doi:10.24412/2687-1092-2021-8-246-251

СКОРОСТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДИАПИРОПОДОБНЫХ СТРУКТУР В ПЕЧОРСКОМ МОРЕ

Тулапин А.В., Рокос С.И., Длугач А.Г.

АО «АМИГЭ», Мурманск, Россия; TulapinAV@rusgeology.ru, RokosSI@rusgeology.ru

«Ледовые диапиры», также известные как пингоподобные структуры (Pingo-like features)- сложные геоморфологические образования, сложенные многолетнемерзлыми льдистыми отложениями, которые распространены в пределах Арктического шельфа. Пингоподобные структуры, в силу особенностей своей эволюции, часто ассоциируются с газовыми «карманами», которые генетически приурочены к подошве мерзлой толщи. Газовые «карманы», как показывают результаты бурения, могут быть связаны с зонами аномально высокого пластового давления (АВПД), которые, в свою очередь, коррелируются с высокой степенью геотехнических рисков при бурении. В данной статье рассмотрены результаты методики скоростного моделирования PLF и пост-стэк сейсмические маркеры зон АВПД ассоциирующихся с PLF.

Ключевые слова: *«ледовые диапиры», сейсмический атрибут, газовые “карманы”, геотехнические риски, высококонтрастная отражающая граница*

Введение

Пинго (булгунняхи), хорошо известные ландшафтные структуры, развитые в пределах многолетнемерзлых пород (ММП) на суше [*Андреев, 1936*]. Данные образования представляют собой холмообразные поднятия, сложенные многолетнемерзлыми льдистыми отложениями. В море, похожие формы рельефа (также известные в западной литературе как “Pingo-like features” (PLF)) были впервые описаны Shearer [*Shearer et al., 1971*] при изучении особенностей шельфовой зоны моря Бофорта. Позже, в 1987 г. аналогичные структуры были встречены в пределах отечественного Арктического шельфа. Обнаруженные в пределах Печорского моря, первые комплексные геолого-геофизические исследования PLF в России и их анализ, по-видимому, стоит связывать с пионерными исследованиями, проведенными АО АМИГЭ в 1996 г. [*Длугач и др., 1996*]. Позже, результаты исследований PLF в Печорском море были обобщены Бондаревым и др. [*Бондарев и др., 2002*]. Несколько позднее, пингоподобные структуры были встречены в Карском и Восточно-Сибирском морях, а также в море Лаптевых [*Rekant et al, 2005*; *Serov et al, 2015*].

Происхождение PLF до сих пор является предметом дискуссии [*Shearer, 1976; Paul, 2007; Бондарев и др., 2002*], однако, большинство исследователей данных образований сходятся во мнении, что ледовые диапиры, так или иначе, могут быть связаны с проявлениями газа, концентрирующегося вблизи PLF и формирующего зоны АВПД. Такие зоны АВПД, как показывает опыт, могут быть сопряжены со значительными геотехническими рисками при разведочном бурении. Ярким примером может служить аварийная ситуация, произошедшая с буровым судном АО «АМИГЭ» «Бавенит» в 1995 г., который при изучении (бурении) вблизи «ледовых диапиров» столкнулся с выбросом приповерхностного газа из инженерно-геологической скважины [*Бондарев и др., 2002*].

В настоящей статье приводится анализ мониторинговых сейсмоакустических работ места аварии бурового судна «Бавенит» (1995 г.) проведенных во время полевого сезона 2021 г.

