ТЕРРИТОРИЙ С ПОМОЩЬЮ СЕЙСМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

**В.П. Мельников, А.Г. Скворцов, Г.В. Малкова, Д.С. Дроздов, О.Е. Пономарева,
М.Р. Садуртдинов, А.М. Царев, В.А. Дубровин***

Институт криосферы Земли СО РАН, 625000, Тюмень, а/я 1230, Россия

**Всероссийский научно-исследовательский институт гидрогеологии и инженерной геологии,
142452, Московская обл., пос. Зеленый, Россия*

Рассматриваются результаты использования сейсмических методов для изучения особенностей сейсмогеокриологического строения толщи многолетнемерзлых пород, выделения и оконтуривания природных и техногенных таликов, определения положения кровли многолетнемерзлых пород в мелководной части шельфа арктических морей и изучения устойчивости береговых склонов. При проведении исследований использовались как традиционные методы исследований, применяющиеся в малоуглубленной сейсморазведке, так и новые оригинальные сейсмические методики, разработанные в ИКЗ СО РАН. Исследования выполняются с помощью сейсмических волн различных типов и классов. Совместное применение продольных и поперечных волн обеспечивает повышение точности и достоверности геокриологической интерпретации сейсмических данных. При использовании одного типа сейсмических волн предпочтение должно быть отдано поперечным волнам.

Многолетнемерзлые породы, шельф арктических морей, сейсморазведка

SEISMIC STUDIES OF FROZEN GROUND IN ARCTIC AREAS

**V.P. Mel'nikov, A.G. Skvortsov, G.V. Malkova, D.S. Drozdov, O.E. Ponomareva,
M.R. Sadurtdinov, A.M. Tsarev, and V.A. Dubrovin**

Seismic surveys have been applied to investigate the structure of frozen ground, identify and contour natural and man-caused unfrozen layers in permafrost (taliks), constrain the position of the permafrost table in the Arctic inner shelf, and study the related coastal stability. They are the classic methods common in shallow seismic exploration and new techniques specially designed at the Institute of Earth's Cryosphere (Tyumen') for different wave components. The joint use of compressional and shear waves provides a higher-quality interpretation of seismic data in permafrost applications. In the case of a single wave component, shear waves are advantageous over *P* waves.

Frozen ground, Arctic shelf, seismic surveys

ВВЕДЕНИЕ

С середины 90-х годов прошлого столетия в ИКЗ СО РАН (г. Тюмень) проводятся целенаправленные сейсмические исследования по изучению геокриологических условий на территории нефтегазоносных провинций в северных регионах России. Общей целью проведения сейсмических исследований является изучение особенностей структуры волнового поля в криолитозоне и установление связей между сейсмическими и инженерно-геокриологическими свойствами многолетнемерзлых пород (ММП). Использование сейсмических методов для изучения геокриологических условий и их пространственно-временной изменчивости на обширных территориях в криолитозоне является особенно актуальным при отсутствии или недостатке полевых и лабораторных инженерно-геокриологических данных.

Применение геофизических, а в том числе и сейсмических методов, основывается на существенном различии физических свойств талых и мерзлых пород, а для мерзлых пород — на зависимости их физических свойств от литологического состава, льдистости, температуры, засоленности, а также некоторых других характеристик: упругих, прочностных, деформационных и фильтрационных свойств, параметров напряженного состояния и т.д. [Изучение..., 1992].

Результаты сейсмических исследований кроме научного интереса имеют и большое практическое значение. Они могут быть применены в разных областях. С одной стороны, эти результаты можно использовать при обработке данных структурной сейсморазведки на этапе введения различных поправок на неоднородность строения верхней части геологической среды. С другой стороны, полученные с помощью сейсмических методов сведения полезны при проектировании различных объектов инфраструктуры на территории нефтегазовых месторождений и последующей их эффективной и безопасной эксплуатации.

Специфика сейсмогеологического строения толщи ММП, проявляющаяся в широком распространении инверсных скоростных разрезов [Скворцов, 1997], существенно ограничивает или делает невозможным проведение сейсмических исследований с помощью традиционного для малоглубинной сейсморазведки метода преломленных волн.

Для изучения сейсмогеологического строения инверсных скоростных разрезов в ИКЗ СО РАН разработана методика высокоразрешающей сейсморазведки на поперечных волнах (ВСПВ). Она основана на использовании отраженных поперечных *SH*-волн. Целесообразность и эффективность применения поперечных волн для изучения геологической среды была показана в многочисленных работах Н.Н. Пузырева и его коллег [Пузырев и др., 1985; Пузырев, 1997].

Феноменологическая основа методики ВСПВ заключается в кардинальном изменении структуры поля *SH*-волн в инверсных скоростных разрезах [Горяинов, Скворцов, 1979; Применение..., 1992]. В благоприятных условиях это обеспечивает возможность регистрации разрешенных отраженных волн данного типа от сейсмогеологических границ, расположенных на глубине в первые метры.

В ИКЗ СО РАН разработана также методика многоволновой разноазимутальной сейсморазведки (МРС), предназначенной для изучения особенностей напряженно-деформированного состояния грунтовых массивов и оценки их устойчивости. Теоретическое и экспериментальное обоснование указанных методик приведено в работах [Изучение..., 1987; Скворцов, 2005; Скворцов и др., 2006]. Методики ВСПВ и МРС в настоящее время с успехом используются как для изучения строения и состояния ММП, так и для проведения различного вида малоглубинных сейсмических исследований вне пределов криолитозоны. Ряд важных геокриологических задач можно решить с использованием скважинных сейсмических наблюдений по методике вертикального сейсмического профилирования (ВСП). Разработанные методики являются оригинальными. О применении аналогичных методик с использованием поперечных *SH*-волн различных классов другими исследователями для геокриологических и инженерно-геологических целей в России и за рубежом авторам не известно.

