

ДЕГАЗАЦИЯ ЗЕМЛИ В АРКТИКЕ: КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ ФАКТОРОВ МОЩНОЙ ЭМИССИИ ГАЗА В МОРЕ ЛАПТЕВЫХ

В. И. Богоявленский

ФГБУН Институт проблем нефти и газа РАН (Москва, Российская Федерация)

А. Г. Казанин

АО «Морская арктическая геологоразведочная экспедиция» (Мурманск, Российская Федерация)

А. В. Кишанков

ФГБУН Институт проблем нефти и газа РАН (Москва, Российская Федерация)

Г. А. Казанин

АО «Морская арктическая геологоразведочная экспедиция» (Мурманск, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 10 марта 2021 г.

В Центрально-Лаптевском районе, где ранее была выявлена зона мощной эмиссии газа, проинтерпретированы временные разрезы, построенные методом общей глубинной точки (МОГТ) по 28 сейсмопрофилям АО «МАГЭ» суммарной протяженностью 5930 км. Обнаружено 519 аномальных объектов в придонных отложениях со средним шагом по сейсмопрофилям 11,4 км, потенциально связанных с залежами газа и каналами его субвертикальной миграции. В результате комплексного анализа впервые доказана приуроченность сипов газа в данном районе к глубинным разломам. Сделан высоковероятный прогноз, что в районе обнаруженных сипов (глубины от 50–60 до 110 м) мерзлые породы и газогидраты отсутствуют, а сипы обусловлены прямой миграцией газа с больших глубин. На континентальном склоне моря Лаптевых по временным разрезам МОГТ выделен отождествляемый с подошвой газогидратов горизонт BSR (bottom simulating reflector) и уточнена зона его распространения, ранее выявленная авторами.

Ключевые слова: море Лаптевых, сейсморазведка МОГТ, сипы газа, эмиссия газа, термогенный газ, газовые карманы, газовые гидраты, горизонт BSR.

Введение

В последние десятилетия вопросам дегазации Земли уделяется большое и постоянно увеличивающееся внимание мирового научного сообщества [1—50]. Главным образом это обусловлено происходящим потеплением климата, которое объясняется как естественными циклическими изменениями [19; 25], так и ростом концентрации парниковых газов в атмосфере антропогенного генезиса [12; 40 и др.]. По данным Национальной океанической и атмосферной администрации США (NOAA), базирующимся на измерениях содержания газов в атмосфере в глобальной сети пунктов отбора проб воздуха,

в 2010—2019 гг. наблюдался средний ежегодный рост содержания метана в атмосфере около 7,5 ppb [32]. В 2020 г., по предварительным данным NOAA, вопреки снижению объемов производства и выбросов парниковых газов, обусловленному пандемией COVID-19, прирост глобального содержания метана в атмосфере практически удвоился. Одним из основных объяснений роста объемов эмиссии метана в Арктике, происходящей на суше преимущественно со дна термокарстовых озер [9; 47] и со дна мелководных акваторий арктических морей [16; 21; 43—45], является деградация многолетнемерзлых пород (ММП) [12; 16; 21].

Большая часть площади акваторий Северного Ледовитого океана обладает благоприятными термобарическими условиями для образования газовых

гидратов (ГГ — преимущественно гидраты метана) или их сохранения в метастабильном состоянии [14; 23; 27]. Очевидно, что для образования ГГ кроме термобарических условий необходимо наличие в пластах-резервуарах газа и воды, поэтому залежи ГГ существуют не повсеместно. Из-за дефицита воды при образовании ГГ в промерзающей толще возможно сохранение залежей газа в свободном состоянии (газовые карманы — gas pockets), сформировавшихся до или во время существования ММП.

Выявление зон дегазации и анализ генезиса выходов (сипов) углеводородов способствует повышению успеха нефтегазопроисловых работ [35; 49]. Вместе с тем природная и техногенная дегазация Земли нередко приобретает вид мощных выбросов и взрывов газа, несущих большие угрозы жизнедеятельности человека, включая проведение нефтегазопроисловых работ, функционирование нефтегазовой и угольной отраслей в Арктике [2—4; 10; 17]. Из-за выбросов приповерхностного газа (shallow gas) погибли многие сотни буровых установок на суше и акваториях Мирового океана, нередко со всем персоналом или с его частью [2; 3].

На основе анализа временных разрезов, построенных методом общей глубинной точки (МОГТ), доказан высокий уровень газонасыщенности ВЧР (верхняя часть разреза — глубины до 600—900 м от дна) акваторий арктических и субарктических морей России (Охотского, Лаптевых, Чукотского и Берингова) [5—8; 27; 28].

Во время последнего ледникового максимума мелководное дно акваторий морей Восточной Сибири было материковой сушей, в пределах которой под влиянием отрицательных температур образовалась мощная толща ММП (многие сотни метров, местами свыше километра) [2]. Благоприятные термобарические условия в толще ММП способствовали формированию залежей ГГ [14; 23].

В позднем плейстоцене-голоцене в результате постледниковой трансгрессии, начавшейся примерно 15 тыс. лет назад, оказались затопленными обширные низменные территории суши Сибири с ММП (до современных изобат около 110 м) [13]. Происходящие изменения термобарических условий способствуют деградации субаквальных ММП и переходу части ГГ в метастабильное состояние за счет эффекта самоконсервации [14; 15; 23] или их диссоциации. При этом высвободившийся газ сформировал залежи в природных ловушках или мигрировал по системам разломов и субвертикальных трещин в гидросферу и атмосферу.

Масштабы современного распространения субаквальных ММП и реликтовых ГГ остаются малоизученными, особенно на шельфе России. В ходе российских экспедиций на акваториях Арктики (включая море Лаптевых) не поднято ни одного образца ГГ, в то время как на акваториях других стран ГГ неоднократно извлекались и исследовались. Это не означает отсутствие ГГ на шельфе России, где

прогнозируются их основные ресурсы, а лишь свидетельствует об отсутствии планомерных специализированных исследований. Сказанное подтверждается тем, что в 2016 г. в ходе корейской экспедиции ARA07C на судне «IBRV Araon» на западном склоне Чукотского плато (Чукотский бассейн) на двух поднятиях в рельефе дна (координаты около 75,7° N, 169,75° W, глубины — 610—662 м) были подняты образцы ГГ [38]. Напомним, что разграничивающая линия между Россией и США в Чукотском море проходит по меридиану 169°. Отметим, что обнаруженные поля ГГ [38] никак не связаны с субаквальными ММП.

В последнее десятилетие шельф Восточной Сибири, включающий моря Лаптевых и Восточно-Сибирское, является объектом пристального внимания ученых различных организаций, включая Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева ДВО РАН, Стокгольмский университет, Аляскинский университет (Фэрбенкс), что обусловлено главным образом обнаружением зон активной эмиссии метана со дна в водную толщу [1; 16; 21; 24; 43—46]. По мнению многих исследователей, включая [21; 44; 45], метан в значительной степени выделяется из ГГ, которые диссоциируют по мере деградации субаквальных ММП при изменяющихся термобарических условиях, вызванных потеплением климата. При этом предполагается, что эмиссия метана будет усиливаться при дальнейшем таянии ММП, поскольку в ГГ сосредоточены огромные ресурсы газа. Высокая опасность данного процесса заключается в том, что шельф восточносибирских морей является мелководным (на 75% площади глубина моря составляет менее 50 м), и часть метана, выделяющегося через морское дно, не успевая раствориться в гидросфере, попадает в атмосферу, где нарушает баланс газов и усиливает парниковый эффект, что ведет к потеплению климата на Земле [21; 33; 34; 37].

Самая обширная зона распространения сипов газа (субширотной протяженностью свыше 200 км и до 60—90 км в меридиональном направлении) обнаружена в пределах Центрально-Лаптевского района — в северной части шельфа моря Лаптевых в основном на глубинах от 50—60 до 100—110 м (рис. 1) [1; 16; 21; 24; 43; 46]. При этом сипы газа (факелы) были зафиксированы при эхолокации.

Отмеченная выше зона активной разгрузки метана в Центрально-Лаптевском районе (см. рис. 1) является основным объектом комплексного исследования авторов данной статьи, которое включало анализ новейших сейсмических материалов ОАО «Морская арктическая геологоразведочная экспедиция» (ОАО «МАГЭ», с 2020 г. — АО «МАГЭ»), температур воды вблизи дна моря, а также условий существования ГГ. Необходимо отметить, что газонасыщенность ВЧР мелководного шельфа и центральной части континентального склона в региональном плане была исследована авторами в 2017—2018 гг. (см.

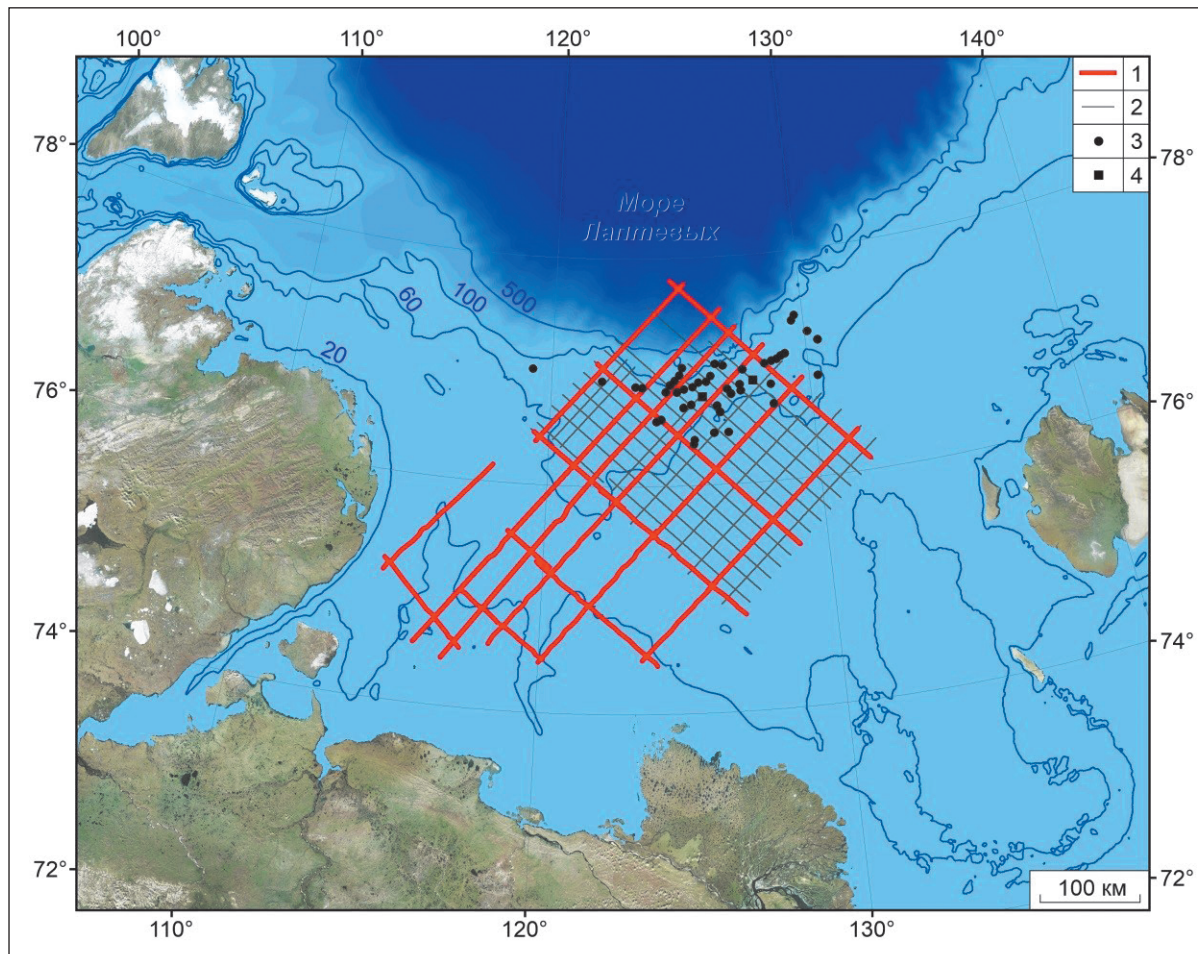


Рис. 1. Расположение сейсмопрофилей МОГТ АО «МАГЭ» в зоне активной эмиссии газа в море Лаптевых. Обозначения: 1 – сейсмопрофили, проанализированные в 2018 г. [6]; 2 – дополнительные сейсмопрофили в Центральном-Лаптевском районе; 3 и 4 – сипы газа по данным работ [1; 24; 43; 46], включая зоны их высокой концентрации (4) [24]. Основа рисунка – батиметрия GEBCO и космоснимок Bing

Fig. 1. Location of the JSC "MAGE" CDP seismic lines in the zone of active gas emission in the Laptev Sea. Legend: 1 – seismic lines analyzed in 2018 [6]; 2 – additional seismic lines in the Central Laptev Area; 3 and 4 – gas seeps based on [1; 24; 43; 46], including zones of their high concentration (4) [24]. The Figure basis is the GEBCO bathymetry and the Bing satellite image

ниже) [6], а потенциальная газогидратоносность — в работе [28]. В связи с большим интересом [1; 16; 21; 24; 43; 46] к обнаруженному крупному полю (полигону) сипов авторы решили провести анализ данных МАГЭ на детальном уровне с использованием всей сети сейсмопрофилей МОГТ.

