НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
КРИОСФЕРА ЗЕМЛИ

Криосфера Земли, 2014, т. XVIII, № 2, с. 83–90 **http://www.izdatgeo.ru**

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ КРИОЛИТОЗОНЫ

УДК 551.341+550.834

СЕЙСМИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ ИДЕНТИФИКАЦИИ МЕРЗЛОГО СОСТОЯНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

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

Институт криосферы Земли СО РАН, 625000, Тюмень, а/я 1230, Россия; agskvortsov@mail.ru

Рассмотрены возможности и перспективы использования динамического коэффициента Пуассона в качестве дополнительного критерия идентификации мерзлого состояния водонасыщенных песчано-глинистых пород. На основе анализа литературных источников и многолетних экспериментальных исследований авторов в арктических районах Западной Сибири и европейского Севера установлено, что для водонасыщенных песчано-глинистых пород интервал значений коэффициента Пуассона 0,45–0,46 является граничным между их мерзлым и талым состоянием. При коэффициенте Пуассона, равном 0,46 и более, породы независимо от их состава, температуры и минерализации находятся в талом состоянии, при значениях 0,45 и менее – в мерзлом. Использование коэффициента Пуассона наиболее эффективно при идентификации мерзлого состояния глинистых пород.

Коэффициент Пуассона, продольные и поперечные волны, многолетнемерзлые породы, пластично-мерзлые породы, сейсмический каротаж

SEISMIC IDENTIFICATION CRITERIA OF THE FROZEN STATE IN ROCKS

A.G. Skvortsov, M.R. Sadurtdinov, A.M. Tsarev

Earth Cryoshere Institute, SB RAS, 625000, Tyumen, P/O box 1230, Russia; agskvortsov@mail.ru

The possibilities and perspectives of using the Poisson's ratio as an additional criterion for identification of the frozen state in the massives of the water-saturated sandy-clay deposits have been examined. Based on the analysis of the literary sources and perennial experimental researches of the authors in the Arctic regions of West Siberia and European North, it has been determined that the 0.45–0.46 interval of values of the Poisson's ratio for water-saturated sandy-clay deposits marks the boundary between their frozen and thaw states. If the Poisson's ratio is 0.46 and higher the deposits will be in the thaw state and if the Poisson's ratio is 0.45 or lower the deposits will be in the frozen state, irrespective of their composition, temperature and mineralization. Using the Poisson's ratio is most effective for the identification of the frozen state in clay deposits.

Poisson's ratio, compressional and transversal waves, permafrost, plastic frozen ground, seismic well logging

ВВЕДЕНИЕ

При сейсмических исследованиях в криолитозоне возникает необходимость идентификации мерзлого состояния горных пород и сейсмогеокриологических границ, ограничивающих массив многолетнемерзлых пород или расположенных в его пределах. Наличие априорной информации, получаемой главным образом с помощью бурения, значительно упрощает решение этой задачи. При отсутствии опорных сведений о геокриологическом строении исследуемого разреза для определения мерзлого состояния горных пород могут быть использованы различные сейсмические критерии.

Идентификация мерзлого состояния пород и геокриологических границ может быть выполнена по значениям скоростей сейсмических волн, по наличию обменной *PSP*-волны, формирующейся на кровле толщи многолетнемерзлых пород (ТМП) при регистрации продольных преломленных волн, по динамическим особенностям волновой записи.

Однако использование этих сейсмических критериев не всегда дает положительный результат, особенно в разрезах, сложенных глинистыми породами, находящимися в пластично-мерзлом состоянии. В этом случае для более надежной и достоверной идентификации мерзлого состояния горных пород необходимо применять дополнительные критерии.

© А.Г. Скворцов, М.Р. Садуртдинов, А.М. Царев, 2014

АНАЛИЗ СЕЙСМИЧЕСКИХ КРИТЕРИЕВ ИДЕНТИФИКАЦИИ МЕРЗЛОГО СОСТОЯНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

Наиболее распространенным сейсмическим критерием идентификации геокриологических границ являются скорости упругих волн, значения которых в талых и мерзлых водонасыщенных породах различны [*Джурик, 1988; Применение..., 1992; Воронков и др., 1997; Фролов, 1998; Rogers, Morack, 1978; Neave, Sellmann, 1983*]. В мерзлых породах значения скоростей сейсмических волн выше, чем в талых. Увеличение скорости упругих волн при переходе из талого состояния в мерзлое определяется в первую очередь дисперсностью пород. В крупнодисперсных породах скорость сейсмических волн при переходе из талого состояния в мерзлое увеличивается значительно больше, чем в тонкодисперсных.

На рис. 1 показаны диапазоны значений скоростей продольных и поперечных волн в мерзлых и талых водонасыщенных песчано-глинистых породах. При построении рисунка использованы данные из работ [*Применение..., 1992; Воронков и др., 1997; Фролов, 1998*], а также результаты исследований авторов, полученные в северных районах Западной Сибири и на европейском Севере.