Применение сейсмических исследований обеспечивает получение надежной и объективной информации о строении, свойствах и состоянии пород в пределах криолитозоны. К настоящему времени получены представительные данные по использованию сейсмических методов для изучения сейсмогеологического строения и состояния толщи ММП при решении следующих задач:

- Изучение особенностей сейсмогеокриологического строения мерзлых толщ, в том числе оконтуривание пластовых льдов, обнаружение и оконтуривание криопэггов.
- Изучение состояния и свойств ММП.
- Выделение природных и техногенных таликов.
- Картирование ММП в мелководной части шельфа арктических морей.
- Изучение устойчивости береговых склонов и прогноз активизации криогенных процессов (раскрекивание, солифлюкция, криогенное оползание).

ИЗУЧЕНИЕ СЕЙСМОГЕОКРИОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ, СОСТОЯНИЯ И СВОЙСТВ ТОЛЩИ ММП

Решение данной задачи наиболее эффективно может быть осуществлено с помощью скважинных сейсмических наблюдений по методике вертикального сейсмического профилирования. Для этих исследований в ИКЗ СО РАН разработаны скважинные одноточечные трехкомпонентные сейсмические зонды прижимного типа с ортогональным расположением сейсмоприемников.

Результаты инженерно-геокриологического обследования и данные ВСП в одной из скважин, расположенной в северной части Уренгойского газоконденсатного месторождения, показаны на рис. 1. Разрез представлен дисперсными породами (пески, суглинки, глины) четвертичного, неогенового и палеогенового возрастов. Скважина глубиной 220 м прошла в ММП, но не вскрыла мерзлую толщу на полную мощность. Температура ММП в исследуемом интервале глубин колеблется от -0.8 °С до -2.3 °С. Минимальные температуры ММП зафиксированы на глубинах от 20 до 60 м.

Распределение скоростей продольных (v_p) и поперечных *SH*-волн (v_s) по глубине соответствует полностью инверсному скоростному разрезу [Скворцов, 1997], что исключает возможность обнаружения в толще ММП сейсмогеокриологических границ с помощью преломленных волн, используемых, как правило, при малоглубинных исследованиях. Неэффективным оказывается также использование для решения этой задачи отраженных продольных волн из-за присутствия в структуре регистрируемого волнового поля большого количества интенсивных поперечных и обменных волн, существенно уменьшающих разрешенность сейсмической записи. С успехом задачи изучения строения, состояния и свойств мерзлой толщи могут быть решены с помощью отраженных *SH*-волн по методике ВСПВ, поскольку процедура суммирования с вычитанием, обеспечивающая эффективную пространственно-поляризационную фильтрацию регистрируемого сигнала, практически полностью удаляет из структуры волнового поля регуляр-

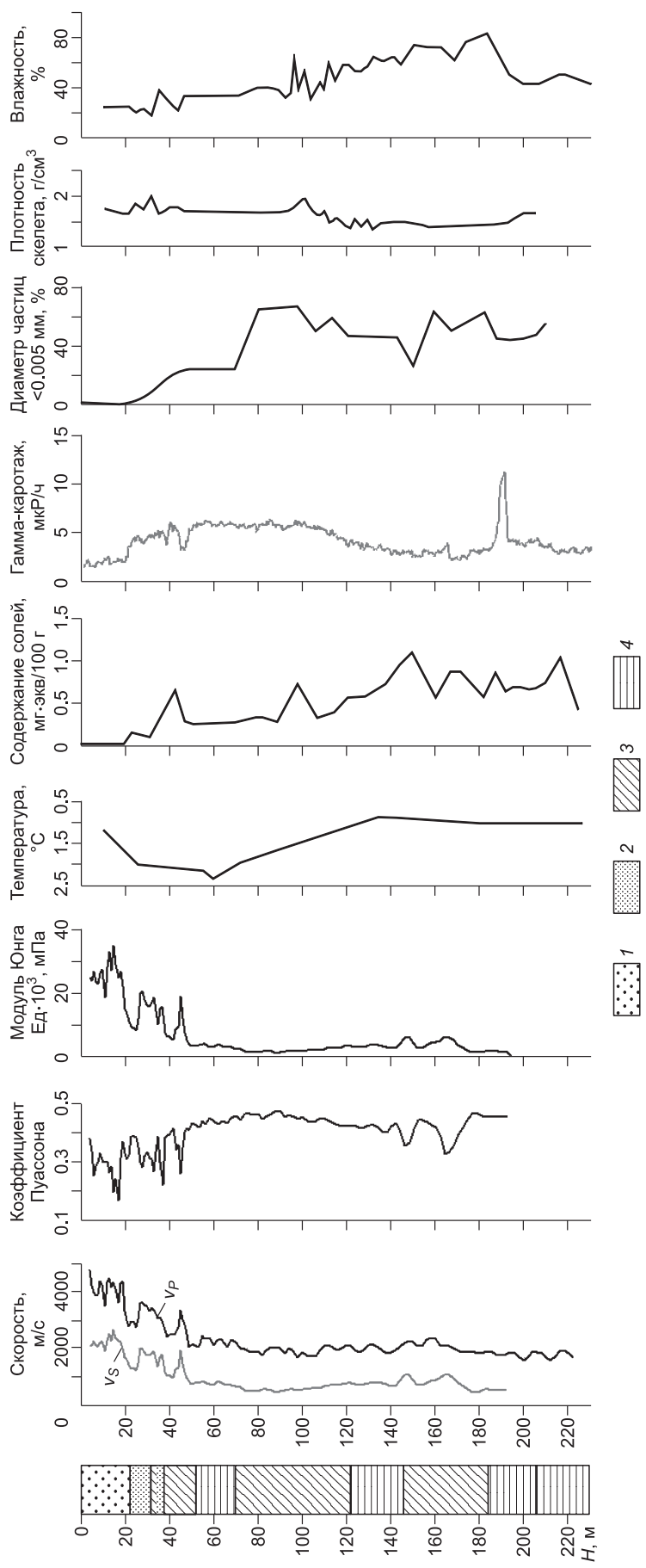


Рис. 1. Результаты продольного ВСП и инженерно-геологического опробования скважины в пойме р. Ен-Яха в северной части Уренгойского ГКМ.

