

О критериях выявления массивов многолетнемерзлых пород в Печорском и юго-западной части Карского морей на временных разрезах сейсмоакустического профилирования

Куликов С.Н. (ОАО АМИГЭ), Рокос С.И. (ОАО АМИГЭ), Тулапин А.В. (ОАО АМИГЭ)

Введение

В Печорского и юго-западной части Карского морей расположен ряд крупных нефтегазовых месторождений, а также перспективных структур. К их числу относятся Варандей-море, Медыньское-море; Крузенштернское и Харасавэйское (акваториальные части площадей); Русановское, Ленинградское и др. Указанные районы характеризуются широким распространением многолетнемерзлых пород. Это в значительной мере осложняет поиски, разведку и добычу углеводородов. В связи с этим, одной из основных задач инженерно-геологических изысканий в указанных районах является выявление и оконтуривание массивов мерзлых льдистых грунтов. Решение этой задачи с помощью сейсмоакустического профилирования является достаточно проблематичным по причине сложной и неоднозначной волновой картины, наблюдаемой на временных разрезах.

Геологическое строение верхней части разреза

В пределах мелководных районов Печорского и юго-западной части Карского морей верхняя часть осадочного разреза (до глубины 50-100м от поверхности дна) сложена в основном четвертичными отложениями. Мощность четвертичной толщи составляет на большей части площади описываемых районов около 100м. Согласно рабочей стратиграфической схемы Открытого Акционерного Общества «Арктические Морские Инженерно-Геологические Экспедиции» (ОАО АМИГЭ) в составе четвертичного покрова выделяется ряд стратиграфо-генетических комплексов:

Аллювиальный эоплейстоценовый комплекс (аС), представлен песками, мощность до 50м. Установлен на шельфе Печорского моря в крупных палеодепрессиях кровли дочетвертичных образований.

Аллювиально-морской, морской эоплейстоценовый комплекс (am-тС) представлен глинами и суглинками, мощность до 60-70м. Развита в крупных палеодепрессиях на шельфе Карского моря.

Морской, ледово-морской нижне-среднеооплейстоценовый комплекс имеет мощность 30-60м. Представлен массивными и (или) нечеткослоистыми глинами и суглинками тугопластичной-твердой консистенции, с включениями крупнообломочного материала. В подошве выделяется пачка тонкоритмичнослоистых суглинков. Толща комплекса залегает в виде прерывистого плаща. В Печорском море он коррелируется с роговской свитой прилегающего побережья (m-gmI-IIrg), в Карском море- с ямальской серией (m-gmI-Пум).

Морской верхнеооплейстоценовый комплекс, мощность 20-50м, представлен глинами и суглинками мягко-тугопластичной консистенции с редкими включениями крупнообломочного материала, залегает в виде невыдержанного по мощности покрова. В Печорском море он коррелируется с мореюской свитой прилегающего побережья (mIII¹mu), в Карском море- с казанцевской свитой (mIII¹kz).

Аллювиальный, аллювиально-морской верхнеооплейстоценовый комплекс, мощность до 20-50м, представлен песками с прослоями оторфованного глинисто-суглинистого материала и глинисто-суглинистыми слоистыми образованиями текучей-текучепластичной консистенции, развит в палеодепрессиях кровли подстилающих отложений. В Печорском море он коррелируется с отложениями *валадайского надгоризонта*, в Карском море- с *зырянским*

надгоризонтом. В составе комплекса выделяются две пачки приблизительно равной мощности: нижняя, представленная аллювиальными песками и верхняя- аллювиально-морскими глинами и суглинками с прослоями песка. В Печорском море нижняя пачка аллювиальных песков коррелируется с отложениями *калининского горизонта* ($a\Pi^2kl$), в Карском море- с *ермаковским горизонтом* ($a\Pi^2er$). Верхняя аллювиально-морская глинистая пачка коррелируется: в Печорском море- с *ленинградским горизонтом* ($am\Pi^3ln$), в Карском- с *каргинским* ($am\Pi^3kr$).