Из рис. 1 следует, что диапазоны скоростей сейсмических волн в талых и мерзлых породах перекрываются. Поэтому идентификация мерзлого состояния горных пород по значениям скоростей упругих волн (особенно без знания литологического состава пород) может оказаться неоднозначной, а в случае глинистых пород даже невозможной. Величина скорости сейсмических волн в мерзлых породах определяется не только их дисперсностью, она зависит также от температуры и засоленности пород [*Фролов, 1998; Зыков, 2007; Воронков, 2009*]. В результате влияния этих факторов неоднозначность идентификации мерзлых пород по значениям скоростей сейсмических волн увеличивается.

На рис. 1 видно, что интервал перекрытия значений скоростей в талых и мерзлых породах

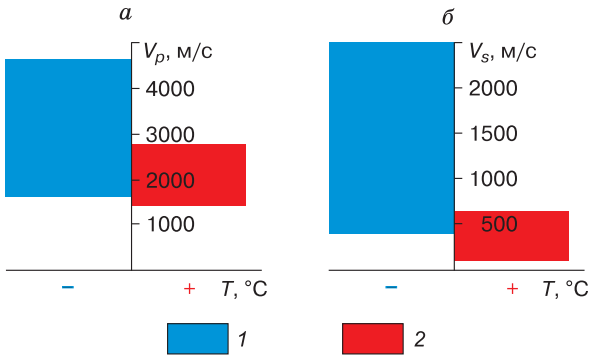

Рис. 1. Диапазоны значений скоростей продольных (*а*) и поперечных (*б*) волн в мерзлых (*1*) и талых (*2*) водонасыщенных песчано-глинистых породах (по данным О.К. Воронкова [*Воронков и др., 1997; Воронков, 2009*], Н.Н. Горяинова [*Применение..., 1992*], А.Д. Фролова [*1998*] и авторов статьи).

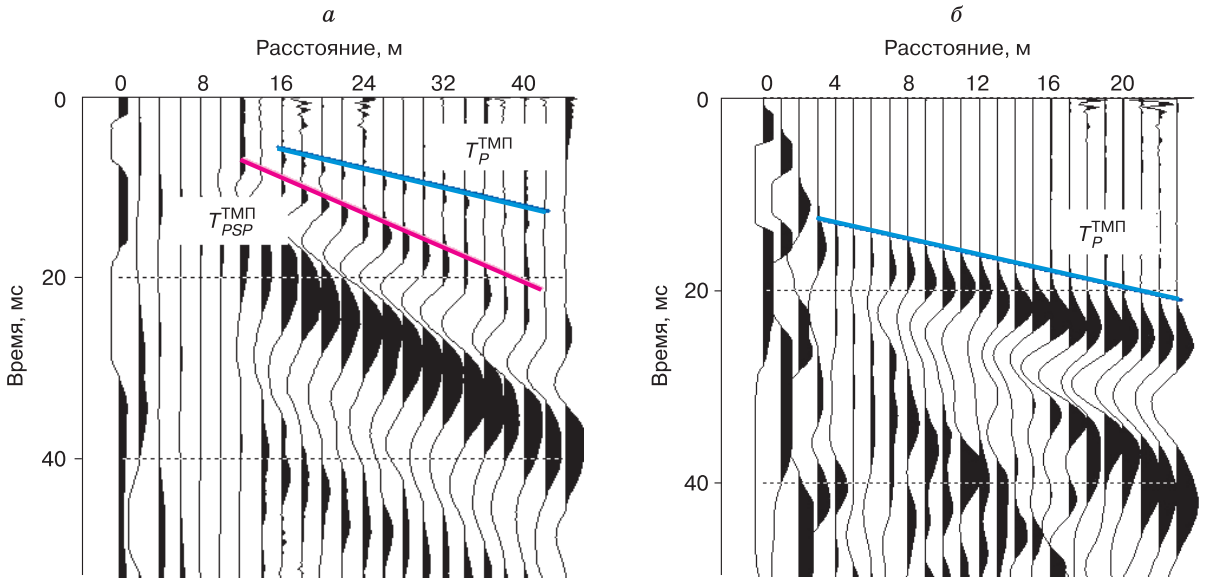

Рис. 2. Структура поля продольных волн в условиях песчаного (*а*) и глинистого (*б*) разрезов п-ова Ямал.

а – пос. Мыс Каменный; *б* – геокриологический стационар Марре-Сале; $T_P^{ТМП}$ – продольная волна, преломленная на кровле ТМП; $T_{PSP}^{ТМП}$ – обменная волна, сформировавшаяся на кровле ТМП.

для поперечных волн значительно меньше, чем для продольных. Это означает, что идентификация геокриологических границ по значениям скоростей поперечных волн более достоверна.

Одной из основных геокриологических границ, определяемых с помощью геофизических методов, является кровля ТМП. Критерием для ее идентификации может служить также присутствие в структуре поля продольных волн, помимо однотипной волны, преломленной на кровле ТМП, обменной волны *PSP* [*Применение..., 1992*], которая формируется на этой границе. Интенсивность *PSP*-волны существенно превосходит интенсивность продольной преломленной волны (рис. 2, *а*).