1 — песок мелкосреднезернистый, 2 — песок пылеватый, 3 — суглинок, 4 — глина.

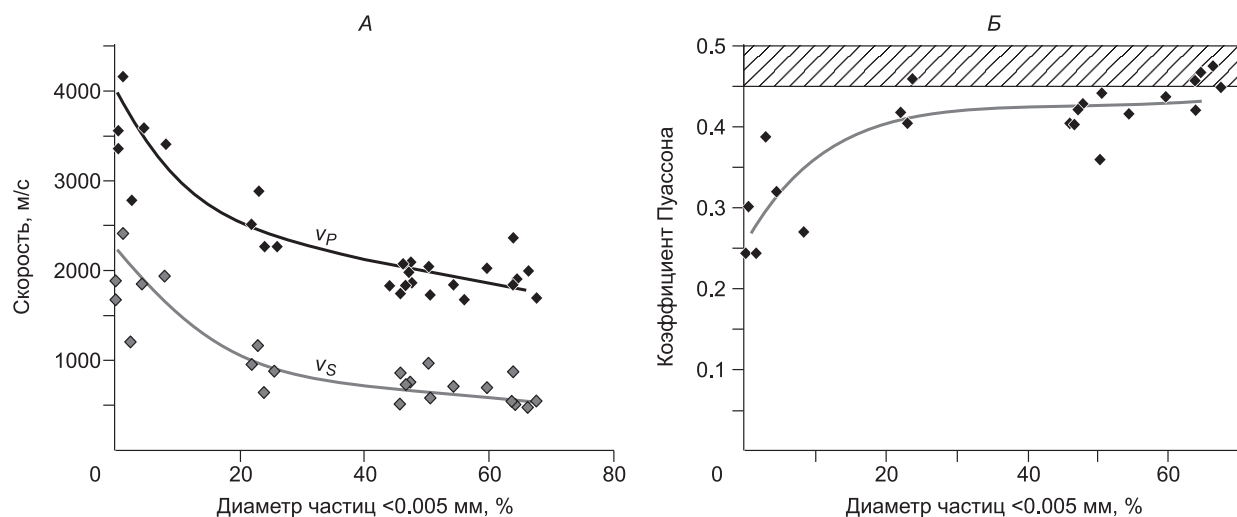


Рис. 2. Зависимости: А — скорости продольных и поперечных SH -волн, Б — величины коэффициента Пуассона от дисперсности мерзлых грунтов по данным сейсмического каротажа в скважине.

ные волны с вектором поляризации в вертикальной плоскости (продольные, поперечные SV -волны и обменные волны) [Скворцов, 2001; и др.].

Полученные данные показывают, что в целом характер изменения скорости продольных и поперечных SH -волн идентичен. Он определяется, прежде всего, дисперсностью ММП. Зависимость скоростей упругих волн от процентного содержания мелкодисперсных частиц (<0.005 мм) приведена на рис. 2, А. Рассмотрение графиков показывает, что при общей их схожести диапазон изменения скорости поперечных волн значительно выше, чем для продольных волн. Это свидетельствует о большей чувствительности поперечных волн к изменениям гранулометрического состава ММП.

Отдельные интервалы скважины характеризуются относительно низкими значениями скоростей упругих волн. Так, в интервале глубин 70—100 м значения скорости волн обоих типов практически соответствуют значениям, характерным для талых водонасыщенных песчано-глинистых пород [Применение..., 1992]. Это дает основание утверждать, что, несмотря на отрицательные температуры, породы в этом интервале глубин фактически находятся в состоянии, близком к талому, и практически не содержат льда.

Совместное использование продольных и поперечных волн позволило определить в рамках изотропной модели упругие модули ММП, а по характеру изменчивости коэффициента Пуассона μ подтвердить особенности их мерзлого состояния в интервале 70—100 м.

Известно, что в мерзлых песчано-глинистых породах при незначительной минерализации порового раствора значения коэффициента Пуассона находятся в диапазоне 0.25—0.35. Вместе с тем в интервале глубин 70—100 м коэффициент Пуассона достигает значений 0.45—0.48, которые характерны для талых пород.

График зависимости μ от дисперсности мерзлых грунтов представлен на рис. 2, Б. С увеличением дисперсности грунтов значения μ возрастают, что связано с увеличением количества незамерзшей воды в глинистых грунтах. На рис. 2, Б в верхней части графика заштрихована зона, соответствующая величинам коэффициента Пуассона, характерным для талых пород [Применение..., 1992]. В отмеченной зоне располагаются несколько точек. Это позволяет утверждать, что в этих точках ММП содержат незначительное количество льда или он вовсе отсутствует. Согласно сейсмическим данным и результатам инженерно-геологического опробования, помимо указанного интервала в разрезе скважины выделяется интервал 170—220 м, где с учетом минимальных значений скоростей сейсмических волн и аномально высоких значений коэффициента Пуассона также должно быть незначительное количество льда. Особенность мерзлого состояния пород в этих интервалах обусловлена повышенным содержанием солей в грунтах.