Отложения верхней ступени позднего неоплейстоцена (*осташковские* ($a\Pi^4os$) в Печорском море и *сартанские* ($a\Pi^4sr$) в Карском) мощностью до 5-7м, представленные аллювиальными песками заполняют мелкие врезы в кровле подстилающих отложений.

В составе комплекса *голоценовых морских осадков* (mH) преобладают в основном суглинки и супеси текучей консистенции. Данные осадки залегают в виде тонкого покрова, мощность которого составляет в основном 1-3м. На участках с интенсивной гидродинамикой, супесчано-суглинистые осадки замещаются песками и крупнообломочными образованиями. В локальных депрессиях голоценовые осадки представлены тонкими глинисто-суглинистыми илами.

Кроме того, в Обской и Тазовской губах, заливе Шарапов Шар Карского моря, а также в Печорской губе также выделяются *древнеголоценовые аллювиальные* (aH^1) и *современные аллювиально-морские осадки* (amH^2). Толща этих осадков заполняет древние речные долины, приуроченные к указанным губам. Максимальные мощности данных образований отмечены в осевых частях губ, где они достигают 50м и более. Древнеголоценовые аллювиально-морские осадки представлены песками, которые с эрозионным несогласием перекрывает размытую поверхность кровли образований казанцевской свиты и ямальской серии. В осевых частях указанных губ мощность древнеголоценовых осадков достигает 30м и более. Вышележащие современные аллювиально-морские осадки представлены глинистыми и суглинистыми илами, которые в подошве замещаются более грубыми суглинками текучей-текучепластичной консистенции. Их мощность в осевых частях губ изменяется от 1-2 до 10-25м.

Многолетнемерзлые породы и газосодержащие осадки

В Печорском море и на мелководном юго-западном Карском шельфе рядом инженерно-геологических скважин на удалении от берега до 126км и более при глубинах моря до 103м были вскрыты мерзлые льдистые грунты (Рис. 1). Кровля разбуренных мерзлых массивов залегают обычно на глубине 15-50м ниже поверхности дна. Вскрытая мощность составляет около 20-30м [5]. Распространение мерзлых льдистых пород носит островной характер. Они развиты в виде локальных разрозненных массивов неясной конфигурации.

На большей части площади акваторий Обской и Тазовской губ, а также, предположительно, и Гыданской и Печорской губах, мерзлые породы практически отсутствуют. По видимому данные акватории представляют собой крупные талики, что обусловлено воздействием относительно теплого стока впадающих рек. Здесь мерзлые льдистые грунты были вскрыты лишь в прибрежных районах на удалении не более 1км от береговой линии. Эти районы приурочены к участкам, которые относительно недавно погрузились под воду в результате интенсивной термоабразии, либо к искусственно врезанным в побережье заливам (порт Ямбург). Кроме того, крупный талик выделен также у западного побережья о. Колгуев. Вероятно, его наличие связано с древней речной долиной одного из палеорусел пра-Печоры.

Многолетнемерзлые глинистые отложения представлены в основном пластично-мерзлыми образованиями. В кернах из пластичномерзлых глинистых образований наблюдаются наклонные шпирьы льда мощностью до 20-30см (вероятно, фрагменты сетчатой криотекстуры). Песчаные разности находятся в твердомерзлом состоянии и отличаются массивной криотекстурой. В ряде разрезов (Байдарацкая губа, площадь Русановского месторождения и др.) в кровле мерзлой толщи скважинами вскрыты ледогрунотовые образования мощностью 3-

5м. Они характеризуются высокой (50-70% и более) льдистостью, а также базально-атакситовой криотекстурой.

В целом многолетнемерзлые льдистые грунты Печорского и Карского морей рассматриваются нами как реликтовые эпигенетические образования. Предполагается, что они были сформированы в течении последней сартанской регрессии, когда уровень моря опустился до отметки около -90...-140м (в качестве средней можно принять оценку -120м). В ходе последующей трансгрессии мерзлый массив оказался перекрыт водами современного бассейна с температурами, превышающими температуру таяния мерзлых грунтов. В результате реликтовая мерзлая толща в существенной степени деградировала (на значительной части площади региона- полностью).