Краткая характеристика района исследований

Море Лаптевых на западе граничит с Карским морем (по восточным берегам островов архипелага Северная Земля), на востоке — с Восточно-Сибирским морем (по Новосибирским островам), на юге — с побережьем Сибири, на севере граница условна и проходит по глубоководной части Северного Ледовитого океана [51]. Как уже было отмечено, море большей частью мелководное, однако в северной части на континентальном склоне глубина резко возрастает до 3385 м.

Геолого-геофизическая изученность моря Лаптевых преимущественно основана на данных трех этапов сейсморазведочных работ МОГТ. На первом этапе во времена СССР были проведены работы МОГТ с кратностью 12—48 — МАГЭ ПГО «Севморгеология» (СМНГ) в 1986—1990 гг., трестом «Севморнефтегеофизика» (СМНГ) в 1989 и 1991 гг., а также ЛАРГЕ в 1989 г. На втором этапе (1993, 1994 и 1997 гг.) сейсморазведка проводилась трестом СМНГ совместно с Федеральным институтом геолого-геофизических исследований и природных ресурсов Германии (BGR) с кратностью от 48 до 240. Общий объем данных МОГТ по первым двум этапам составил около 30 тыс. км сейсмопрофилей, имеющих неравномерное расположение и разное качество материалов. На третьем этапе (2005—2012 гг.) по госконтракту МАГЭ проведены работы с кратностью до 120 в объеме около 16,6 тыс. км. Кроме того, проводились эксклюзивные работы МОГТ по заказам нефтегазовых компаний.

В результате многолетних исследований показаны высокие перспективы нефтегазоносности шельфа моря Лаптевых, основанные на данных о значительной мощности мел-кайнозойского (возможно, и домелового) осадочного чехла, местами достигающей 14 км [52; 53]. Осадочный чехол шельфовой части моря Лаптевых разбит многочисленными разломами, формирующими Лаптевоморскую рифтовую систему [54—56]. Данная система сформировалась в палеоцене-эоцене, однако активизация рифтогенеза была в позднемiocен-плейстоценовое время [55]. В рельефе дна по данным сейсмоакустического профилирования выделяются разломы и грабены, свидетельствующие о существовании неотектонических движений, особенно широко развитых в рифтовой долине хребта Гаккеля вблизи континентального склона [57]. Практически весь Лаптевоморский регион характеризуется активной сейсмичностью [58], что делает системы разломов и субвертикальных трещин хорошо проницаемыми для вертикальной миграции газа.

Район исследований в данной работе с активными выходами газа находится в зоне сочленения Лаптевоморской рифтовой системы с Хатангско-Ломоносовской зоной разломов [59; 60] и хребтом Гаккеля [53]. В исследовании ученых Института океанологии РАН [1; 24] предполагается, что источником метана, выделяющегося через морское дно в зоне сипов, могут являться глубинные залежи углеводородов, откуда газ мигрирует к ВЧР по сети разломов, выделенных на основе сейсморазведки МОГТ первого и второго этапов (до 1997 г.) [55]. При этом отмечается наличие ММП и ГГ.

В 2017—2018 гг. была исследована газонасыщенность ВЧР моря Лаптевых на основе интерпретации временных разрезов МОГТ «МАГЭ» по региональной выборке сейсмопрофилей 2005—2009 гг. общей длиной 3550 км (см. рис. 1) [6]. В результате в Южно-Лаптевском, Юго-западном и Центрально-Лаптевском районах были выявлены 102 потенциально газонасыщенных объекта, находящихся преимущественно (около 78,4%) на глубинах до 200 м от морского дна, а также впервые выявлена зона распространения горизонта BSR (Bottom simulating reflector — псевдодонный отражающий горизонт), отождествляемого с подошвой зоны стабильности ГГ.

Комплексный анализ газонасыщенности верхней части разреза

В 2020—2021 гг. при комплексном анализе газонасыщенности ВЧР по Центрально-Лаптевскому району были использованы все 28 имеющихся временных разрезов МОГТ АО «МАГЭ» 2009 г. общей протяженностью около 5930 км (рис. 1 и 2). Данные профили составляют каркасную сеть с преимущественным расстоянием между ними 15 и 25 км в направлениях СЗ-ЮВ и СВ-ЮЗ соответственно (см. рис. 1 и 2). Полевые работы были проведены с научно-исследовательскими судами «Про-

фессор Куренцов» и «Геолог Дмитрий Наливкин» [61]. На обоих судах использовались сейсмические косы Sercel SEAL Sentinel Solid длиной 8100 м (648 каналов с шагом 12,5 м), кратность наблюдений — 120, длина записи — 12 с.

Анализ временных разрезов МОГТ проведен в программном комплексе IHS Kingdom. При этом выделялись аномалии сейсмической записи, указывающие на возможные залежи свободного газа. Такие аномалии определяются по шести основным признакам, которые далее в тексте указаны в цифровой индексации, принятой в предыдущих работах авторов [7; 8]:

- 1) резкое локальное повышение амплитуды отражений («яркое пятно»);
- 2) инверсия фаз отражений (смена полярности);
- 3) прогибание осей синфазности под аномалией, обусловленное уменьшением значений скорости распространения упругих волн в газонасыщенных отложениях;
- 4) аномальное поглощение высоких частот упругих колебаний;
- 5) наличие зоны акустической тени — ухудшение прослеживаемости сейсмических горизонтов под предполагаемой залежью газа;
- 6) наличие плоских осей синфазности, соответствующих отраженным волнам от газоводяного контакта.

Анализ временных разрезов МОГТ также включал выделение вертикальных зон нарушения прослеживаемости осей синфазности отраженных волн, указывающих на возможные пути миграции газа (газовые трубы — gas pipes, gas chimneys), ассоциируемых с разломами или зонами субвертикальной трещиноватости [30; 36]. Кроме того, проводилось выделение горизонта BSR по трем основным признакам [39]:

- субпараллельности поверхности морского дна;
- инверсии сигнала отражения (смена полярности);
- сечению слоистости осадочного чехла.

Сопоставление положений сипов газа и сейсмопрофилей показало, что в ряде случаев сипы оказались вблизи профилей или практически прямо на них (см. рис. 1 и 2). На рис. 3 представлен пример сопоставления аномальных объектов участка временного разреза LS0910 (длина 62 км) с сипами, спроецированными на линию профиля. При этом на рис. 3 отмечены расстояния сипов от профиля (в километрах), а латинскими буквами указаны направления их удаления. На пикете ОГТ 1000 (рис. 3А) сип находится в 0,4 км от профиля и совпадает с доходящим до поверхности осадочного чехла разломом, по которому, вероятно, газ мигрировал из глубинных горизонтов. На пикетах 1600—1800 расположена зона с высокой концентрацией сипов (рис. 3В), выделенных и исследованных в работе [24]. Данный участок уверенно коррелируется с вертикальной зоной нарушенной сейсмозаписи, наиболее вероятно, связанной с миграцией глубинного газа. На морском дне на месте

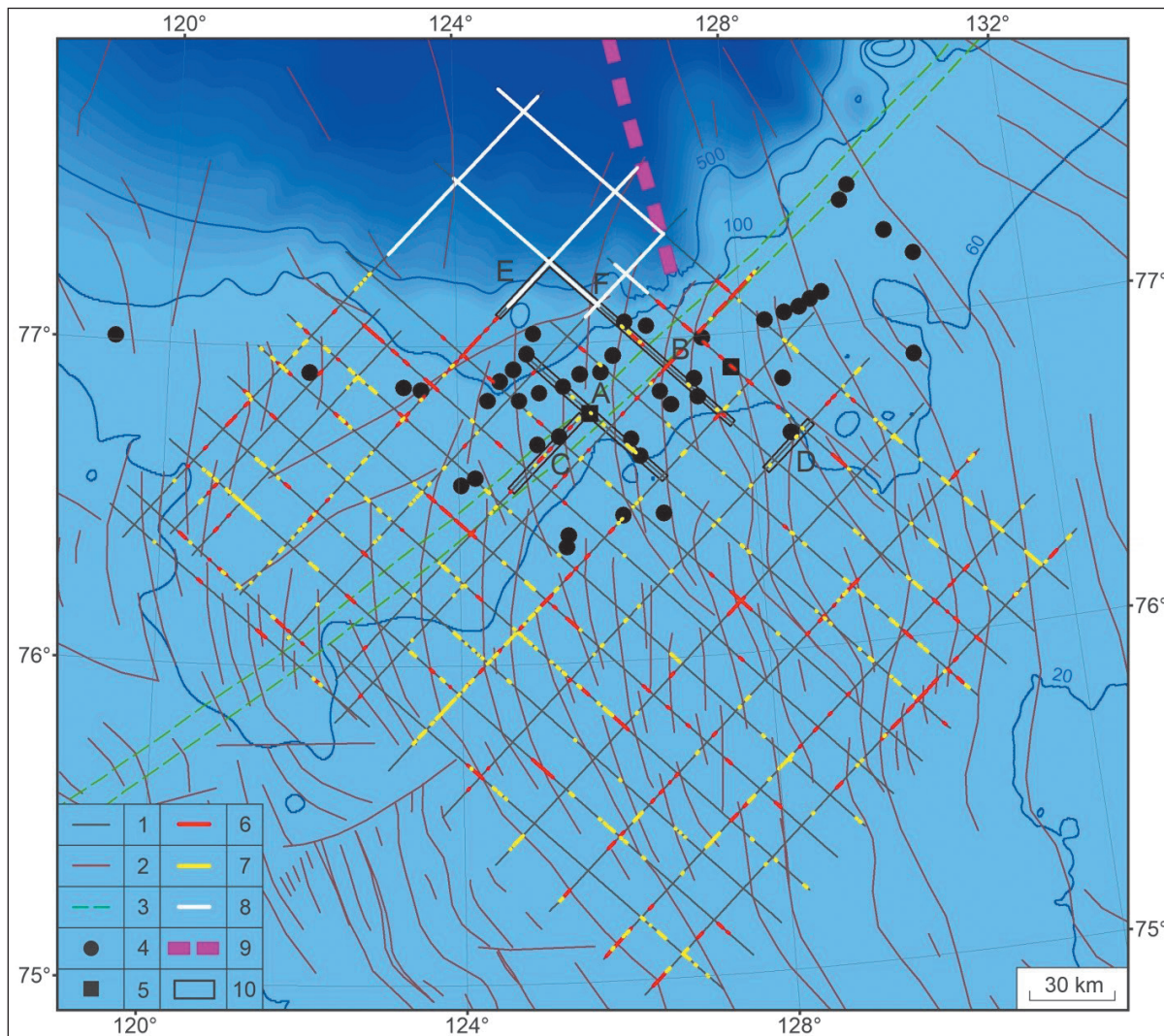


Рис. 2. Положение сипов газа, аномальных объектов в ВЧР и разломов, выделенных на временных разрезах АО «МАГЭ». Обозначения: 1 – сейсмопрофили; 2 – разрывные нарушения [61; 62]; 3 – Хатангско-Ломоносовская зона разломов [59; 60]; 4 и 5 – сипы газа [1; 24; 43; 46], в том числе участки с высокой концентрацией сипов газа (5); 6 – аномальные объекты, отождествляемые с залежами свободного газа в ВЧР; 7 – сейсмические аномалии, указывающие на возможные пути миграции газа; 8 – горизонт BSR; 9 – положение погребенной зоны спрединга хребта Гаккеля [53]; 10 – положение участков временных разрезов МОГТ, приведенных в данной работе: А – рис. 3, В – рис. 4, С – рис. 5, D – рис. 6, E и F – рис. 7