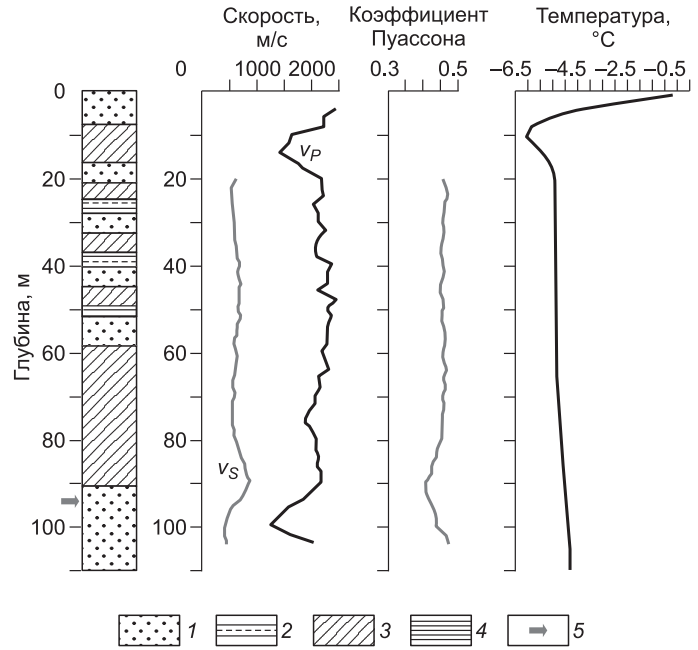
Полученные данные показывают, что при совместном анализе распределения скоростных характеристик и коэффициента Пуассона можно надежно оценивать степень физической «вялости» мерзлоты и использовать предложенный подход для выделения в разрезе криопэггов.

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ КРИОПЭГГОВ

Наличие криопэггов в толще ММП является характерной особенностью субаквальной и субэдральной криолитозоны на участках распространения морских четвертичных отложений. Криопэги формиру-

Рис. 3. Результаты сейсмического каротажа в скважине на стационаре Марре-Сале.

1 — песок, 2 — переслаивание песка, супеси и суглинка, 3 — суглинок, 4 — глина, 5 — интервал выброса газа во время бурения.



ются при промерзании засоленных пород и представляют собой отдельные линзы и горизонты природных рассолов, имеющих отрицательную температуру, но не содержащих льда. Они встречаются на различных глубинах и вскрываются буровыми скважинами.

Два горизонта криопэггов были обнаружены в 2008 г. при выполнении скважинных сейсмических исследований на геокриологическом стационаре Марре-Сале (западное побережье Ямала). Работы проводились в скважине, пробуренной в 1995 г. Из-за мощного выброса газа на глубине 92.5 м бурение скважины было приостановлено и продолжено

после окончания газирования. Однако в интервале 93—126 м поднять керн не удалось. После окончания бурения скважина была обсажена металлическими трубами диаметром 40—50 мм до глубины 110 м и используется как параметрическая до настоящего времени [Дубровин и др., 1996].

Для выполнения работ были изготовлены скважинные прижимные зонды малого диаметра. Результаты сейсмического каротажа в виде графиков скорости продольных и поперечных волн и графика коэффициента Пуассона представлены на рис. 3. Здесь же приведен график температуры ММП в скважине, измеренной в середине сентября 2001 г.

Несмотря на достаточно низкие отрицательные температуры ММП, значения скоростей продольных и поперечных волн невелики. При этом практически по всей глубине скважины отмечаются высокие значения коэффициента Пуассона. Как и на Уренгойском месторождении, это может быть связано с достаточно большим количеством незамерзшей воды в ММП.

Особый интерес представляют два интервала глубин скважины — 10—18 и 93—107 м. В последнем интервале наблюдается заметное понижение скорости продольных и поперечных волн. На глубине около 100 м величина скорости продольных волн оказалась даже меньше значений, характерных для талых водонасыщенных пород. На этих же глубинах регистрируются и самые низкие значения поперечных волн. Кроме того, в интервале 100—104 м коэффициент Пуассона имеет максимальные значения. Такое распределение сейсмических параметров с учетом информации об интенсивном выбросе газа во время бурения на глубине 92.5 м дает основание сказать, что породы в этом интервале физически находятся в незамерзшем состоянии. При этом часть интервала, где фиксируются минимальные значения скорости продольных волн сложена неводонасыщенными породами. С большой долей уверенности можно предположить, что в интервале 95—104 м расположен безнапорный криопэг.

Низкие значения скорости продольных волн в интервале 10—18 м также дают возможность предположить наличие криопэга и в этой части разреза.

Таким образом, по результатам исследований в скважинах на двух геокриологических участках, можно говорить, что совместный анализ закономерностей пространственного распределения скоростных характеристик и коэффициента Пуассона открывает путь для количественного определения незамерзшей воды в ММП с помощью сейсмических методов.

ВЫДЕЛЕНИЕ И ОКОНТУРИВАНИЕ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ ТАЛИКОВ

Природные талики (подозерные, подрусловые и др.) широко распространены в криолитозоне. Их размеры и конфигурация варьируют в широких пределах. С одной стороны, природные талики представляют серьезную опасность в случае размещения в их пределах сооружений различного назначения. С другой стороны, природные талики нередко могут являться источниками водоснабжения и в этой связи становятся объектами целенаправленных поисков. Как правило, эта задача решается с помощью наземных наблюдений. При незначительной (до 5—7 м) мощности таликов сейсмические исследования для определения их параметров следует проводить с помощью преломленных волн.

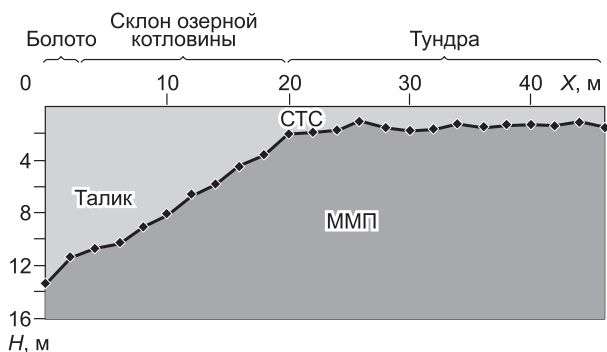


Рис. 4. Конфигурация кровли ММП на склоне озерной котловины (Ненецкий АО, мыс Болванский).

