

# СБОРНИК ТЕЗИСОВ

ЯМАЛ – 2021



## МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО – ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

СОВРЕМЕННЫЕ  
ИССЛЕДОВАНИЯ  
ТРАНСФОРМАЦИИ  
КРИОСФЕРЫ  
И ВОПРОСЫ  
ГЕОТЕХНИЧЕСКОЙ  
БЕЗОПАСНОСТИ  
СООРУЖЕНИЙ  
В АРКТИКЕ

Ноябрь 8-12

## Субаквальная криолитозона и сипы газа на шельфе моря Лаптевых

Богоявленский В.И.<sup>1</sup>, Кишанков А.В.<sup>1</sup>, Казанин А.Г.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт проблем нефти и газа Российской академии наук,  
119333, г. Москва, ул. Губкина, 3, vib@pgc.su

<sup>2</sup> АО «Морская арктическая геологоразведочная экспедиция»,  
183038, г. Мурманск, ул. Софьи Перовской, д. 26, a.kazanin@mage.ru

### Реферат

Объектом исследования являлся Центрально-Лаптевский участок, включающий зону интенсивной эмиссии метана через морское дно. В ходе работы проанализированы сейсмические разрезы и отдельные сейсмограммы по 28 сейсмопрофилям общей длиной 5930 км. В результате работы доказаны отсутствие субаквальных многолетнемерзлых пород и газогидратов, а также приуроченность сипов к разрывным нарушениям, уходящим на большие глубины осадочного чехла. Обосновано, что исследованная зона является одной из самых уникальных на мелководном шельфе Арктики. В ней одновременно присутствуют мощный осадочный чехол с высоким нефтегазоматеринским потенциалом, активные сейсмические события и системы тектонических разломов с преобладающим региональным напряжением растяжения. Это привело к образованию крупного окна длительной интенсивной дегазации Земли с прямой миграцией глубинного термогенного газа по системам разломов и субвертикальных трещин.

**Ключевые слова:** газ; газовые гидраты; дегазация; криолитозона; многолетнемерзлые породы; море Лаптевых.

### Subaquaclyolithozone and gas seeps on the Laptev Sea shelf

Bogoyavlensky V.I.<sup>1</sup>, Kishankov A.V.<sup>1</sup>, Kazanin A.G.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Oil and Gas Research Institute of the Russian Academy of Sciences,  
3, Gubkina Street, 119333, Moscow, Russia, vib@pgc.su

<sup>2</sup> JSC Marine Arctic Geological Expedition,  
26, S. Perovskoy Street, 183038, Murmansk, Russia, a.kazanin@mage.ru

### Abstract

The object of the research was the Central Laptev area, including the zone of intensive methane emission through the seafloor. The research consisted of analysis of seismic sections and separate seismograms for 28 lines with total length of 5930 km. As a result of the research, the absence of subaquaclyolithozone and gas hydrates, and also connection of seeps with faults reaching great depths of the sedimentary cover were proved. It was justified that the studied zone is one of the most unique on the shallow shelf of the Arctic. It includes thick sedimentary cover with high petroleum potential, active seismic events and systems of tectonic faults with prevailing regional extension stress. This led to formation of the large window of continuous intensive degassing of the Earth with direct migration of deep thermogenic gas through systems of faults and subvertical fractures.

**Key Words:** cryolithozone; degassing; gas; gas hydrates; Laptev Sea; permafrost.

### Введение

В последние десятилетия резко вырос объем исследований газонасыщенности верхней части разреза и эмиссии газа в атмосферу на шельфе Арктики. Не вызывает сомнений, что в Арктике происходит эмиссия газа (в основном метана) вследствие деградации многолетнемерзлых пород (ММП) на мелководном дне (до 120 м) - затопленной при потеплении климата в процессе постледниковой трансгрессии низменной части суши [Баранов и др., 2019; Богоявленский, 2020; Богоявленский и др., 2018, 2021а, б; Сергиенко и др., 2012, Varanov et al., 2020; Shakhova et al., 2015; 2019 и др.]. При этом эмиссия газа идет из залежей в свободном и/или гидратном состояниях. На мелководье шельфа значительная часть газа не успевает раствориться в водной толще и уходит в атмосферу, усиливая парниковый эффект. Сформулированные явления применены для объяснения интенсивной эмиссии газа в крупной (80x200

км) Центрально-Лаптевской зоне сипов газа (ЦЛЗСГ) [Сергиенко и др., 2012, Shakhova et al., 2015; 2019 и др.]. Однако распространение реликтовых ММП и газогидратов (ГГ) в данной зоне, как и на всем шельфе морей Восточной Сибири, изучено недостаточно.

