

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

УДК 551.462

ФЛЮИДОГЕННЫЙ РЕЛЬЕФ НА ШЕЛЬФАХ МОРЕЙ АРКТИКИ

А.В. Кохан¹, Е.А. Еременко², Е.А. Мороз³, А.В. Ермаков⁴, С.Ю. Соколов⁵^{1-3,5} Геологический институт РАН, лаборатория геоморфологии и тектоники дна океанов⁴ Геологический институт РАН, лаборатория тепломассопереноса² Географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, кафедра геоморфологии и палеогеографии¹ Мл. науч. сотр., канд. геол.-минерал. наук; e-mail: kkkkk1987@mail.ru² Доц., канд. геогр. наук; e-mail: eremenkoeaig@gmail.com³ Ст. науч. сотр., канд. геол.-минерал. наук; e-mail: morozzea@gmail.com⁴ Науч. сотр.; e-mail: a.v.ermakov@gmail.com⁵ Гл. науч. сотр., д-р геол.-минерал. наук; e-mail: sysokolov@yandex.ru

Обобщены и систематизированы опубликованные в России и за рубежом сведения о распространении и геолого-геоморфологическом строении флюидогенного рельефа на шельфах Арктики, в частности покмарок, пингоподобных форм, поднятий и кратеров. Составлена мелкомасштабная карта распространения флюидогенного рельефа. Установлены географические закономерности распространения разных типов флюидогенных форм в морях Арктики, а также главные факторы и условия, определяющие их локализацию, морфологию и современную активность. Показано, что флюидогенные формы являются комплексными образованиями с многосоставным источником флюидов. Распространение их и сопутствующих газопроявлений в донных осадках и водной толще определяется сложным сочетанием ряда факторов, среди которых значимая роль отводится распространению и мощности толщ субаквальных многолетнемерзлых пород, подстилающих их толщ подмерзлотных и приповерхностных глубоководных газогидратов. На плотность флюидогенных форм на дне оказывают влияние условия залегания нефтегазоносных структур и пород с коллекторскими свойствами, а также приток пресных вод суши вдоль подошвы многолетней мерзлоты на шельфе, степень засоленности донных отложений и температура придонных вод. Кроме того, флюидогенному морфолитогенезу способствует наличие структурных каналов для притока флюидов к поверхности в виде разломов и газовых труб в разрезе отложений с возможным вкладом струйного эффекта дегазации в новообразование мерзлых пород, сопровождающееся пучением дна. Морфологические различия в строении флюидогенных форм связываются, помимо обозначенных выше факторов, еще и с историей геологического развития шельфа, в частности со временем затопления дна в ходе голоценовой трансгрессии и воздействием ледниковых покровов.

Ключевые слова: дегазация, покмарки, пингоподобные формы, газопроявления, акустические аномалии, морфолитогенез, флюиды

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.2.8

ВВЕДЕНИЕ

Активное развитие методов морских геолого-геофизических исследований в последние десятилетия, приведшее к увеличению детальности получаемых данных, площади пространственного охвата и разрешения по глубине, способствовало получению сведений о ранее неизвестных формах рельефа и рельефообразующих процессах на дне Мирового океана. В частности, в пределах шельфовых зон были обнаружены районы разгрузки флюидов, связанные с деградацией газогидратов [Астахов и др., 2014; Waage et al., 2019; 2020], та-

янием субаквальных многолетнемерзлых пород [Paull et al., 2007; 2022], истечением грунтовых вод [Gwiazda et al., 2019; Paull et al., 2022], грязевым вулканизмом и притоком глубинных углеводородов [Иванов, 1999]. При этом дегазация нередко сопровождается формированием специфических положительных и отрицательных форм рельефа. К первым относятся пингоподобные формы (от англ. pingo-like features) [Shearer et al., 1971; Paull et al., 2007], купола газового пучения (domes), газогидратные и грязевые вулканы и диапиры [Milkov, 2000], ко вторым – покмарки (от англ. rockmark), или газовые

воронки [Chand et al., 2009, 2012; Rise et al., 2015]. Механизм образования этих форм слабо изучен и в настоящее время связывается с поступлением из недр флюидов различного генезиса, развитием процессов пучения донных отложений (положительные формы) [Бондарев и др., 2002; Paull et al., 2007], выбросом флюидов и донных грунтов с образованием кратеров (отрицательные формы) [Waage et al., 2020] и образованием специфических отложений (сопочных брекчий, газо- и газогидратонасыщенных осадков, биохемогенных отложений и проч.) [Миرونюк, 2020; Astrom et al., 2020]. Образуются на дне, флюидогенный рельеф (предложен в качестве самостоятельного генетического типа С.Г. Миرونюком [Миرونюк, 2020]) подвергается воздействию донных течений, местами – экзарации, на склонах флюидогенных форм развиваются склоновые процессы [Кохан и др., 2023]. На активность процессов дегазации в районах распространения флюидогенного рельефа указывают фиксируемые визуально и геофизическими методами газопроявления в водной толще и донных осадках. Дегазация приводит к изменению мутности воды (за счет подъема флюидами тонкодисперсных осадков со дна), появлению областей выноса / аккумуляции взвеси и дифференциации скоростей осадконакопления на дне акваторий. Кроме того, под действием потока флюидов происходят вещественные и текстурные изменения в донных отложениях, а на поверхности дна возникают оазисы жизни, где фиксируется увеличение видового разнообразия бентоса и микробных сообществ, что отражается в составе продуктов морского седиментогенеза [Astrom et al., 2020]. Таким образом, процесс дегазации является причиной возникновения особого типа морфолитогенеза на дне – флюидогенного, который, в свою очередь, оказывает воздействие на донные осадки, рельеф и водную толщу.

Флюидогенные формы описаны в разных частях акватории Мирового океана (в том числе, в Арктике), а также в ряде озер (например, на дне Байкала [Van Rensbergen et al., 2002] и Онежского озера [Алешин и др., 2019]). Они идентифицируются на дне с помощью комплекса геолого-геофизических методов. В первую очередь это однолучевое и многолучевое эхолотирование, гидролокация и сейсмоакустическое профилирование. Так, с использованием методов однолучевого эхолотирования, гидролокации и акустического профилирования в рамках региональных геолого-съёмочных работ флюидогенный рельеф был обнаружен в море Бофорта [Shearer et al., 1971]. В Печорском море в дополнение к перечисленным методам при изучении флюидогенных форм проводилось механизированное бурение донных осадков с судна [Бондарев

и др., 2002]. Более поздние работы выполнялись уже с применением многолучевого эхолотирования [Blasco et al., 2013; Paull et al., 2007, 2022; Кохан и др., 2023; Thorsnes et al., 2023]. Этот метод позволяет получить более детальные сведения о площадном распространении и морфологии флюидогенных форм. Кроме того, отдельными исследователями в дополнение к перечисленным выше методам выполнялись сейсмические исследования высокого разрешения [Waage et al., 2019, 2020], пробоотбор, видеосъемка [Baranov et al., 2020] и многолучевое эхолотирование с необитаемых подводных аппаратов [Paull et al., 2022]. При проведении детальных съёмочных работ в рамках исследования флюидогенного рельефа (описание морфологии, характера слагающих отложений, глубинного строения дна в районах дегазации) необходимо комплексирование методов (прежде всего, многолучевого эхолотирования и сейсмопрофилирования на разных частотах) с как можно более высокой детальностью (разрешением).