При большей мощности таликов целесообразно использовать отраженные волны. Предпочтение следует отдавать поперечным *SH*-волнам. При использовании этого типа волн регистрируется более простая структура волнового поля, что способствует получению качественных данных и обеспечивает более достоверную их интерпретацию. В

немалой степени этому способствует и то обстоятельство, что в структуре волнового поля поперечных *SH*-волн отсутствуют сейсмические волны от уровня грунтовых вод.

На рис. 4 показана конфигурация кровли ММП на одной из опытных площадок в пределах геокриологического стационара Болванский. Площадка была выбрана для определения глубины залегания кровли ММП на юго-восточной бровке холма и склоне к озеру, где было невозможно определить глубину протаивания (СТС) щупом или зондировочным бурением [Малкова и др., 2008]. Исследования проводились с помощью преломленных поперечных *SH*-волн. Было установлено, что преломляющая граница, связанная с кровлей ММП, с глубины 1.0—1.5 м в верхней части склона опускается при подходе к озеру до 14—15 м. При этом наклон кровли ММП весьма крутой и равен 30—45°.

Многолетние режимные наблюдения за температурами грунтов в лесотундре Западной Сибири показывают их постепенный рост в последние 25—35 лет, хотя с середины 1990-х годов он явно замедлился. При этом происходит выравнивание среднегодовой температуры грунта: на низкотемпературных участках температура повышается гораздо быстрее, чем на участках с изначально высокой среднегодовой температурой ММП. А на участках с температурой, близкой к 0 °С, происходит массовое опускание кров-

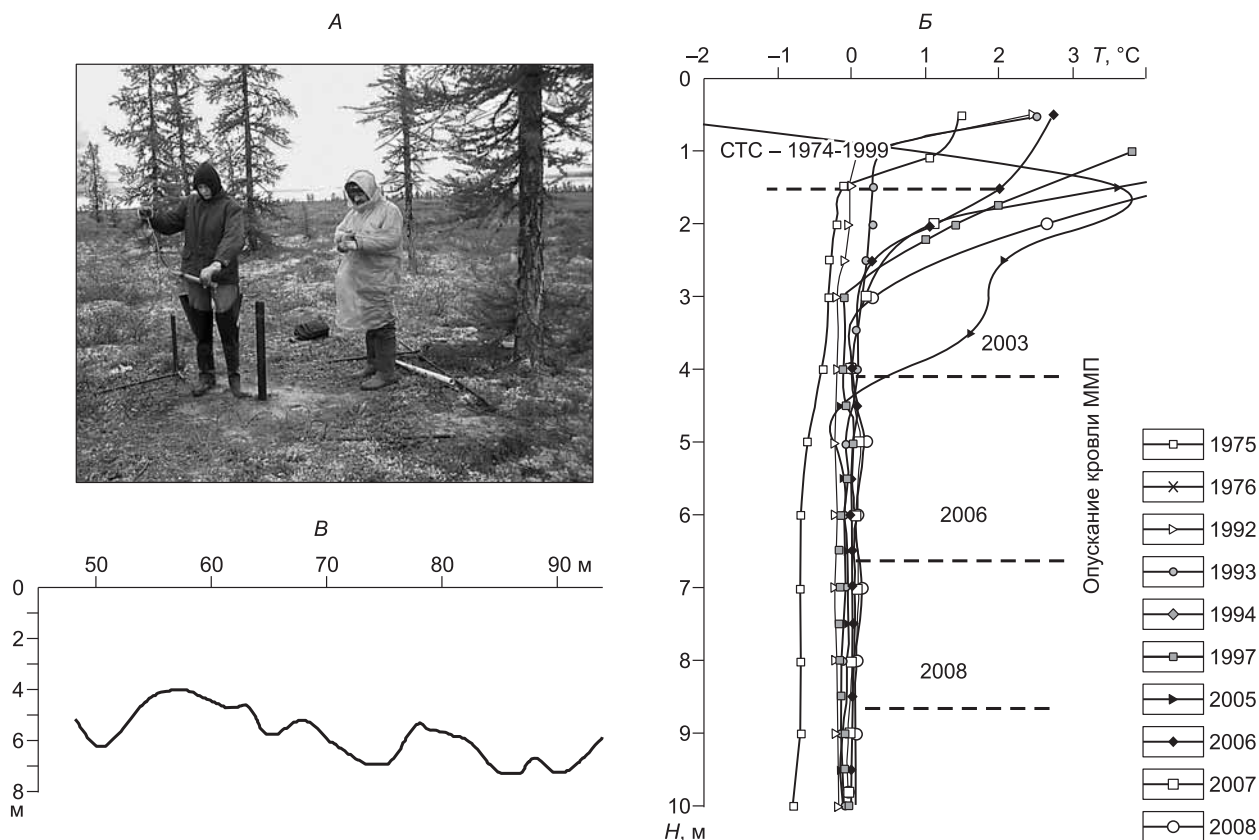


Рис. 5. Температурные и сейсмические наблюдения на режимной площадке в южной лесотундре (Уренгойское месторождение).

А — наблюдательная скважина в лиственном редколесье; Б — температурные измерения в различные годы и положение кровли ММП как точки перехода температур через 0 °С; В — кровля ММП по данным наземной сейсморазведки 2008 г. (скв. 5-1 — на ПК50).