Целью данной работы являлся анализ распространения ММП и ГГ в центральной части моря Лаптевых, включая ЦЛЗСГ для определения возможного генезиса газа в сипах.

### Метод и теория

Поставленная цель была достигнута на основе комплексных исследований сейсмических волновых полей, зарегистрированных при проведении сейсморазведки МОГТ АО «МАГЭ» в 2009 г. На первом этапе работы анализировались временные разрезы МОГТ, на которых выделялись аномалии, указывающие на потенциальные залежи свободного газа, по

следующим признакам: локальное повышение амплитуды отражений типа «яркое пятно»; инверсия фаз отражений; прогибание осей синфазности за счет уменьшения скоростей распространения упругих волн в газонасыщенных отложениях; снижение частотного диапазона; наличие зоны акустической тени; наличие плоских осей синфазности (газоводяной контакт) [Богоявленский и др., 2018, 2021a]. Также выделялись зоны ухудшения прослеживаемости отражений – газовые трубы, ассоциируемые с разломами и зонами трещиноватости, и горизонт BSR (bottom simulating reflector), указывающий на ГГ.

Сопоставление положений сипов газа и сеймопрофилей показало их явную взаимосвязь (например, рис. 1). На пикете ОГТ 1000 (рис. 1А) сип находится рядом с входящим до поверхности осадочного чехла разломом. На пикетах 1600-1800 расположена зона с высокой концентрацией сипов (рис. 1В). Данный участок уверенно коррелируется с рядом разломов и с широкой зоной деструкции сейсмозаписей. На месте многочисленных сипов газа на дне наблюдается поднятие, возможно, газодинамического генезиса. Всего в ходе работы было проанализировано 28 временных разрезов МОГТ общей протяженностью около 5930 км, на которых выделено 519 аномальных объектов со средним шагом 11,4 км (рис. 2). Большая часть объектов находится на глубинах до 200 м от морского дна, что объясняется наличием активных систем разломов и субвертикальных трещин, местами доходящих до дна [Богоявленский и др., 2021a]. Кроме того, выделена зона распростра-

нения ГГ на континентальном склоне [Богоявленский и др., 2021a; Bogoyavlensky et al., 2018] (см. рис.2).

На втором этапе работы анализировались сейсмограммы ОПВ (общий пункт взрыва) [Богоявленский и др., 2021б]. Физическая суть анализа заключалась в выявлении в придонных отложениях (глубины до 400-500 м) неоднородностей с повышенными скоростями распространения упругих колебаний, характерными для пород в мерзлом состоянии, а также содержащих залежи ГГ.

Наиболее надежно пласты с повышенными скоростями могут быть обнаружены и исследованы по записям преломленных волн, обычно регистрируемым в первых вступлениях сейсмограмм ОПВ. При аппроксимации среды горизонтально-слоистой моделью кажущиеся скорости, определяемые по годографам (осям синфазности) преломленных волн, равны граничной (пластовой) скорости в преломляющем горизонте, что справедливо и при небольших углах наклона границы раздела (до 1-1,5°) [Brothers et al., 2012]. Данный подход был реализован ранее специалистами Геологической службы США (USGS) для северного шельфа Аляски в море Бофорта при анализе сейсмопрофилей МОГТ 1977-1992 гг. в объеме около 5000 км [Brothers et al., 2012]. При этом, минимальным значением скорости распространения преломленных волн в кровле ММП принято 2,3 км/с, а для разделения ММП на более и менее стабильные, принято второе ограничивающее значение скорости 2,8 км/с.

