

МОРФОЛОГИЯ ПИНГОПОДОБНЫХ ФОРМ НА ШЕЛЬФАХ МОРЕЙ ПЕЧОРСКОГО И КАРСКОГО КАК ИНДИКАТОР ИХ ВОЗРАСТА И ДИНАМИКИ

¹Кохан А.В., ¹Мороз Е.А., ^{1,2}Еременко Е.А., ^{1,2}Денисова А.П., ³Ананьев Р.А., ¹Сухих Е.А., ³Никифоров С.Л., ¹Соколов С.Ю.

¹Геологический институт РАН, Москва, Россия

²МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

³Институт океанологии РАН, Москва

По результатам многолучевого эхолотирования и высокочастотного сейсмического профилирования, выполненных в рамках рейсов научно-исследовательских судов «Академик Николай Страхов» и «Академик Борис Петров» в 2018-2022 гг. установлены закономерности изменения морфометрических параметров и внутреннее строение пингоподобных форм на шельфах морей Печорского и Карского. Проведен морфометрический анализ пингоподобных форм, позволивший сделать выводы об их относительном возрасте, а также степени участия деятельности придонных течений и склоновых процессов в их современной динамике. Выявлено, что плотность и морфологическое разнообразие пингоподобных форм зависят от геоморфологической и геолого-тектонической позиции участка дна, наличия, мощности и типа многолетней мерзлоты, интенсивности дегазации, а также времени затопления шельфа в ходе голоценовой трансгрессии.

Ключевые слова: Арктика, дегазация, флюидогенный рельеф, акустические аномалии, голоценовая трансгрессия, многолетняя мерзлота

Введение и методы исследования. Флюидогенный рельеф образуется на поверхности шельфа в результате дегазации – процесса поднятия флюидов, в основном метана, из недр Земли вверх по разрезу к поверхности дна и в водную толщу [Judd, Hovland, 2007]. На арктических шельфах России он представлен покмарками («rockmarks»), пингоподобными формами («pingo-like features»), а также разнообразными образованиями в районах развития псевдовулканизма на дне, описанию которых посвящено немало научных работ [Миронюк, 2019, 2020; Paull et al., 2007; Serov et al., 2015; Shearer, 1971]. Вопросы, связанные с причинами дегазации и источниками флюидов, а также характером взаимосвязи между геолого-геоморфологическими условиями на шельфе и морфологией флюидогенного рельефа, до сих пор остаются во многом дискуссионными. Согласно имеющимся представлениям [Бондарев и др., 2002; Миронюк и др., 2019; Paull et al., 2021; Portnov et al., 2013; Serov et al., 2015], образование ППФ обусловлено выделением газов, связанных с таянием субаквальных многолетнемерзлых пород (ММП) и внутри- и подмерзлотных газогидратов, а также подъемом к поверхности глубинных термогенных газов. В некоторых работах [Serov et al., 2015; Paul et al., 2021] указывается на возможность пучения поверхностных грунтов дна в результате замерзания в субаквальных условиях пресных вод, мигрирующих со стороны суши вдоль подошвы мерзлоты.

В настоящей работе представлены результаты анализа морфологии пингоподобных форм (ППФ) на шельфах морей Печорского и Карского, выполненного с целью реконструкции истории их развития и оценки современной динамики. Морфологический анализ ППФ выполнен на основе полевых геофизических данных, полученных в ходе работ на полигонах в центральной части Печорского моря площадью около 150 км² (полигон 1), в центральной части Карского моря (полигон 2) площадью около 40 км² и в западной части Байдарацкой губы (полигон 3) площадью около 6 км². Экспедиционные работы выполнены авторами в рамках 38-го (2018 г.), 41-го (2019 г.), 49-го (2020 г.) и 52-го (2021 г.) рейсов НИС «Академик Николай Страхов» и 51-го (2022 г.) рейса НИС «Академик Борис Петров» в рамках программы «Геолого-геофизические, геоморфологические и гидрофизические исследования в Баренцевом и Карском морях»