Деградация мерзлой толщи привела к насыщению приповерхностных осадков газом [3, 4]. В пределах рассматриваемого региона при глубинах моря менее 120м газосодержащие осадки развиты весьма широко. Газ в этих осадках представлен в основном биогенным метаном с незначительной примесью CO_2 , H_2S и др. Достоверные данные о его содержании в осадках верхней части разреза отсутствуют. В глинистых отложениях верхней части разреза газ содержится в основном в диспергированной форме (в виде разрозненных мелких пузырьков). В песках газ скапливается в кровле под подошвой перекрывающих глинистых толщ в своеобразных мини-ловушках.

Механизм насыщения осадков газом, как представляется, выглядит следующим образом: сформированная при регрессии мерзлая толща выступала как крышка, сдерживающая вертикальную миграцию биогенного и термокаталитического газа из глубины вверх по разрезу. Достигнув подошвы мерзлой толщи этот газ, не имея возможности к дальнейшей эмиссии, накапливался в достаточно больших количествах. После деградации мерзлой толщи газ перераспределился в толще вышележащих протаявших осадков в зависимости от их коллекторских свойств.

Кроме того процессы разложения органического вещества и, соответственно, выделение биогенного газа, в мерзлой толще были почти полностью подавлены. При трансгрессии, когда мерзлые отложения претерпели таяние, температура в ранее промерзшем интервале осадочной толщи повысилась до положительных значений, процессы разложения органики резко активизировались. Это также привело к интенсивному выделению биогенного газа.

Особенности волнового поля

На сейсмоакустических временных разрезах, полученных в мелководных районах Печорского и юго-западной части Карского морей, наблюдается достаточно сложная волновая картина. Она обусловлена наличием в разрезе газонасыщенных и мерзлых образований, а также посткриогенными преобразованиями. Эти факторы накладываются на структуру, формируемую литолого-стратиграфической компонентой, образуя сложную и неоднозначную, с точки зрения интерпретации, картину. При этом выделить из нее отдельные составляющие (фазовые или литолого-стратиграфические) весьма затруднительно [1, 2, 3].

Ведущую роль в формировании изображений на сейсмоакустических временных разрезах играет свободный газ. Наличие в осадках скоплений свободного газа проявляется в виде амплитудных аномалий типа «яркое пятно», зон резкой потери сейсмической корреляции, а также в виде различных акустических неоднородностей.

Скапливаясь в песчаных образованиях ермаковского (в Карском море) и калининского (в Печорском море) под подошвой глинистых осадков голоцена и ленинградского-каргинского горизонтов, свободный газ препятствует распространению упругих колебаний вниз по разрезу. Поскольку, как правило, мерзлые льдистые образования залегают глубже кровли

газосодержащих осадков, этот фактор в значительной мере препятствует прослеживанию вечномерзлых грунтов на временных сейсмоакустических разрезах.

В районах, где газосодержащие отложения имеют сплошной тип распространения, сейсмическая корреляция глубже кровли толщ рассматриваемых образований отсутствует. В районах, в пределах которых газосодержащие осадки развиты спорадически, сейсмическая корреляция имеет прерывистый характер.

На временных разрезах, полученных высокочастотными (2-20КГц) профилографами типа boomer, ringer, chirp и др. при энергии источника менее 0.3КДж (высокочастотная модификация) глубина распространения упругих колебаний обычно ограничивается кровлей газосодержащих образований. Как правило, глубина освещения разреза с применением этих систем не превышает 0.03с (20-25м) при разрешении 0.1-0.3м. В основном по этим временным разрезам удается проследить акустическую структуру и подошву толщ приповерхностных голоценовых осадков и неконсолидированных глинистых образований каргинского и ленинградского горизонтов. В консолидированных глинистых образованиях неоплейстоцена, а также в газосодержащих песках высокочастотный сигнал интенсивно затухает.

Использование более мощных электроискровых источников (5-10КДж) при относительно низких частотах 0.3-1.2КГц (низкочастотная модификация) позволяет достигнуть значительно большей глубины освещения разреза (до 0.2-0.3с или 100-150м) при разрешении 2-5м. При этом часто удается выделять и прослеживать отражающие горизонты ниже кровли газосодержащих отложений.