Fig. 2. The position of gas seeps, anomalous objects in the upper part of sedimentary cover and faults identified on the JSC “MAGE” seismic sections. Legend: 1 – seismic lines; 2 – faults [61; 62]; 3 – Khatanga-Lomonosov fault zone [59; 60]; 4 and 5 – gas seeps [1; 24; 43; 46], including zones of their high concentration (5); 6 – anomalous objects, associated with free gas deposits in the upper part of sedimentary cover; 7 – seismic anomalies, indicating possible gas migration paths; 8 – BSR horizon; 9 – the position of the buried spreading zone of the Gakkel Ridge [53]; 10 – the position of the fragments of the CDP seismic sections, given in the paper: A – fig. 3, B – fig. 4, C – fig. 5, D – fig. 6, E and F – fig. 7

многочисленных сипов газа наблюдается поднятие, возможно, образовавшееся из-за газодинамического воздействия газа, накапливающегося в придонных отложениях. На участке профиля с пикетами 2400—3000 (рис. 3С) один из сипов (пикет 2600) находится рядом с широкой зоной деструкции сейсмозаписи — газовой трубой, доходящей почти до поверхности морского дна. Сип на пикете 2950 расположен рядом с придонным участком, нарушенным разломами и антиклинальным сводом, отождествляемым с потенциальной залежью газа в ВЧР.

На рис. 4 приведен временной разрез участка профиля LS0912 длиной 57 км, рядом с которым находятся три сипа. На пикете 4700 сип практически совпадает с разломом, доходящим до поверхности осадочного чехла. Справа от разлома (пикеты 4750—5200) видна ярко выраженная аномалия с признаками наличия газа 1, 2, 3 и 4, вероятно, соответствующая тектонически экранированной крупной (до 8 км) залежи, из которой газ может просачиваться к дну по разлому и формировать сип (рис. 4В). Также разломы, уходящие на большие глубины, от-

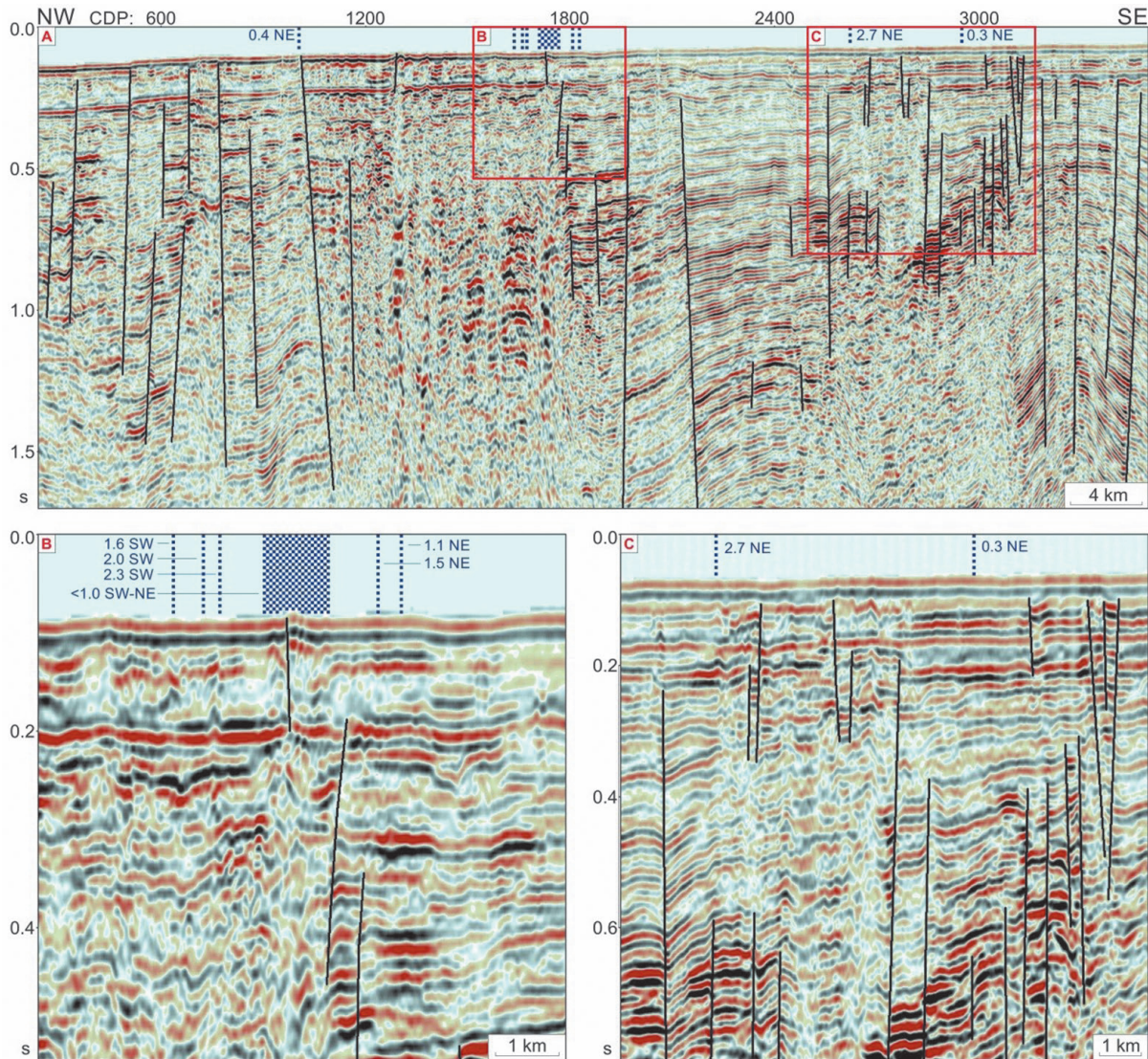


Рис. 3. Участок временного разреза LS0910 (A) с увеличенными объектами (B и C)
 Fig. 3. Fragment of the seismic section LS0910 (A) with zoomed objects (B and C)

мечены на пикете около 5200. Наиболее глубокий из этих разломов на времени 1,4—2,1 с проходит через зону с нарушенным сигналом, возможно, являющуюся каналом миграции газа — газовой трубой. Таким образом, по данной зоне и примыкающим разломам газ мог мигрировать к предполагаемой залежи из глубинных горизонтов. Над аномалией на пикетах 4900 и 5200 наблюдаются вертикальные зоны ослабленного сигнала — потенциальные каналы вертикальной миграции газа. При этом очевидно, что далеко не все сипы были выявлены в работах [1; 24; 43; 46]. Возле сипа на пикете 6630 аномалий и разломов у поверхности дна не наблюдается, однако ниже видны разрывные нарушения.

Наибольший интерес вызывает сип вблизи объекта на пикете 6400, показанный на увеличенном фрагменте рис. 4С. На морском дне в районе сипа видно поднятие предположительно газодинамиче-

ского генезиса (см. рис. 4С), а ниже наблюдаются разрывы осей синфазности и ослабление амплитуд отражений, вероятно, связанные с субвертикальным каналом подтока газа (газовая труба). Характерные искривления осей синфазности слева и справа от субвертикальной зоны разрывов, идущие плавно вниз, а затем круто вверх, легко отождествляются соответственно с кальдерой проседания и жерлом грязевого вулкана. Таким образом, специфика всего интервала сейсмических записей на рис. 4С позволяет предположить, что поднятие в рельефе дна — грязевулканическая постройка, а сам вулкан приурочен к разлому и является каналом миграции газа из глубоких горизонтов в гидросферу.

На участке временного разреза LS0922 длиной 35 км сипы находятся над антиклинальным поднятием, нарушенным рядом разломов (рис. 5). На пикете 5800 сип удален на 4,3 км от профиля, но распо-

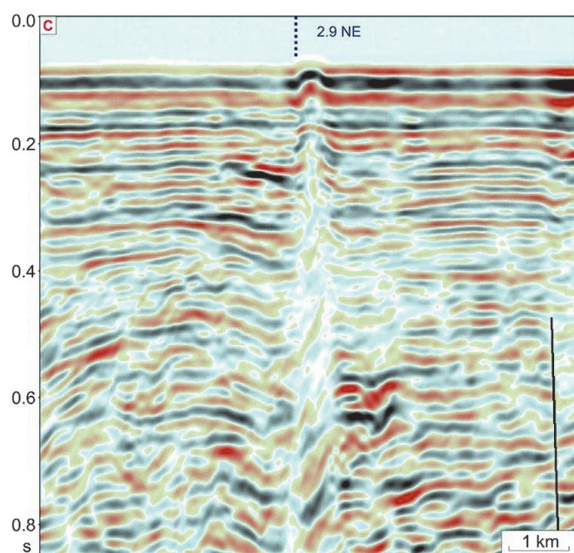
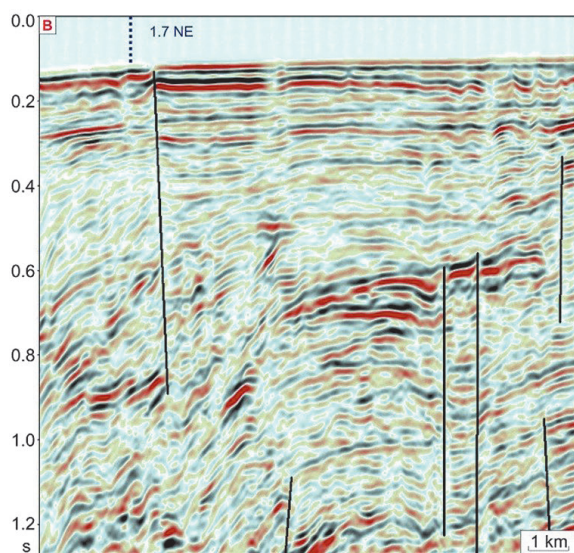
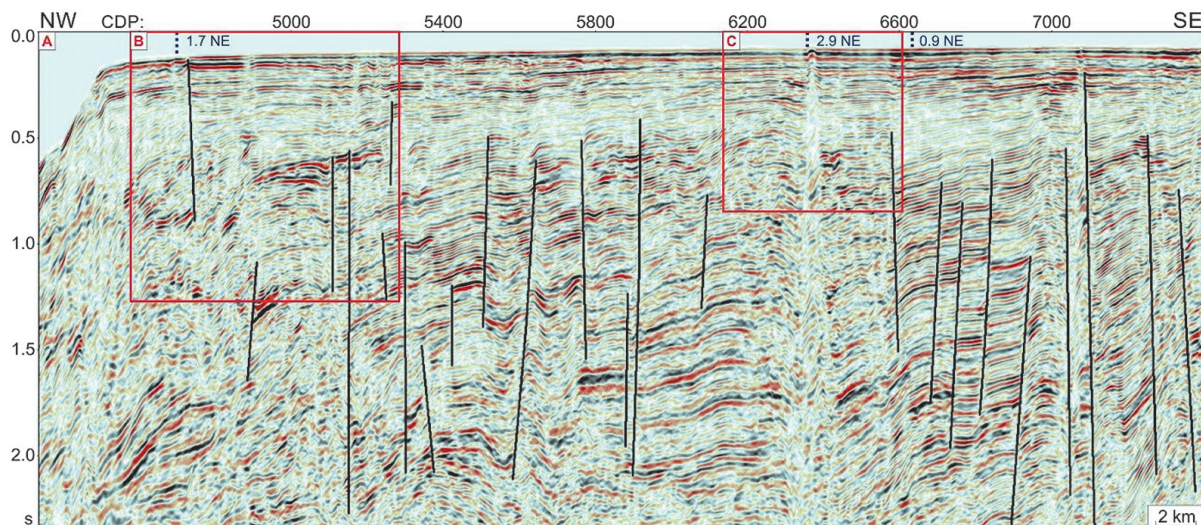


Рис. 4. Участок временного разреза LS0912 (A) с увеличенными объектами (B и C)
 Fig. 4. Fragment of the seismic section LS0912 (A) with zoomed objects (B and C)

ложен между двумя разломами, прослеживаемыми практически до дна моря. На пикетах 5600—5700 на времени 0,6—0,83 с наблюдаются яркие отражения — аномальный объект с признаками 1, 2, 4 и 6, из которого газ может мигрировать по разлому к поверхности осадочного чехла. Схожая ситуация наблюдается и около сипа вблизи пикета 6200.