Однако интенсивные обменные волны формируются, как правило, на контрастных сейсмических границах. Эти условия выполняются, когда кровля ТМП расположена в песчано-супесчаных породах. В случае, если разрез сложен глинистыми высокотемпературными и (или) засоленными породами, скоростная контрастность кровли ТМП оказывается не столь большой и прослеживание в структуре волнового поля продольных волн обменной *PSP*-волны затруднено или невозможно (см. рис. 2, *б*). Здесь обменная *PSP*-волна на сейсмической записи в явном виде не прослеживается, а продольная волна, преломленная на кровле ТМП, имеет скорость 1800 м/с, что не позволяет однозначно идентифицировать ее как волну, связанную с кровлей мерзлых пород.

Таким образом, указанные сейсмические критерии не могут быть в полной мере использованы для однозначной идентификации мерзлого состояния горных пород, особенно если они представлены глинистыми отложениями.

Кроме указанных выше сейсмических критериев, для идентификации мерзлого состояния горных пород в литературе рассматривается возможность использования других сейсмических признаков.

При проведении морской сейсморазведки на акваториях методом отраженных волн наряду с кинематическими предлагается применять и динамические признаки [*Седов, 1988*].

В одной из работ Г.Д. Хобсон [*Hobson, 1967*] приводит пример выделения кровли ММП на основе оценки коэффициента отражения. Однако подобные признаки в практике инженерно-геокриологических исследований применяются крайне редко, и такие работы носят экспериментальный характер.

ПРЕДПОСЫЛКИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ПУАССОНА ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ МЕРЗЛОГО СОСТОЯНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

Рассмотрим возможность использования динамического коэффициента Пуассона (μ) в качестве сейсмического критерия для идентификации мерзлого состояния горных пород. Динамический коэффициент Пуассона однозначно определяется по значениям скоростей продольных и поперечных волн:

$$\mu = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2\left(V_p^2 - V_s^2\right)},$$

где V_p, V_s – скорости продольных и поперечных волн соответственно [*Применение..., 1992*]. Коэффициент μ изменяется от 0 до 0,5.

В таблице приведены значения коэффициента Пуассона для водонасыщенных песчано-глинистых пород в зависимости от их физического состояния по данным работ [*Применение..., 1992; Фролов, 1998; Воронков, 2009*].

В талых породах величина μ близка к своему верхнему предельному значению. Однако следует обратить внимание на то, что для талых пород средние значения μ и диапазон их изменений, приводимые разными авторами, несколько различаются. По данным О.К. Воронкова и А.Д. Фролова, значения коэффициента Пуассона для талых водонасыщенных пород находятся в интервале 0,40–0,45. По Н.Н. Горяинову [*Применение..., 1992*], значения μ в этих породах выше и равны 0,48–0,49. Данные о высоких значениях μ для талых водонасыщенных песчано-глинистых пород (μ = 0,46–0,49), близких к значениям Н.Н. Горяинова, приводятся во многих работах [*Гурвич, 1970; Сейсморазведка..., 1981; и др.*].

Авторами статьи при проведении наземных и скважинных исследований в пределах арктических мелководных акваторий и прибрежных участков суши Западной Сибири и европейского Севера в талых водонасыщенных песчано-глинистых породах четвертичного возраста не фиксировались значения μ < 0,46 [*Садуртдинов, Скворцов, 2008; Садуртдинов и др., 2009, 2010; Скворцов и др., 2011а,б; Sadurtdinov et al., 2012*].

Анализ литературных данных и результатов исследований авторов настоящей статьи дает основание предположить, что пониженные значе-

Значение коэффициента Пуассона в водонасыщенных песчано-глинистых породах

Порода	Состояние породы	Коэффициент Пуассона (μ)	
		по Н.Н. Горяинову	по О.К. Воронкову, А.Д. Фролову
Пески	Мерзлое	0,29	0,27
Супеси		0,30	0,38
Суглинки		0,29	0,33
Глины		0,35	0,38
Пески	Талое (водонасыщенное)	0,49	0,40
Супеси		0,48	0,40
Суглинки		0,49	0,45
Глины		0,48	0,45

ния μ, приводимые в работах О.К. Воронкова и А.Д. Фролова для талых водонасыщенных пород, могут быть обусловлены несколькими факторами: спецификой минералогического состава, на которую указывают эти исследователи, и сформировавшимися структурными связями в породах древнего возраста. Одной из важных причин пониженных значений μ может являться неполное водонасыщение исследуемых пород. Косвенным подтверждением этому служит то, что относительно низкие значения μ = 0,4 для водонасыщенных пород в работах О.К. Воронкова и А.Д. Фролова обусловлены, в частности, низкими значениями скорости продольных волн (V_p = 700–1300 м/с).