Некоторые закономерности распространения дегазации и отчасти связанных с ней форм в Российской Арктике подчеркнуты в опубликованных работах отечественных исследователей (например: [Миرونюк, Росляков, 2019; Миرونюк и др., 2019а, 2019б; Chuvilin et al., 2020]). В то же время нередко упор делается на рассмотрение процесса эмиссии газов в целом, в том числе и с прибрежных скважин (например: [Chuvilin et al., 2020]), а формируемый в результате дегазации рельеф детально не рассматривается. В то же время флюидогенный рельеф является одним из признаков нефтегазоносности на шельфе, поэтому систематизация представлений о его распространении и факторах, влияющих на морфологическое разнообразие, представляется актуальной научной задачей. Целью настоящей работы является обзор и систематизация опубликованных, а также новых авторских данных о флюидогенных процессах и формах рельефа, зафиксированных сопутствующих газопроявлениях на шельфах морей Арктики (отечественных и зарубежных), а также анализ имеющихся сведений для выявления основных факторов, влияющих на распространение и активность флюидогенного морфолитогенеза. Выполненный обзор полностью базируется на опубликованных сведениях, а также некоторых новых данных, полученных непосредственно авторами и публикуемых впервые (материалы были собраны в рамках научно-исследовательских работ Геологического института РАН на НИС «Академик Николай Страхов»). Некоторые из использованных публикаций включают результаты инженерных изысканий, выполнявшихся различными организациями для нефтегазодобывающих компаний [Колубакин

и др., 2016; Миронюк и др., 2019а, 2019б, 2020], государственными агентствами по госпрограммам геологического картирования [Blasco et al., 2013; Thorsnes et al., 2023].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Распространение и строение флюидогенных форм. По имеющимся на данный момент сведениям о локализации на шельфах Арктики флюидогенные формы являются одним из основных видов морфоскульптур, осложняющих поверхность дна. На некоторых участках детальной батиметрической съемки шельфа плотность покмарок и/или пингоподобных форм достигает нескольких штук (реже – десятков) на квадратный километр. В Баренцевом и Карском морях флюидогенные формы зафиксированы и описаны отечественными и зарубежными исследователями в разных частях шельфовой зоны (рис. 1), в море Лаптевых изученность ниже и затрагивает в основном прибрежную часть шельфа, в Восточно-Сибирском и Чукотском морях сведения о флюидогенных формах единичны. В канадском секторе Арктики флюидогенные формы (в частности, пингоподобные поднятия) детально изучены лишь в море Бофорта (рис. 2А), где они и были впервые в мире обнаружены в 1969 г. [Shearer et al., 1971]. Исследование флюидогенного рельефа и слагающих его отложений проводилось в течение последних 50 лет разными геолого-геофизическими методами, что стало причиной неоднородности полученных данных по глубинности, разрешению и другим параметрам. В то же время накопленные сведения обширны и позволяют выявить основные закономерности геолого-геоморфологического строения флюидогенных форм на шельфах Арктики.

Баренцево море. Баренцевоморский шельф отличается наиболее высокой геолого-геофизической и геоморфологической изученностью среди морей Арктики, описанный здесь флюидогенный рельеф морфологически разнообразен и представлен покмарками (в том числе кратерообразными впадинами до 400 м в поперечнике), пингоподобными формами (ППФ), а также обширными линейными и изометричными поднятиями дна до 500 м в поперечнике.

Покмарки. Во внутренней юго-западной части шельфа покмарки встречаются повсеместно за исключением Кольского склона непосредственно у Кольского полуострова. Плотность их изменяется в широких пределах: от 1–2 шт./км² в пределах Северо-Баренцево-Карской и Приновоземельской областей (Северо-Восточное плато, плато Литке, Адмиралтейский вал) до 300–350 шт./км² (занимают 70–75% площади дна) в границах Мурманской банки. В Кольском желобе плотность покмарок

составляет порядка 80–100 шт./км² (рис. 2Е). Диаметр покмарок изменяется от 10–15 до 100–110 м, глубина – от первых метров до 8–10 м [Миронюк, Росляков, 2019]. На отдельных участках в центральной части моря на возвышенностях, образованных соляными диапирами, плотность покмарок и их размер отличаются повышенными значениями (при глубине до 5–10 м диаметр достигает 300 м). На отдельных участках на склонах Центральной котловины отмечена приуроченность цепочек покмарок к реликтовым бороздам айсбергового выпавивания. Под воздействием придонных течений на склонах Гусиной и Северо-Канинской банок покмарки трансформировались в вытянутые по направлению течений котловины [Миронюк, Росляков, 2019]. В ходе работ ГИН РАН на полигонах в Центральной котловине, к югу и северу от банки Тидли, на плато Литке, в Южном Приновоземельском и Кольском желобах [Соколов и др., 2023; Мороз и др., 2023] были обнаружены многочисленные покмарки как сплошного распространения, так и единичные формы диаметром от 15–30 до 150–200 м и глубиной от первых метров до 10–15 м. Широкое распространение покмарок в российском секторе акватории моря было также отмечено в ходе съемочных работ вдоль трасс волоконно-оптической линии связи и трубопровода на Штокмановское нефте-газоконденсатное месторождение, а также на лицензионных участках на нефтегазоносных структурах [Миронюк, Росляков, 2019].

Анализ батиметрических и геофизических данных, полученных по программам детального картирования дна юго-восточной части норвежского сектора Баренцева моря, показал широкое распространение здесь разломов, покмарок и флюидоподводящих каналов в форме газовых труб в разрезах. При этом размеры покмарок здесь более скромные – диаметр составляет от 5–10 до 40–50 м (встречаются и удлиненные формы), глубина – от 1–2 до 4–5 м, при этом плотность местами существенно выше – от 100–200 до 700–900 шт./км² [Rise et al., 2015]. Покмарки формируют линейные скопления, сосредоточенные вдоль разломов и реликтовых борозд айсбергового выпавивания, а местами вложенные в более крупные формы диаметром до 300–500 м и глубиной до 10–20 м с крутыми (до 15–25°) склонами [Chand et al., 2009, 2012; Tasianas et al., 2018]. Гигантские покмарки (глубиной до 20–30 и до 300–400 м в поперечнике) были также обнаружены в районе соляного диапира банки Тидли (рис. 2Д). В их осевых частях видеосъемкой с телеуправляемого необитаемого подводного аппарата (ТНПА) зафиксированы группы впадин диаметром до 2–3 м, глубиной до 0,5 м, которые, по-видимому, являются сипами (очагами дегазации) [Salt..., 2023].

