

УДК 551.24

## СИСТЕМА РАЗЛОМОВ, КОНТРОЛИРУЮЩИХ МЕТАНОВЫЕ СИПЫ НА ШЕЛЬФЕ МОРЯ ЛАПТЕВЫХ

Б. В. Баранов\*, член-корреспондент РАН Л. И. Лобковский, К. А. Дозорова\*\*, Н. В. Цуканов

Поступило 05.02.2019 г.

Приведены данные, полученные в экспедициях 69-го и 72-го рейсов нис “Академик Мстислав Келдыш” (2017, 2018 гг.). Предложен механизм разгрузки метана, объясняющий локализацию сиповых полей в ограниченной области внешнего шельфа и предполагающий наличие системы глубинных и поверхностных разломов. 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.

*Ключевые слова:* море Лаптевых, рельеф шельфа, метановые сипы, глубинные разломы, поверхностные разломы.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524863354-358>

### ВВЕДЕНИЕ

На шельфе моря Лаптевых участки интенсивной пузырьковой разгрузки метана, которые фиксируются на записях эхолота в виде гидроакустических аномалий (газовых факелов) и являются одним из основных признаков наличия метановых сипов, были впервые обнаружены в 2008 г. [1]. В результате дальнейших исследований на шельфе в северной части моря было выделено 112 полей, которые включали в себя множество метановых сипов, расположенных в интервале глубин 50–90 м [2].

Поля метановых сипов можно оконтурить с выделением области размерами примерно 190×90 км, вытянутой в направлении ЮЗ–СВ и приуроченной к зоне сочленения срединно-океанического хребта Гаккеля, Хатангско-Ломоносовской зоны разломов (ХЛЗР) и Лаптевоморской рифтовой системы (ЛРС) (рис. 1). Основными подводящими каналами для эмиссии газа считаются разломы, и в работах [4, 5] отмечалась роль разрывных нарушений ЛРС или ХЛЗР в этом процессе, однако более детально данный вопрос нигде не рассматривался.

В настоящей работе этот пробел будет восполнен с использованием результатов предыдущих исследова-

ний и данных, полученных в экспедициях 69-го и 72-го рейсов нис “Академик Мстислав Келдыш” (2017, 2018 гг.) в рамках программы Института океанологии РАН “Экосистемы морей Сибирской Арктики” [6]. Исследования в 69-м и 72-м рейсах проводились однолучевым эхолотом EA600 фирмы Kongsberg, работающим на постоянной частоте 12 кГц с разрешением около 20 см и гидролокатором бокового обзора (ГБО) “Мезоскан” (ИО РАН) с частотой 78 кГц и разрешающей способностью от 1 м до 20 см. Район исследований включал в себя два полигона (“Один” и “С15”), расположенных на внешнем шельфе (рис. 1).

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Шельф моря Лаптевых подразделяется на внутренний и внешний [7]. Внешний шельф начинается с глубины 50 м и отчётливо выделяется по увеличению наклона дна и его расчлененности по сравнению с ровной субгоризонтальной поверхностью внутреннего шельфа (рис. 1, верхняя врезка). Расчленённость рельефа дна обусловлена наличием депрессий или уступов глубиной и высотой до 5 м, отстоящих друг от друга на расстоянии в несколько километров.

Полигон “Один” располагался на глубинах 63–68 м, а полигон “С15” — в интервале глубин 70–73 м; площади, охваченные съёмкой, были равны 12 и 11 км<sup>2</sup>, соответственно. На полигоне “Один” наи-