(руководитель проекта - д.г.н. Никифоров С.Л.). Для сбора данных применялся программно-аппаратный комплекс, включающий многолучевой эхолот (SeaBat 8111/SeaBat T50 ER); GPS, сенсоры движения и гирокомпас, объединенные в приборе Applanix POS-MV; датчик скорости звука SVP-70; высокочастотный профилограф (EdgeTech3300/Parasound P70). Съёмка выполнялась по сетке галсов (межгалсовое расстояние – 200 м) с одновременной работой многолучевого эхолота, высокочастотного профилографа и системы сейсмоакустического профилирования. На камеральном этапе обработка данных многолучевого эхолотирования выполнялась в программном пакете PDS2000 с построением цифровых моделей рельефа дна разрешением 2x2 м и 10x10 м (на полигоне 1) и 10x10 м (на полигонах 2 и 3). С использованием цифровых моделей рельефа дна определены морфометрические параметры ППФ: высота, длина, ширина, площадь основания, периметр, ориентировка (для удлинённых форм), их статистический анализ выполнен в MS Excel. Обработка сейсмических данных проводилась в программе RadExPro, для интерпретации и визуализации использовались программы SeiSee и Kingdom Software 8.3.

Результаты работ. На всех изученных полигонах установлено наличие ППФ и газопроявлений в осадочном чехле и водной толще. **Полигон 1** располагается во внешней части Печороморского шельфа, глубина изменяется от 47 до 82 м. Общий выровненный рельеф дна осложнен 840 ППФ изометричной или удлинённой формы в плане с щитовидным, куполовидным или коническим поперечными профилями. ППФ сосредоточены в центральной и северной пониженных частях полигона и сгруппированы в кластеры. В восточной части полигона их плотность максимальна и достигает 35-45 шт./км², в других частях она составляет 20-25 шт./км². Высота ППФ составляет от 1,5-3 м до 20-25 м, диаметр (или длинная ось для вытянутых форм) – от 20-30 до 300-430 м.

На основе результатов морфометрического анализа ППФ установлено наличие трех морфологических типов, различающихся размером и формой в плане. ППФ **первого типа** – это самые крупные формы с диаметром от 100 до 250 м, высотой 12-25 м, округлые в плане, как правило, окруженные компенсационными понижениями глубиной до 3-4 м. Нередко на их вершинах наблюдаются воронки глубиной до 1,5 м. Крутизна склонов ППФ составляет от 10-15 до 25-35°, они осложнены натечными псевдотеррасами. Для ППФ первого типа характерно образование кластеров в виде двух-трех слившихся или непосредственно примыкающих друг к другу форм без четко выраженного общего основания. ППФ **второго типа** – менее крупные формы с диаметром от 35 до 170 м, высотой 5-12 м, крутизна склонов составляет 10-15°. Эти поднятия не сливаются друг с другом, редко бывают окружены компенсационными впадинами. Существенно более мелкими являются ППФ **третьего типа**, высота которых не превышает 5-7 м, диаметр составляет около 100-120 м, а крутизна склонов – до 10-15°.

В некоторых случаях соседние ППФ разных типов сливаются в единое грядобразное поднятие, длина основания которого изменяется от 200-300 до 700-800 м, высота поднятий вместе с основанием может достигать 50-70 м. Крутизна склонов гряд не превышает 10-15°. Нередко они ориентированы субширотно или субмеридионально, однако отчетливой связи их ориентировки с морфологием фоновой поверхности дна не прослеживается. В пределах понижений дна плотность ППФ возрастает, встречаются крупные, с причудливой в плане формой поднятия дна с надстроенными на них грядами, описанными выше, и отдельными изометричными ППФ высотой до 15-20 м. Крутизна уступов таких крупных поднятий нередко достигает 25-35°. В центральной и восточной частях полигона отмечается наличие асимметрии склонов и удлинённости ППФ, по-видимому, связанные с накоплением осадков, переносимых придонными течениями с юга на север (ППФ выступают преградой на пути переноса материала). Результаты морфометрического анализа демонстрируют полимодальное распределение ППФ по высоте и наличие трех основных типов, выделенных выше. Зависимость между высотой ППФ и площадью их основания близка к линейной (коэффициент корреляции $r = 0,68$,

табл. 1). Удлиненные ППФ ориентированы преимущественно субмеридионально (азимут $155-225^\circ$), при этом вытянутость более характерна для ППФ второго и третьего типов. По результатам высокочастотного сейсмоакустического профилирования выявлено 608 акустических аномалий в водной толще, приуроченных, в основном, к районам распространения ППФ на дне. Так, к вершинным поверхностям и склонам ППФ первого типа приурочены вертикальные аномалии типа газовых факелов. Для других типов ППФ четкая пространственная привязка газопроявлений не характерна: акустические аномалии в водной толще выявлены в виде разрозненных хаотичных структур как над самими ППФ, так и между ними.