Скорости распространения сейсмических волн в толщах осадков, включающих как газосодержащие, так и мерзлые льдистые образования изменяются в широком диапазоне. Для талых (не мерзлых) образований характерные значения скоростей продольных волн составляют 1400-1800м/с. В мерзлых интервалах они достигают 2000-2500м/с. В осадках, содержащих сводный газ, эти значения понижаются до 800-1200м/с. При этом, скорости поперечных волн могут составлять 300м/с и ниже [4, 6].

Обсуждение результатов

При интерпретации временных сейсмоакустических разрезов, полученных в районе распространения многолетнемерзлых пород, первоочередной задачей представляется выделение отражающей границы, соответствующей кровле толщи (массива) льдистых отложений. Основываясь на общих представлениях о физической сущности изучаемого объекта (многолетнемерзлых пород) следовало бы ожидать, что отражающая граница, соответствующая кровле мерзлой толщи, будет иметь высокую амплитуду и являться секущей по отношению к литолого-стратиграфическим элементам акустической структуры, а также быть конформной поверхности дна. Предполагалось, что в целом она должна напоминать отражающие границы типа BSR (bottom simulated reflector- отражающая граница типа «второе дно»), соответствующие кровле осадков, содержащих газовые гидраты.

Сопоставление сейсмоакустических временных разрезов с материалами бурения показало, что эти представления о природе отражающих границ толщ и массивов являются ошибочными. Прежде всего, нужно отметить, что на участках развития многолетнемерзлых отложений, выявленных по данным бурения, отсутствуют какие-либо отражающие границы с протяженными осями синфазности, которые можно было бы связать с кровлей или подошвой мерзлых толщ (массивов).

На временных разрезах высокочастотной модификации сейсмоакустического профилирования во временных интервалах, соответствующих кровле мерзлой толщи чаще всего наблюдается практически полное затухание сигнала (Рис. 1). Вероятно, это связано с рассеиванием

высокочастотных волн среди ледяных неоднородностей (ледяных линз, гнезд, шпиров и т.п.), содержащихся в кровле мерзлой толщи.

В пределах участков развития мерзлых льдистых отложений, где свободный газ содержится в осадках спорадически и не препятствует распространению упругих волн, на временных разрезах, полученных с помощью низкочастотной модификации сейсмоакустического профилирования, наблюдается ухудшение или полная потеря сейсмической корреляции (Рис. 2).

