

## Опасные геологические процессы в позднеплейстоценовых долинах Карского моря

Е.В. Ворошилов\* (МГУ им. М.В. Ломоносова), Е.А. Мороз (ГИН РАН), С.Ю. Соколов (ГИН РАН), Ананьев Р.А. (ИО РАН).

### Введение

Карское море является регионом Российской Арктики, малоизученным детальной съемкой высокочастотным профилированием и многолучевым эхолотом. Эти методы дают информацию о детальном строении верхней части разреза и геоморфологии дна. В позднем плейстоцене на шельфе Карского моря были сформированы комплексы ледникового, водно-ледникового, флювиального, палеомерзлотного и дегазационного рельефа (кратеры, формы газового пучения и др.), определившие его сложную морфологию. Одним из ключевых направлений является изучение современных процессов дегазации метана [Рокос, Тарасов, 2007; Portnov et al. 2018], связанных с деградацией многолетнемерзлых пород – естественного флюидоура, который проявлен на больших площадях шельфа. Установленным фактом является интенсивная дегазация в областях развития пингоподобных поднятий в Печорском море и южной части Карского моря [Бондарев и др. 2002; Serov et al. 2015; Соколов и др. 2019]. В свою очередь в Карском море участки с зафиксированными выходами газа в водную толщу выявлены в аномально переуглубленных долинах. Вопрос относительно генезиса подобных депрессий на настоящий момент остается открытым.

По итогам морских экспедиционных работ в Карском море в 2019 и 2020 году на НИС «Академик Николай Страхов» были построены карты рельефа дна и получены сейсмоакустические разрезы верхней части осадочного чехла. Установлено, что газопроявления, которые могут оказывать негативное воздействие на хозяйственную и навигационную деятельность человека, развиты в бортовых частях и днищах долин. Кроме того, вне долин наблюдаются многочисленные газовые воронки – покмарки, которые указывают на потенциально опасные зоны, где имели место выбросы газа

### Аппаратура и методика

Используемые данные были получены при помощи гидроакустического комплекса установленного стационарно на НИС «Академик Николай Страхов». Многолучевая батиметрическая съемка производилась эхолотом REASON Seabat 8111 с частотой сигнала 100 кГц. Профилирование верхней части разреза осуществлялось профилографом Edgetech 3300 с CHIRP сигналом 2-12 кГц. Данный частотный диапазон позволяет изучать рыхлую часть разреза с проникновением в тонкослоистые осадки до 100 м.