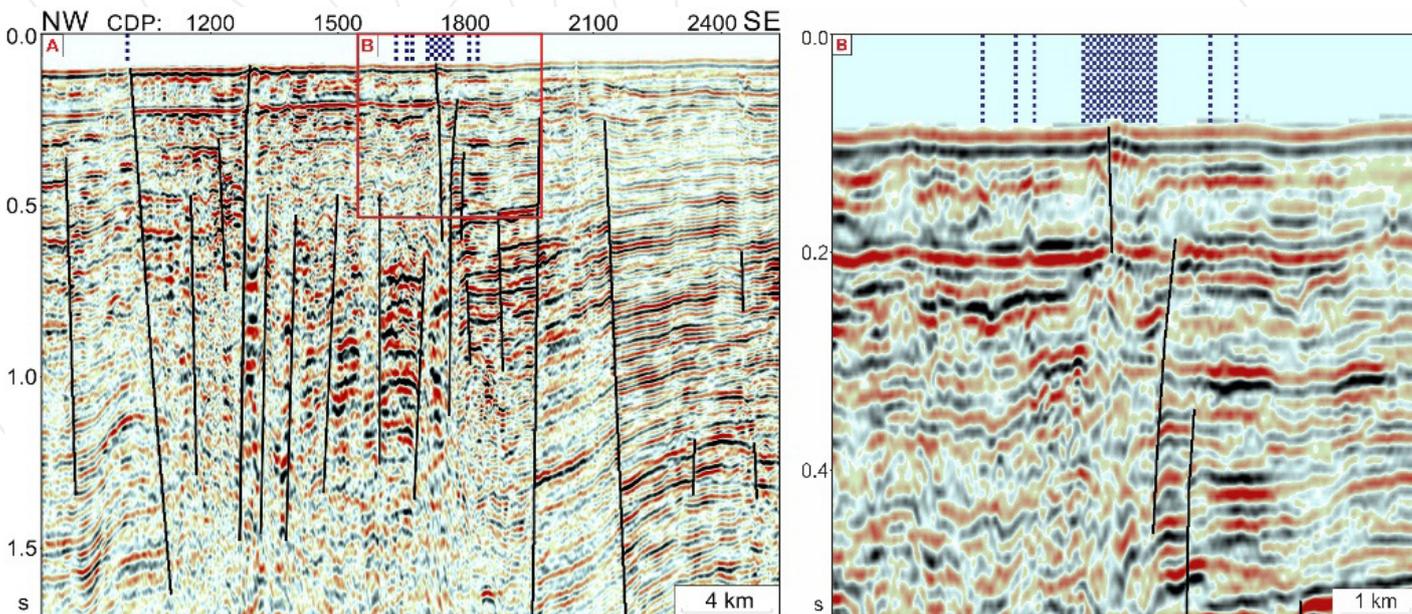


Рис. 1. Участок временного разреза по сейсмопрофилю МОГТ LS0910 (А) с увеличенным фрагментом (В).  
Положение на карте – см. рис. 2, 3.