Скоростной профиль ММП

Кровлю ММП на сейсмических разрезах часто принято характеризовать в виде высоконтрастной границы обусловливающий раздел мерзлых и не мёрзлых пород. Несмотря на общепринятое представление о резком градиенте скоростей на разделе этих двух сред, серия исследований и лабораторных тестов, показывает, что скорость продольных волн в ММП во многом зависит от объемного содержания льда в поровом пространстве, а также, от гранулометрического состава мерзлых пород [*Brothers et al, 2012*] и может варьировать в широком диапазоне от 2300 м/с до 5000 м/с. Данные скоростного моделирования в песках, например, показали, что при объемном содержании льда в порах от 0 до 40 %, изменение скоростей характеризуется интервалом от 2.5 км/с до 2.8 км/с; при содержании льда от 40% до 100 % - до 4.35 км/с [*Johansen et al., 2003*]. Согласно Длугач и др. [*Длугач и др., 1996*], скоростной диапазон 2.7-3.1 км/с в ММП характерен для ледогрунтов; интервал от 1.8 км/с до 2.2 км/с, с большой степенью вероятности стоит относить к мерзлым суглинкам.

Методы полевых геофизических исследований

Работы проводились на одном региональном геофизическом профиле общей протяжённостью около 200 км (Рис. 1). Исследования включали метод многоканального непрерывного сейсмоакустического профилирования (МНСАП) и съемку многолучевым эхолотом (МЛЭ). В настоящей статье проанализированы две части данного профиля (part_11 и part_12), одна из которых проходит 480 и 481.

Для проведения сейсмоакустических исследований использовалась 24-х канальная твердотельная сейсмическая коса (Geometrics, USA) и электроискровой источник типа «Спаркер» (Геодевайс, Россия). Параметры съемки, следующие: шаг между каналами- 3.125 м; длина косы- 75 м; шаг между пунктами взрыва- 1.56 м; минимальное удаление «источник-первый канал» - 9.35; скорость судна 3.8-4.2 узла. Многолучевое эхолотирование выполнялось оборудованием SeaBat T50, (при максимальной развертке луча 150°).

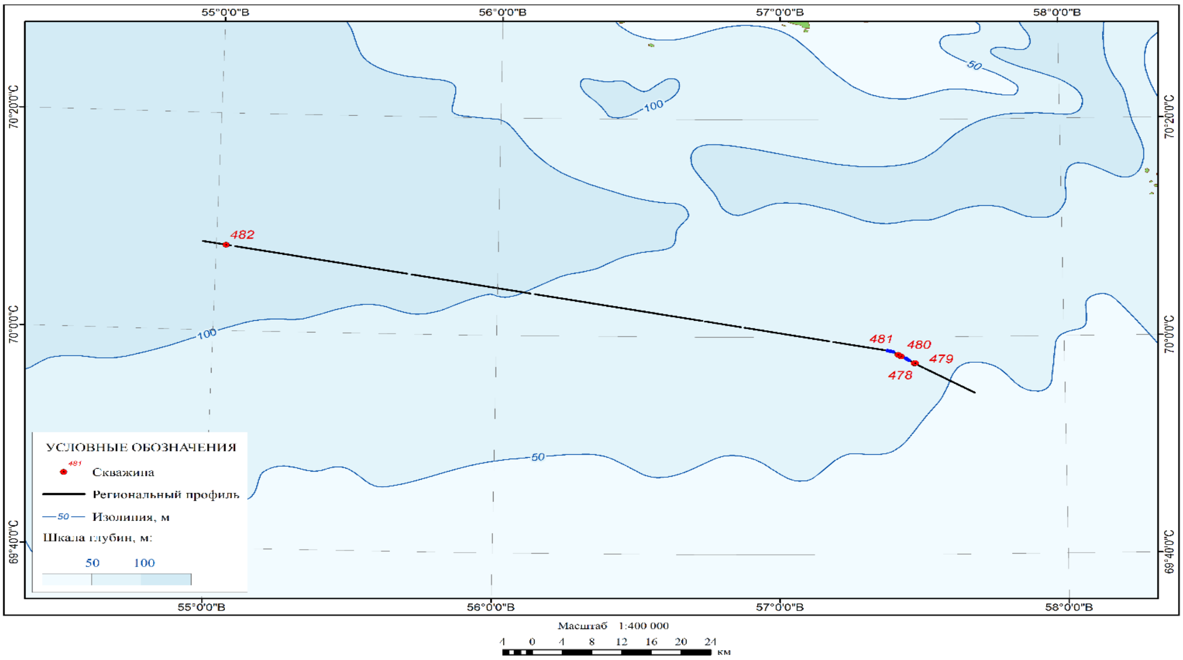

Рис. 1. Обзорная карта района работ. Синим цветом выделены части регионального профиля Part_11 и Part_12.