На участке временного разреза LS0919 длиной 21 км сип находится прямо над узкой вертикальной зоной нарушенного сигнала — газовой трубой (рис. 6). Данная зона приурочена к разлому, достигающему до морского дна. В верхней части газовой трубы, у поверхности осадочного чехла, наблюдается аномалия с признаками 1 и 3 (локальное повышение амплитуды и прогибание оси синфазности), которая может быть связана с небольшой залежью газа в придонных отложениях.

Всего в ходе работы было проанализировано 28 временных разрезов МОГТ общей протяженно-

стью около 5930 км, на которых выделено 519 аномальных объектов со средним шагом 11,4 км (см. рис. 2). Большая часть объектов находится на глубинах до 200 м от морского дна, что согласуется с распределением аномалий в ВЧР, полученным нами в работе [6], и объясняется наличием активных систем разломов и субвертикальных трещин, местами достигающих до дна. На рис. 2 показано положение широкой сети разломов по кровле фундамента, выявленных по данным МАГЭ [62], многие из которых прослеживаются от фундамента до ВЧР и поверхности дна. Данная сеть разломов по детальности и площади охвата значительно превосходит схемы из работ [53; 55].

Важно особо отметить, что генезис большинства сипов газа, расположенных вблизи сейсмопрофилей, находит обоснование на временных разрезах и объясняется наличием каналов вертикальной миграции газа с больших глубин, обычно приуро-

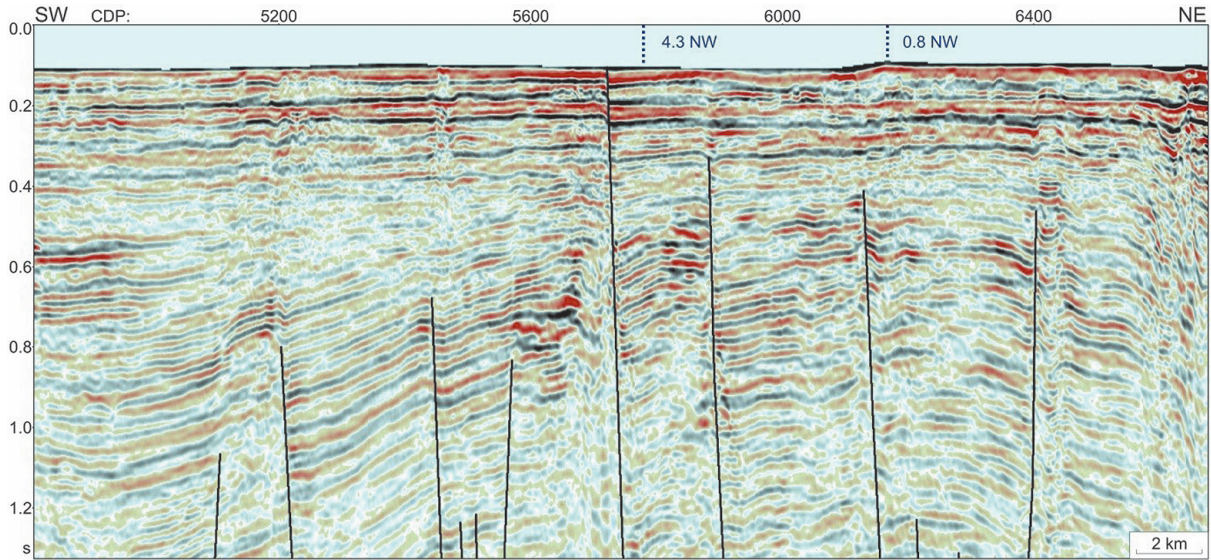


Рис. 5. Участок временного разреза LS0922
Fig. 5. Fragment of the seismic section LS0922

ченных к разломам. Кроме того, очевидно, что на площади исследований далеко не все сипы были выявлены, в том числе и вдоль сейсмических профилей МАГЭ.

Кроме аномалий, указывающих на залежи и пути миграции свободного газа, на участках 6 профилей МОГТ, выходящих на континентальный склон, наблюдается горизонт BSR, уверенно выделяемый по всем трем признакам, указанным выше. Впервые существование ГГ в данной зоне по признаку наличия горизонта BSR было спрогнозировано авторами в 2018 г. [6]. На комбинированном временном разрезе, относящемся к двум пересекающимся профилям LS0924 (A) и LS0912 (B) (рис. 7), видна

четкая взаимная увязка сейсмозаписей по всем отражающим горизонтам, включая BSR. Стоит отметить, что данная зона приурочена к глубинам морского дна свыше 240—270 м, где в настоящее время имеются благоприятные термобарические условия для образования и существования ГГ. Таким образом, здесь ГГ находятся в зоне благоприятных термобарических условий вне зон распространения ММП и не подвержены диссоциации, если не увеличится температура воды вблизи дна. Кроме того, на разрезе видны характерные выступы морского дна (LS — landslide), образовавшиеся в результате оползания придонных отложений на континентальном склоне.

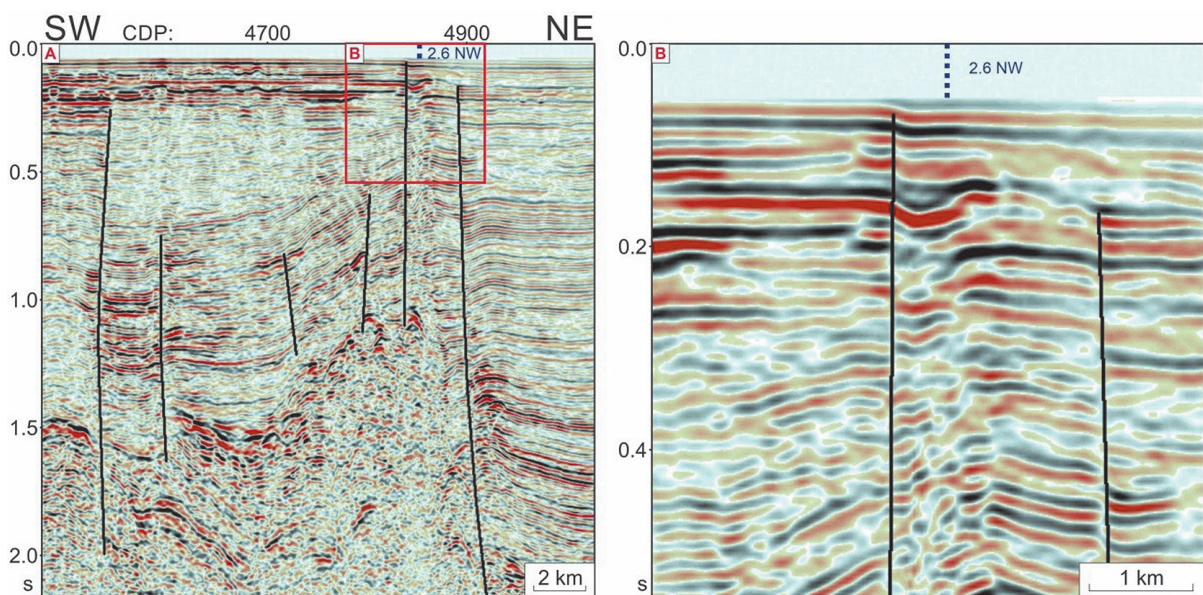


Рис. 6. Участок временного разреза LS0919 (A) с увеличенным объектом (B)
Fig. 6. Fragment of the seismic section LS0919 (A) with a zoomed object (B)

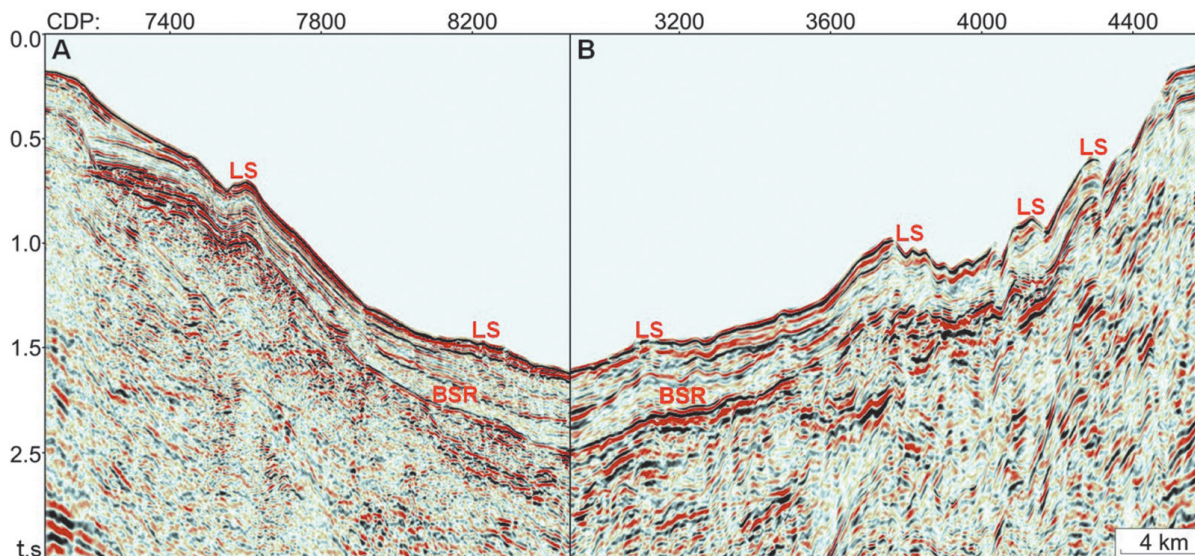


Рис. 7. Монтаж фрагментов временных разрезов LS0924 (А) и LS0912 (В) в море Лаптевых. Обозначения: BSR – псевдонный отражающий горизонт, LS – оползни
 Fig. 7. Compilation of fragments of seismic sections LS0924 (A) and LS0912 (B) in the Laptev Sea. Legend: BSR – bottom simulating reflector, LS – landslides

Анализ температур воды вблизи дна моря

Основная цель анализа температур воды вблизи дна моря заключается в проверке влияния потепления климата и возможных изменений подводных течений. При потеплении придонных вод возможно ускорение процессов повышения температуры ВЧР осадочной толщи, что может ускорить деградацию ММП и изменить термобарические условия потенциальных залежей ГГ, находящихся в метастабильном состоянии, вплоть до их полной диссоциации (если они существуют).