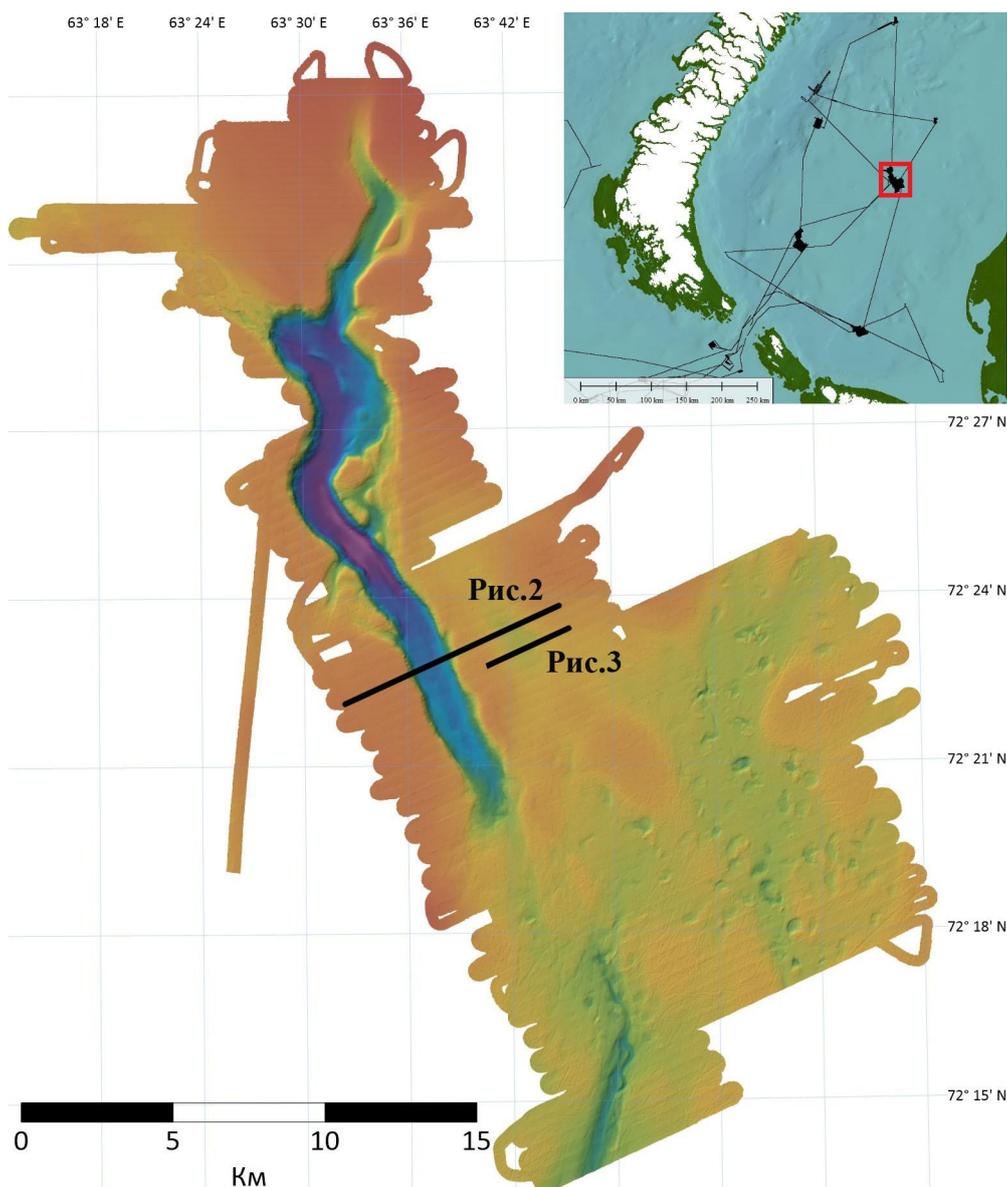
Работы проводились по системе параллельных галсов с эффективным перекрытием полос озвучивания между галсами около 20% после удаления краевых некондиционных отскоков данных многолучевого эхолота. Обработка данных многолучевой батиметрической съемки производилась операторами вручную в программном пакете PDS V3.4.7.1. Визуализация разрезов проводилась в программных пакетах RadExPro и SeiSee.

### Полученные результаты

В западной части Карского моря в ходе работ 41 и 49 рейсов НИС «Академик Николай Страхов» сплошной батиметрической съемкой была закартирована крупная депрессия рельефа (рис.1). Полигон располагается на глубинах от 50 до 240 м, при фоновых глубинах 60-90 м, перепад глубин на участке – 190 м.). Крупнейшая форма полигона – грабенообразная долина,

представляет собой извилистую в плане линейную депрессию длиной 18 км и относительной глубиной до 160 м (рис. 1). Ширина депрессии по бровкам 1.5-1.7 км в южной и центральной частях понижения, и 2.8-3 км в северной части.

В морфоструктурном отношении, по данным [Верба, 2007] рассматриваемая долина представляет собой неотектонический грабен проседания. Субпараллельно по направлению основной отрицательной структуры к востоку от основного грабена по данным многолучевой съемки и сейсмоакустического профилирования была выявлена грабенообразная структура (рис.1,2) меньшего порядка, классифицируемая как «эмбриональный» грабен проседания. В юго-восточной части полигона наблюдаются депрессии рельефа с меньшим перепадом глубин, в пределах которых распространены покмарки.