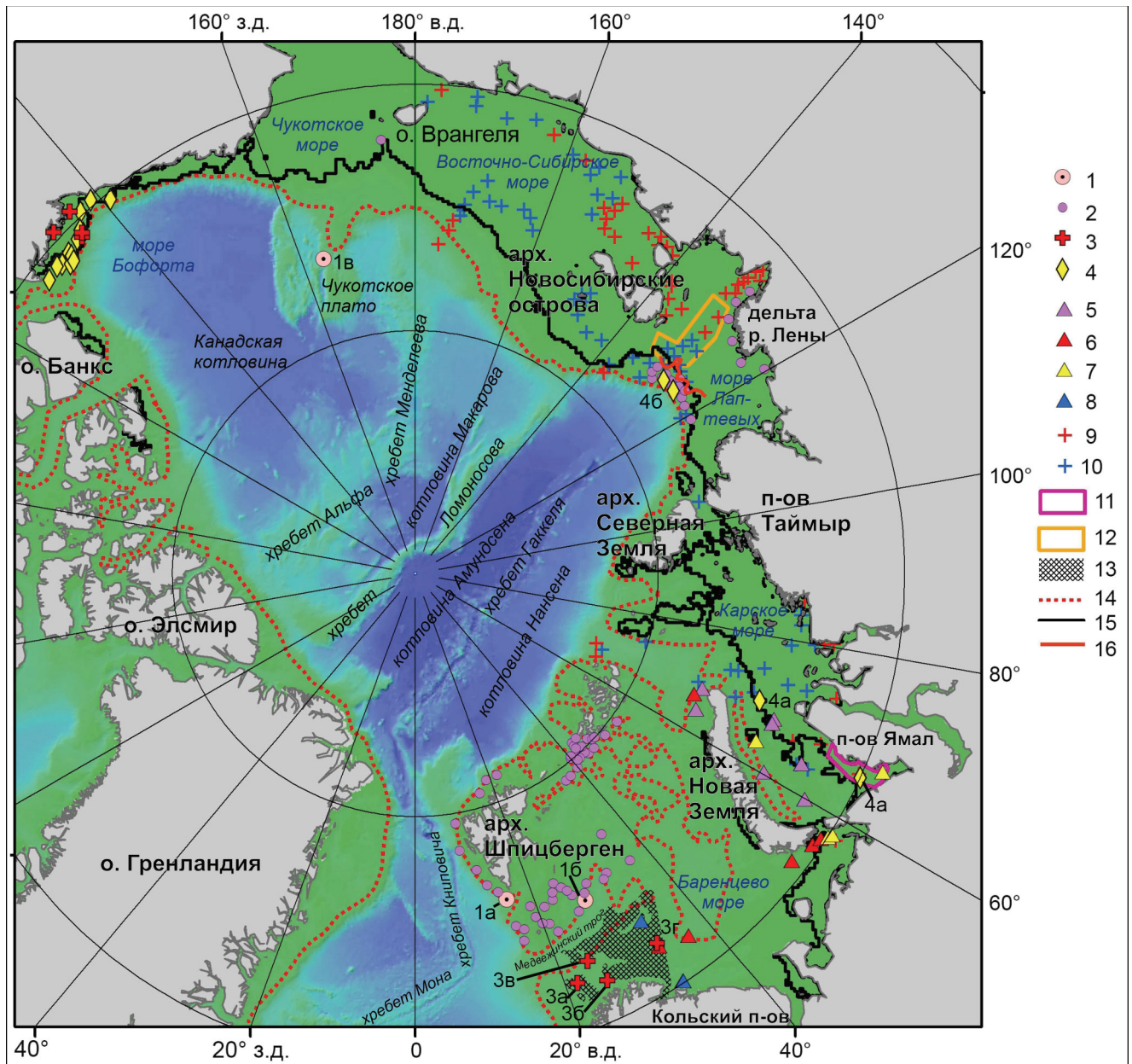


Рис. 1. Участки распространения флюидогенных форм и сопутствующих газопроявлений на шельфах морей Арктики:

1 – гигантские кратеры и поднятия прибрежной части шельфа: 1а – по [Waage et al., 2019]; 1б – по [Waage et al., 2020];
 1в – по [Астахов и др., 2014]; 2 – участки распространения газопоявлений в донных осадках и водной толще; 3 – ареалы покмарок: 3а – по [Chand et al., 2009]; 3б – по [Chand et al., 2012]; 3в – по [Tasianas et al., 2018]; 3г – по [Salt..., 2022]; 4 – ареалы пингоподобных форм: 4а – по [Semenov et al., 2020; Serov et al., 2015]; 4б – по [Baranov et al., 2020; Shakhova et al., 2015];
 5–8 – флюидогенные формы и газопоявления по результатам работ на НИС «Академик Николай Страхов» при участии авторов: 5 – ареалы газопоявлений в водной толще и в разрезе донных осадков; 6 – ареалы покмарок и сопутствующих газопоявлений в водной толще и в разрезе осадков; 7 – ареалы покмарок, пингоподобных форм и газопоявлений в водной толще и в разрезе осадков; 8 – ареалы покмарок без сопутствующих газопоявлений; 9–10 – станции отбора керна и измерения температуры донных отложений по [Bukhanov et al., 2023]: 9 – с положительной температурой донных осадков; 10 – с отрицательной температурой донных осадков; 11–12 – районы работ, флюидогенный рельеф и газопоявления на которых описаны в статьях: 11 – [Portnov et al., 2013]; 12 – [Rekant et al., 2015]; 13 – район картирования покмарок в работе [Rise et al., 2015]; 14 – граница зоны стабильности глубоководных газогидратов (изобаты 300–450 м) по данным [Bogoyavlensky et al., 2018]; 15 – граница распространения субаквальных многолетнемерзлых пород по данным модели [Overduin et al., 2019]; 16 – северная граница распространения субаквальных многолетнемерзлых пород на шельфе по результатам анализа скоростей отраженных волн на разрезах, полученных методом общей глубинной точки, в море Лаптевых [Bogoyavlensky et al., 2023]

Пингоподобные формы (ППФ). В акватории морей российского сектора Арктики ППФ были впервые обследованы в ходе работ ГУП «Арктические морские инженерно-геологические экспедиции» (АМИГЭ) в 1988 г. на полигоне в юго-восточной части Баренцева моря (Печорское море) (обнаружено 50 ППФ до 150 м в поперечнике и высотой 20–25 м) [Бондарев и др., 2002]. В 1995–1996 гг. на данном участке было выполнено бурение (до глубины 25–100 м), сейсмопрофилирование и гидролокация на площади 5×5 км с целью изучения внутреннего строения ППФ. Установлено, что ППФ сложены позднеплейстоценовыми казанцевскими пластично-мерзлыми сильнольдистыми глинами, суглинками и ледогрунтами с объемной льдистостью до 50–90%. При этом на глубинах более 50 м от поверхности дна льдистость осадков снижается до 30% и менее [Бондарев и др., 2002]. Скважиной, пробуренной на валобразном поднятии (нередко ППФ насажены именно на такие валы), на глубине 47 м от поверхности дна была вскрыта зона аномально высокого пластового давления в газонасыщенной талой толще, представленной предположительно зырянскими аллювиальными песками. В результате мощного выброса газогрунтового-водяной смеси бурение было прекращено, в течение 10 дней наблюдался газовый фонтан в водной толще, и образовалась воронка глубиной до 3 м и шириной до 15 м, сохранившаяся в рельефе дна до сих пор [Тулапин и др., 2021].

Спустя почти 20 лет (в 2018–2019 гг.) геолого-геофизические работы на этом полигоне и в его окрестностях (общая площадь съемки – 150 км²) были продолжены в ходе рейсов НИС «Академик Николай Страхов». С применением многолучевого эхолотирования и непрерывного сейсмопрофилирования установлено наличие порядка 850 ППФ высотой от 1,5–3 до 20–25 м, в диаметре (или по длинной оси для вытянутых форм) – от 20–30 до 300–430 м. Плотность ППФ на дне изменяется здесь от 20–25 до 35–45 шт./км². Нередко ППФ при-

урочены к линейным валобразным поднятиям дна высотой до 8–10 м и шириной до 700 м. В границах полигона установлены многочисленные газопоявления в донных осадках и водной толще, при этом покмарки на дне встречались крайне редко (см. рис. 2Б) [Кохан и др., 2023]. Обследование соседних участков дна (в 7 км к юго-востоку), выполненное в 2020 г. НИС «Академик Николай Страхов» и в 2022 г. НИС «Академик Борис Петров», также установило широкое распространение ППФ на дне. При этом размеры обнаруженных форм несколько более скромные: высота – от 1–2 до 12–14 м, диаметр (или длинная ось для вытянутых форм) от 30–40 до 120–135 м, крутизна склонов – в среднем 10–15°. В водной толще зафиксированы 162 акустические аномалии факельного типа, ассоциируемые с подъемом флюидов.