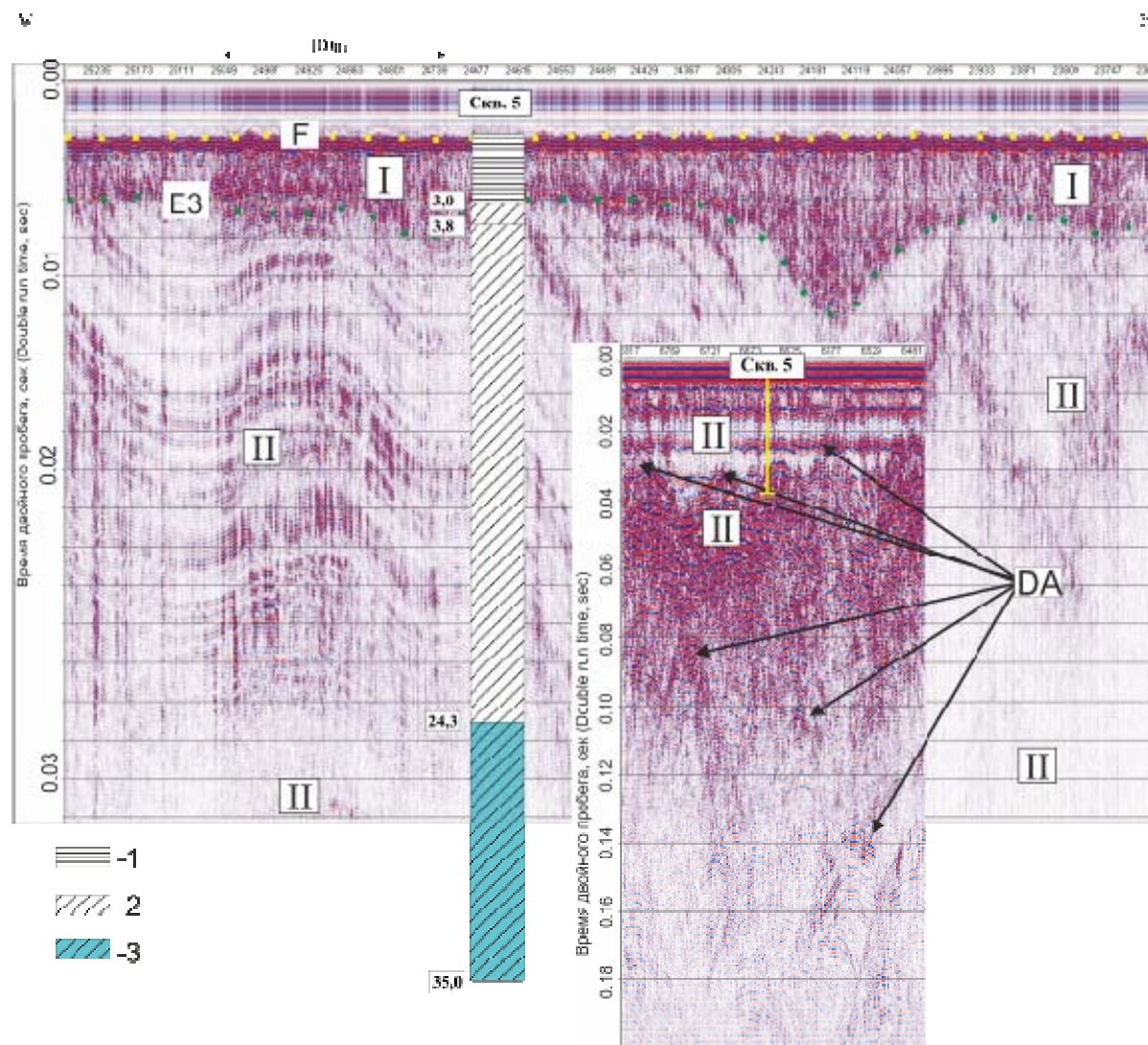


Рис. 1. Временной разрез, Карское море, залив Шаранов Шар, профилограф X-Star (EG&G) с частотно-модулированным сигналом 2-7.5КГц. В интервалах времени соответствующих кровле мерзлой толщи отмечается затухание сигнала. На врезке-фрагмент низкочастотного (300-1000Гц) временного разреза. На временах, соответствующих интервалу развития мерзлых образований наблюдается потеря сейсмической корреляции и дифракционные оси. I-II- стратиграфия: I- современные аллювиально-морские осадки (amH^2), II- осадки каргинского горизонта ($amIII^3kr$) зырянского надгоризонта; Скв.5- инженерно-геологическая скважина (подписи слева- глубина залегания подошвы слоя в метрах от поверхности дна); F- поверхность дна, E3- подошва толщи аллювиально-морских голоценовых осадков, DA- дифракционные оси; 1-3 литология по скважинам: 1- глина, 2- суглинок, 3- льдистый суглинок;