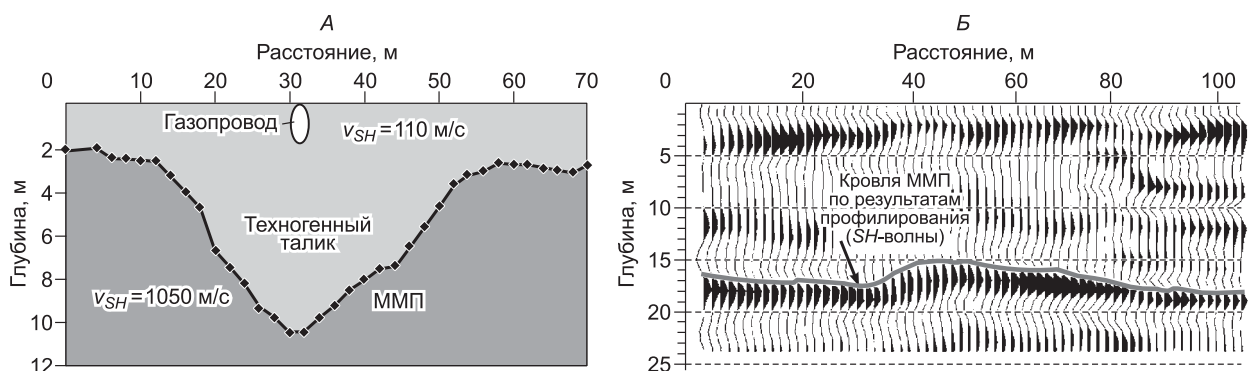


Рис. 6. Техногенные талики различного генезиса.

А — техногенный талик под действующим газопроводом Надым—Пунга на геокриологический стационар Надымский; *Б* — техногенный талик в г. Мирный на участке застройки.

ли ММП на 4—10 м и более [Drozdov et al., 2008], что ведет к изменению гидрологических, гидрогеологических и геоэкологических условий.

Однако оценить реальные масштабы и темп этого опускания по режимным температурным наблюдениям сложно из-за разнонаправленных фазовых переходов (при сезонных протаивании и промерзании ММП). К тому же, когда возникает необходимость уловить изменения температуры в сотые доли градуса, резко возрастают требования к контролю за техногенными изменениями в окрестностях наблюдательной скважины, которые существенно увеличивают ошибку наблюдений. Наземные сейсмические наблюдения, выполненные с использованием преломленных *SH*-волн и привязанные к скважинным, позволяют проследить положение кровли ММП на участках ее опускания (рис. 5). Так, на профиле-трансекте в лиственничном редколесье вблизи режимной скважины кровля мерзлоты в 2008 г. располагается на глубине 4—7 м (а не 8.5 м, как показывает термометрия в скважине, т.е. на участке локального техногенеза). Очевидно, что даже в относительно однородных ландшафтных условиях изменчивость в положении кровли ММП достигает 3 м, и оценка ее положения по единичным скважинам — непредставительна.

Техногенные талики образуются в результате чрезмерной антропогенной нагрузки на геологическую среду. При их формировании резко уменьшается несущая способность грунтов. В результате возможна существенная деформация зданий и сооружений вплоть до полного их разрушения. На рис. 6 приведены результаты изучения техногенного талика под действующим газопроводом Надым—Пунга с помощью преломленных *SH*-волн (геокриологический стационар Надымский) [Пономарева, Скворцов, 2006] и техногенного талика в г. Мирный с применением отраженных поперечных *SH*-волн по методике ВСПВ. Имеются также примеры успешного изучения техногенных таликов непосредственно под многоэтажными зданиями с проветриваемым подпольем в городах Норильск и Мирный с помощью этой методики [Snegirev A.M. и др., 2003].

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ КРОВЛИ ММП В МЕЛКОВОДНОЙ ЧАСТИ ШЕЛЬФА

О строении мерзлых толщ в субаквальных условиях в пределах мелководья Печорской губы и Баренцева моря можно судить в общих чертах по единственной публикации В.П. Мельникова и В.И. Спевивцева [1995]. В 2006 г. в устье р. Печора на геокриологическом стационаре Болванский были начаты исследования по использованию сейсмических методов для определения положения кровли ММП в мелководной прибрежной части шельфа арктических морей. Для выполнения этих исследований было изготовлено специальное оборудование для возбуждения и регистрации сейсмических колебаний на дне акватории.

Для определения конфигурации кровли ММП в прибрежной мелководной зоне была заложена сеть геофизических профилей вдоль береговой линии (на пляже и на мелководье), а также в перпендикулярном направлении (от пляжа — в глубь губы на расстояние до 200 м от береговой линии)

В пределах акватории с помощью продольных отраженных волн обнаружение в разрезе кровли ММП оказалось возможным только за пределами приливной зоны на удалении более 100 м от береговой линии. Более надежные результаты были получены при использовании отраженных поперечных *SH*-волн. С помощью этого типа волн кровля ММП уверенно прослеживается и на пляже, и в акватории. В пределах пляжа кровля ММП расположена на глубинах от 8 до 10 м. Понижения кровли ММП на пляже в плане приурочены к выходам тальвегов небольших оврагов, образованных на склоне.

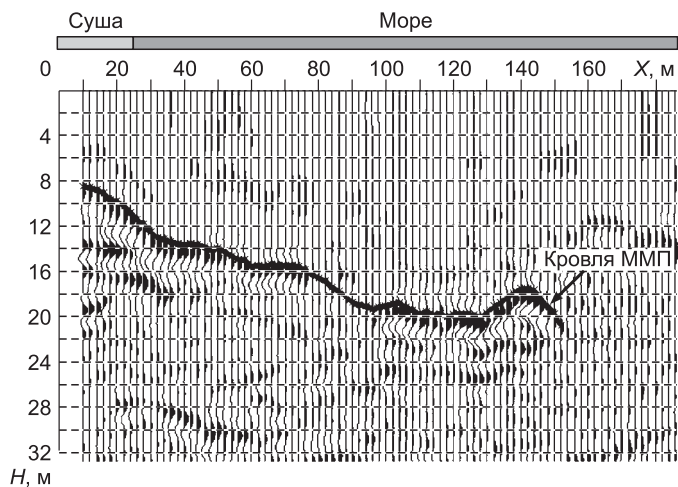


Рис. 7. Положение кровли ММП на шельфе Печорской губы. Стационар Болванский.