Для анализа придонных температур воды использованы данные из базы NOAA World Ocean Database (WOD) [63]. База WOD представляет собой совокупность значений различных параметров воды с множества станций измерений. Согласно этой базе, первые замеры температур в море Лаптевых были проведены в 1878 г. Не вызывает сомнений, что они были сделаны во время экспедиции Норденшельда в 1878—1879 гг. Здесь в качестве исторической справки отметим, что первоначально море Лаптевых называлось морем Норденшельда. Современное название окончательно утвердилось в 1935 г.

Для каждой станции в море Лаптевых были отобраны значения температур по критерию приближенности к морскому дну не более чем на 10% глубины дна, как это было сделано ранее в работе [27]. На рис. 8 приведена картографическая схема распределения полученных значений придонных температур воды, по которой видно преобладание отрицательных значений. Положительные температуры наблюдаются у континентального побережья, островов, что связано с летним прогревом воды и интенсивным привносом прогретой пресной воды

реками (Лена, Анабар, Оленёк и др.). Ограниченное количество положительных замеров температуры (от 0 до 2°C) есть и у северной кромки шельфа над континентальным склоном, что объясняется адвекцией вод Северо-Атлантического течения. Отметим, что в Центрально-Лаптевском районе (см. рис. 8) 96,2% замеров выполнено в летнее время.

На рис. 9 приведен график изменения придонных температур в зависимости от даты проведения измерений, построенный для полигона (ограничен широтами 76—77° и долготами 119—132°), включающего большую часть известных сипов и показанного на рис. 8 красным цветом. После отбраковки данных по глубине в построение схемы и статистический анализ вошли измерения с 1932 по 2008 гг. (рис. 8 и 9). Усредняющая линия свидетельствует об отсутствии потепления морской воды вблизи донных отложений в XX—XXI вв. Также ограниченное количество зимних замеров (5) находится в тренде летних замеров, что подтверждает круглогодичные стабильные средние температуры около -1,5°C. Таким образом, современные экзогенные факторы не влияют на температуру у морского дна на полигоне расположения сипов, и, следовательно, нет оснований утверждать, что деградация ММП (если она есть) сверху в этом районе активизировалась в последние десятилетия.

В соответствии с рис. 8 севернее полигона сипов над континентальным склоном имеются положительные температуры воды вблизи дна, видимо, обусловленные циркуляцией относительно теплого Северо-Атлантического течения. Его температура в последние десятилетия могла увеличиться за счет потепления климата, особенно сильного в Арктике.

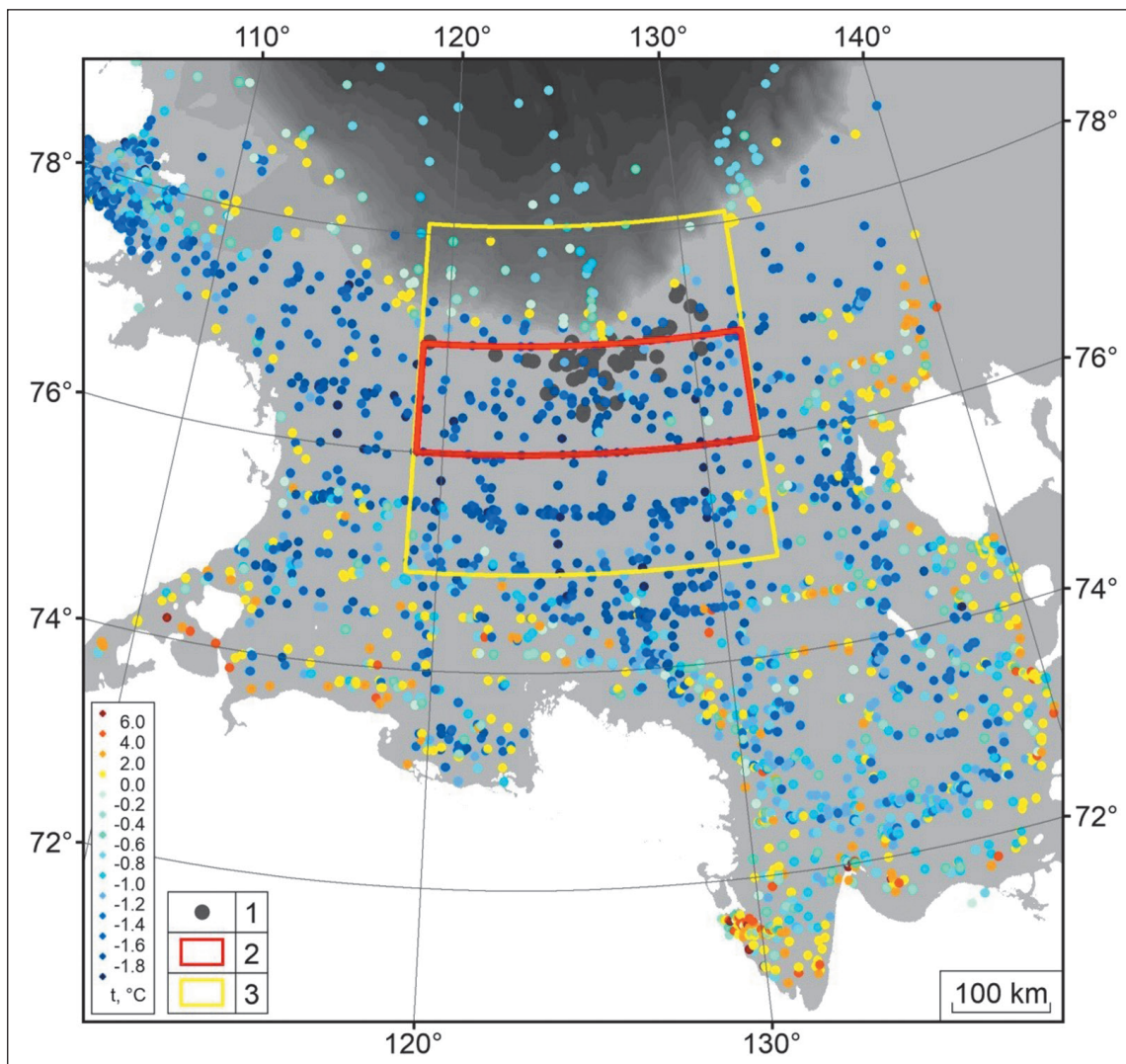


Рис. 8. Картографическая схема придонных температур воды в море Лаптевых. Обозначения: 1 – сипы газа [1; 24; 43; 46], 2 – полигон расположения сипов газа, 3 – Центрально-Лаптевский район исследований
 Fig. 8. Cartographic scheme of near-bottom water temperatures in the Laptev Sea. Legend: 1 – gas seeps [1; 24; 43; 46], 2 – polygon of seeps distribution, 3 – Central Laptev area of research

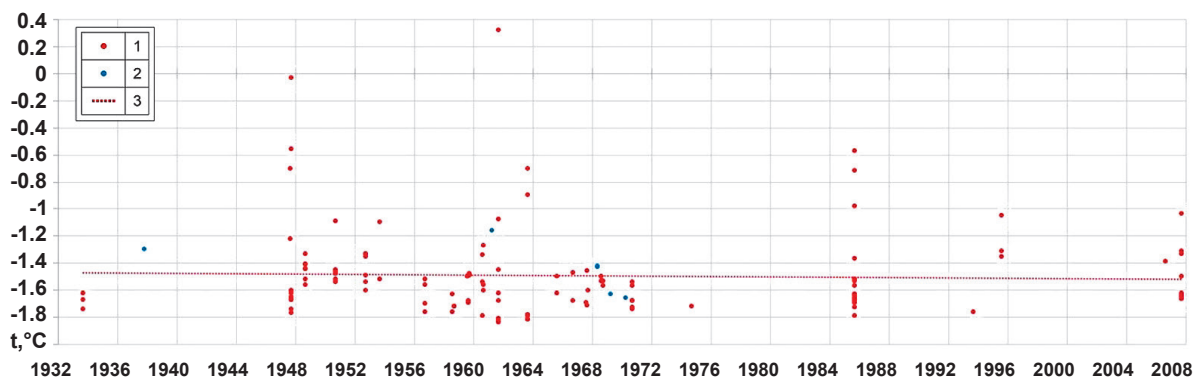


Рис. 9. Мониторинг изменений придонных температур воды в пределах полигона сипов в 1932–2008 гг. Обозначения: 1 и 2 – температуры в безледовые (1) и ледовые (2) периоды замеров, 3 – тренд изменения температуры в безледовые периоды замеров
 Fig. 9. Monitoring of changes of near-bottom water temperatures within the seeps polygon in 1932–2008. Legend: 1 and 2 – temperatures in ice-free (1) and ice-cover (2) periods of measurements, 3 – trend of temperature change in ice-free measurement periods

В итоге за счет повышения температур на участке континентального склона (севернее полигона сипов) по всему Центрально-Лаптевскому участку прослеживается тенденция изменения температуры на 0,6°C от -1,6°C в 1932 г. до -1,0°C в 2016 г. Поэтому представляется целесообразным обследовать зону континентального склона на предмет выявления возможных сипов газа.

Обсуждение результатов

В процессе постледниковой трансгрессии в море Лаптевых затопленные ММП оказались в несравнимо более теплых среднегодовых условиях (до -1,8°C), чем сопредельная суша (ниже -10°C), что способствовало постепенной деградации ММП сверху. Дополнительно конвективные тепловые потоки из недр Земли в зонах существования систем активных разломов и субвертикальных трещин, включая Центрально-Лаптевский район, привели к усиленному прогреву ММП снизу и ускорили общий процесс их деградации. Анализ придонных температур на полигоне расположения сипов не показал их изменений, что исключает влияние современного потепления климата на аномальное повышение темпов деградации ММП (если они есть) в районе исследований, как предполагается в работах [21; 22; 44; 45 и др.].

Представляется весьма вероятным, что в северной части шельфа моря Лаптевых ММП, затопленные на раннем этапе постледниковой трансгрессии (глубины свыше 50—60 м), уже деградировали, как это произошло на других акваториях Арктики (например, морей Чукотского и Бофорта). При анализе данных сейсморазведки Геологической службы США на шельфе Аляски прогнозируется существование ММП только до глубины морского дна около 20 м [29]. В восточной (канадской) части моря Бофорта ММП выявлены до изобат около 70 м [48], при этом в зоне существования ММП подтверждено наличие залежей ГГ. Опубликованные данные о распространении субаквальных ММП в Чукотском море не обнаружены (кроме прибрежной части) [8]. Также не обнаружены данные о вскрытии ММП и ГГ в доступных описаниях результатов бурения шести скважин в восточном секторе Чукотского моря (США) на шельфе Аляски (Burger, Diamond и др.) [8]. Возможно, что под действием теплого Тихоокеанского течения в открытом море завершились процессы деградации ММП и диссоциации ГГ. При этом они сохранились лишь в узкой полосе вдоль берегов Аляски и Чукотки.

В связи с практически горизонтальным залеганием придонных отложений на мелководной части шельфа моря Лаптевых залежи ГГ по временным разрезам МОГТ практически невозможно выделить, как и на шельфе Чукотского моря [8]. Поэтому однозначно говорить о наличии или отсутствии ГГ в Центрально-Лаптевском и других районах на данном этапе представляется недостаточно обоснованным.

Вместе с тем характер ВЧР на временных разрезах МОГТ позволяет предположить уменьшение мощности ММП в северном направлении с возможной ее полной деградацией в районе расположения сипов газа на глубинах свыше 50—60 м. Это подтверждается результатами предварительного анализа характера сейсмических волновых полей, зафиксированных на полевых сейсмограммах МАГЭ и согласуется с недостаточным обоснованными выводами, сделанными на основе анализа данных сейсморазведки МОГТ BGR [31]. Также отметим, что, по данным моделирования [20; 41], глубже изобаты 60 м прогнозируется наличие лишь островной мерзлоты.