Прочие формы. С процессом дегазации в западной части Баренцевоморского шельфа связывается образование и более крупных форм, таких как кратерообразные впадины и поднятия дна. Так, в прибровочной части шельфа к югу от архипелага Шпицберген на глубинах 340–370 м обнаружены семь поднятий диаметром от 200–300 до 500 м и высотой 7–10 м [Waage et al., 2019]. На северном борту северо-восточной части Медвежинского трога на глубинах 320–370 м зафиксировано более сотни кратерообразных впадин диаметром от 300 до 1000 м и глубиной до 30–35 м (см. рис. 2Г). На бортах и вдоль бровок впадин располагаются поднятия округлой или удлиненной формы длиной/шириной в сотни метров и высотой до 20 м [Waage et al., 2020]. В водной толще практически над всеми поднятиями и кратерообразными впадинами наблюдаются акустические аномалии факельного типа, связанные с подъемом флюидов.

Карское море. Сведения о флюидогенном рельефе Карского шельфа пока немногочисленны в опубликованной литературе, что связано с более низкой в целом геолого-геофизической изученностью

Fig. 1. Areas of distribution of fluidogenic forms and accompanying gas manifestations on the shelves of the Arctic seas: 1 – giant craters and domal rises of the shelf edge: 1a – after [Waage et al., 2019]; 1б – after [Waage et al., 2020]; 1в – after [Astakhov et al., 2014]; 2 – areas of gas manifestations in bottom sediments and water column; 3 – areas of pockmarks: 3a – according to [Chand et al., 2009]; 3б – according to [Chand et al., 2012]; 3в – according to [Tasianas et al., 2018]; 3г – according to [Salt..., 2022]; 4 – areas of pingo-like features: 4a – according to [Semenov et al., 2020; Serov et al., 2015]; 4б – according to [Baranov et al., 2020; Shakhova et al., 2015]; 5–8 – fluidogenic forms and gas manifestations based on the results of investigations on the R/V “Akademik Nikolai Strakhov” with participation of the authors: 5 – areas of gas manifestations in water column and the section of bottom sediments; 6 – areas of pockmarks and associated gas manifestations in water column and the section of sediments; 7 – areas of pockmarks, pingo-like features and gas manifestations in water column and the sediment section; 8 – areas of pockmarks without accompanying gas manifestations; 9–10 – stations for core sampling and measurements of the temperature of bottom sediments according to [Bukhanov et al., 2023]; 9 – with positive; 10 – with negative temperatures of bottom sediments; 11–12 – areas of surveys with the fluidogenic bottom forms and gas shows described in the articles: 11 – [Portnov et al., 2013]; 12 – [Rekant et al., 2015]; 13 – area of pockmarks mapping in [Rise et al., 2015]; 14 – boundary of the stability zone of deep-sea gas hydrates (isobaths 300–450 m) according to [Bogoyavlensky et al., 2018]; 15 – boundary of distribution of subaqueous permafrost rocks according to the model data [Overduin et al., 2019]; 16 – northern limit of subaquatic permafrost on the Laptev Sea shelf based on the results of analysis of reflected wave velocities on sections obtained by the common depth point method [Bogoyavlensky et al., 2023]

региона. Так, детальными съемками покрыт преимущественно южный сектор дна, отличающийся сравнительной мелководностью.

Покмарки. В сравнении с Баренцевоморским шельфом покмарки на обследованной части дна Карского моря распространены более ограничено и

не образуют крупных скоплений. Так, в юго-западной части шельфа они встречаются в районе нефтегазоносной структуры Университетской [Миронюк, Росляков, 2019], где представляют собой блюдцеобразные понижения дна диаметром до 30–50 м и глубиной до 3–4 м, расположенные над газовыми

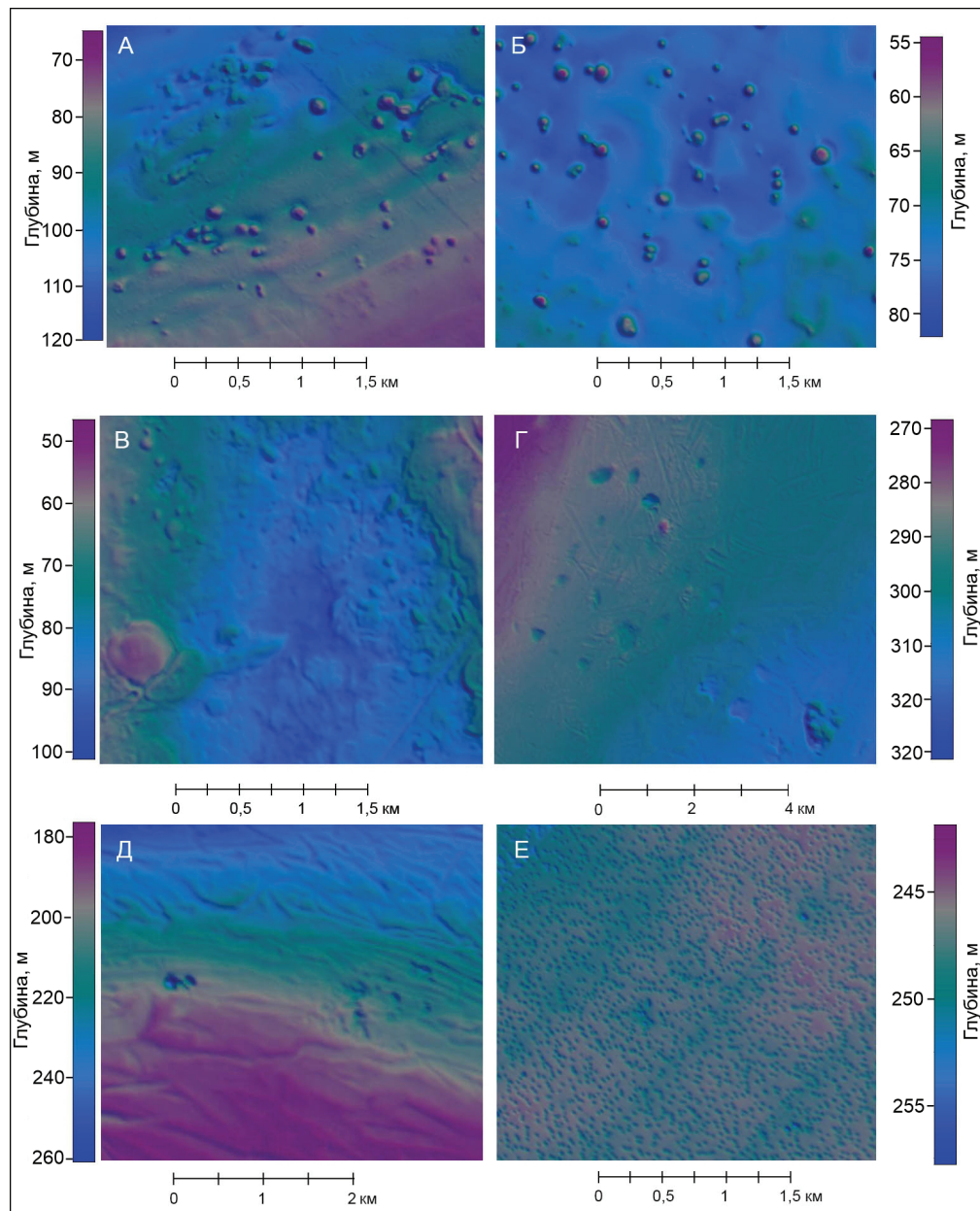


Рис. 2. Морфология флюидогенного рельефа, распространенного на шельфах Арктики:

А – пингоподобные формы внешней части шельфа моря Бофорта [Paull et al., 2022]; Б – пингоподобные формы юго-восточной части Баренцева моря [Кохан и др., 2023]; В – пингоподобные формы восточной части Карского шельфа в районе нефтегазоносной структуры «Университетская» [Кохан и др., 2023]; Г – кратеры (гигантские покмарки) и поднятия дна на склоне Медвежинского желоба в западной части Баренцева моря [Waage et al., 2020]; Д – гигантские покмарки на соляном диапире банки Тидли (Баренцево море) [Salt..., 2022]; Е – покмарки на дне Кольского желоба Баренцева моря [Соколов и др., 2023]

Fig. 2. Morphology of fluidogenic relief common within the Arctic shelves:

А – pingo-like features of the outer part of the Beaufort Sea shelf [Paull et al., 2022]; Б – pingo-like features of the southeastern part of the Barents Sea [Kokhan et al., 2023]; В – pingo-like features of the eastern part of the Kara Sea shelf in the area of the Universitetskaya oil and gas bearing structure [Kokhan et al., 2023]; Г – craters (giant pockmarks) and bottom rises on the slope of the Medvezhinsky Trench in the western part of the Barents Sea [Waage et al., 2020]; Д – giant pockmarks on the salt diapir of the Tidley Bank (Barents Sea) [Salt..., 2022]; Е – pockmarks on the bottom of the Kola Trench of the Barents Sea [Sokolov et al., 2023]

трубами на сейсмических разрезах. Единичные покмарки, зафиксированные на этом же полигоне в ходе рейсов НИС «Академик Николай Страхов» и НИС «Академик Борис Петров» в 2020–2022 гг., также отличаются небольшими размерами (до 60–70 м в поперечнике, глубиной до 2–3 м) [Кохан и др., 2023].

Пингоподобные формы. Результаты исследований последнего десятилетия позволяют заключить, что ППФ являются более распространенными формами на дне Карского моря в сравнении с покмарками. Так, по результатам региональных съемочных работ по сети профилей общей длиной около 1300 км в южной части Карского моря (глубины от 5–10 до 45–50 м) установлены границы ареалов газонасыщенных донных осадков и газопроявления в водной толще, а также зафиксированы несколько ППФ [Portnov et al., 2013]. Встречены они и на севере центральной части Карского моря [Serov et al., 2015]. Морфологически ППФ представляют собой изометричные поднятия дна высотой до 5–8 м и диаметром от 100–120 до 700–800 м, расположенные в диапазоне глубин от 30 до 40–45 м. В пределах мелководья центральной части Байдарацкой губы (15–30 м) и на Ямало-Гыданском мелководье [Миронюк и др., 2019а] ППФ имеют близкие морфометрические параметры – до первых сотен метров в поперечнике, высота – от 8–10 до 20–25 м (см. рис. 2В) [Кохан и др., 2023]. При этом газопроявления в водной толще над ППФ не выражены вовсе, в то время как в разрезе донных осадков отчетливо фиксируются многочисленные признаки флюидогенной активности (акустические аномалии типа «яркое пятно» и вертикальные осветления типа газовых труб). По результатам акустического профилирования ППФ предположительно сложены мерзлыми / газонасыщенными зырянскими песками, а в окружающих их компенсационных впадинах залегают талые морские голоценовые илы, глины, суглинки и пески [Кохан и др., 2023]. ППФ на границе Русановской террасы и Ямальского мелководья сложены до глубины порядка 10 м глинистым илом [Миронюк и др., 2019а], в южной части Карского моря [Serov et al., 2015] до глубины 1,1 м – илами и текучими глинами с прослоями пылеватых песков и супесей.

Вблизи Новоземельского желоба, где глубины составляют от 50 до 120 м, около 60 ППФ зафиксированы на структуре Университетская в ходе работ на НИС «Академик Николай Страхов». Это округлые в плане куполовидные постройки в среднем до 100 м в диаметре, высотой до 6–7 м. Единичные ППФ имеют гораздо более внушительные размеры и куполовидный поперечный профиль, высота их достигает 20–25 м, диаметр – 450–500 м. Отличительной чертой крупных ППФ является наличие на

их вершинной поверхности воронкообразного понижения глубиной до 3 м и диаметром до 50–80 м [Кохан и др., 2023]. На отдельных участках в интервале глубин 5,5–10,0 м от поверхности дна выявлены реликтовые льдистые мерзлые грунты. Их распространение носит островной характер. Участки субаквальной криолитозоны предположительно находятся в настоящее время в стадии деградации [Миронюк и др., 2019а]. ППФ на данном участке сложены акустически практически непроницаемой толщей с поверхности дна (по-видимому, мерзлой и/или сильно газонасыщенной, в отсутствие материалов бурения точно установить это невозможно). На соседствующих с ППФ участках дна залегают частично проницаемые слоистые глинистые и глинисто-песчаные осадки, в толще которых установлены акустические аномалии типа «яркое пятно», связанные с газонасыщенностью [Кохан и др., 2023].

Море Лаптевых. Сведения о флюидогенном рельефе на шельфе моря Лаптевых в опубликованной литературе единичны, однако высокая активность процессов дегазации подтверждается многочисленными газопроявлениями, зафиксированными в воде и осадочной толще в разных частях акватории. Так, в прибровочной части шельфа на глубинах 65–70 м и более зафиксированные газопроявления приурочены к террасовидным субгоризонтальным поверхностям, разбитым современными тектоническими нарушениями. Вертикальные акустические аномалии факельного типа обнаружены в толще воды и на отдельных участках доходили до поверхности моря, ширина их достигала 100–150 м. На одной из обследованных площадей было установлено 46 таких вертикальных аномалий диаметром от 10–15 до 300–350 м, в том числе 15 – диаметром более 100 м. Обследование дна на участках газопроявлений с помощью ТНПА не выявило каких-либо сопутствующих крупных форм рельефа типа ППФ или покмарок. Истечение газа наблюдалось из небольших отверстий диаметром в первые сантиметры в преимущественно песчаной поверхности дна [Vaganov et al., 2020; Shakhova et al., 2015]. По результатам геофизических работ АО «Морская арктическая геологоразведочная экспедиция» (МАГЭ) методом общей глубинной точки (ОГТ) на глубинах более 50–60 м также установлены многочисленные очаги газонасыщения осадков в верхней части разреза (до глубин 200–300 м от поверхности дна), нередко приуроченные к тектоническим разломам [Vogoyavlensky et al., 2023].

В центральной части шельфа моря Лаптевых на участках с глубинами порядка 55–65 м были обнаружены отдельные округлые в плане поднятия куполовидной формы диаметром в среднем 15–20 м и высотой около 0,5–2,0 м, на отдельных участках

наблюдались поля сходных по размерам впадин, интерпретируемых как покмарки [Колюбакин и др., 2016]. В ходе инженерно-гидрографических работ с участием одного из авторов настоящей статьи на участках в центральной части моря Лаптевых (глубина 50–70 м) в зоне повышенной тектонической трещиноватости наблюдались многочисленные щитовидные округлые в плане поднятия диаметром от 50–100 до 250–300 м и высотой до 3,5–4,0 м. Вершинные поверхности поднятий осложнены воронками глубиной до 2 м и диаметром до 25–40 м, над отдельными поднятиями наблюдались газопроявления в водной толще. Повсеместно участки развития этих форм сопровождалась полями покмарок.