*Институт океанологии им. П.П. Ширинова  
Российской Академии наук, Москва*

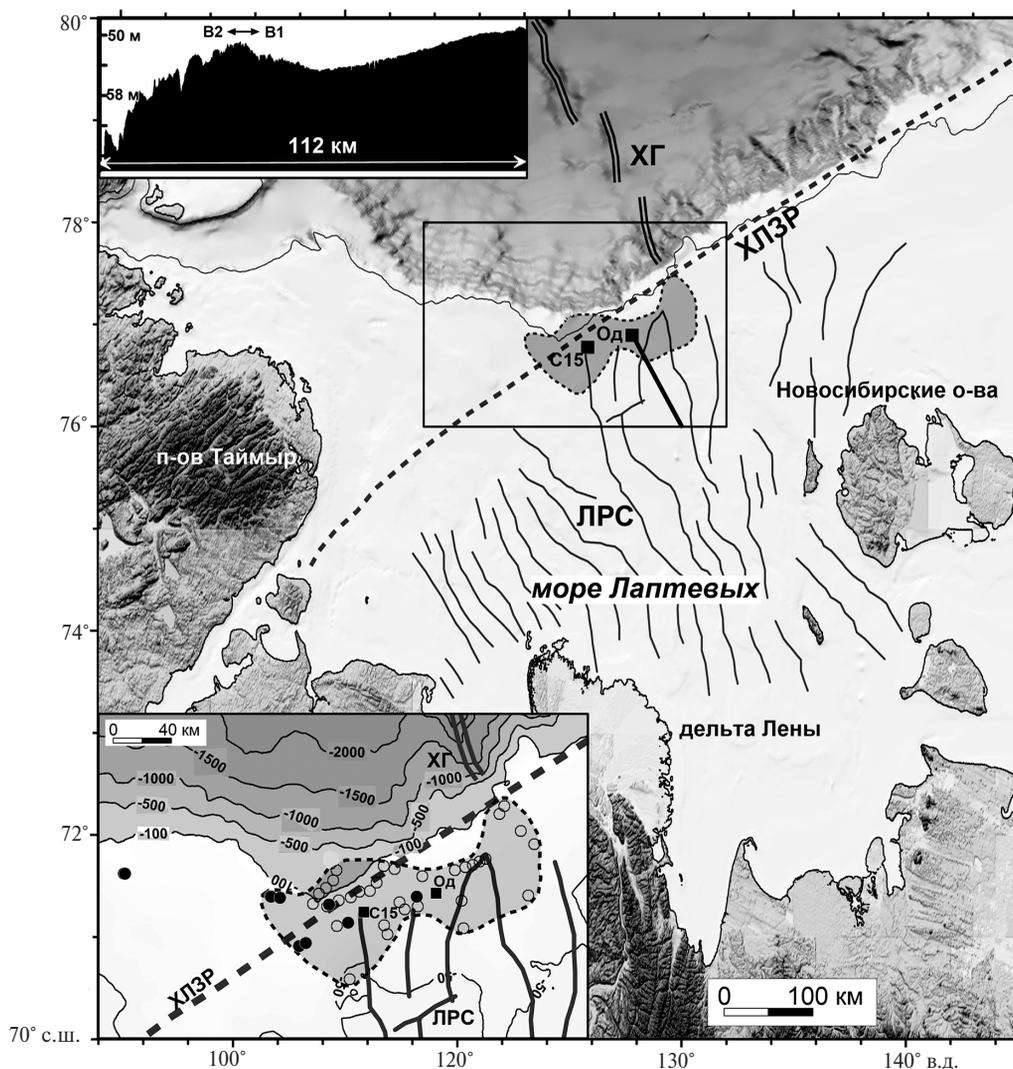
\*E-mail: [bbaranov@ocean.ru](mailto:bbaranov@ocean.ru)

\*\*E-mail: [karina.dozorova@yandex.ru](mailto:karina.dozorova@yandex.ru)