Результаты и обсуждение

Исследуемая в данной статье диапироподобная структура (Рис. 2-А) имеет размеры в плане около 140 м в длину (с ю-з на с-в), 115 м (с ю-в на с-з) в ширину. Максимальное превышение над дном составляет около 15 м.

При исследовании данного ледового диапира было пробурено две скважины (Рис. 2-В): скважина 480, была заложена в центральной части свода диапироподобной структуры;

скважина 481, располагалается на некотором удалении. Расстояние между скважинами составляет 444 м.

На месте бурения скважины 481, в результате выброса газа, находящегося под большим давлением, образовалась воронка, диаметром около 15 м и глубиной порядка 3.5 м (Рис. 2-С).

Обработка данных МНСАП проводилась согласно стандартного графа, включающего подавление когерентных и некогерентных помех, подавления кратных волн, детерминистическую деконволюцию и миграцию.

Для оценки скоростей профиля ММП в районе исследования диапироподобных структур, было предложено три подхода моделирования: линейное (во времени и пространстве); линейное во времени и нелинейное в пространстве; нелинейное во времени и пространстве. Принципы методик моделирования скоростей- предмет отдельных обсуждений и в данной статье, в виду емкости изложений, не приведены. Однако, результаты сравнения показывают (не приведены), что последний алгоритм наиболее близко отражает физико-геологическую картину строения PLF. Используя данную модель, сейсмоакустический разрез по фрагменту Part_11 был пересчитан из временной в глубинную область (Рис. 3-А).

Для оценки и сравнения динамики волнового поля в месте бурения скважин 480 и 481, были рассчитаны разрезы по сейсмическим атрибутам “sweetness”, “bandwidth” (Рис. 3-В) и “dominant wavenumber” (Рис. 3-С).

Анализ разрезов сейсмических атрибутов “bandwidth” (абсолютное значение изменения огибающей сигнала) и “ dominant wavenumber” (среднеквадратичная оценка максимума амплитудного спектра волнового числа) показывает контраст последних в районах заложения скважин 480 и 481. Контрастная аномальная зона в призабойной части скважины 481 коррелируется нами с зоной АВПД, которая контролируется кровлей Казанцевско-каргинского комплекса (mQ_{III}^{1-3}), выступающей в роли покрышки. “Разуплотнение” аномалии, может объясняться частичным выходом газа со временем.

Выводы

- Методика нелинейного моделирования скоростей может быть использована для аппроксимации скоростной модели области развития диапироподобных структур;

- Характерной чертой диапироподобных структур в Печорском море является наличие аномальных областей у подошвы мерзлой толщи, ассоциирующихся с газовыми карманами и зонами АВПД, фиксирующимися на сейсмических изображениях;

- Пост-стэк атрибуты “bandwidth” и “ dominant wavenumber” эффективны для картирования зон АВПД, развитых в районах распространения диапироподобных структур.