По результатам работ в *восточной части шельфа* в секторе палеодолины р. Лены и на ее склонах зафиксированы многочисленные ассоциируемые с газонасыщенностью акустические аномалии в разрезе донных осадков на глубину до 30–35 м [Rekant et al., 2015]. Результаты геофизических исследований позволили установить широкое распространение на дне многолетнемерзлых пород, залегающих на глубинах от 0–1 до 20–25 м (от поверхности дна). Наиболее обширные участки распространения газопроявлений в толще донных осадков зафиксированы в днище палеодолины Лены, при этом кровля газонасыщенных осадков нередко залегают вблизи поверхности дна. Предполагается, что в осевых частях погребенных термокарстовых западин и в днище палеодолины р. Лены могут существовать сквозные талики, в последнем случае – крупный, тектонически обусловленный сквозной талик, связанный с высоким тепловым потоком в границах одного из рифтов системы рифтовых впадин моря Лаптевых. Дополнительным подтверждением этого служат высокие концентрации метана в воде на участке палеодолины [Shakhova et al., 2015]. О проявлениях процессов дегазации в рельефе морского дна авторами работы [Rekant et al., 2015] не сообщалось. В южной и восточной частях моря Лаптевых об активной дегазации свидетельствует сравнительно высокое содержание метана в образцах воды, льда, осадков, а также в воздухе [Shakhova et al., 2013].

В *прибрежной части шельфа* моря Лаптевых с глубинами до 10 м многочисленные газопроявления были зафиксированы в пределах аванделът рек Лена и Оленек. Дегазация сопровождается здесь формированием полей небольших сипов с практически полным проективным покрытием обследованной площади (зарегистрировано около 27 тыс. отдельных газопроявлений различной интенсивности на протяжении порядка 2000 км галсов съемки) [Shakhova et al., 2013].

Восточно-Сибирское море. Опубликованные сведения о флюидогенных формах рельефа на дне

Восточно-Сибирского моря на данный момент отсутствуют, что отчасти связано с существенно более низкой геолого-геофизической изученностью региона. Региональные сейсмические исследования, выполненные АО «Морская арктическая геологоразведочная экспедиция» методом ОГТ по серии профилей на участках с глубинами более 50 м позволили установить гораздо более малочисленные, нежели в море Лаптевых, очаги газонасыщения в верхней части разреза (до 200–300 м от поверхности дна) [Bogoyavlensky et al., 2023], при этом тектонических разломов зафиксировано не было. В то же время в рельефе дна были обнаружены многочисленные углубления до 1,5–2 км в поперечнике (по профилям) и глубиной до 10–20 м. Почти под всеми этими углублениями потенциально газонасыщенные объекты и тектонические нарушения отсутствуют. Имеющихся данных для однозначной генетической интерпретации этих форм пока недостаточно, и потенциально они могут представлять собой реликтовые борозды ледового выпаживания или флюидогенные кратеры.

Чукотское море. Сведения о дегазации на шельфе Чукотского моря отрывочны. В 2014 г. в ходе работ экспедиции SWERUS в районе трога Геральда на глубинах 50–95 м в водной толще зафиксировано 89 вертикальных акустических аномалий «факельного типа», ассоциируемых с подъемом флюидов. Эти газопроявления приурочены преимущественно к бортам трога, имеющим тектоническую природу [Weidner et al., 2019]. В южной части погруженного краевого Чукотского плато с отметками глубин порядка 500–580 м были обнаружены конусовидные кратеры (150–850 м в диаметре и глубиной до 40–50 м) [Астахов и др., 2014]. Кратеры приурочены к локальным разломным зонам, нередко выстраиваются в цепочки. Изучение керна (мощностью до 2 м) донных осадков в днищах кратеров показало, что эти формы образовались в период 15–30 тыс. лет назад под действием притока флюидов по разломным зонам в сочетании с хемогенными и склоновыми процессами. На состав осадков влияли и грязевулканические процессы с возможными кратковременными выбросами материала и образованием прослоев соответствующих брекчий [Астахов и др., 2014]. Отдельные кратеры окружают куполовидное поднятие дна высотой около 20 м и до 3 км в поперечнике. Область развития этих предположительно флюидогенных форм приурочена к более крупному поднятию дна относительной высотой порядка 40–50 м и до 10 км в диаметре. Признаков присутствия газа в отложениях или в водной толще на участке развития кратеров отмечено не было. Следов газогидратов не было обнаружено.

Море Бофорта. Флюидогенный рельеф на шельфе моря Бофорта был обнаружен в конце 1960-х гг. и представлен покмарками и пингоподобными формами.

Покмарки зафиксированы в прибрежной части шельфа на глубинах до 10 м (диаметр их составляет до 15 м, глубина – до 3–4 м), вдоль одной из разломных зон во внутренней и вдоль прибровочной внешней части шельфа (до 20–30 м в диаметре и до 2–3 м в глубину). Повторные съемки на участках развития покмарок показали новообразование некоторых форм, а также наличие над ними газопроявлений в водной толще [Blasco et al., 2013].

Пингоподобные формы были впервые обнаружены на шельфе в 1969 г. в ходе гидролокационного обследования и съемок дна однолучевым эхолотом по сетке региональных съемочных профилей [Shearer et al., 1971]. Было выдвинуто предположение, что ППФ имеют субаэральное криогенное происхождение и сохранились на дне в ходе голоценовой трансгрессии как реликтовые сухопутные бугры пучения. Позднее методами многолучевого эхолотирования и сейсмоакустического профилирования в регионе моря Бофорта было закартировано более 1000 ППФ и выделены две разновидности этих форм, приуроченных к внешней (небольшие формы) и внутренней (крупные формы) частям шельфа [Blasco et al., 2013; Paull et al., 2022]. Во внешней части шельфа с глубинами от 75 до 200 м располагается зона развития ППФ шириной от 1,5 до 5 км субпараллельная бровке шельфа. Она отличается сильно пересеченным рельефом с высокой плотностью ППФ (диаметром от 70 до 180 м, высотой от 5 до 25 м) и впадин (до 200 м в поперечнике, глубиной в первые метры) (см. рис. 2А). ППФ, распространенные во внутренней части шельфа (глубины менее 75 м), крупнее (до 1,5–2 км в поперечнике и высотой 40–50 м) и окружены компенсационными впадинами глубиной до 10–12 м, заполненными слоистыми морскими осадками мощностью до 30–70 м. ППФ сгруппированы в кластеры и сосредоточены вдоль разломных зон (к примеру, в трогe Маккензи) и на участках с предполагаемой пониженной мощностью субаквальных ММП [Blasco et al., 2013]. По результатам мониторинга дна с применением необитаемых подводных аппаратов установлено, что при прекращении притока флюидов в течение нескольких лет некоторые ППФ трансформируются в округлые в плане впадины глубиной до 15 м [Paull et al., 2022]. Опробованием ППФ гравитационными трубками получен керн длиной 1–5 м как на их вершинах, так и в компенсационных впадинах. Установлено, что ППФ сложены переслаиванием позднеплейстоценовых талых песков и суглинков, сильнольдистых суглинков и ледогрунтов с объемной льдистостью

от 10–30 до 70–90%. Отложения окружающих ППФ компенсационных впадин представлены морскими голоценовыми текучими глинами и илами с прослоями, обогащенными органическим материалом и остатками ракушек [Paull et al., 2007]. Молекулярный состав и изотопия углерода в составе метана газовых выбросов указывают на газогидратное (подмерзлотное и внутримерзлотное) происхождение флюидов [Paull et al., 2007]. Результаты опробования в последние годы [Gwiazda et al., 2019] показали, что в донных осадках на участке развития ППФ в большом количестве содержатся пресные поровые воды, причем их содержание возрастает по мере увеличения глубины моря.

Механизм образования флюидогенных форм и его связь с газопроявлениями на шельфе. Опубликованные материалы свидетельствуют о наличии на дне арктических морей флюидогенных форм, различающихся по морфологии и внутреннему строению, в частности покмарок, ППФ, комплексов поднятий и кратеров в относительно глубоководных частях шельфа. На большинстве участков их распространения установлены газопроявления в донных осадках и в водной толще, что позволяет заключить, что процесс дегазации является определяющим в развитии этих форм. Наличие газопоявлений с высокой вероятностью позволяет ожидать в районе их развития присутствия на дне флюидогенных форм того или иного ранга (от мезо- до наноформ). Установленные выше закономерности пространственного развития и внутреннего строения флюидогенных форм разных видов позволяют сделать некоторые выводы о механизме их образования и современной активности флюидогенного морфолитогенеза.