Вместе с тем известно, что в практике сейсмических работ широко используется способ определения границы зоны полного водонасыщения в песчано-глинистых породах [*Применение..., 1992*]. Он основан на том, что при переходе от трехфазной среды к двухфазной, в которой практически полностью отсутствует воздух, происходит скачкообразное увеличение скорости продольных волн до значений не менее 1450 м/с, что равно скорости распространения продольных волн в воде.

Согласно таблице, величина коэффициента Пуассона в мерзлых породах располагается вблизи средних значений возможного диапазона его изменения. При этом μ в песчано-глинистых многолетнемерзлых породах (ММП) является переменной величиной, и значение μ зависит от количества незамерзшей воды в них. Поэтому μ уменьшается с понижением температуры и уменьшением глинистости мерзлых пород [*Фролов, 1998*].

Указанные особенности изменения коэффициента Пуассона дают основание предположить, что имеется некоторое граничное значение или узкий интервал значений μ, соответствующий переходу пород из талого состояния в мерзлое, когда в водонасыщенных песчано-глинистых породах начинается образование льда.

Из таблицы следует, что среднее значение μ для талых песчано-глинистых пород равно 0,46.

Согласно результатам лабораторных исследований А.Д. Фролова [*1998*], максимальное значение μ в момент начала промерзания глинистых пород равно 0,45, кварцевого песка – 0,40. Более низкое значение коэффициента Пуассона в начале промерзания песка автор эксперимента связывает с аномально низким значением μ в кварце. Причинами этого могут быть также факторы, указанные выше. В талых песчано-глинистых водонасыщенных породах в районах, где авторами статьи проводились исследования, такие низкие коэффициенты Пуассона не встречались.

Таким образом, анализ литературных данных позволяет обоснованно предположить, что граничные значения μ для водонасыщенных песчано-глинистых пород при переходе их из талого состояния в мерзлое располагаются в узком интервале значений 0,45–0,46.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ПУАССОНА ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ МЕРЗЛОГО СОСТОЯНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

Экспериментальное обоснование предположения о существовании граничного значения коэффициента Пуассона при переходе водонасыщенных песчано-глинистых пород из талого состояния в мерзлое было выполнено при совместном анализе результатов сейсмического каротажа и данных инженерно-геологического опробования ряда скважин на территории Западной Сибири.

Результаты сейсмического каротажа и инженерно-геокриологического обследования скважины глубиной 220 м на Уренгойском газоконденсатном месторождении (ГКМ) представлены на рис. 3. В интервале глубин 70–90 м в этой скважине был вскрыт межмерзлотный талик [*Дроздов, Скворцов, 1998*].

По результатам обработки данных сейсмического каротажа в этой скважине была получена зависимость коэффициента Пуассона от дисперсности мерзлых грунтов (рис. 4) [*Мельников и др., 2010*]. Она показывает, что увеличение дисперсности пород сопровождается повышением значений μ. Это согласуется с общей закономерностью увеличения количества незамерзшей воды в мерзлых породах с увеличением их глинистости. На рис. 4 ряд точек, полученных по измерениям скорости сейсмических волн в пределах межмерзлотного талика, располагается в области значений μ > 0,46 (эта зона выделена желтым цветом на рис. 4). Эти результаты подтверждают предположение о возможности выделения в разрезе мерзлых пород по критическим значениям μ ≈ 0,45–0,46.

Возможность использования коэффициента Пуассона в качестве критерия для идентификации геокриологических границ в условиях глинистого сильнозасоленного разреза подтверждена результатами скважинных сейсмических исследований в пределах геокриологического стационара Марре-Сале на западном побережье п-ова Ямала [*Мельников и др., 2010*].

На рис. 5 приведены данные сейсмического каротажа в скважине 14-10, расположенной на этом участке [*Скворцов и др., 2012*]. В интервале глубин 20–23 м в процессе бурения скважины был вскрыт криопэг. В его пределах глинистые породы находятся в талом состоянии, хотя их температура равна –4,5 °С, а μ = 0,46. Эти данные являются еще одним подтверждением того, что диапазон значений μ = 0,45–0,46 является граничным между мерзлым и талым состоянием для водонасыщенных песчано-глинистых пород.