В работах [1; 16; 21; 24; 43; 46] в Центрально-Лаптевском районе на полигоне активных сипов предполагается наличие интенсивно деградирующих ММП. При этом в [1; 16; 24; 46] констатируется широко известный факт возможной вертикальной миграции газа по системам активных разломов [36; 64]. В частности, предполагается, что «...вдоль глубинных разломов происходит перенос газового флюида в верхние горизонты осадочного чехла, где он аккумулируется ниже зоны стабильности газогидрата и горизонта многолетнемерзлых пород. Поверхностные разломы внешнего шельфа нарушают сплошность этой покрывки, создавая подводящие каналы, по которым происходит миграция газа к поверхности и его струйное выделение в водную толщу» [1]. Приведенная карта с «основными разломами в фундаменте и осадочном чехле» [1, рис. 1], выделенными на основе сейсморазведки первого и второго этапов исследований моря Лаптевых (до 1997 г.) [55], не является достаточным обоснованием для подтверждения наличия разломов, доходящих до морского дна, и является по сути генерализованной схемой. Она не позволяет привязать сипы к конкретным разломам и не доказывает их приуроченность. Даже более детальная и современная схема разломов МАГЭ третьего этапа исследований (см. рис. 2) [61; 62] не позволяет делать однозначные утверждения на этот счет.

Основным результатом исследований авторов данной статьи является демонстрация приуроченности известных сипов газа к глубинным каналам миграции, выделенным на временных разрезах МОГТ. В итоге авторы считают, что ключевую роль в эмиссии газа у кромки шельфа моря Лаптевых однозначно играют многочисленные тектонические нарушения и большие объемы углеводородов термогенного (катагенетического) генезиса в осадочном чехле акватории, а не разлагающиеся ГГ при деградации ММП.

Вынуждены отметить, что наши выводы об отсутствии в северной части шельфовой зоны Центрально-Лаптевского района ММП имеют предварительный характер и требуют дальнейшего подтверждения, которое можно получить на основе детальной обработки и интерпретации записей преломленных/

рефрагированных волн, содержащихся на полевых материалах сейсмозондировки МОГТ МАГЭ во многих частях моря Лаптевых. Наличие ММП и/или ГГ должно сопровождаться образованием высокоскоростных (от 2—2,8 до 3—4 км/с) преломленных/рефрагированных волн [29, 31].

Очевидно, что вблизи побережья и особенно дельт северных рек, как и в других регионах мира, метан в придонных отложениях имеет преимущественно бактериальный генезис, что обусловлено современным отложением больших объемов органики, приносимой с суши. В частности, в результате исследований изотопного состава углерода метана $\delta^{13}\text{C}$ (CH_4) бактериальный газ был обнаружен в районе дельты Лены в заливе Буор-Хая [42].

Доступные результаты исследований $\delta^{13}\text{C}$ (CH_4), проведенные по сипам газа в морях Восточной Арктики вдали от современного положения речных дельт, практически повсеместно показали его глубинный генезис [31; 38; 46]. При этом в Чукотском бассейне $\delta^{13}\text{C}$ (CH_4) изменялся от $-63,6\text{‰}$ до $-55,6\text{‰}$ [38], что близко к данным по метану биогенного генезиса с глубин 500—1300 м сеноманских отложений севера Западной Сибири [3; 4]. В абсолютном большинстве исследований [31] в море Лаптевых в придонных осадках и сипах был обнаружен термогенный метан с $\delta^{13}\text{C}$ (CH_4) от -43‰ до -37‰ , а также более тяжелые молекулярные соединения (этан, пропан и др.). Анализы газа из ряда сипов в Центрально-Лаптевском районе [46] показали его термогенный генезис ($\delta^{13}\text{C}$ (CH_4) от -55‰ до $-42,6\text{‰}$). По нашему мнению, такие результаты свидетельствуют о длительной миграции глубинного газа в атмосферу по системам активных разломов и субвертикальных трещин, за счет чего бактериальный газ в приповерхностных отложениях (*in situ*) оказался фактически вытесненным (замещенным) на стадии деградации ММП и диссоциации ГГ сильными потоками термогенного газа.

Заключение

На основе комплексного анализа материалов сейсмозондировки МОГТ МАГЭ 2009 г., данных по придонным температурам воды NOAA, а также результатов исследований сипов газа (включая изучение изотопного состава углерода метана) сделаны следующие выводы.

При интерпретации временных разрезов МОГТ МАГЭ по 28 сейсмопрофилям в Центрально-Лаптевском районе в суммарном объеме 5930 км обнаружено 519 аномальных объектов, потенциально связанных с газонасыщением. Средний шаг распространения данных объектов по профилям составляет 11,4 км, а большинство объектов доходит практически до дна (глубины 0—200 м). На континентальном склоне моря Лаптевых на шести разрезах был выделен горизонт BSR, что позволило уточнить зону распространения потенциальных ГГ, впервые выявленную авторами в 2018 г.

Впервые по данным сейсмозондировки МОГТ обоснована приуроченность сипов газа в Центрально-Лаптевском районе к глубинным разломам, многие из которых доходят до морского дна.

Анализ изменений в последние десятилетия придонных температур воды на полигоне сипов не показал их увеличения. Поэтому потепление климата не смогло привести к аномальному усилению процесса деградации ММП и диссоциации ГГ, если они еще существуют.

При комплексном анализе имеющейся информации авторы пришли к высоковероятному прогнозу, что в области обнаруженных сипов газа в Центрально-Лаптевском районе (глубины от 50—60 до 110 м) ММП и ГГ отсутствуют, а сипы обусловлены прямой миграцией газа с больших глубин. Это подтверждается измеренным изотопным составом углерода метана [31; 46]. Несмотря на это, сделанный прогноз требует дополнительных подтверждений, над которыми авторы работают в настоящее время.

Работа выполнена по государственному заданию ИПНГ РАН по теме «Рациональное природопользование и эффективное освоение нефтегазовых ресурсов арктической и субарктической зон Земли» (№ АААА-А19-119021590079-6).

Авторы высоко ценят всемерное содействие научным исследованиям АО «МАГЭ» Г. С. Казанина и благодарят его сотрудников С. И. Шкарубо, В. В. Ланцева, А. П. Демонова, Е. А. Фомина, содействовавших выполнению работы, а также других сотрудников, принимавших участие в экспедиции 2009 г. в море Лаптевых и в обработке материалов. Авторы признательны NOAA за предоставление температурных данных в базе WOD.

Литература/References

1. Баранов Б. В., Лобковский Л. И., Дозорова К. А., Цуканов Н. В. Система разломов, контролирующая метановые сипы на шельфе моря Лаптевых // Докл. Акад. наук. — 2019. — Т. 486, № 3. — С. 354—358. Baranov B. V., Lobkovsky L. I., Dozorova K. A., Tsukanov N. V. The fault system controlling methane seeps on the shelf of the Laptev Sea. Dokl. Akad. nauk, 2019, vol. 486, no. 3, pp. 354—358. (In Russian).
2. Богоявленский В. И. Чрезвычайные ситуации при освоении ресурсов нефти и газа в Арктике и Мировом океане // Арктика: экология и экономика. — 2014. — № 4. — С. 48—59. Bogoyavlensky V. I. Emergency Situations in Developing Oil and Gas Resources in the Arctic and the Ocean. Arktika: ekologiya i ekonomika. [Arctic: Ecology and Economy], 2014, no. 4, pp. 48—59. (In Russian).
3. Богоявленский В. И. Природные и техногенные угрозы при освоении месторождений горючих ископаемых в криолитосфере Земли // Гор. пром-сть. — 2020. — № 1 (149). — С. 97—118. Bogoyavlensky V. I. Natural and technogenic threats in fossil fuels production in the Earth cryolithosphere.

- Gor. prom-st'. [Russian Mining Industry], 2020, no. 1 (149), pp. 97—118. DOI: 10.30686/1609-9192-2020-1-97-118. (In Russian).
4. Богоявленский В. И. Фундаментальные аспекты генезиса катастрофических выбросов газа и образования гигантских кратеров в Арктике // Арктика: экология и экономика. — 2021. — Т. 11, № 1. — С. 51—66. *Vogoyavlensky V. I. Fundamental aspects of the catastrophic gas blowout genesis and the formation of giant craters in the Arctic. Arktika: ekologiya i ekonomika. [Arctic: Ecology and Economy], 2021, vol. 11, no. 1, pp. 51—66. DOI: 10.25283/2223-4594-2021-1-51-66. (In Russian).*
5. Богоявленский В. И., Керимов В. Ю., Ольховская О. О. Опасные газонасыщенные объекты на акваториях Мирового океана: Охотское море // Нефтяное хоз-во. — 2016. — № 6. — С. 43—47. *Vogoyavlensky V. I., Kerimov V. Yu., Olkhovskaya O. O. Dangerous gas-saturated objects in the World Ocean: the Sea of Okhotsk. Neftyanoye khoz-vo. [Oil Industry], 2016, no. 6, pp. 43—47. (In Russian).*
6. Богоявленский В. И., Казанин Г. С., Кишанков А. В. Опасные газонасыщенные объекты на акваториях Мирового океана: море Лаптевых // Бурение и нефть. — 2018. — № 5. — С. 20—28. *Vogoyavlensky V. I., Kazanin G. S., Kishankov A. V. Dangerous gas-saturated objects in the World Ocean: the Laptev sea. Burenie i neft'. [Drilling and oil], 2018, no. 5, pp. 20—28. (In Russian).*
7. Богоявленский В. И., Кишанков А. В. Опасные газонасыщенные объекты на акваториях Мирового океана: Берингово море // Бурение и нефть. — 2018. — № 9. — С. 4—12. *Vogoyavlensky V. I., Kishankov A. V. Dangerous gas-saturated objects in the World Ocean: the Bering sea. Burenie i neft'. [Drilling and oil], 2018, no. 9, pp. 4—12. (In Russian).*
8. Богоявленский В. И., Кишанков А. В. Опасные газонасыщенные объекты на акваториях Мирового океана: Чукотское море (Россия и США) // Арктика: экология и экономика. — 2020. — № 2 (38). — С. 45—58. *Vogoyavlensky V. I., Kishankov A. V. Dangerous gas-saturated objects in the World Ocean: the Chukchi Sea (Russia and the USA). Arktika: ekologiya i ekonomika. [Arctic: Ecology and Economy], 2020, no. 2 (38), pp. 45—58. DOI: 10.25283/2223-4594-2020-2-45-58. (In Russian).*
9. Богоявленский В. И., Сизов О. С., Никонов Р. А. и др. Дегазация Земли в Арктике: генезис природной и антропогенной эмиссии метана // Арктика: экология и экономика. — 2020. — № 3 (39). — С. 6—22. *Vogoyavlensky V. I., Sizov O. S., Nikonov R. A., Bogoyavlensky I. V., Kargina T. A. Earth degassing in the Arctic: the genesis of natural and anthropogenic methane emissions. Arktika: ekologiya i ekonomika. [Arctic: Ecology and Economy], 2020, no. 3 (39), pp. 6—22. DOI: 10.25283/2223-4594-2020-3-6-22. (In Russian).*
10. Бондарев В. Н., Рокос С. И., Костин Д. А. и др. Подмерзлотные скопления газа в верхней части осадочного чехла Печорского моря // Геология и геофизика. — 2002. — № 43 (7) — С. 587—598. *Bondarev V. N., Rokos S. I., Kostin D. A., Dlugach A. G., Polyakova N. A. Under-permafrost gas accumulations in the upper part of sedimentary cover of the Pechora Sea. Geologiya i geofizika. [Russian Geology and Geophysics], 2002, no. 43 (7), pp. 587—598. (In Russian).*
11. Бондур В. Г., Кузнецова Т. В. Выявление газовых сипов в акваториях арктических морей с использованием данных дистанционного зондирования // Исслед. Земли из космоса. — 2015. — № 4. — С. 30—43. *Bondur V. G., Kuznetsova T. V. Detection of gas seeps in the Arctic seas using remote sensing data. Issled. Zemli iz kosmosa, 2015, no. 4, pp. 30—43. (In Russian).*
12. Брушков А. В. Глобальные изменения окружающей среды, реакция криолитозоны и устойчивость инженерных сооружений // Инженер. изыскания. — 2015. — № 14. — С. 14—26. *Brushkov A. V. Global changes of the environment, reaction of cryolithozone and stability of engineering facilities. Inzhener. izyskaniya, 2015, no. 14, pp. 14—26. (In Russian).*
13. Гаврилов А. В., Романовский Н. Н., Хуббертсен Х.-В. Палеогеографический сценарий послеледниковой трансгрессии на шельфе моря Лаптевых // Криосфера Земли. — 2006. — Т. 10, № 1. — С. 39—50. *Gavrilov A.V., Romanovskii N.N., Hubberten H.-W. Paleogeographic scenario of post-glaciation transgression on the Laptev Sea shelf. Kriosfera Zemli. [Earth's Cryosphere], 2006, vol. 10, no. 1, pp. 39—50. (In Russian).*
14. Истомин В. А., Якушев В. С. Газовые гидраты в природных условиях. — М.: Недра, 1992. — 235 с. *Istomin V. A., Yakushev V. S. Gas hydrates in natural conditions. Moscow, Nedra, 1992, 235 p. (In Russian).*
15. Истомин В. А., Якушев В. С., Махонина Н. А. и др. Эффект самоконсервации газовых гидратов // Газовые гидраты, спецвыпуск приложения к журналу «Газовая пром-сть». — 2006. — С. 36—46. *Istomin V. A., Yakushev V. S., Makhonina N. A., Kvon V. G., Chuvilin Y. M. Effect of self-preservation of gas hydrates. Gazovaya prom-st', special issue, 2006, pp. 36—46. (In Russian).*
16. Лобковский Л. И., Никифоров С. Л., Дмитревский Н. Н. и др. О процессах газовыделения и деградации подводных многолетнемерзлых пород на шельфе моря Лаптевых // Океанология. — 2015. — Т. 55, № 2. — С. 312—320. *Lobkovskiy L. I., Nikiforov S. L., Dmitrevskiy N. N. et al. Mechanisms Responsible for Gas Emission and Underwater Permafrost Degradation on Laptev Sea Shelf. Okeanologiya, 2015, vol. 55, no. 2, pp. 312—320. (In Russian).*
17. Мельников В. П., Спесивцев В. И., Куликов В. Н. О струйной дегазации углеводородов как источнике новообразований льда на шельфе Печорского моря // Итоги фундаментальных исследований криосферы Земли в Арктике и Субарктике: Материалы Международной конференции, Пушино, 23—