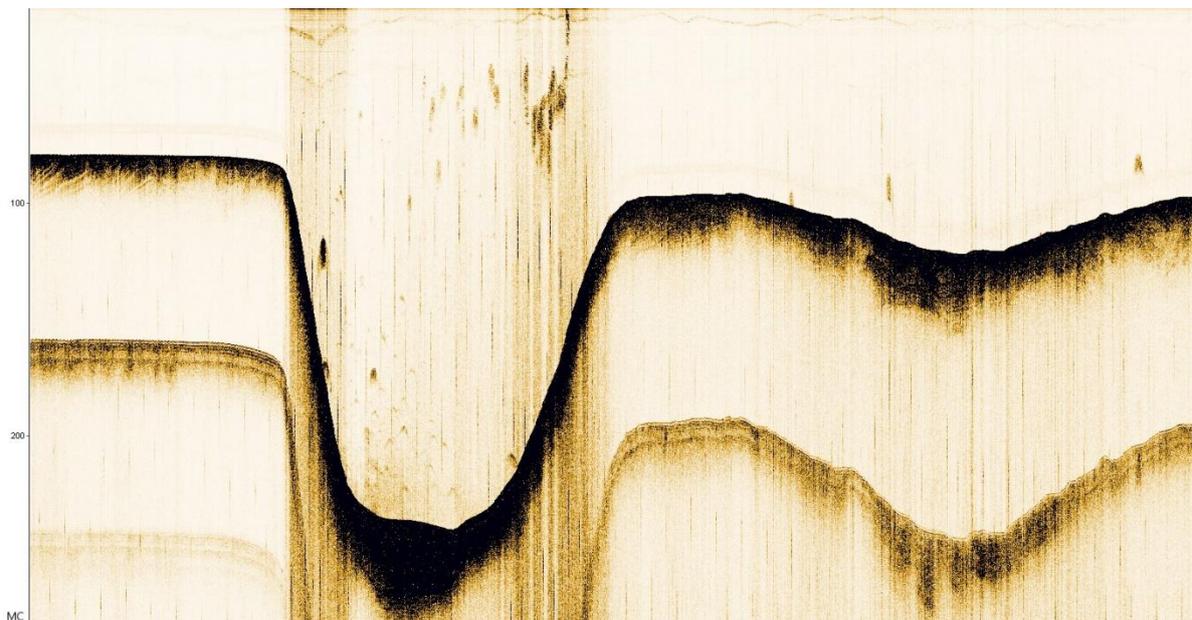
**Рисунок 1.** Многолучевая батиметрия полигона в Карском море. В западной части выделяются переуглубленные долины. Черными линиями показаны положения разрезов **Рис.2** и **Рис.3**.

По данным фактического материала, полученного в экспедиционных работах 41-49 рейсов НИС «Академик Николай Страхов», были выявлены признаки существенной переработки территории в позднечетвертичное время. Рельеф полигона представляет собой

эрозионно-денудационную равнину, смоделированную ледниковыми, водно-ледниковыми и криогенными процессами с последующей голоценовой морской аккумуляцией. В пределах территории преобладают субгоризонтальные поверхности и очень пологие склоны (менее  $4^\circ$ ). У грабенообразных понижений и эрозионных врезов встречаются склоны средней крутизны ( $8-15^\circ$ ) и крутые (до  $35^\circ$ ). Для небольших западин характерны склоны средней крутизны и пологие ( $4-8^\circ$ ).