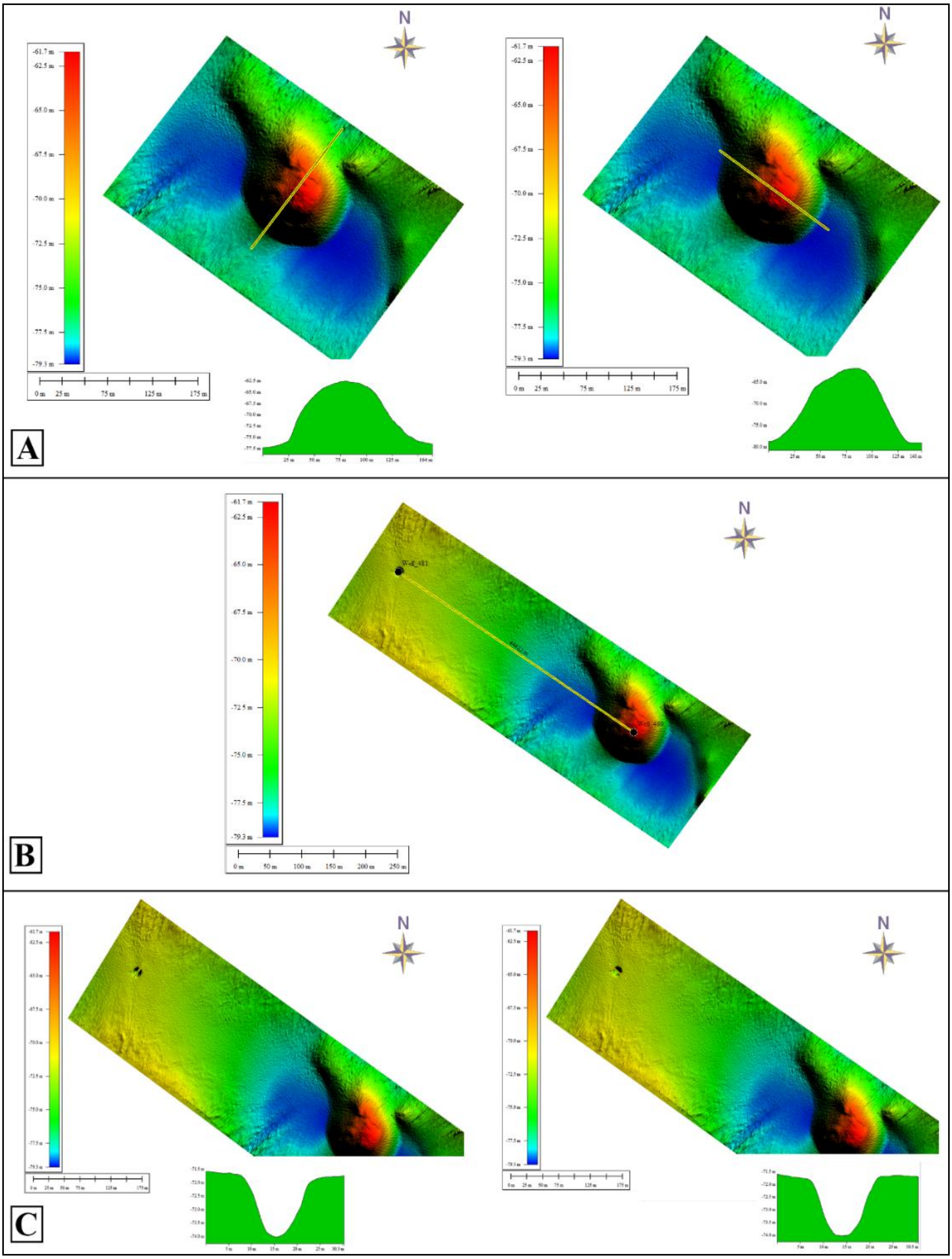

Рис. 2. Исследуемая диапироподобная структура. A- линейные размеры ледового диапира; B- расположение скважин 480 и 481; C- линейные размеры воронки в месте выхода газа.