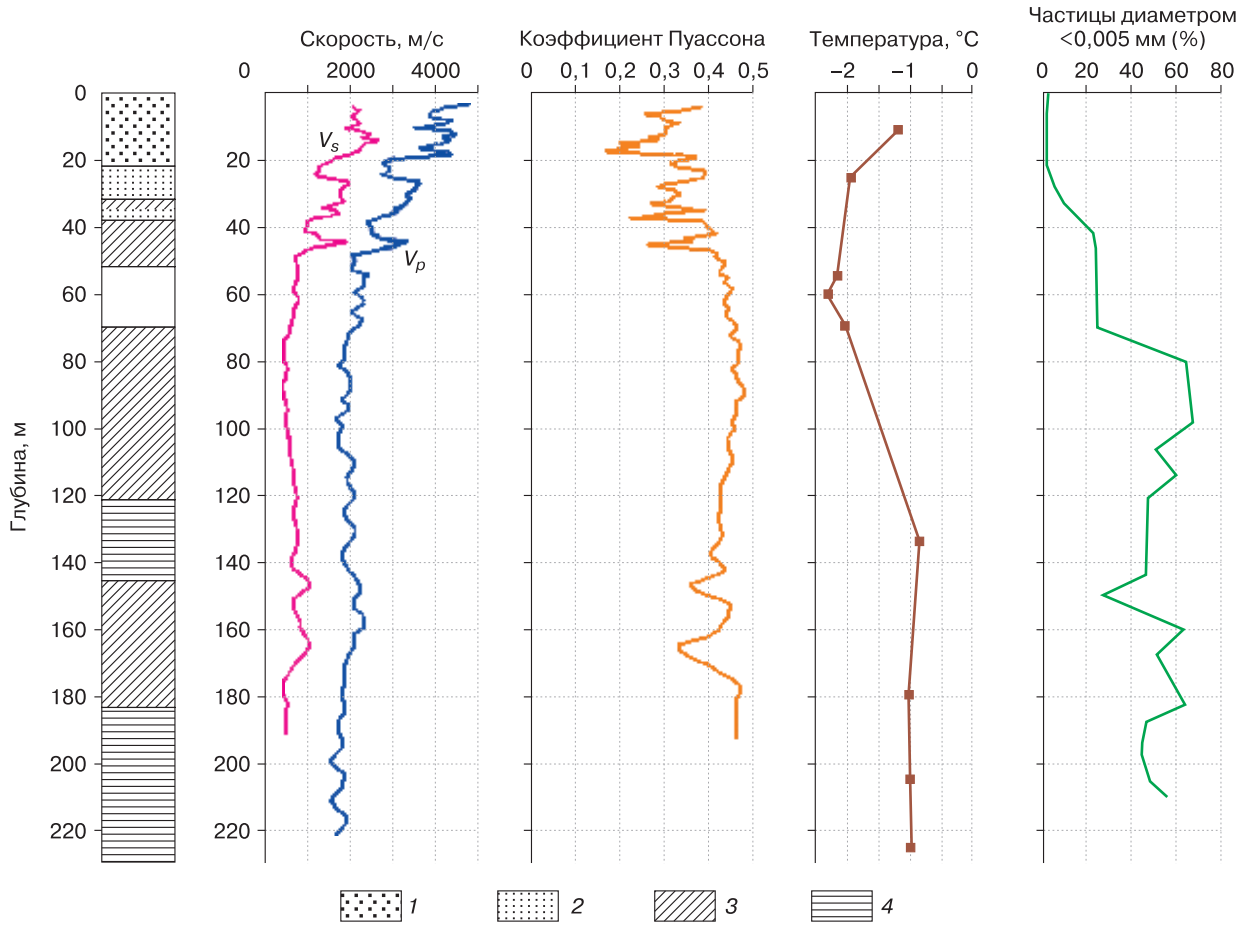

Рис. 3. Результаты продольного вертикального сейсмического профилирования и инженерно-геологического опробования скважины 1 в пойме р. Ен-Яха в северной части Уренгойского ГКМ.

1 – крупнозернистый песок; *2* – песок пылеватый; *3* – суглинок; *4* – глина.

Заслуживает внимания интервал глубин 9–11 м, сложенный мерзлым маловлажным пылеватым песком. Малая влажность песка становится причиной низких значений скорости продольных волн. Используя только этот показатель, можно сделать ошибочный вывод о том, что породы в данном интервале являются талыми и водонасыщенными. Однако совместное рассмотрение скоростей сейсмических волн и величины μ позволяет утверждать, что этот интервал разреза сложен мерзлыми породами.

Рассмотрим возможности разных сейсмических критериев для идентификации геокриологических границ по результатам наземных сейсмических наблюдений с помощью преломленных волн в различных геокриологических условиях.

На рис. 6 приведены глубинные разрезы по трем участкам, где была выделена и идентифицирована сейсмическая граница, соответствующая кровле ТМП.

Участок Мыс Каменный расположен на западном берегу Обской губы (см. рис. 6, *а*). Верхняя часть разреза представлена незасоленными крупно- и среднезернистыми песками. Сейсмичес-

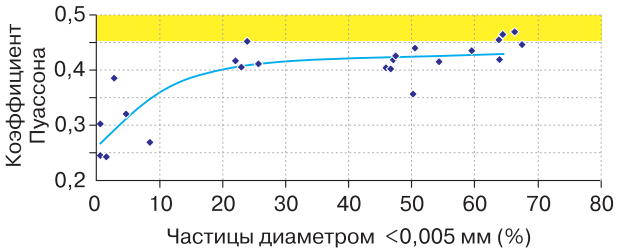

Рис. 4. Зависимость коэффициента Пуассона (μ) от дисперсности мерзлых грунтов по данным сейсмического каротажа в скважине 1 Уренгойского ГКМ.

Цветом выделена область значений μ в талых породах в пределах межмерзлотного талика.