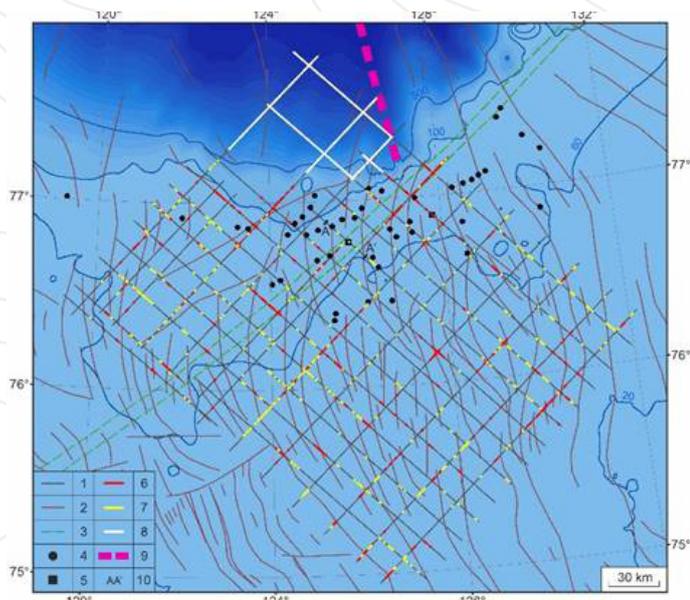


Рис. 2. Результаты анализа временных разрезов.  
 Обозначения: 1 — сейсмопрофили; 2 — глубинные разломы;  
 3 — Хатангско-Ломоносовская зона разломов;  
 4 и 5 — сипы газа, в том числе участки с высокой концентрацией сипов газа (5); 6 — аномальные объекты, отождествляемые с залежами свободного газа в ВЧР; 7 — сейсмические аномалии — возможные пути миграции газа; 8 — горизонт BSR; 9 — ось хребта Гаккеля; 10 — положение участка временного разреза рис. 1.

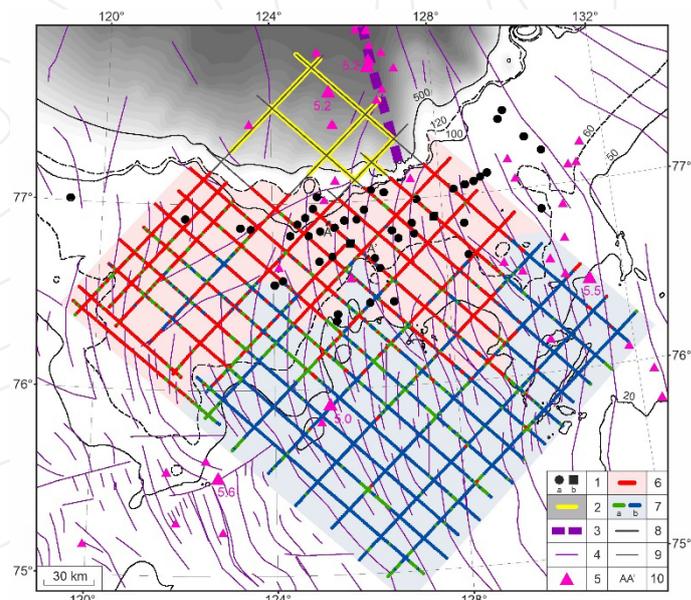


Рис. 3. Результаты анализа состояния придонных отложений.  
 Обозначения: 1 а, б — сипы газа (б — участки с высокой концентрацией сипов); 2 — горизонт BSR; 3 — ось хребта Гаккеля;  
 4 — глубинные разломы; 5 — землетрясения (в том числе с указанной магнитудой более 5,0); 6 — отсутствие преломленных волн или их скорости менее 2,3 км/с; 7 — преломленные волны с кажущимися скоростями 2,3-2,8 км/с (а) и 2,8-4,0 км/с (б); 8 — участки сейсмопрофилей на глубинах свыше 120 м; 9 — изобаты; 10 — положение участка временного разреза рис. 1.

В результате анализа волновых полей сейсмограмм ОПВ обнаружены две кардинально различающиеся зоны (рис. 3). Северная зона (до изобаты 120 м — примерной береговой линии во время последнего оледенения [Shakhova et al., 2019 и др.] характеризуется практически полным отсутствием преломленных волн от неглубоких (до 400-500 м) горизонтов за исключением небольших локальных площадей (возможно, островная мерзлота). Отсутствие преломленных волн объясняется отсутствием ММП и/или ГГ. В южной зоне на сейсмограммах ОПВ выделяются преломленные волны со скоростями 2,3-4,0 км/с, отождествляемые с наличием толщи ММП и/или ГГ, при этом изменения скоростей характеризуют акустические характеристики среды. Пониженные скорости (2,3-2,8 км/с), видимо, соответствуют очагам большей деградации ММП. Здесь же имеются небольшие зоны размером до 2-5 км, отождествляемые со сквозными таликами, на которых преломленные волны отсутствуют. Граница между двумя зонами проходит примерно по изобате 60 м, с локальными отклонениями до изобат 85 и 45 м, что согласуется с выполненным ранее моделированием для региона [Romanovskii et al., 2005]. Отклонения границы могут объясняться литологическими неоднородностями придонных отложений и отложений ВЧР и различиями в тепловых потоках. Переход из южной зоны в северную практически повсеместно сопровождается постепенным снижением скоростей, что, видимо, обусловлено увеличением уровня деградации ММП в северном направлении, связанным с ранней трансгрессией моря.