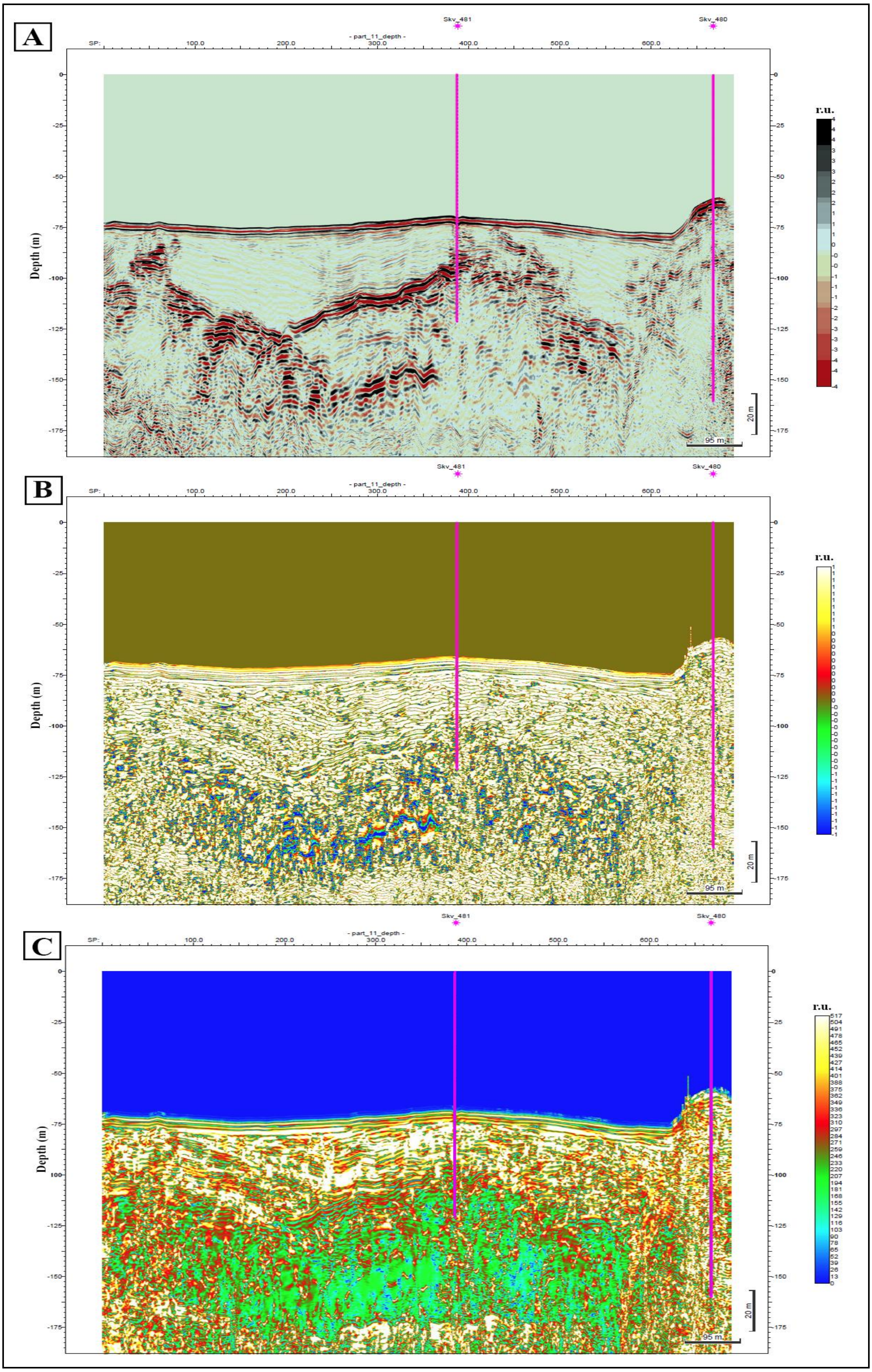

Рис. 3. Исследуемая диапироподобная структура на сейсмоакустическом разрезе. A- разрез амплитуд; B- разрез сейсмического атрибута “bandwidth” (призабойная часть скважины 481 характеризуется контрастной зоной, предположительно связанной с газом); C- разрез сейсмического атрибута “dominant wavenumber” (призабойная часть скважины 481 характеризуется ярко выраженной контрастной зоной, ассоциируемой с газом).