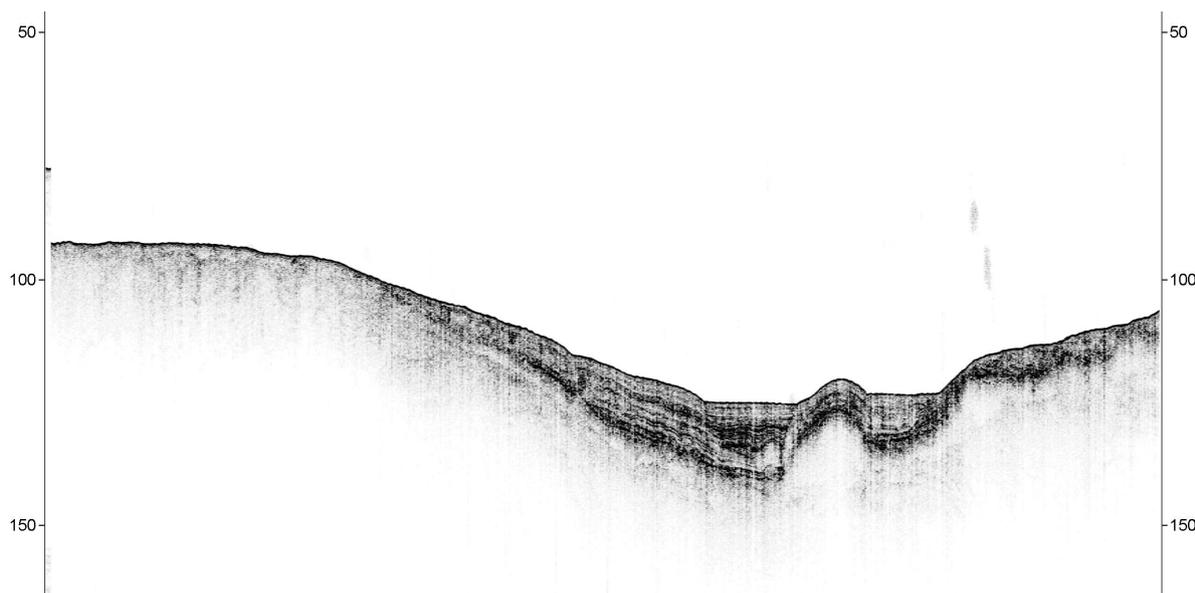
Склоны грабена с обеих сторон осложнены эрозией. По батиметрии выделяются поверхности, состоящие из холмов останцовой природы и реликтов русел, создающих вокруг них понижения глубиной 30-50 м. Понижения на этих поверхностях образуют рисунок, схожий с рисунком меандрирования. Склоны холмов средней крутизны –  $5-8^\circ$ , до  $10^\circ$ , вершины плоские. Абсолютные высоты вершин всех холмов соответствуют высотам фоновой равнины. Ступенчатый характер склонов, по-видимому, обусловлен переработкой поверхностей оползневыми процессами и отседанием крупных блоков по системе трещиноватости, которую наследует и эрозионная сеть.

Сейсмоакустические разрезы профилографа на полигоне показали наличие слоистых осадков, заполняющих депрессии рельефа, признаки наличия газа в приповерхностных осадках и многочисленные газовые проявления в водной толще (Рис.2, 3) в виде звукорассеивающих объектов различной формы. Характер распределения газовых факелов и пузырей в водной толще показывает увеличение концентрации акустических аномалий над основной долиной. В пределах субпараллельного прогиба количество газовых аномалий существенно меньше.



**Рисунок 2.** Газовые аномалии в водной толще над грабенообразными долинами. Сейсмоакустический разрез профилографа (2-12 кГц)

Предполагается, что повышенная концентрация газа в поверхностном слое осадков связана с деградацией реликтов многолетней мерзлоты на Карском шельфе. По всей видимости, переработка отрицательных морфоструктур эрозионными и склоновыми процессами на фоне неотектонического прогибания стимулировала процессы дегазации метана в позднечетвертичное время. Разуплотнение верхней части разреза на склонах и прибрежных частях междуречий может привести к последующему их обрушению и увеличению площади газовых выбросов в пределах указанного полигона.



**Рисунок 3.** Бугор пучения на восточном борту грабенообразной долины с признаками скопления газа под дном. Сейсмоакустический разрез профилографа (2-12 кГц)

На восточном борту грабенообразной долины (рис.3) указанные выше процессы проявлены в виде бугра пучения с признаками скопления газа на глубине около 10 м под дном но без их прорыва в водную толщу. Тем не менее, подобные объекты представляют потенциальную опасность, поскольку мощность пород над газовым скоплением крайне мала, и в районе с активными неотектоническими и эрозионными процессами прорыв газа в водную толщу представляется неизбежным.