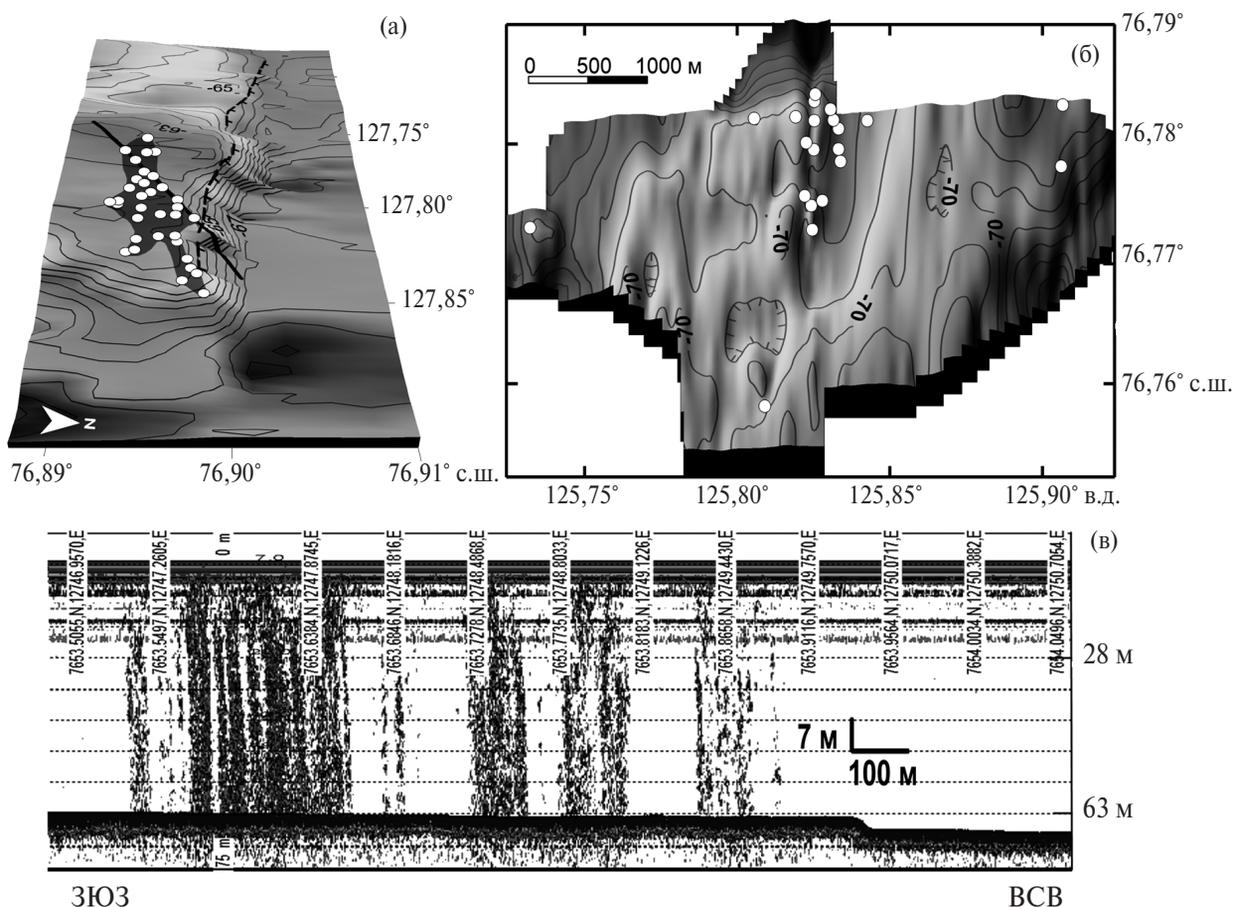
более примечательной формой рельефа является субширотный уступ, протяжённостью более 3 км (рис 2а). В центральной части уступа, как это видно на изображении ГБО, бровка уступа смещается, образуя левостороннюю кулису. Высота уступа уменьшается с востока на запад с 4 до 1 м, к западу он становится более пологим и его простираение отклоняется к северу. Рельеф дна на полигоне “С15” является менее выразительным, уступы широтного простираения здесь отсутствуют, но наблюдается чередование небольших прогибов и поднятий суб-меридиональной ориентировки (рис. 2б).

На полигоне “Один” в результате гидроакустической съёмки было зарегистрировано 34 газовых факела, максимальные поперечные размеры которых могли достигать 300 м (рис. 2в). Газовые факелы маркируют поле метановых сипов, которое располагается на относительно приподнятой части полигона вблизи бровки уступа и вытянуто в направлении ЗЮЗ–ВЗВ на расстояние около 2 км (рис. 2а).

При наших исследованиях наличие газовых факелов вблизи уступов или на незначительном удалении от них наблюдалось на большинстве профилей, которые пересекали сиповые поля. Это даёт основание предполагать, что расположение газовых



**Рис. 1.** Теневая батиметрическая карта моря Лаптевых (грид ИВСАО V.3), основные разломы в фундаменте и осадочном чехле по [3] и область метановых сипов (серый контур). Залитые квадраты — полигоны “С15” и “Один” (Од), прямоугольник — район исследований. На нижней врезке показаны поля метановых сипов (незалитые кружки по [2] и залитые кружки по данным 67-го и 72-го рейсов нис “Академик Мстислав Келдыш”). Сокращения: ЛРС — Лаптевоморская рифтовая система, ХЛЗР — Хатангско-Ломоносовская зона разломов, ХГ — хребет Гаккеля. На верхней врезке показан батиметрический профиль, иллюстрирующий переход от внутреннего (В1) к внешнему (В2) шельфу, положение профиля дано жирной линией на рисунке.



**Рис. 2.** 3-х мерные изображения рельефа полигонов “Один”, вид с востока (а) и “С15” (б) с положением газовых факелов (залитые белые кружки). Тёмно-серым цветом показан контур сипового поля на полигоне “Один”. Пунктирной линией с бергштрихами обозначена бровка уступа по данным ГБО; (в) фрагмент эхолотной записи с газовыми факелами.

факелов вблизи уступов характерно для всей рассматриваемой области.