- 26 апр. 1996 г. / Е. С. Мельников (ред.). — Новосибирск: Наука; 1997. — С. 259—269.
Melnikov V. P., Spesivtsev V. I., Kulikov V. N. About stream degassing of hydrocarbons as a source of new formation of ice on the Pechora Sea shelf. Results of fundamental research of the Earth cryosphere in the Arctic and Subarctic: Proceedings of the International conference, Puschino, 23—26 April 1996. Melnikov Y. S. (Ed.). Novosibirsk, Nauka, 1997, pp. 259—269. (In Russian).
18. Мельников В. П., Нестеров А. Н., Поденко Л. С. и др. Метастабильные состояния газовых гидратов при давлениях ниже давления равновесия лед-гидрат-газ // Криосфера Земли. — 2011. — № 4. — С. 80—83.
Melnikov V. P., Nesterov A. N., Podenko L. S., Reshetnikov A. M., Shalamov V. V. Metastable states of gas hydrates under pressures lower than ice-hydrate-gas equilibrium pressure. Kriosfera Zemli. [Earth's Cryosphere], 2011, no. 4, pp. 80—83. (In Russian).
19. Проблемы зарождения и эволюции биосферы. — Ч. 2 / Под ред. акад. Э. М. Галимова. — М.: КРАСАНД, 2013. — 640 с.
 Problems of biosphere genesis and evolution. Pt. 2. Ed. by E. M. Galimov. Moscow, KRASAND, 2013, 640 p. (In Russian).
20. Романовский Н. Н., Хуббертен Х.-В. Криолитозона и зона стабильности гидратов газов на шельфе моря Лаптевых (основные результаты десяти лет российско-германских исследований) // Криосфера Земли. — 2006. — Т. 10, № 3. — С. 61—68.
Romanovskii N. N., Hubberten H.-W. Permafrost and gas hydrate stability zone on the Laptev Sea shelf (main results of ten-year Russian-German investigation). Kriosfera Zemli. [Earth's Cryosphere], 2006, vol. 10, no. 3, pp. 61—68. (In Russian).
21. Сергиенко В. И., Лобковский Л. И., Шахова Н. Е. и др. Деградация подводной мерзлоты и разрушение гидратов шельфа морей Восточной Арктики как возможная причина «метановой катастрофы»: некоторые результаты комплексных исследований 2011 года // Докл. Акад. наук. — 2012. — Т. 446, № 3. — С. 330—335.
Sergienko V. I., Lobkovskiy L. I., Shakhova N. E. et al. Degradation of underwater permafrost and degradation of hydrates of the Eastern Arctic Shelf seas as a possible cause of a “methane catastrophe”: some results of complex research in 2011. Dokl. Akad. nauk, 2012, vol. 446, no. 3, pp. 330—335. (In Russian).
22. Шахова Н. Е., Сергиенко В. И., Семилетов И. П. Вклад Восточно-Сибирского шельфа в современный цикл метана // Вестн. Рос. акад. наук. — 2009. — Т. 79, № 6. — С. 507—518.
Shakhova N. E., Sergienko V. I., Semiletov I. P. Contribution of the East Siberian Shelf to modern methane cycle. Vestn. Ros. akad. nauk, 2009, vol. 79, no. 6, pp. 507—518. (In Russian).
23. Якушев В. С. Природный газ и газовые гидраты в криолитозоне. — М.: ВНИИГаз, 2009. — 192 с.
Yakushev V. S. Natural gas and gas hydrates in cryolithozone. Moscow, VNIIGaz, 2009, 192 p. (In Russian).
24. Baranov B., Galkin S., Vedenin A. et al. Methane seeps on the outer shelf of the Laptev Sea: characteristic features, structural control, and benthic fauna. *Geo-Marine Letters*, 2020, vol. 40, pp. 541—557.
25. Berger A. Milankovitch theory and climate. *Reviews of geophysics*, 1988, vol. 26, no. 4, pp. 624—657.
26. Bogoyavlensky V. I., Kerimov V. Yu., Bogoyavlensky V. I., Shayhullina A. A. The Main Guidelines of the Efficiency and Safety Increasing of Hydrocarbon Deposits Exploration and Development on the Arctic and Other Russian Offshore. 8th Saint Petersburg International Conference & Exhibition Saint Petersburg 2018. *Innovations in Geosciences — Time for Breakthrough*. EAGE, 2018, 5 p. Submission ID: 44704.
27. Bogoyavlensky V., Kishankov A., Yanchevskaya A., Bogoyavlensky I. Forecast of Gas Hydrates Distribution Zones in the Arctic Ocean and Adjacent Offshore Areas. *Geosciences*, 2018, no. 8, 45317. DOI: 10.3390/geosciences8120453.
28. Bogoyavlensky V. I., Kazanin G. S., Kishankov A. V. Gas saturation of shallow deposits of the Arctic and Subarctic seas. 1st Conference “Marine Technologies”, Gelendzhik. EAGE, 2019, pp. 124—130.
29. Brothers L. L., Hart P. E., Ruppel C. D. Minimum distribution of subsea ice-bearing permafrost on the US Beaufort Sea continental shelf. *Geophysical research letters*, 2012, vol. 39, no. 15, pp. 1—6.
30. Cartwright J., Huuse M., Aplin A. Seal bypass systems. *AAPG bull.*, 2007, vol. 91, no. 8, pp. 1141—1166.
31. Cramer B., Franke D. Indications for an active petroleum system in the Laptev Sea, NE Siberia. *J. of Petroleum Geology*, 2005, vol. 28, no. 4, pp. 369—384.
32. Dlugokencky E. J. Trends in Atmospheric Methane. NOAA. Global Monitoring Laboratory. 2021.03.05. Available at: https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends_ch4/.
33. Giustiniani M., Tinivella U., Jakobsson M., Rebesco M. Arctic ocean gas hydrate stability in a changing climate. *J. Geol. Res.*, 2013, 783969.
34. Henriot J. P., Mienert J. Gas Hydrates: Relevance to World Margin Stability and Climate Change. Bath, UK, Geological Society of London, 1998, vol. 137, 348 p.
35. Ingle S., Gharib J. Seep Hunting! GEOExPro, October 2018, p. 60—61. Available at: https://www.fugro.com/docs/default-source/translations_import/geo-expro-vol-15-n-5-fugro-seep-hunting.pdf?sfvrsn=ea6de219_2.
36. Judd A., Hovland M. *Seabed Fluid Flow*. The Impact on Geology, Biology, and the Marine Environment. New York, NY, USA, Cambridge Univ. Press, 2007, 475 p.
37. Judd A. G., Hovland M., Dimitrov L. I. et al. The geological methane budget at continental margins and its influence on climate change. *Geofluids*, 2002, vol. 2, no. 2, pp. 109—126.
38. Kim Y.-G., Kim S., Lee D.-H. et al. Occurrence of active gas hydrate mounds in the southwestern slope of the Chukchi Plateau, Arctic Ocean. *Episodes*, 2020, vol. 43, no. 2, pp. 811—823.