## Выводы

В результате работы доказаны отсутствие ММП и ГГ в зоне ЦЛЗСГ и приуроченность сипов к разрывным нарушениям, уходящим на большие глубины осадочного чехла [Богоявленский и др., 2021а, б]. Данные выводы подтверждаются результатами анализа изотопного состава углерода метана проб газа из сипов, свидетельствующими о его термогенном (глубинном) генезисе ( $\delta^{13}\text{C}$  ( $\text{CH}_4$ ) от  $-55\%$  до  $-42,6\%$ ) [Steinbach et al., 2021]. Совокупность геолого-геофизических и криологических особенностей делает район ЦЛЗСГ одной из самых уникальных зон мелководного шельфа Арктики, в которой одновременно присутствуют мощный осадочный чехол с высоким нефтегазоматеринским потенциалом, активные сейсмические события и системы тектонических разломов с преобладающим региональным напряжением растяжения. По мнению авторов, здесь образовалось крупное окно длительной интенсивной дегазации Земли с прямой миграцией глубинного термогенного газа по системам разломов и субвертикальных трещин.

Работа выполнена по госзаданию ИПНГ РАН по теме № АААА-А19-119021590079-6.

## Литература

Баранов Б.В., Лобковский Л.И., Дозорова К.А., Цуканов Н.В. Система разломов, контролирующая метановые сипы на шельфе моря Лаптевых // Докл. Акад. Наук, 486 (3) — 2019 — С. 354–358.

Богоявленский В.И. Природные и техногенные угрозы при освоении месторождений горючих ископаемых в криолитосфере Земли // Горная промышленность, 1 (149) – 2020 – С. 97–118.

Богоявленский В.И., Казанин Г.С., Кишанков А.В. Опасные газонасыщенные объекты на акваториях Мирового океана: море Лаптевых // Бурение и нефть, 5 – 2018 – С. 20–28.

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, 11 (2) – 2021а – С. 178–194.

Богоявленский В.И., Кишанков А.В., Казанин А.Г. Мерзлота, газогидраты и сипы газа в центральной части моря Лаптевых. // Докл. Акад. Наук, 500 (1) – 2021б – С. 83–89.

Пискарев А.Л., Поселов В.А., Аветисов Г.П. и др. Арктический бассейн (геология и морфология). СПб: ВНИИОкеангеология, 2016 – 291 с.

Сергиенко В.И., Лобковский Л.И., Шахова Н.Е. и др. Деграция подводной мерзлоты и разрушение гидратов шельфа морей Восточной Арктики как возможная причина «метановой катастрофы»: некоторые результаты комплексных исследований 2011 года. // Докл. Акад. Наук, 446 (3) – 2012 – С. 330–335.

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, 40 – 2020 – Pp. 541–557.

Bogoyavlensky V., Kishankov A., Yanchevskaya A., Bogoyavlensky I. Forecast of Gas Hydrates Distribution Zones in the Arctic Ocean and Adjacent Offshore Areas // Geosciences, 8 (12), 453 – 2018 – Pp. 1–17.

Brothers L. L., Hart P. E., Ruppel C. D. Minimum distribution of subsea ice-bearing permafrost on the US Beaufort Sea continental shelf // Geop. Res. Let., 39 (15) – 2012 – Pp. 1–6.

Romanovskii N. N., Hubberten H.-W., Gavrilov A. V. et al. Offshore permafrost and gas hydrate stability zone on the shelf of East Siberian Seas // Geo-marine letters, 25 (2–3) – 2005 – Pp. 167–182.

Shakhova N., Semiletov I., Sergienko V., Lobkovsky L. 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, 373, 20140451 – 2015.

Shakhova N., Semiletov I., Chuvilin E. Understanding the permafrost-hydrate system and associated methane releases in the east Siberian Arctic Shelf // Geosciences, 9 (6), 251 – 2019.