ЛИТЕРАТУРА

Андреев В.И. Гидролакколиты (булгунняхи) в Западно-Сибирских тундрах // Известия Государственного Географического общества. 1936. Том 68. Выпуск 2, с. 186-210.

Длугач А.Г., Антоненко С.В., Потапкин Ю.В. и др. "Изучение основных закономерностей, пространственного распространения и строения криолитозоны Баренцево-Карского шельфа в связи с поиском и освоением нефтегазовых месторождений". Тематический отчет №159, 1996. ГП АМИГЭ Министерства топлива и энергетики Российской Федерации.

Бондарев В.Н., Рокос С.И., Костин Д.А., Длугач А.Г., Полякова Н.А. Подмерзлотные скопления газа в верхней части осадочного чехла Печорского моря // Геология и геофизика, 2002, №7, с. 587-598.

Brothers L.L., Hart P.E., Ruppel C.D. Minimum distribution of subsea ice-bearing permafrost on the U.S. Beaufort Sea continental shelf // Geophys. Res. Lett. 2012. Vol. 39, L15501, doi:10.1029/2012GL052222

Johansen T.A., Digranes P., van Schaack M., Lonne I. Seismic mapping and modeling of near-surface sediments in polar areas // Geophysics. 2003. Vol. 68. Is. 2. P. 566–573. doi:10.1190/1.1567226

Paull C., Ussler W., Dallimore S.R., Blasco S.M., Lorenson T.D., Melling H., Medioli B.E., Nixon F.M., McLaughlin F.A. Origin of pingo-like features on the Beaufort Sea shelf and their possible relationship to decomposing methane gas hydrates // Geophys. Res. Lett., 2007. Vol. 34, L01603, doi:10.1029/2006GL027977.

Rekant P., Cherkashev G., Vanstein B., Krinitsky P. Submarine permafrost in the nearshore zone of the southwestern Kara Sea // Geo-Marine Letters. 2005. Vol. 25. Is. 2-3. P. 183-189. doi:10.1007/s00367-004-0199-5

Serov P., Portnov A., Mienert J., Semenov P., Ilatovskaya P. Methane release from pingo-like features across the South Kara Sea shelf, an area of thawing offshore permafrost // Journal of Geophysical Research: Earth Surface. 2015. Vol. 120. Is. 8. P. 1515-1529. doi:10.1002/2015JF003467

Shearer J.M., Macnab R.F., Pelletier B.R., Smith T.B. Submarine pingos in the Beaufort Sea // Science. 1971. Vol. 174(4011). P. 816-818. doi: 10.1126/science.174.4011.816

SEISMIC VELOCITY MODELING AND DYNAMIC ANALYSIS OF THE SEISMOACOUSTIC IMAGES OF PLF IN PECHORA SEA

Tulapin A.V., Rokos S.I., Dlugach A.G.

JSC «Arctic-Marine Engineer-Geological Expeditions», Murmansk, Russia
TulapinAV@rusgeology.ru , RokosSI@rusgeology.ru

«Ice-bounded diapirs», also known as Pingo-like features (PLF) are complicated geomorphological structures comprised of ice-bounded sediments which distributed along Arctic shelf. PLF, due to some specifics of evolution, are often associated with gas manifestation and formation of so called "gas pockets", which are genetically linked to the base of the permafrost deposits. "Gas pockets", as drilling data showed, might be related to abnormal formation pressure, which, in turn, can cause serious geotechnical hazards while drilling. In this paper, some velocity modeling techniques of PLF and post-stack seismic markers associated with the PLF- related abnormal formation pressure are discussed.

Keywords: *«ice-bounded diapirs», seismic attributes, gas "pockets", geotechnical hazards, high contrast reflector*