На рис. 7 приведены результаты исследований, полученные с использованием отраженных *SH*-волн по методике ВСПВ в прибрежной мелководной части шельфа.

В мелководной части Печорской губы, где глубина акватории составляет 0.8—1.5 м, кровля ММП опускается на глубину до 25 м, а на удалении около 130 м от береговой линии сейсмогеокриологическая граница, связанная с кровлей ММП, перестает прослеживаться. Структура глубинного разреза дает основание

говорить, что в пределах прибрежной части акватории ММП имеют форму козырька с уменьшающейся мощностью при удалении от береговой линии.

ИЗУЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ БЕРЕГОВЫХ СКЛОНОВ АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ

Береговая зона арктических морей подвержена значительным разрушениям за счет процессов термоабразии. Для выбора оптимальных технических решений строительства и эксплуатации сооружений на побережье арктических морей информация об устойчивости береговых откосов может быть получена с помощью методики многоволновой разноазимутальной сейсморазведки (МРС). Основой методики является наличие теоретических и тесных экспериментальных зависимостей сейсмических свойств грунтов с их прочностными характеристиками и напряженным состоянием грунтового массива [Изучение..., 1987; Скворцов, 1989; Skvortsov A.G., Drozdov D.S., 2003]. Один из вариантов методики МРС предусматривает получение информации о скорости прямых продольных и поперечных волн, распространяющихся

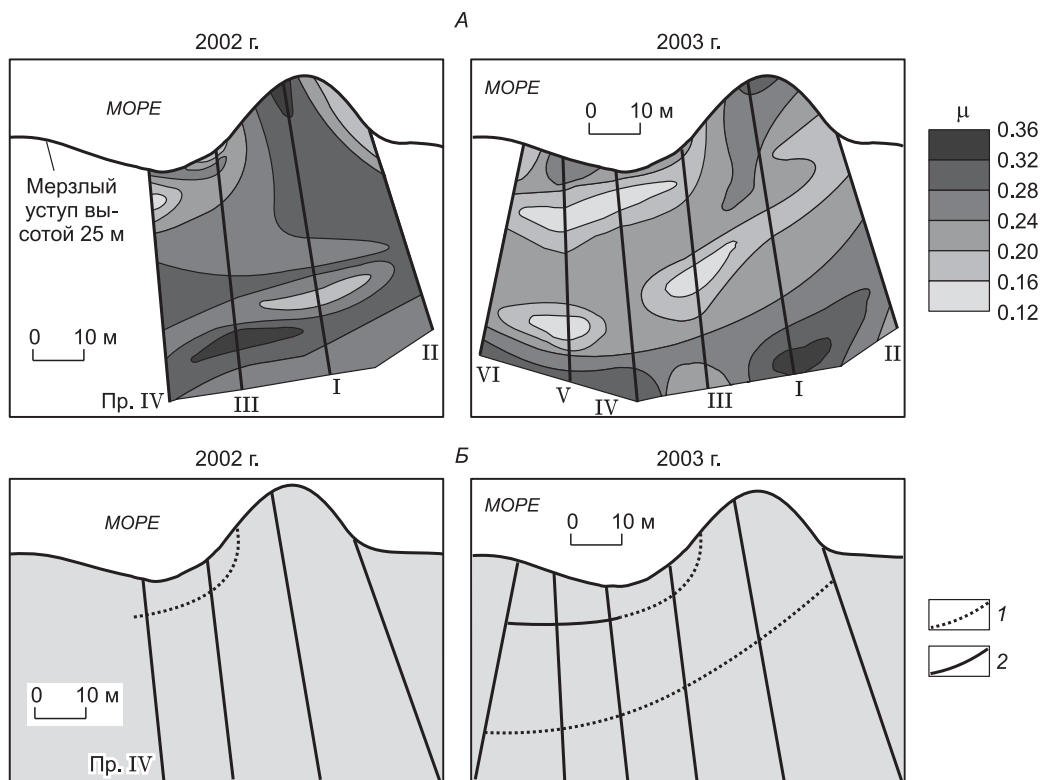


Рис. 8. Результаты режимных сейсмических наблюдений на береговом уступе в устье р. Печора. Геокриологический стационар Болванский.

A — значения коэффициента Пуассона; *Б* — положение прогнозируемых (1) и сформировавшихся (2) трещин.

ся в приповерхностной части разреза [Скворцов и др., 2006]. На участке исследований таким слоем является сезонно-талый слой, мощность которого на момент проведения измерений была 0.9—1.3 м. С учетом этого размер базы наблюдений составлял 2 м.

Измерение скорости осуществляется по двум перпендикулярным направлениям, которые, как правило, соответствуют главным осям эллипса напряжений, — по простиранию и падению склона.

Анализ пространственно-временного распределения сейсмических характеристик геологической среды, особенно производных характеристик (коэффициента Пуассона), позволяет выявлять особенности напряженно-деформированного состояния на различных участках склона, оценивать его пространственно-временную изменчивость и на основании этого осуществлять прогноз устойчивости грунтового массива на стадии подготовки его разрушения.

На рис. 8 приведены схемы распределения значений коэффициента Пуассона (см. рис. 8, А), полученные на одном и том же участке с временным интервалом в один год. По низким значениям коэффициента Пуассона уверенно выделяются ослабленные зоны, в которых возможно нарушение сплошности грунтового массива, в том числе и за счет оползания сезонно-талого слоя.