39. Kvenvolden K. A., Ginsburg G. D., Soloviev V. A. World-wide distribution of subaquatic gas hydrates. *Geo-Marine Letters*, 1993, vol. 13, no. 1, pp. 32—40.
40. McGlade C., Michaels K. C., Gould T. Global methane emissions from oil and gas. Insights from the updated IEA Methane Tracker. IEA, 31 Mar. 2020. Available at: <https://www.iea.org/articles/global-methane-emissions-from-oil-and-gas>.
41. Romanovskii N. N., Hubberten H.-W., Gavrilo A. V. et al. Offshore permafrost and gas hydrate stability zone on the shelf of East Siberian Seas. *Geo-marine letters*, 2005, vol. 25, no. 2—3, pp. 167—182.
42. Sapart C.J., Shakhova N., Semiletov I. et al. The origin of methane in the East Siberian Arctic Shelf unraveled with triple isotope analysis. *Biogeosciences*, 2017, vol. 14, no. 9, pp. 2283—2292.
43. Shakhova N., Semiletov I., Sergienko V. et al. The East Siberian Arctic Shelf: towards further assessment of permafrost-related methane fluxes and role of sea ice. *Philosophical Transactions of the Royal Society. A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2015, vol. 373, 20140451.
44. Shakhova N., Semiletov I., Gustafsson O. et al. Current rates and mechanisms of subsea permafrost degradation in the East Siberian Arctic Shelf. *Nature Communications*, 2017, vol. 8, no. 1, pp. 1—13. DOI: 10.1038/ncomms15872.
45. Shakhova N., Semiletov I., Chuvilin E. Understanding the permafrost-hydrate system and associated methane releases in the east Siberian Arctic Shelf. *Geosciences*, 2019, vol. 9, no. 6, p. 251. Available at: <https://doi.org/10.3390/geosciences9060251>.
46. Steinbach J., Holmstrand H., Shcherbakova K. et al. Source apportionment of methane escaping the subsea permafrost system in the outer Eurasian Arctic Shelf. *PNAS*, 2021, vol. 118, no. 10, e2019672118, pp. 1—9.
47. Walter K. M., Smith L. C., Chapin F. S. Methane bubbling from northern lakes: Present and future contributions to the global methane budget. *Phil. Trans. R. Soc. A*, 2007, vol. 365, no. 1856, pp. 1657—1676.
48. Weaver J. S., Stewart J. M. In situ hydrates under the Beaufort Sea shelf. Proceedings, fourth Canadian permafrost conference. Ottawa, Ont., Natl. Res. Council of Can., 1982, pp. 312—319.
49. Williams A. Satellite Seep Detection of Leaking Deep Water Oilfields, Fact or Fantasy? Fugro NPA, UK, May 26, 2010. Available at: <https://www.findingpetroleum.com/files/event11/fugro-npa.pdf>.
50. Yakushev V. S., Semenov A. P., Bogoyavlensky V. I., Medvedev V. I., Bogoyavlensky I. V. Experimental modeling of methane release from intrapermafrost relic gas hydrates when sediment temperature change. *Cold Regions Science and Technology*, 2018, vol. 149, pp. 46—50. DOI: 10.1016/j.coldregions.2018.02.007.
51. Атлас Арктики / Под ред. А. Ф. Трешникова. — М.: Гл. упр. геодезии и картографии при Совете Министров СССР, 1985. — 203 с.
- Atlas of the Arctic. A. F. Treshnikov (Ed.). Moscow, Gl. Upr. geodezii i kartografii pri Sovete Ministrov SSSR, 1985, 203 p. (In Russian).
52. Ким Б. И., Евдокимова Н. К., Харитонова Л. Я. и др. Осадочный чехол шельфа моря Лаптевых и его нефтегазовый потенциал // Геология нефти и газа. — 2011. — № 6. — С. 116—131.
- Kim B. I., Yevdokimova N. K., Kharitonova L. Y. et al. Sedimentary cover of the Laptev Sea shelf and its petroleum potential. *Geologiya nefi i gaza*. [Russian Oil and Gas Geology], 2011, no. 6, pp. 116—131. (In Russian).
53. Drachev S. S., Malyshev N. A., Nikishin A. M. Tectonic history and petroleum geology of the Russian Arctic Shelves: an overview. Geological Society, London, petroleum geology conference series. Geological Society of London, 2010, vol. 7, no. 1, pp. 591—619.
54. Грамберг И. С., Деменицкая Р. М., Секретов С. Б. Система рифтогенных грабенов шельфа моря Лаптевых как недостающего звена рифтового пояса хребта Гаккеля — Момского рифта // Докл. АН СССР. — 1990. — Т. 311. — № 3. — С. 689—694.
- Gramberg I. S., Demenitskaya R. M., Sekretov S. B. System of rift grabens of the Laptev Sea shelf as a missing part of the Gakkel Ridge — Momiyskiy Ridge belt. *Dokl. AN SSSR*, 1990, vol. 311, no. 3, pp. 689—694. (In Russian).
55. Драчев С. С. Тектоника рифтовой системы дна моря Лаптевых // Геотектоника. — 2000. — Т. 6. — С. 43—58.
- Drachev S. S. Tectonics of the rift system of the Laptev Sea bottom. *Geotektonika*, 2000, vol. 6, pp. 43—58. (In Russian).
56. Drachev S. S., Shkarubo S. I. Tectonics of the Laptev Shelf, Siberian Arctic. *Circum-Arctic Lithosphere Evolution*. Eds. V. Pease, B. Coakley. Geological Society, London, Special Publications, 2018, vol. 460, no. 1, pp. 263—283. DOI: 10.1144/SP460.15.
57. Рекант П. В., Гусев Е. А. Признаки новейших тектонических движений на Лаптевоморской континентальной окраине по данным сейсмоакустического профилирования // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2009. — № 2. — С. 85—94.
- Rekant P. V., Gusev E. A. The seismic-acoustic evidences of the recent tectonics on the Laptev sea continental margin. *Problemy Arktiki i Antarktiki*, 2009, no. 2, pp. 85—94. (In Russian).
58. Аветисов Г. П. Еще раз о землетрясениях моря Лаптевых // Геолого-геофизические характеристики литосферы Арктического региона. — Вып. 3. — СПб.: ВНИИОкеангеология, 2000. — С. 104—114.
- Avetisov G. P. Again about earthquakes in the Laptev Sea. *Geologo-geofizicheskiye kharakteristiki litosfery Arkticheskogo regiona*. Iss. 3. St. Petersburg, VNIIOkeangeologia, 2000, pp. 104—114. (In Russian).
59. Шипилов Э. В., Лобновский Л. И., Шкарубо С. И. Строение Хатангско-Ломоносовской зоны разломов по сейсмическим данным // Докл. Акад. наук. — 2019. — Т. 487, № 3. — С. 304—309.

- Shipilov E. V., Lobkovskiy L. I., Shkarubo S. I. Structure of the Khatanga-Lomonosov Fault Zone based on seismic data. Dokl. Akad. nauk, 2019, vol. 487, no. 3, pp. 304—309. (In Russian).
60. Шипилов Э. В., Лобковский Л. И., Кириллова Т. А. О тектоно-геодинамических взаимоотношениях Евразийского бассейна и хребта Ломоносова с континентальной окраиной Сибири по новым сейсмическим данным // Арктика: экология и экономика. — 2020. — № 4 (40). — С. 34—42.
- Shipilov E. V., Lobkovskiy L. I., Kirillova T. A. On tectonic-geodynamic relationships of the Eurasian Basin and the Lomonosov Ridge with the continental margin of Siberia according to new seismic data. Arktika: ekologiya i ekonomika. [Arctic: Ecology and Economy], 2020, no. 4 (40), pp. 34—42. DOI: 10.25283/2223-4594-2020-4-34-42. (In Russian).
61. Отчет по объекту «Региональные комплексные геофизические исследования с целью оценки перспектив нефтегазоносности Центрально-Лаптевского района и осадочных бассейнов Лаптевоморской континентальной окраины». Государственный контракт № 15/03/70-20 от 6 июля 2009 г. Отв. исполнитель Кириллова Т. А. — Мурманск: ОАО «МАГЭ» — 2011.
- Report on the object “Regional complex geophysical research with the objective of assessment of oil and gas bearing perspectives of the Central Laptev Area and sedimentary basins of the Laptev Sea continental margin”. State contract no. 15/03/70-20, 6th July 2009. Responsible executor Kirillova T. A. Murmansk, JSC “MAGE”, 2011. (In Russian).
62. Кириллова-Покровская Т. А. Актуализированная модель строения моря Лаптевых и основные ловушки УВ структурного класса // Инновационный вектор развития ОАО «МАГЭ»: Сб. статей ОАО «МАГЭ». — СПб., 2017. — С. 228—251.
- Kirillova-Pokrovskaya T. A. Actualized model of the Laptev Sea structure and main HC traps of structural class. Innovatsionnyi vector razvitiya OAO “MAGE”. Sb. statey OAO “MAGE”. St. Petersburg, 2017, pp. 228—251. (In Russian).
63. World Ocean Database Select and Search. National Centers for Environmental Information, National Oceanic and Atmospheric Administration. Available at: <https://www.ncei.noaa.gov/access/world-ocean-database-select/dbsearch.html>.
64. Tissot B. P., Welte D. H. Petroleum Formation and Occurrence. Second edition. Berlin, Springer-Verl., 1984.

Информация об авторах

Богоявленский Василий Игоревич, доктор технических наук, член-корреспондент РАН, заместитель директора по научной работе, заведующий лабораторией «Шельф», главный научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа РАН (119333, Россия, Москва, ул. Губкина, д. 3), e-mail: vib@pgc.su.

Казанин Алексей Геннадьевич, кандидат технических наук, генеральный директор, ОАО «МАГЭ» (183038, Россия, Мурманск, ул. Софьи Перовской, д. 26), e-mail: a.kazanin@mage.ru.

Кишанков Алексей Владимирович, младший научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа РАН (119333, Россия, Москва, ул. Губкина, д. 3), e-mail: alexey137k@yandex.ru.

Казанин Геннадий Алексеевич, заместитель начальника управления обработки и интерпретации геолого-геофизической информации, ОАО «МАГЭ» (183038, Россия, Мурманск, ул. Софьи Перовской, д. 26), e-mail: g.kazanin@mage.ru.

Библиографическое описание данной статьи

Богоявленский В. И., Казанин А. Г., Кишанков А. В., Казанин Г. А. Дегазация Земли в Арктике: комплексный анализ факторов мощной эмиссии газа в море Лаптевых // Арктика: экология и экономика. — 2021. — Т. 11, № 2. — С. 178—194. — DOI: 10.25283/2223-4594-2021-2-178-194.

EARTH DEGASSING IN THE ARCTIC: COMPREHENSIVE ANALYSIS OF FACTORS OF POWERFUL GAS EMISSION IN THE LAPTEV SEA

Bogoyavlensky, V. I.

Oil and Gas Research Institute of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation)

Kazanin, A. G.

Marine Arctic Geological Expedition (Murmansk, Russian Federation)

Kishankov, A. V.

Oil and Gas Research Institute of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation)

Kazanin, G. A.

Marine Arctic Geological Expedition (Murmansk, Russian Federation)

The article was received on March 10, 2021

Abstract

Interpretation was conducted for 28 CDP seismic time sections with total length of 5930 km acquired by JSC “MAGE” in the Central Laptev Area, where a zone of powerful gas emission had been discovered earlier. 519 anomalous objects were revealed in near-bottom deposits with an average distance on seismic lines of 11,4 km, potentially connected with accumulations of gas and its migration paths. As a result of comprehensive analysis, for the first time, connection of gas seeps with deep-seated faults in the study area was justified. Highly likely forecast was made that in the area of the discovered seeps (seafloor depths from 50—60 m to 110 m), permafrost and gas hydrates are absent, and the seeps are caused by direct migration of gas from great depths. On the continental slope of the Laptev Sea, a bottom simulating reflector (BSR) was distinguished in CDP seismic sections, associated with the base of gas hydrates.

Keywords: *Laptev Sea, CDP seismic, gas seeps, gas emission, thermogenic gas, gas pockets, gas hydrates, BSR horizon.*

The research was conducted according to the state assignment to OGRI RAS on the topic “Sustainable environmental management and effective development of oil and gas resources of the Arctic and Sub-Arctic zones of the Earth” (No. AAAA-A19-119021590079-6).

The authors highly appreciate intensive assistance of G. S. Kazanin in scientific research of JSC “MAGE” and are thankful to the staff of MAGE JSC, S. I. Shkarubo, V. V. Lantsev, A. P. Demonov, E. A. Fomina, who assisted in the present work, and also other employees who took part in the 2009 expedition in the Laptev Sea and in processing of the data. The authors are grateful to NOAA for providing the temperature data in WOD base.

Information about the authors

Bogoyavlensky, Vasily Igorevich, Doctor of Engineering Science, Corresponding member of RAS, Deputy Director for Science, Head of “Shelf” Laboratory, Chief Researcher, Oil and Gas Research Institute of RAS (3, Gubkina St., Moscow, Russia, 119333), e-mail: vib@pgc.su.

Kazanin, Aleksey Gennadyevich, PhD of Engineering Science, Director General, Marine Arctic Geological Expedition (26, Sofia Perovskaya str., Murmansk, Russia, 183038), e-mail: a.kazanin@mage.ru.

Kishankov, Aleksei Vladimirovich, Junior Researcher, Oil and Gas Research Institute of RAS (3, Gubkina St., Moscow, Russia, 119333), e-mail: alexey137k@yandex.ru.

Kazanin, Gennady Alekseyevich, Deputy Head of Department of Processing and Interpretation of Geological and Geophysical Information, Marine Arctic Geological Expedition (26, Sofia Perovskaya str., Murmansk, Russia, 183038), e-mail: g.kazanin@mage.ru.

Bibliographic description of the article

Bogoyavlensky, V. I., Kazanin, A. G., Kishankov, A. V., Kazanin, G. A. Earth degassing in the Arctic: comprehensive analysis of factors of powerful gas emission in the Laptev Sea. *Arktika: ekologiya i ekonomika*. [Arctic: Ecology and Economy], 2021, vol. 11, no. 2, pp. 178—194. DOI: 10.25283/2223-4594-2021-2-178-194. (In Russian).

© Bogoyavlensky V. I., Kazanin A. G., Kishankov A. V., Kazanin G. A., 2021