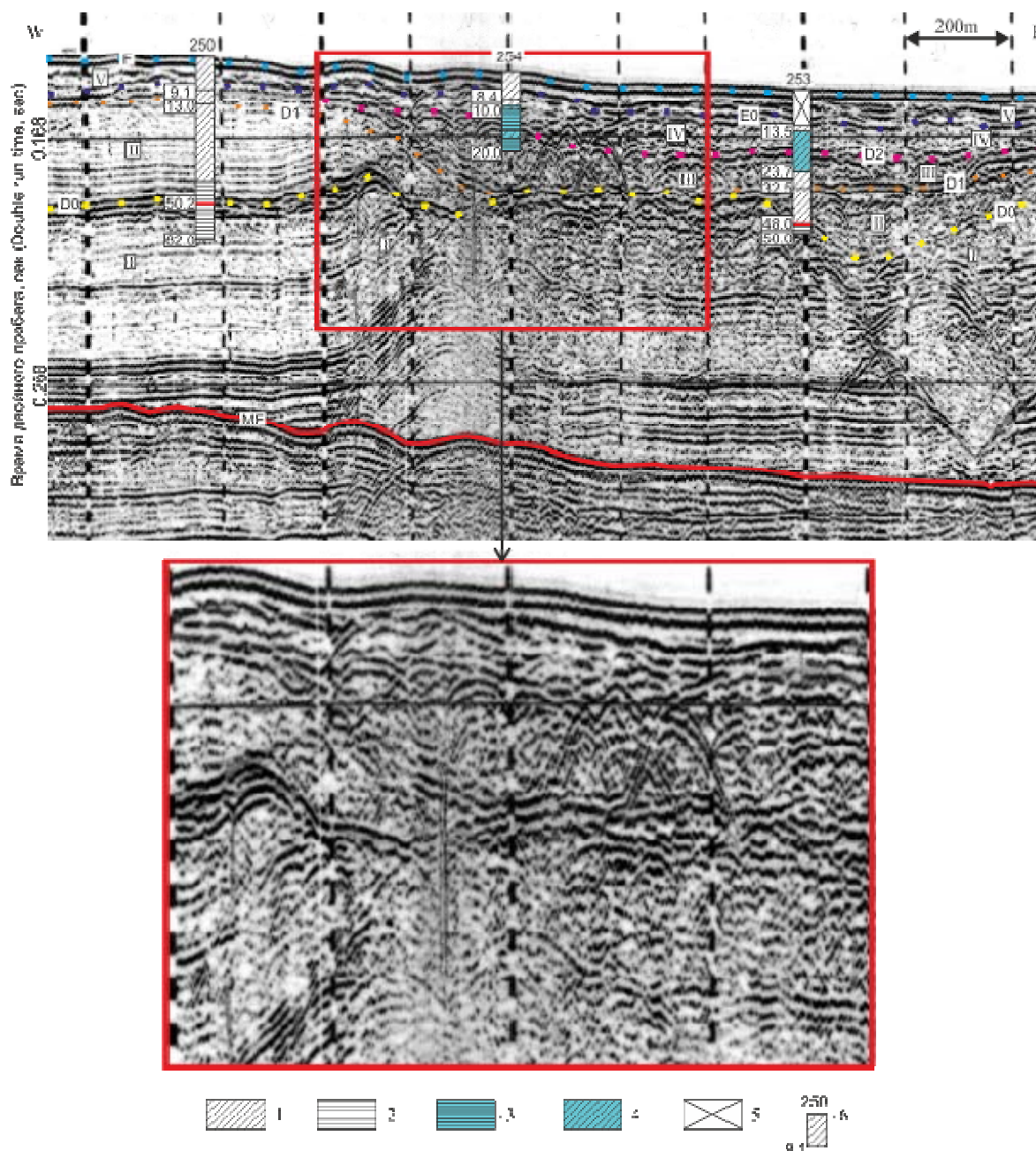


Рис. 2. Временной разрез, Карское море, площадь Русановского месторождения, спаркер, частоты 300-1000Гц. На участке распространения мерзлых льдистых грунтов между скважинами 254 и 253 отмечается резкое ухудшение сейсмической корреляции и многочисленные дифракционные оси. На периферии мерзлого массива наблюдается воздымание отражающих границ, обусловленное дефектом скорости.

I-V- стратиграфия: I- палеоценовые отложения (P₁), II- аллювиально-морские, морские эоплейстоценовые отложения (ат-тс), III- отложения ямальской серии (т-гтI-Пут), IV- отложения казанцевской свиты (тIII¹kz), V- осадки каргинского горизонта (атIII³kr) зырянского надгоризонта; 1-5- литология по скважинам: 1- суглинок, 2- глина, 3- льдистая глина, 4- льдистый суглинок, 5- интервал бескернового бурения; 6- инженерно-геологическая скважина: сверху- номер скважины, слева- глубина залегания подошвы слоя в метрах от поверхности дна; D0-F- региональные отражающие горизонты: D0- подошвы четвертичной толщи, D1- подошва ямальской серии, D2- подошва казанцевской свиты, E0- подошва зырянского надгоризонта, F- поверхность дна, MF- отражения, кратные поверхности дна.