Покмарки. Широкое распространение покмарок характерно для Баренцевоморского шельфа, в особенности для участков развития немерзлых осадков морского, озерного, аллювиально-морского и ледниково-озерного генезиса. Там, где мощность этих толщ снижается до 5 м и менее, плотность покмарок резко сокращается или они вообще не выражены [Rise et al., 2015]. На таких участках не установлено связи плотности покмарок на дне с распространением дочетвертичных отложений с коллекторскими свойствами, а также с плотностью зафиксированных газопоявлений в донных осадках и водной толще. Исключение составляют разломные зоны и участки нефтегазоносных структур, где установлена современная флюидогенная активность. Наличие каналов, подводных флюидов в виде газовых труб в разрезе, разломов и источников флюидов в форме диапиров, нефтегазоносных структур и неглубокого залегания коренных пород с коллекторскими свойствами играет решающую роль для современного

развития этих форм [Chand et al., 2009, 2012; Tasianan et al., 2018; Миронюк, Росляков, 2019; Мороз и др., 2023; Соколов и др., 2023]. В таких районах участки с повышенной плотностью покмарок, как правило, сосредоточены вдоль линейных тектонических нарушений, в разрезах и водной толще фиксируются акустические аномалии, связанные с подъемом флюидов. Так, установлено наличие сложной флюидопроводящей системы на участках нефтегазовых месторождений в Норвежском секторе Баренцева моря [Chand et al., 2009, 2012; Tasianan et al., 2018]. Глубинные флюиды проникают к поверхности дна по разломам в коренных консолидированных отложениях в сосредоточенной форме и по рыхлым глинистым четвертичным осадкам – в диффузной форме. В приповерхностном слое донных осадков разгрузка газов происходит через покмарки, в том числе насаженные на борозды айсбергового выпавивания. На участках повышенной активности дегазации (в зонах высокой трещиноватости, в местах пересечения тектонических разломов) формируются гигантские покмарки с вложенными в них скоплениями более мелких форм.

Установленные закономерности позволяют заключить, что не все покмарки, зафиксированные на дне арктических морей, являются современными активными формами. По-видимому, значительная часть их образовалась в недавнем геологическом прошлом, после снятия ледниковой нагрузки (на Баренцевоморском шельфе) и деградации газогидратов в верхней части разреза. Таким образом, многие покмарки можно считать реликтовыми образованиями, на отсутствие их современной динамики указывает отсутствие газопроявлений в донных осадках и водной толще, а также, нередко, перекрытие их голоценовыми морскими отложениями.

Кратеры и поднятия дна в области погруженного шельфа, описанные в работах [Waage et al., 2019, 2020; Астахов и др., 2014], по-видимому, представляют собой формы одного порядка, происхождение которых также связано с дегазацией. Крупные флюидогенные кратеры (иногда именуемые гигантскими покмарками) приурочены к участкам наиболее активного флюидного потока на флангах структурных поднятий шельфа и на участках разломных зон, сочетающихся с близким к поверхности залеганием газогидратов (см. рис. 1). Для этих районов характерна сравнительно малая мощность четвертичных ледниковых и морских отложений – от 5–10 до 50–150 м [Waage et al., 2019; Waage et al., 2020], близкое залегание к поверхности дна триасовых, девонских и более древних отложений, обладающих коллекторскими свойствами. Современная тектоническая активность также является причиной повышенной мощности флюидопотока. Так, указанные

формы широко развиты близ бровки западной части Баренцевоморского шельфа в границах разломной зоны Хорнсунд. Агградация / деградация газогидратов служит дополнительным источником флюидов и триггером процессов пучения / проседания с образованием поднятий и кратеров. Механизм их формирования представляется следующим. Флюиды, мигрирующие из дочетвертичных отложений, проникают к поверхности по разломам и накапливаются под подошвой слабопроницаемых четвертичных преимущественно глинистых отложений. На участках, где их давление превысило критические значения, в толще слабопроницаемых четвертичных отложений сформировались подводящие каналы в форме газовых труб. В приповерхностной части разреза флюиды трансформировались в газогидраты и карбонатные отложения, накопление которых сопровождалось уменьшением плотности и увеличением объема осадков с формированием поднятий. Деградация газогидратов в дальнейшем могла приводить к обрушению поднятий и формированию кратеров (гигантских покмарок). При этом эмиссия флюидов в их центральных частях блокировалась обвальными накоплениями, что приводило к росту поднятий по периферии кратеров. По всей видимости, поднятия и кратеры формируют единый парагенез форм с комплексной морфоскульптурой, о чем говорит нахождение склоновых отложений и грязевых брекчий в кернах [Астахов и др., 2014]. На западной периферии Баренцевоморского шельфа эти формы являются достаточно активными, что фиксируется многочисленными газопроявлениями, а в прибровочной части Чукотского шельфа, вероятно, представляют собой реликтовые образования.

Пингоподобные формы. Несмотря на достаточно широкое распространение ППФ на арктических шельфах, общепринятого мнения о механизме образования этих форм до сих пор нет. На основании полученных данных о строении ППФ на шельфе моря Бофорта была предложена гипотеза об их субаквальном формировании в результате таяния газогидратных залежей в ходе голоценовой трансгрессии [Paull et al., 2007]. Таяние газогидратов привело к формированию зон аномально высокого пластового давления и вовлечению пластичных высокольдистых отложений в движение вверх по разрезу по ослабленным зонам и участкам пониженной мощности многолетнемерзлых пород.

С учетом данных о наличии притока пресных вод к поверхности дна во внешней части шельфа моря Бофорта была предложена гипотеза, подразумевавшая значимое участие пресных вод в образовании ППФ [Gwiazda et al., 2019]. Предполагается, что пресные воды поступают к поверхности дна в результате таяния газогидратов и многолетнемерзлых

пород, а также с суши вдоль подошвы многолетней мерзлоты. Близ поверхности дна они замерзают из-за отрицательной температуры придонных вод и формируют льдистые отложения, вовлекая в процесс пучения окружающие осадки, что приводит к образованию ППФ как исключительно криогенных форм на дне. Возможность развития такого процесса подтверждена модельными расчетами [Frederick, Buffett, 2016]. Таким образом, участие притока пресных вод в качестве одного из факторов образования ППФ нельзя исключать в юго-восточной части Баренцева моря (близ устья р. Печоры), Карского моря (близ западного побережья п-ова Ямал), а также в море Лаптевых, где установлен значительный приток пресных вод через сквозные талики в Усть-Ленском рифте к востоку от дельты р. Лены [Charkin et al., 2017]. Формирование льдистых пород в привершинной части ППФ может быть связано с охлаждением слагающих грунтов придонными водами (с отрицательной температурой) при снижении потока флюидов [Serov et al., 2015]. В этом случае, наличие мерзлой «покрышки» указывает на отсутствие активной дегазации. В целом придонная температура вод, по-видимому, является важным условием образования ППФ на шельфах Арктики. По данным [Bogoyavlensky et al., 2018], во всех арктических морях наблюдаются отрицательные температуры придонных вод. Исключения составляют юго-западная и южная части Баренцева моря, а также заливы и губы (Байдарацкая, Енисейская, Обская, Хатангский и др. восточная часть Чукотского моря), где велико отепляющее влияние рек [Bukhanov et al., 2023].