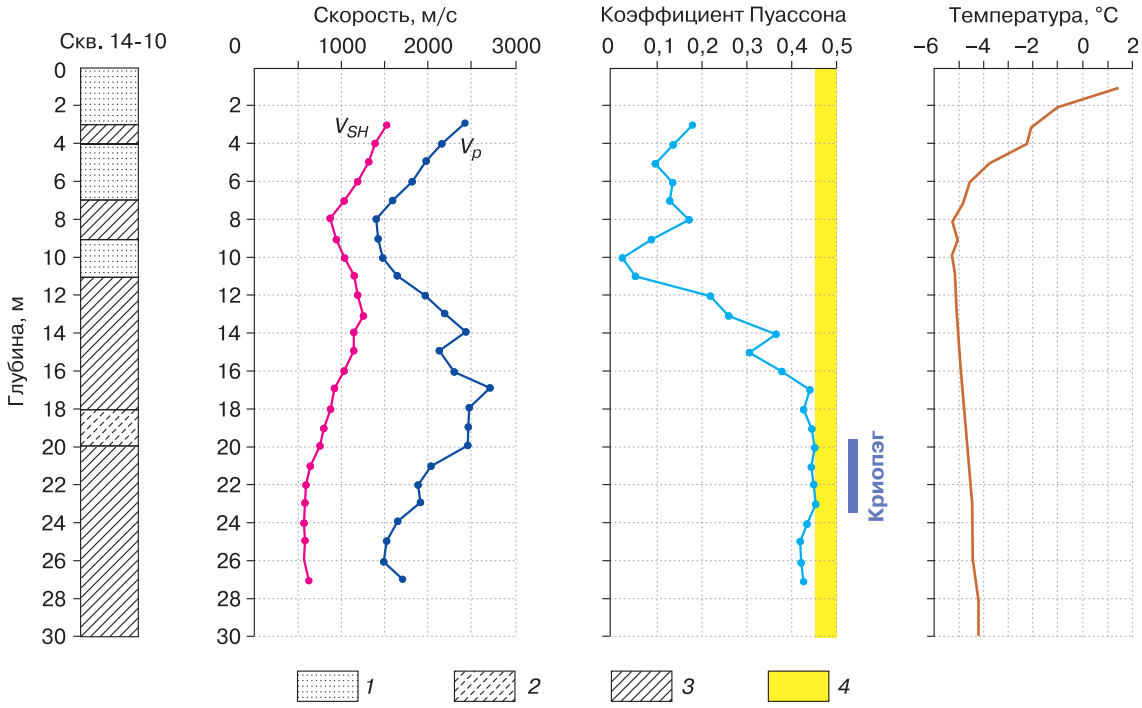

Рис. 5. Результаты сейсмического каротажа в скважине 14-10 на геокриологическом стационаре Марре-Сале.

1 – песок; *2* – суглинок; *3* – глина; *4* – область значений μ в талых водонасыщенных породах. V_p – скорость продольных волн; V_{SH} – скорость поперечных *SH*-волн.