На рис. 8, Б показано положение прогнозируемых и сформировавшихся трещин, последние достаточно хорошо выражены морфологически (разрывы дернины, норы грызунов, небольшие ступеньки). Прогнозируемые трещины никак морфологически не подчеркнуты. Поэтому особенно следует отметить, что с помощью методики МРС можно контролировать развитие трещин на стадии их подготовки. Это позволяет осуществлять прогноз возможного нарушения сплошности грунтового массива, например, по anomalно низким значениям коэффициента Пуассона.

Так, по результатам измерений 2002 г. был сделан вывод, что возможно развитие трещины на пересечении с пр. IV (см. рис. 8, Б), хотя какие-либо визуальные признаки отсутствовали. Образовавшаяся в 2003 г. трещина на удалении 7—10 м от морского уступа была зафиксирована именно в предполагаемой зоне. Кроме того, в 2003 г. была обнаружена еще одна зона с пониженными значениями коэффициента Пуассона — примерно в 30 м от морского уступа. Появление и дальнейшее развитие трещин в этой зоне было зафиксировано только через 1—2 года.

ВЫВОДЫ

Накопленный к настоящему времени опыт показывает, что сейсмические методы с успехом могут быть использованы для изучения сейсмогеокриологических условий при решении широкого круга задач. Эти исследования, как правило, целесообразно проводить с помощью поперечных волн. В ряде случаев необходимо совместное использование продольных и поперечных волн.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 08-05-00421а, 08-02-00872а, 09-05-10030к), интеграционных программ РАН и СО РАН, а также международных программ CALM и TSP.

ЛИТЕРАТУРА

Горяинов Н.Н., Скворцов А.Г. Сейсмоакустические методы при инженерно-геокриологических исследованиях // Инженерное мерзлотоведение (Материалы 3-й Международной конференции по мерзлотоведению). Новосибирск, Наука, 1979, с. 267—272.

Дубровин В.А., Павлов А.В., Харитонов Л.П. Экспериментальное исследование термического режима грунтов в арктических районах Западной Сибири // Материалы Первой конференции геокриологов России. Кн. 1. М., 1996, с. 310—320.

Изучение оползней геофизическими методами / Н.Н. Горяинов, А.Н. Боголюбов, Н.М. Варламов, В.Н. Никитин, В.С. Матвеев, А.Г. Скворцов. М., Недра, 1987, 157 с.

Изучение инженерно-геокриологических и гидрогеологических условий верхних горизонтов пород в нефтегазоносных районах криолитозоны: Методическое руководство / Под ред. Е.С. Мельникова, С.Е. Гречищева, А.В. Павлова. М., Недра, 1992, 288 с.

Малкова Г.В., Скворцов 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 Международной конференции, Тюмень, 21—24 апреля 2008 г.). Тюмень, ООО ИПЦ. Изд-во «Экспресс», 2008, с. 311—313.

Мельников В.П., Спесивцев В.И. Инженерно-геологические и геокриологические условия шельфа Баренцева и Карского морей. Новосибирск, Наука, 1995, 198 с.

Пономарева О.Е., Скворцов А.Г. Методы и результаты изучения экзогенных геологических процессов в Надымском районе Западной Сибири // Материалы Международной конференции. Теория и практика оценки состояния криосферы Земли и прогноз ее изменений. Т. 1. Тюмень, ТГНУ, 2006, с. 272—274.

Применение сейсмоакустических методов в гидрогеологии и инженерной геологии / Ред. Н.Н. Гояинов. М., Недра, 1992, 264 с.

Скворцов А.Г. Контроль за изменением устойчивости оползневых склонов с использованием сейсмических методов // Исследование гидрогеологических и инженерно-геологических объектов геофизическими и изотопными методами. М., ВСЕГИНГЕО, 1989, с. 32—43.

Скворцов А.Г. Особенности структуры поля упругих колебаний в нелитифицированных многолетнемерзлых породах // Криосфера Земли, 1997, т. 1, № 3, с. 66—72.

Скворцов 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. Пушино, 2001, с. 130—131.

Скворцов А.Г. Высокорастворимая сейсморастворка на поперечных волнах при изучении верхней части геологической среды // Инженерная геофизика, 2005, с. 16—18.

Скворцов А.Г., Дроздов Д.С., Малкова Г.В., Сметанин Н.Н., Украинцева Н.Г. Мониторинг напряженно-деформированного состояния берегового склона на геокриологическом стационаре Болванский с помощью сейсморастворки // Криосфера Земли, 2006, т. X, № 2, с. 46—55.

Пузырев Н.Н. Методы и объекты сейсмических исследований. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 1997, 301 с.

Пузырев Н.Н., Тригубов А.В., Бродов Л.Ю., Ведерников Г.В., Лебедев К.А., Оболенцева И.Р., Нефедкина Т.В., Худобина Л.Н., Сибиряков Б.П., Куличихина Т.Н., Лебедева Г.Н., Коржиев Л.В. Сейсмическая разведка методом поперечных и обменных волн. М., Недра, 1985, 277 с.

Drozdov D.S., Malkova G.V., Melnikov V.P. Recent advances in Russian geocryological research: a contribution to the International Polar Year // Proceedings of the 9th Intern. conf. on permafrost, Fairbanks, Alaska, June 29—July 3, 2008, v. 1, p. 379—385.

Skvortsov A.G., Drozdov D.S. Stress-strain conditions and stability of the Arctic coastal slopes: assessment using seismic surveys // Permafrost: 8th Intern. conf. on permafrost: extended abstracts. Zurich: ICOP, 2003, p. 149—150.

Snegirev A.M., Velikin S.A., Istratov V.A., Kuchmin A.O., Skvortsov A.G., Frolov A.D. Geophysical monitoring in permafrost areas // Permafrost: 8th Intern. conf. on permafrost. Zurich, ICOP, 2003, p. 1079—1084.

*Поступила в редакцию
15 мая 2009 г.*