Особо следует обратить внимание на то, что в границах участков развития мерзлых образований на временных разрезах отмечаются области сосредоточения многочисленных дифракционных осей. Кроме того, в некоторых случаях в периферийных областях мерзлых массивов иногда наблюдается резкое воздымание отражающих границ. Очевидно, что это связано с дефектом скоростей сейсмических волн.

В районах сплошного распространения газосодержащих осадков массивы, сложенные мерзлыми отложениями, по изменениям качества сейсмической корреляции не выделяются, т.к. она в основном зависит от условий распространения газосодержащих образований. Вместе с тем, здесь на участках развития мерзлых льдистых отложений также наблюдается сосредоточение множественных дифракционных осей (Рис. 3)

Вероятно, дифракционные оси, наблюдаемые на временных разрезах, на участках развития мерзлых отложений, продуцируются льдистыми неоднородностями. Безусловно, что дифракционные оси могут быть образованы не только льдистыми включениями, они формируются и в осадочных толщах, содержащих, например, включения валунно-глыбового материала и другие неоднородности. Однако, в пределах рассматриваемого региона не мерзлые отложения, содержащие подобные неоднородности и формирующие аналогичную картину записи на временных разрезах, отсутствуют. Это позволяет рассматривать сосредоточение дифракционных осей как достаточно четкий критерий выделения многолетнемерзлых отложений в пределах Печорского и юго-западной части Карского морей.

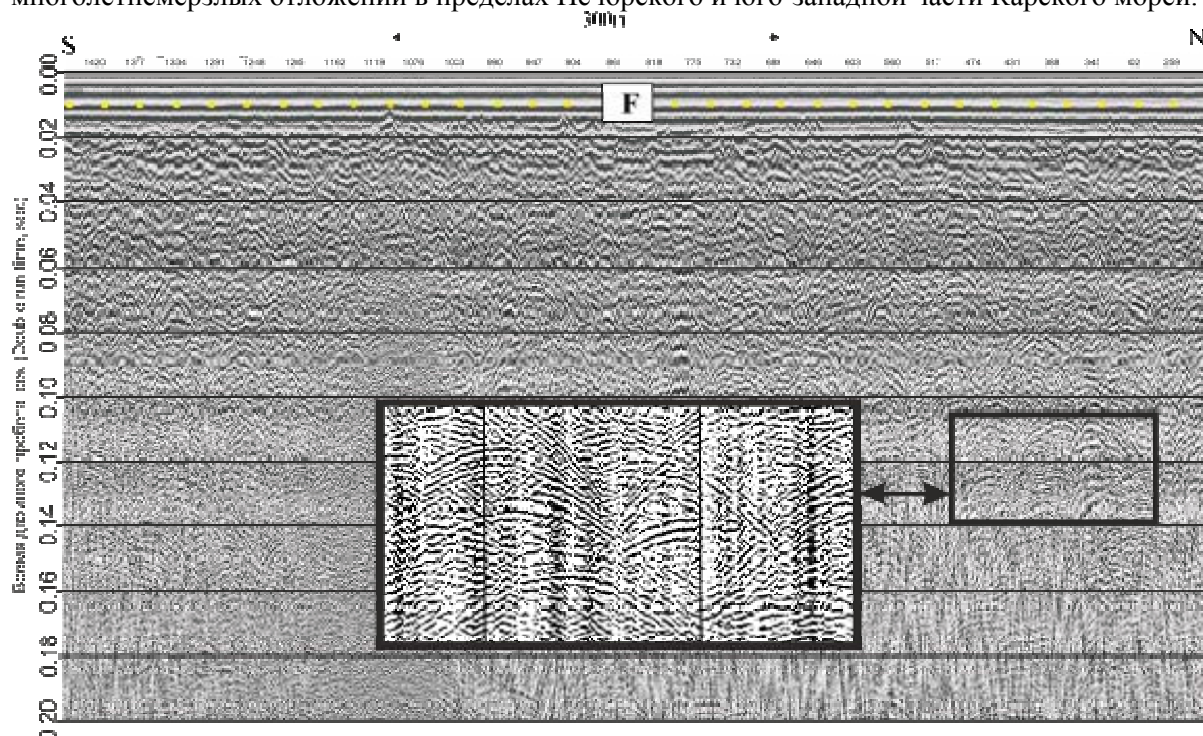


Рис. 3. Временной разрез (спаркер, частоты 300-1000Гц), Карское море, район м. Харасавэй. Сосредоточение множественных дифракционных осей на участке развития мерзлых льдистых отложений и газосодержащих осадков при практически полном отсутствии сейсмической корреляции.