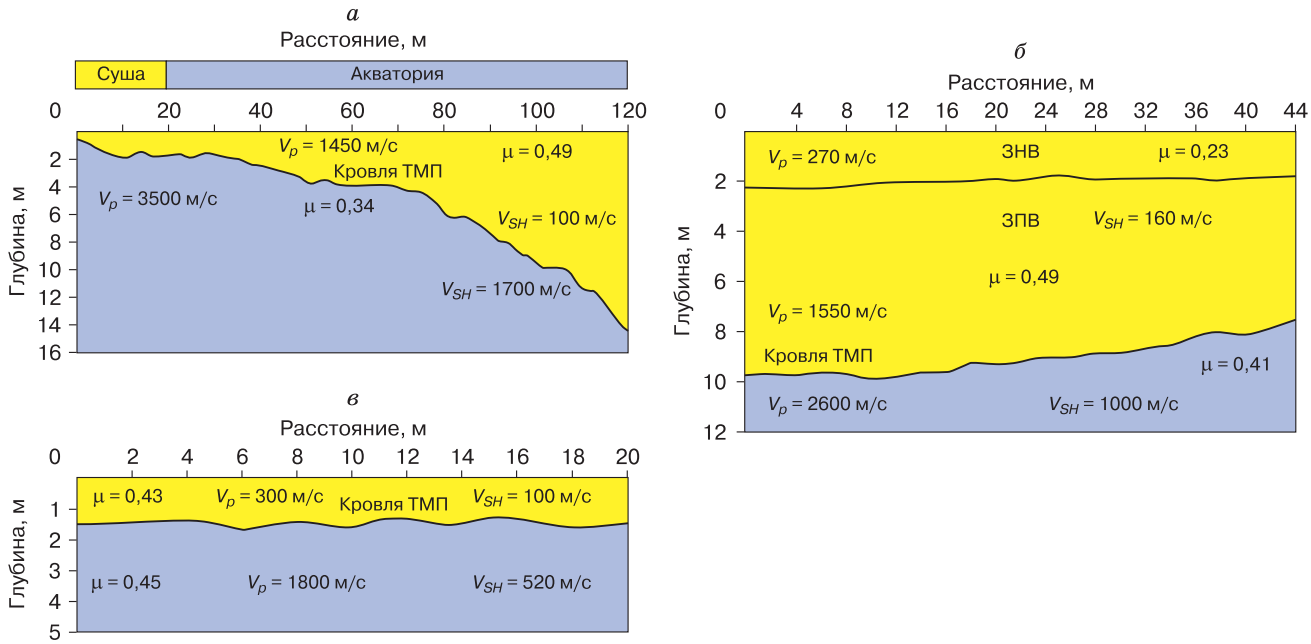

Рис. 6. Сейсмогеокриологические разрезы в прибрежной части Обской губы (*а*), на морском пляже в устье р. Печора (*б*) и на пляже западного берега п-ова Ямал (*в*), полученные с использованием преломленных продольных и поперечных *SH*-волн.

а – пос. Мыс Каменный; *б* – стационар Болванский; *в* – стационар Марре-Сале. ЗНВ – зона неполного водонасыщения, ЗПВ – зона полного водонасыщения.

кий профиль располагался на пляже и в прибрежной части акватории. Глубина акватории не превышала 2,5 м. В этих условиях идентификация сейсмической границы, соответствующей кровле ТМП, уверенно осуществляется по всем индикационным критериям: значениям скоростей сейсмических волн, наличию обменной волны и коэффициенту Пуассона.

Породы на морском пляже в устье р. Печора представлены супесчано-суглинистыми незасоленными отложениями (см. рис. 6, *б*). В этих условиях идентификация кровли ТМП успешно выполнена по значениям скоростей волн и коэффициенту Пуассона. Использование в качестве идентификационного признака наличия на волновой записи обменной волны от кровли ТМП было затруднено. Помимо кровли ТМП на этом участке выделена кровля зоны полного водонасыщения (ЗПВ), которая является контрастной сейсмической границей только для продольных волн.

На геокриологическом стационаре Марре-Сале (см. рис. 6, *в*) широко распространены, в том числе на морском пляже, глинистые пластично-мерзлые засоленные породы, обнаружить которые сложно даже с помощью заверочного бурения. При наземных исследованиях на пляже была обнаружена сейсмическая граница, залегающая на глубине 1,5–2,0 м. Однако низкие значения граничной скорости продольных и поперечных *SH*-волн (1800 и 530 м/с соответственно), а также отсутствие обменной волны не позволили идентифицировать эту границу как кровлю ТМП. Таким скоростным характеристикам могла соответствовать сейсмическая граница, связанная с кровлей ЗПВ. В данных условиях однозначно идентифицировать обнаруженную сейсмическую границу как кровлю ТМП оказалось возможно только по величине коэффициента Пуассона. Высокое значение $\mu = 0{,}45$ фактически является предельным для мерзлых пород и свидетельствует о том, что породы находятся в пластично-мерзлом состоянии.

Полученные результаты показывают, что с помощью коэффициента Пуассона возможна не только идентификация мерзлого состояния горных пород в геологическом разрезе, но и оценка его качества.

Минимальная погрешность вычисления коэффициента Пуассона отмечается при его значениях, близких к 0,5 [*Савич, 1979*]. При $\mu = 0{,}46$ погрешность вычислений не превышает 2 %, что в абсолютных значениях равно 0,01 и фактически соответствует ширине установленного в результате исследований интервала критических значений μ при переходе пород из талого состояния в мерзлое.

Из результатов исследований следует, что коэффициент Пуассона является дополнительным надежным критерием для идентификации мерзлого состояния горных пород, особенно в случае глинистого разреза, где породы находятся в пластично-мерзлом состоянии.

ВЫВОДЫ

Анализ литературных данных и многолетние экспериментальные исследования, выполненные авторами, позволили сделать следующие выводы о сейсмических критериях идентификации мерзлого состояния горных пород и свойствах талых и мерзлых пород.

1. Показано, что достоверная идентификация мерзлого состояния водонасыщенных песчано-глинистых пород не во всех случаях может быть осуществлена с помощью известных сейсмических критериев.

2. Впервые предложена и обоснована возможность использования коэффициента Пуассона в качестве надежного дополнительного сейсмического критерия для идентификации мерзлого состояния водонасыщенных песчано-глинистых пород.

3. Экспериментально подтверждено, что водонасыщенные песчано-глинистые породы, независимо от их состава, температуры и засоленности, при величине коэффициента Пуассона 0,46 и более находятся в талом состоянии, при значениях 0,45 и менее – в мерзлом. Диапазон значений $\mu = 0{,}45–0{,}46$ является граничным и определяет переход пород из талого состояния в мерзлое.

4. Понижение/повышение коэффициента Пуассона в мерзлых песчано-глинистых породах обусловлено уменьшением/увеличением количества незамерзшей воды, что позволяет использовать этот параметр для оценки качества мерзлого состояния.