На полигоне “С15” был зарегистрирован 21 газовый факел, причём большинство из них концентрировалась вдоль небольшого прогиба, ориентированного в субмеридиональном направлении. На одном из галсов съёмки газовые факелы выстраивались в цепочку субширотного простирания (рис. 2б). Отдельные газовые факелы были также зарегистрированы в пределах всего полигона, однако по сравнению с полигоном “Один” детальность съёмки оказалась недостаточной для выделения границ метанового поля.

## ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

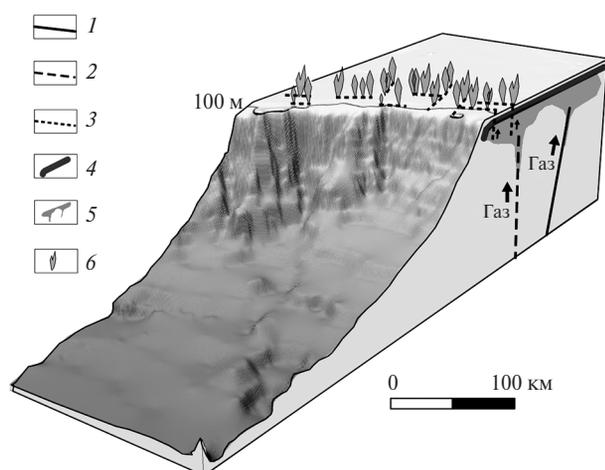
Метановые сипы, как известно, образуются при наличии в осадочной толще подводящих каналов и свободного газа/флюида. На лаптевоморском шельфе фундамент разбит многочисленными глу-

бинными разломами, которые могут являться подводящими каналами для эмиссии газа [3, 8]. Разломы, ориентированные в СЗ–ЮВ и субмеридиональном направлениях, связаны с рифтами и горстами ЛРС. Другая группа разрывных нарушений имеет ЮЗ–СВ простирание; наиболее ярким её представителем является ХЛЗР. Судя по высокой сейсмичности [7], глубинные разломы являются активными, но из-за большой мощности осадочного чехла они, как правило, не выходят на поверхность [3]. Плоскости разрывных нарушений, достигающие дна, выглядят как уступы высотой в несколько метров, которые резко контрастируют с выровненным субгоризонтальным дном. Существующая детальность проведённой здесь батиметрической и сейсмической съёмки является недостаточной для уверенного определения их ориентировки, но предполагается, что они наследуют простирания глубинных разломов [8].

Третья группа разломов наблюдается вдоль бровки лаптевоморского шельфа. Это поверхностные разрывные нарушения, которые образуются в результате оседания края внешнего шельфа [9], происходящего за счёт избыточного поступления осадочного материала, выносимого реками [7].

При батиметрической съёмке на полигоне “Один” был закартирован уступ высотой несколько метров, который имеет субширотное простираие. Учитывая данные, полученные при изучении новейших разломов [8], можно предполагать, что уступ образовался за счёт смещения дна по новейшему разлому. Разлом расположен на удалении от ХЛЗР, ориентирован параллельно бровке шельфа и поэтому он, скорее всего, связан с погружением внешнего шельфа.

Погружение внешнего шельфа на профиле (рис. 1, верхняя врезка) начинается на расстоянии 60 км от бровки шельфа, соответствующей изобате 100 м. Расстояние от бровки до трёх наиболее удаленных от неё сиповых полей колеблется от 58 до 64 км, т.е. совпадает с шириной внешнего шельфа. Ранее отмечалось [8], что косвенным признаком наличия новейших разломов на лаптевоморском шельфе могут быть участки эмиссии газа из осадочной толщи. Это дает основание предположить наличие разрывных нарушений в пределах всего внешнего шельфа, где расположена область полей метановых сипов. Данный вывод подтверждается наличием цепочек метановых полей, которые выстраиваются в ЮЗ–СВ и ЗЮЗ–ВСВ направлениях (рис. 1, нижняя врезка). Субширотная и ЗЮЗ–ВСВ ориен-



**Рис. 3.** Система разломов, которые могут служить подводными каналами для метановых сипов. 1–2 — глубинные разломы: 1 — ЛРС; 2 — ХЛЗР; 3 — поверхностные разломы внешнего шельфа; 4 — покрывка (ММП и ЗСГ); 5 — газовая залежь; 6 — газовые факелы. Вертикальный разрез дан вне масштаба.

тировка скоплений газовых факелов также наблюдается в пределах изученных полигонов, по всей видимости, маркируя разломы.