## Выводы

1. В западной части Карского моря выявлена область сложнопостроенного рельефа, в пределах которой наблюдаются активные геологические процессы, которые могут представлять опасность для функционирования инженерных объектов и навигации.
2. По результатам фактического материала полученного в 41-49 рейсах НИС «Академик Николай Страхов» на полигоне выявлены области развития склоновых процессов: оползни, отседания блоков.
3. Нарушения верхней части осадочного разреза неотектоническими и эрозионными процессами приводят к появлению дегазации, которая проявлена как в водной толще, так и в приповерхностной части рыхлого осадочного разреза.
4. Взаимосвязь генетических типов рельефа и интенсивности дегазации в Карском море на настоящий момент до конца не установлена. Разработка данной проблемы является актуальной в связи с развитием инженерных работ на шельфовых площадях Арктики

## Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ по проекту № 18-05-70040, темы ГИН РАН «Геологические опасности в Мировом океане и их связь с рельефом, геодинамическими и тектоническими процессами» (государственная регистрация 0135-2019-0076), по Программе фундаментальных исследований Президиума РАН № 3.

## Библиография

1. Верб, М.Л. [2007] Современное билатеральное растяжение земной коры в Баренцево-Карском регионе и его роль при оценке перспектив нефтегазоносности. Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2007 (2). <http://www.ngtp.ru/rub/4/026.pdf>. С. 1-37
2. Бондарев, В.Н., Рокос, С.И., Костин, Д.А., Длугач, А.Г., Полякова, Н.А. [2002] Подмерзлотные скопления газа в верхней части осадочного чехла Печорского моря. Геология и геофизика. Т. 43. № 7. С. 587-598.
3. Соколов, С.Ю., Мороз, Е.А., Сухих, Е.А., Разумовский, А.А., Левченко, О.В. [2019] Проявления глубинной дегазации в водной толще и верхней части разреза Печорского моря. Георесурсы / Georesources. Т. 21. № 4. С. 68-76. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2019.4.68-76>
4. Рокос, С.И., Тарасов, Г.А. [2007] Газонасыщенные осадки губ и заливов южной части Карского моря. Бюллетень комиссии по изучению четвертичного периода. № 67. С. 66-75
5. Portnov, A., Mienert, J., Winsborrow, M. et al. [2018] Shallow carbon storage in ancient buried thermokarst in the South Kara Sea. Sci Rep 8. 14342 <https://doi.org/10.1038/s41598-018-32826-z>
6. Serov, P., Portnov, A., Mienert, J., Semenov, P., Ilatovskaya, P. [2015] Methane release from pingo-like features across the South Kara Sea shelf, an area of thawing offshore permafrost. J. Geophys. Res. Earth Surf. 120. 1515–1529. doi:10.1002/2015JF003467.

## References

1. Verba, M.L. [2007] Sovremennoye bilateral'noye rastyazheniye zemnoy kory v Barentsevo-Karskom regione i yego rol' pri otsenke perspektiv neftegazonosnosti. Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika. 2007(2). <http://www.ngtp.ru/rub/4/026.pdf>.
2. Bondarev, V.N., Rokos, S.I., Kostin, D.A., Dlugach, A.G., Polyakova, N.A. [2002] Podmerzlotnyye skopleniya gaza v verkhney chasti osadochnogo chekhla Pechorskogo moray. Geologiya i geofizika. V. 43. № 7. P. 587-598
3. Sokolov, S.Yu., Moroz, E.A., Sukhikh, E.A., Razumovskiy, A.A., Levchenko, O.V. [2019] Manifestations of deep degassing into the water column and upper part of the Pechora sea sedimentary section. Georesursy / Georesources. V. 21. № 4. P. 68-76. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2019.4.68-76>
4. Rokos, S.I., Tarasov, G.A. [2007] Gazonasyschennyye osadki gub i zalivov yuzhnoy chasti Karskogo morya. Byulleten' komissii po izucheniyu chetvertichnogo perioda. № 67. P. 66-75.
5. Portnov, A., Mienert, J., Winsborrow, M. et al. [2018] Shallow carbon storage in ancient buried thermokarst in the South Kara Sea. Sci Rep 8, 14342. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-32826-z>
6. Serov, P., Portnov, A., Mienert, J., Semenov, P., Ilatovskaya, P. (2015), Methane release from pingo-like features across the South Kara Sea shelf, an area of thawing offshore permafrost. J. Geophys. Res. Earth Surf. 120. 1515–1529. doi:10.1002/2015JF003467.