5. Коэффициент Пуассона является дополнительным надежным критерием для идентификации мерзлого состояния, особенно в массивах пластично-мерзлых глинистых пород, и совместное его использование с существующими сейсмическими критериями позволяет существенно повысить достоверность результатов сейсмических работ при геокриологических исследованиях.

Литература

Воронков О.К. Инженерная сейсмика в криолитозоне (Изучение строения и свойств мерзлых и талых горных пород и массивов) / О.К. Воронков. СПб., Изд-во ОАО “ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева”, 2009, 401 с.

Воронков О.К., Моторин Г.А., Михайловский Г.В., Кунцевич С.П. Сейсмогеологические классификации грунтов криолитозоны // Криосфера Земли, 1997, т. I, № 3, с. 47–54.

Гурвич И.И. Сейсмическая разведка. 2-е изд. / И.И. Гурвич. М., Недра, 1970, 552 с.

Джурик В.И. Оценка сейсмической опасности мерзлых грунтов // Оценка влияния грунтовых условий на сейсмическую опасность. М., Наука, 1988, с. 168–183.

Дроздов Д.С., Скворцов А.Г. Инженерно-геокриологические особенности толщи ММП по результатам комплексных геолого-геофизических исследований в глубокой скважине (территория Уренгойского НГКМ) // Проблемы геокриологии Земли. Пущино, Пущинский НЦ РАН, 1998, с. 59–61.

Зыков Ю.Д. Геофизические методы исследования криолитозоны: Учебник / Ю.Д. Зыков. М., Изд-во Моск. ун-та, 2007, 272 с.

Мельников В.П., Скворцов 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. 171–180.

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

Савич А.И. Исследования упругих и деформационных свойств горных пород сейсмоакустическими методами / А.И. Савич, З.Г. Ященко. М., Недра, 1979, 214 с.

Садуртдинов М.Р., Скворцов А.Г. Особенности геокриологических условий прибрежной части суши на побережье Печорской губы // Тез. докл. 4-й Междунар. науч.-практ. конф. “Инженерная и рудная геофизика 2008”. Геленджик, 2008, 2 с. [Электронный ресурс].

Садуртдинов М.Р., Скворцов А.Г., Царев А.М. Изучение строения верхней части геологического разреза в пределах мелководных акваторий с помощью сейсмических методов // Тез. докл. 5-й Междунар. науч.-практ. конф. “Инженерная и рудная геофизика 2009”. Геленджик, 2009, 2 с. [Электронный ресурс].

Садуртдинов М.Р., Царев А.М., Дубровин В.А., Скворцов А.Г. Опыт изучения инженерно-геокриологических условий в пределах мелководных акваторий на территории полуострова Ямал // Материалы Междунар. конф. и выставки “Санкт-Петербург–2010. К новым открытиям через интеграцию геонаук”. С.-Петербург, 2010, 2 с. [Электронный ресурс].

Седов Б.М. Сейсмические исследования в районах вечной мерзлоты / Б.М. Седов. М., Наука, 1988, 180 с.

Сейсморазведка. Справ. геофизика / Под ред. И.И. Гурвича, В.П. Номоконова. М., Недра, 1981, 464 с.

Скворцов А.Г., Дубровин В.А., Садуртдинов М.Р., Царев А.М. Результаты сейсмических исследований на геокриологическом стационаре Марре-Сале (Ямал) // Десятая междунар. конф. по мерзлотоведению (TICOP): Ресурсы и риски регионов с вечной мерзлотой в меняющемся мире. Тюмень, Печатник, 2012, т. 5, с. 289–290.

Скворцов А.Г., Царев А.М., Садуртдинов М.Р. Особенности использования сейсмических методов при инженерно-геокриологических исследованиях // Материалы Четвертой конф. геокриологов России (Москва, 7–9 июня 2011 г.). М., Унив. кн., 2011а, т. 1, с. 225–232.

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

Фролов А.Д. Электрические и упругие свойства мерзлых пород и льдов / А.Д. Фролов. Пущино, ОНТИ ПНЦ РАН, 1998, 515 с.

Hobson G.D. Hammer seismic investigation, Good Spirit Lake area // Pap. Geol. Surv. Can., 1967, No. 1, p. 37–41.

Neave K.G., Sellmann P.V. Seismic velocities and subsea permafrost in the Beafort Sea, Alaska // Proc. of the 4th Intern. Conf. on Permafrost, Fairbanks, USA, 1983, vol. 1, p. 894–898.

Rogers J.C., Morack J.L. Geophysical investigation of offshore permafrost, PrudHoe Bay, Alaska // Proc. of the 3th Intern. Conf. on Permafrost, Edmonton, Canada, 1978, vol. 1, p. 560–566.

Sadurtdinov M.R., Skvortsov A.G., Tsarev A.M., Malkova G.V. Permafrost condition in Kashin Island (Pechora Delta), from seismic profiling data // Tenth Intern. Conf. on Permafrost: Resources and Risks of Permafrost Areas in a Changing World: Abstr. Yekaterinburg, Russia, 2012, vol. 4/2, p. 488–489.

Поступила в редакцию
30 октября 2013 г.