Таблица 1. Взаимосвязь морфометрических параметров ППФ на полигонах в Печорском и Карском морях

Печорское море (полигон 1)					
параметр	h	S	L	B	$K_{удл}$
h		0,68	0,59	0,75	0,18
S	0,68		0,92	0,94	-0,10
L	0,59	0,92		0,88	-0,39
B	0,75	0,94	0,88		0,06
$K_{удл}$	0,18	-0,10	-0,39	0,06	
Карское море (полигон 2)					
параметр	h	S	L	B	$K_{удл}$
h		0,48	0,63	0,56	-0,24
S	0,48		0,92	0,95	-0,11
L	0,63	0,92		0,93	-0,34
B	0,56	0,95	0,93		0,01
$K_{удл}$	-0,24	-0,11	-0,34	0,01	

Условные обозначения: h – высота ППФ, S – площадь основания ППФ, L – длина основания ППФ, B – ширина основания ППФ, $K_{удл} = B/L$ – коэффициент удлиненности ППФ.

Полигон 2 располагается в западной части Карского моря, близ восточной бровки Новоземельского желоба, глубина изменяется от 46 до 110 м. На пологих склонах, и в меньшей степени, в днище установленной на полигоне неогеновой палеодолины выявлены 57 ППФ. Это, в основном, округлые в плане куполовидные постройки до 100 м в диаметре, высотой до 5-7 м, крутизна их склонов составляет не более $10-15^\circ$. Высота единичных ППФ достигает 20-25 м, диаметр – 450-500 м, крутизна склонов при этом остается небольшой – до $8-10^\circ$. Отличительной чертой этих крупных ППФ является наличие на их вершинной поверхности воронок глубиной до 3 м и диаметром до 50-80 м. В целом на полигоне 2 преобладают ППФ третьего типа с высотой от 2-3 до 6-7 м. В то же время, прямая связь между высотой и площадью основания ППФ существенно слабее ($r = 0,48$), что может быть связано, в том числе, с большим возрастом форм. В целом немногочисленные удлиненные ППФ ориентированы субмеридионально (азимут $145-185^\circ$), при этом удлиненность ППФ увеличивается по мере роста высоты. Такое изменение морфологии может быть связано с воздействием придонных течений. Причем, в отличие от полигона 1, крупные ППФ здесь сложены с поверхности частично или полностью тальными породами, поэтому слагающий их тонкий осадок, по-видимому, вовлекается в придонный перенос, что приводит к появлению удлиненной формы. В ориентировке грядобразных поднятий, образованных за счет слияния близко расположенных ППФ на полигоне 2, прослеживается ортогональность, которая может быть объяснена выдавливанием пластичных грунтов по межблоковым понижениям деградирующих ММП с полигонально-жильной структурой. По данным сейсмопрофилирования выявлены

участки газопроявления в водной толще, приуроченные, в том числе, к ППФ (нередко с ними соседствуют покмарки). При этом вертикальные акустические аномалии факельного типа крайне редки и приурочены только к самым крупным ППФ, чаще наблюдаются обширные участки повышенной акустической мутности.

Полигон 3 расположен в центральной части Байдарацкой губы Карского моря в 12 км к юго-западу от мыса Понтон, глубина изменяется от 19 до 26 м. Рельеф дна выровненный с общим небольшим уклоном с северо-востока на юго-запад. В центральной части полигона выявлено пять слабо удлиненных в плане ППФ высотой порядка 3-4 м, шириной 40-45 м, длиной 50-70 м, с симметричными склонами крутизной 8-12°. ППФ характеризуются хорошей морфологической выраженностью и нередко соседствуют с достаточно глубокими впадинами. Так, слабо удлиненные в плане поднятия в северной части полигона имеют высоту порядка 2-2,5 м, ширину от 35 до 40 м, длину – 55-60 м. Их разделяет удлиненная в плане впадина (ок. 120x220 м), глубина 5-5,5 м, крутизна ее склонов составляет 16-18°. Признаков дегазации в водной толще не выявлено, однако в разрезе установлены акустические аномалии типа «плоское пятно» и вертикальные каналы осветления.