Если подводными каналами для метановых сипов являются глубинные разломы фундамента лаптевоморского шельфа, то возникает вопрос, почему разгрузка метана происходит только в локальной области сиповых полей внешнего шельфа, а не по всему шельфу, где широко распространены рифтовые грабены, заполненные мощной осадочной толщей, способной генерировать свободный газ. Образующийся свободный газ может формировать газовую залежь ниже покрывки, включающей горизонт многолетнемерзлых пород (ММП) и зону стабильности газогидрата (ЗСГ). Эта покрывка, как показали результаты математического моделирования [10], будет разрушаться за счёт высокого геотермического потока, приводя к эмиссии газа из нижерасположенной залежи на этапах трансгрессий.

Наши и предыдущие исследования, однако, свидетельствуют о том, что струйное (пузырьковое) выделение газа происходит не на всём протяжении рифтовых грабенов лаптевоморского шельфа, а только в рассматриваемой области внешнего шельфа (рис. 1). Для объяснения этого факта мы предлагаем механизм разгрузки метана, предполагающий наличие системы разломов, включающей в себя глубинные и поверхностные разрывные нарушения (рис. 3). Вдоль первых, связанных с ЛРС и ХЛЗР, происходит перенос газового флюида в верхние горизонты осадочного чехла, где он аккумулируется ниже зоны ЗСГ и горизонта многолетнемерзлых пород (ММП). Погружение шельфа, вероятно, может приводить к возникновению поверхностных разломов как параллельных, так и ортогональных к его бровке, или к реактивации субмеридиональных глубинных разломов с выходом их на поверхность. На это может указывать наличие подводных каньонов, врезанных в бровку шельфа [8] и субмеридиональная ориентировка форм рельефа и цепочки газовых факелов на полигоне “С15”. Поверхностные разломы, связанные с погружением внешнего шельфа, нарушают сплошность покрывки и создают подводные каналы, по которым происходит миграция газа к поверхности и его струйное выделение в водную толщу.

**Источники финансирования.** Работа выполнена в рамках госзадания Института океанологии РАН по базовой теме № 0149–2019–0005 при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18–05–60228 “Арктика”.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юсупов В.И., Салюк А.Н., Карнаух В.Н., и др. // ДАН. 2010. Т. 430. № 6. С. 820–823.
2. Shakhova N., Semiletov I., Sergienko V., et al. // Phil. Trans. Roy. Soc. 2015. A373: 20140451.
3. Драчев С.С. // Геотектоника. 2000. № 6. С. 43–56.
4. Лобковский Л.И., Никифоров С.Л., Дмитриевский Н.Н. и др. // Океанология. 2015. Т. 55. № 2. С. 312–320.
5. Шипилов Э.В., Лобковский Л.И., Кононов М.В. В кн.: Проблемы тектоники и геодинамики земной коры и мантии. Т. 2. Материалы I Тектон. совещ. М.: Геос, 2018. С. 336–341.
6. Флинт М.В., Поярко С.Г., Римский-Корсаков Н.А. // Океанология. 2018. № 2. С. 434–436.
7. Пискарев А. Л. Арктический бассейн (геология и морфология). СПб.: ВНИИОкеангеология, 2016. 291 с.
8. Рекант П.В., Гусев Е.А. // Проблемы Арктики и Антарктики. 2009. № 2 (82). С. 85–94.
9. Анохин В.М., Гусев Е.А. В кн.: Вестник Томского Государственного Университета, Приложение № 3 (I). Материалы научной конференции “Проблемы геологии и географии Сибири”. Томск, 2003. С. 21–23.
10. Романовский Н.Н., Елисева А.А., Гаврилов А.В. и др. // Криосфера Земли. 2006. Т. X. № 1. С. 29–38.

## THE FAULT SYSTEM CONTROLLING METHANE SEEPS ON THE SHELF OF THE LAPTEV SEA

**B. V. Baranov, Corresponding Member of the RAS L. I. Lobkovsky, K. A. Dozorova,  
N. V. Tsukanov**

*P.P. Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow*

Received February 05, 2019

The paper presents data obtained during the 69th and 72nd expeditions of the research vessel Akademik Mstislav Keldysh (2017, 2018). A mechanism of methane discharge that explains the localization of the seep fields in a limited area of the outer shelf and suggesting a system of deep and surface faults is proposed. Along the deep faults, gas fluid is transferred to the upper strata of the sedimentary cover, where it is accumulated below the gas hydrate stability zone and the permafrost horizon. The surface faults of the outer shelf break this caprock, creating conduits for the gas to migrate to the surface and to jet-release into the water column.

*Keywords:* Laptev Sea, shelf relief, methane seeps, deep faults, surface faults.