Выводы

1. Выделение участков распространения льдистых мерзлых массивов можно проводить на временных разрезах, полученных при помощи низкочастотной модификации в диапазоне частот 300-1000Гц и разрешении 2-5м. Временные разрезы, получаемые с помощью высокоразрешающих профилографов, для решения этой задачи непригодны.
2. На временных разрезах, полученных на участках распространения многолетнемерзлых льдистых пород, отражающие границы с протяженными осями синфазности, которые можно было бы отождествить с кровлей или подошвой мерзлых толщ (массивов) отсутствуют.
3. В районах, где газосодержащие осадки развиты спорадически, участкам распространения мерзлых льдистых отложений на временных разрезах соответствуют области ухудшения и (или) полной потери сейсмической корреляции, а также зоны сосредоточения множественных дифракционных осей.
4. В районах, где газосодержащие осадки имеют сплошное распространение, на участках распространения мерзлых отложений наблюдаются области сосредоточения множественных дифракционных осей. При этом наличие или отсутствие в разрезе мерзлых образований на изменения качества сейсмической корреляции здесь не влияет.

Библиография

1. Бондарев В.Н., Длугач А.Г., Костин Д.А., Лисунов В.К., Рокос С.И. Акустические фации посткриогенных обстановок мелководных районов Печорского и Карского морей // Разведка и охрана недр, №7-8, 1999, с.10-14
2. Бондарев В.Н., Длугач А.Г., Костин Д.А., Рокос С.И., Полякова Н.А. Подмерзлотные скопления газа в верхней части осадочного чехла Печорского моря // Геология и геофизика, Том 43, №7, 2002, с. 587-598
3. Рокос С.И., Длугач А.Г., Костин Д.А. Свободный газ и многолетняя мерзлота в осадках верхней части разреза мелководных районов шельфа Печорского и Карского морей / Седиментологические процессы и эволюция морских экосистем в условиях морского перигляциала. Апатиты: Изд. КНЦ РАН, 2001. С. 40-52
4. Рокос С.И. Инженерно-геологические особенности приповерхностных зон аномально высокого пластового давления на шельфе Печорского и южной части Карского морей // Инженерная геология, №4, 2008, с. 22-28
5. Рокос С.И., Длугач А.Г., Локтев А.С., Костин Д.А., Куликов С.Н. Многолетнемерзлые породы шельфа Печорского и Карского морей: генезис, состав, условия распространения и залегания. Инженерная геология, 2009, №10, 2009, с. 38-41
6. Rokos S.I. Acoustical and physical properties of gassy sediments of the Petchora and Kara seas, Workshop, 14 - 15 January, 2013, Helsinki, Finland, Finish Meteorological Institute.

Контактная информация

- Куликов Сергей Николаевич, начальники комплексной геологической партии ОАО АМИГЭ, т.8-815-2 45-23-72, e-mail kulikov@amige.murmansk.ru
- Рокос Сергей Игоревич, ведущий геолог, т.8-815-2 45-23-72, e-mail s_rokos@amige.murmansk.ru
- Тулапин Александр Владимирович, ведущий геофизик, т.8-815-2 45-23-72, e-mail Alexandr.Tulapin@amige.ru

Ссылка на статью:

Куликов С.Н., Рокос С.И., Тулапин А.В. О критериях выявления массивов многолетнемерзлых пород в Печорском и юго-западной части Карского морей на временных разрезах сейсмоакустического профилирования // Инженерная геофизика 2014. Материалы конференции. 21-25 апреля 2014 г. Геленджик: 2014. С. 1-8.