Выводы. Выполненные исследования подтверждают наличие признаков дегазации на участках распространения ППФ, отмеченное и в более ранних работах [Миронюк, 2019, 2020; Paull et al., 2007; Serov et al., 2015]. Акустические аномалии, связанные с дегазацией, выявлены на изученных полигонах как в строении осадочного чехла, так и в водной толще. Используя опубликованные ранее работы [Камалов и др., 2006; Мельников, Спесивцев, 1995; Бондарев, 2002; и др.] и результаты моделирования [Gavrilov et al., 2020; Overduin et al., 2019], а также собственные материалы по ключевым полигонам исследования, можно предположить, что, с учетом величин теплового потока порядка 60-75 мВт/м² в рассматриваемой акватории Карского и Печорского морей [Хуторской и др., 2003], мощность субаквальных ММП, по-видимому, не превышает здесь 100 м. При этом сплошная мерзлота присутствует на мелководье до глубин около 20-30 м. На больших глубинах ММП распространены в виде отдельных островных массивов и на глубине от 70-80 м до 100-110 м их наличие достоверно не установлено. Распространенные на полигонах ППФ обязаны своим происхождением сложному взаимодействию поднимающихся к поверхности дна флюидов (в основном, метана) с геокриологически и литологически неоднородной толщей пород, слагающих верхнюю часть осадочного разреза. Результаты исследований позволяют заключить, что плотность и морфология ППФ в разных частях шельфа во многом связана с историей развития шельфа в последние 10-15 тыс. лет, которая, в свою очередь, предопределила различия в мощности и характере многолетней мерзлоты, а также интенсивности проявления дегазации в настоящее время.

На основании результатов исследования можно сформулировать следующие основные выводы, дополняющие существующие представления [Бондарев и др., 2002; Мельников и др., 1998; Миронюк и др., 2019; Paul et al., 2021; Portnov et al., 2013; Serov et al., 2015] о характере распространения и динамике ППФ на шельфах западноарктических морей:

–ППФ были сформированы в субаквальных условиях после затопления шельфа в ходе голоценовой трансгрессии в результате выпучивания и выдавливания пластичных льдистых пород под действием потока флюидов из недр. Плотность и морфологическое разнообразие ППФ зависят от геолого-тектонической позиции, наличия, мощности и характера многолетней мерзлоты, интенсивности дегазации, а также времени затопления шельфа при голоценовой трансгрессии.

–На относительно глубоких участках дна (более 70-80 м) ППФ сформировались на ранних стадиях голоценовой трансгрессии, к настоящему моменту мерзлота там уже в значительной степени оттаяла или вообще отсутствует. Однако ППФ сохраняют свою выраженность в рельефе и активно преобразуются деятельностью придонных течений, склоновыми и, возможно, псевдовулканическими процессами, связанными с

продолжающейся дегазацией.

–На относительно мелководных (до 20-30 м), близких к берегу участках шельфа ППФ малочисленны и, по-видимому, продолжают формироваться в настоящее время. Большая мощность и сплошность мерзлоты на дне препятствуют активному флюидопотоку, как следствие газопроявления в воде и рыхлой части разреза малочисленны. Для ППФ мелководья более характерна морфология конусообразных бугров, отсутствие признаков интенсивного выхода газов и, в целом, хорошая морфологическая выраженность, свидетельствующая о молодости данного типа флюидогенного рельефа.

–На глубинах от 20-30 до 70-80 м морфологическое разнообразие и плотность ППФ достигают максимальных значений. Этому способствуют наличие островной или прерывистой многолетней мерзлоты, а также высокая интенсивность потока флюидов в районах разломных зон и нефтегазоносных структур. На таких участках в приповерхностной толще осадков сочетаются продолжающиеся местами процессы пучения и активная дегазация, что предопределяет широкое разнообразие морфологических типов ППФ.

Благодарности. Морские экспедиционные работы выполнены в рамках темы госзадания ГИН РАН № FMUN-2019-0076 «Геологические опасности в Мировом океане и их связь с рельефом, геодинамическими и тектоническими процессами» (2018-2021 гг.), а также по теме госзадания ИО РАН FMWE-2021-0005. Экспедиционные исследования в 2022 году и их камеральная обработка выполнены при поддержке гранта РНФ № 22-77-10091 «Закономерности проявления дегазации на Баренцево-Карском шельфе и ее влияние на рельеф и донные отложения».

ЛИТЕРАТУРА

Бондарев В.Н., Рокос С.И., Костин Д.А., Длугач А.Г., Полякова Н.А. Подмерзлотные скопления газа в верхней части осадочного чехла Печорского моря // Геология и геофизика. 2002. Т. 43. № 7. С. 587–598.

Камалов А.М., Огородов С.А., Бирюков В.Ю., Совершаева Г.Д., Цвезинский А.С., Архипов В.В., Белова Н.Г., Носков А.И., Соломатин В.И. Морфолитодинамика берегов и дна Байдарацкой губы на трассе перехода магистральными газопроводами // Криосфера Земли. 2006. Т. 10. № 3. С. 3–14.

Мельников В.П., Спесивцев В.И. Инженерно-геологические и геокриологические условия шельфа Баренцева и Карского морей. Новосибирск: Наука. Сиб. изд. фирма, 1995. 194 с.

Мельников В.П., Федоров К.М., Вольф А.А., Спесивцев В.И. Анализ возможного сценария образования придонных ледяных бугров на шельфе Печорского моря // Криосфера Земли. 1998. Т. 11. № 4. С. 51-57.

Миرونюк С.Г., Колюбакин А.А., Голенок О.А., Росляков А.Г., Терехина Я.Е., Токарев М.Ю. Грязевулканические структуры (вулканоиды) Карского моря: морфологические особенности и строение // Геология морей и океанов: Материалы XXIII Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. М. ИО РАН. 2019. Т. 5. С. 192-196.

Миرونюк С.Г. Флюидогенные образования: обоснование выделения новой генетической группы рельефа морского дна // VIII Щукинские чтения: рельеф и природопользование. Материалы Всероссийской конференции с международным участием. 2020. С. 37-43.

Хуторской М.Д., Подгорных Л.В., Грамберг И.С., Леонов Ю.Г. Термотомография Западно-арктического бассейна // Геотектоника. 2003. №3. С. 79-96.

Gavrilov A., Pavlov V., Fridenberg A. et al. The current state and 125 kyr history of permafrost on the Kara Sea shelf: modeling constraints // The Cryosphere. 2020. Vol. 14. P. 1857–1873. doi: 10.5194/tc-14-1857-2020

Judd A., Hovland M. Seabed Fluid Flow: The Impact on Geology, Biology and the Marine Environment. Cambridge University Press. 2007. 492 p.

Overduin P., Schneider von Deimling T., Miesner F. et al. Submarine permafrost map in the Arctic modeled using 1-D transient heat flux (SuPerMAP), Journal of Geophysical Research: Oceans. 2019. Vol. 124. Is. 6. P. 3490-3507. doi: 10.1029/2018JC014675

Paull C.K., Lii W.U., Dallimore S.R., Blasco S.M. Origin of pingo-like features on the Beaufort Sea shelf and their possible relationship to decomposing methane gas hydrates // Geophysical Research Letters. 2007. Vol. 34, L01603. doi:10.1029/2006GL027977

Paull C.K., Dallimore S.R., Jin Y.K., Caress D.W. et al. Rapid seafloor changes associated with the degradation of Arctic submarine permafrost // PNAS. 2022. Vol. 119. Is. 12. doi:10.1073/pnas.2119105119

Portnov A., Smith A.J., Mienert J., Cherkashov G. et al. Offshore permafrost decay and massive seabed methane escape in water depths >20m at the South Kara Sea shelf // Geophysical Research Letters. 2013. Vol. 40. Is. 15. P. 3962-3967. doi:10.1002/grl.50735

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

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

MORPHOLOGY OF PINGO-LIKE FEATURES ON THE SHELF OF THE PECHORA AND KARA SEAS AS AN INDICATOR OF THEIR AGE AND DYNAMICS

¹Kokhan A.V., ¹Moroz E.A., ^{1,2}Eremenko E.A., ^{1,2}Denisova A.P., ³Ananiev R.A., ¹Sukhikh E.A., ³Nikiforov S.L., ¹Sokolov S.Yu.

¹ Geological Institute of RAS, Moscow, Russia

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

³ Shirshov Institute of Oceanology of RAS, Moscow, Russia

Using to the results of multi-beam echo sounding and high-frequency seismic profiling performed during expeditions of RV «Akademik Nikolai Strakhov» and «Akademik Boris Petrov» in 2018-2022, regularities of changes in morphometric parameters and the internal structure of pingo-like features on the shelves of the Pechora and Kara seas were established. A morphometric analysis of pingo-like features was carried out, which made it possible to draw conclusions about their relative age, as well as the degree of participation of the activity of near-bottom currents and slope processes in their modern dynamics. It was revealed that the density and morphological diversity of pingo-like features depend on the geomorphological and geological position within the bottom area, the presence, thickness and type of permafrost, the intensity of degassing, and the time of shelf flooding during the Holocene transgression.

Keywords: *Arctic, degassing, fluidogenic landforms, acoustic anomalies, Holocene transgression, permafrost*