Гипотеза, предложенная В.П. Бондаревым и соавторами [Бондарев и др., 2002], связывает формирование ППФ с таянием многолетнемерзлых пород снизу (в частности, в юго-восточной части Баренцева моря). Предполагается, что этот процесс сопровождается формированием талого газонасыщенного осадка и избыточного давления на подошву мерзлоты. Несмотря на невысокую мощность, толща мерзлых пород на дне выступает как покрышка, блокирующая миграцию флюидов к поверхности, что приводит к выжиманию глинистых осадков по ослабленным зонам в толще мерзлых пород к поверхности и формированию ППФ. Концептуально эта модель схожа с моделью [Paull et al., 2007], только здесь действующим фактором выступают газы тающих многолетнемерзлых пород, а в работе [Paull et al., 2007] – газогидраты. Также с таянием многолетней мерзлоты на шельфе и сопутствующим увеличением порового давления в грунтах связывается образование ППФ на шельфе моря Лаптевых, при этом предполагается, что стадия формирования ППФ предшествует образованию покмарок [Колюбакин и др., 2016].

В работе [Мельников и др., 1998] отмечается, что одним из возможных механизмов формирования льдистых пород, слагающих ППФ, является «промораживание» вмещающих донных осадков поднимающимся из глубинных нефтегазоносных структур газом за счет его расширения и дроссельного эффекта Джоуля–Томпсона, приводящего к падению температуры грунта вокруг канала истечения газа. По результатам моделирования, в ходе этого процесса под ППФ формируется колонна льдонасыщенных грунтов с убыванием льдистости вниз по разрезу. Эта закономерность в изменении льдистости подтверждена бурением в юго-восточной части Баренцевоморского шельфа [Бондарев и др., 2002].

Наличие в разрезах ППФ глинисто-ледяных брекчий (по данным [Бондарев и др., 2002]) в отдельных работах [Крапивнер, 2007] связывается в диапиризм и грязевым вулканизмом, в частности, в границах Вашуткино-Талотинской надвиговой зоны юго-восточной части Баренцевоморского шельфа.

Таким образом, имеющиеся сведения указывают на зависимость локализации районов распространения ППФ и их морфологии от геолого-тектонической позиции, наличия и характера многолетней мерзлоты, интенсивности дегазации, а также времени затопления конкретного участка шельфа в ходе голоценовой трансгрессии [Кохан и др., 2023]. Полученные к настоящему времени сведения позволяют уверенно связать образование ППФ на шельфе с пучением и выдавливанием пород под действием потока флюидов из недр в районах распространения многолетнемерзлых пород.

ВЫВОДЫ

Источники флюидов, разгрузка которых приводит к образованию покмарок, ППФ и прочих форм, по имеющимся данным могут быть как приповерхностные, так и глубинные. На это указывает присутствие в составе флюидов как термогенных глубинных, так и биогенных газов [Sapart et al., 2017; Semenov et al., 2020; Serov et al., 2015; Steinbach et al., 2021]. Флюиды образуются в результате таяния многолетнемерзлых пород, разложения газогидратов, подтока к поверхности пресных вод, а также поступают из пород с коллекторскими свойствами и нефтегазоносных структур [Соколов и др., 2023; Semenov et al., 2023; Thorsnes et al., 2023 и др.].

Имеющиеся сведения позволяют заключить, что флюидогенные формы являются комплексными образованиями с многосоставным источником флюидов. Распространение этих форм и сопутствующих газопроявлений в донных осадках и водной толще определяется сложным сочетанием ряда факторов:

1. Распространением и мощностью толщ субаквальных многолетнемерзлых пород, подстилающих их толщ подмерзлотных газогидратов, а также толщ приповерхностных глубоководных газогидратов (на участках с глубинами более 300–400 м, обеспечивающей агградацию / деградацию приповерхностных толщ газогидратов).

2. Условиями залегания нефтегазоносных структур и пород с коллекторскими свойствами (в частности, повышенный флюидопоток неоднократно фиксировался в зонах контакта триасовых и юрских толщ на западно-арктических шельфах [Соколов и др., 2023; Semenov et al., 2023; Thorsnes et al., 2023]).

3. Наличием благоприятных структурно-геологических условий для притока пресных вод суши вдоль подошвы многолетней мерзлоты на шельфе, а также степени засоленности донных отложений.

4. Наличием структурных каналов для притока флюидов к поверхности в виде разломов и газовых труб в разрезе отложений с возможным вкладом струйного эффекта дегазации в новообразование мерзлых пород, сопровождающееся пучением дна.

5. Наличием придонных холодных вод и отрицательной температуры донных отложений, способствующих охлаждению флюидов (в первую очередь, пресной воды при ее наличии), промерзанию дна с возможным образованием форм пучения.

Установленные закономерности распространения разных типов флюидогенных форм в Арктике

во многом связаны с историей геологического развития шельфовой зоны. Так, по мнению ряда зарубежных и отечественных исследователей [Swendsen et al., 2004; Velichko et al., 1989], в позднем плейстоцене акватория Баренцева моря подверглась воздействию покровных ледников. Дискуссионные вопросы, касающиеся наличия и границ позднплейстоценового оледенения на шельфе Арктики, лежат за рамками цели настоящего исследования, поэтому в данной работе не рассматриваются. Ледниковая экзарация во многом способствовала формированию условий с близким залеганием к поверхности дна коренных пород с коллекторскими свойствами и последующему проявлению дегазации в рельефе дна [Thorsen et al., 2023]. Мерзлые породы в акватории не установлены (за исключением Печорского моря) [Vogoyavlensky et al., 2018], что создает благоприятные условия для эмиссии газов и формирования ареалов покмарок. На мелководьях других морей Арктики в условиях понижения уровня Мирового океана в позднем плейстоцене (LGM) были сформированы толщ многолетнемерзлых пород и сопутствующие им внутримерзлотные и подмерзлотные газогидраты. В настоящее время все эти толщ, по-видимому, постепенно деградируют под действием потока флюидов разного происхождения, в том числе глубинных газов рифтогенных систем, что сопровождается образованием форм пучения (в частности, ППФ).

Благодарности. Исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ № 22-77-10091 «Закономерности проявления дегазации на Баренцево-Карском шельфе и ее влияние на рельеф и донные отложения».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алешин М.И., Гайнанов В.Г., Токарев М.Ю. и др. Изучение придонных осадков в Петрозаводской губе Онежского озера с помощью комплексирования геолого-геофизических методов изучения донных отложений // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2019. № 4. С. 98–104. DOI: 10.33623/0579-9406-2019-4-98-104.
- Астахов А.С., Маркевич В.С., Колесник А.Н. и др. Возможные условия и время формирования покмарок Чукотского плато // Океанология. 2014. Т. 54. № 5. С. 665–678. DOI: 10.7868/S0030157414040029.
- 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. Т. 43. № 7. С. 587–598.
- Иванов М.К. Фокусированные углеводородные потоки на глубоководных окраинах континентов: дис. ... докт. геол.-минерал. наук. М., 1999. 222 с.
- Колюбакин А.А., Миронюк С.Г., Росляков А.Г. и др. Применение комплекса геофизических методов для выявления опасных геологических процессов и явлений на шельфе моря Лаптевых // Инженерные изыскания. 2016. № 10–11. С. 38–51.
- Кохан А.В., Мороз Е.А., Еременко Е.А. и др. Флюидогенный рельеф районов распространения многолетней мерзлоты на шельфе Печорского и Карского морей // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2023. Т. 78. № 3. С. 104–124. DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.78.3.9.
- Кративнер Р.Б. Признаки неотектонической активности Баренцевоморского шельфа // Геотектоника. 2007. № 2. С. 73–89.
- 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.
- Миронюк С.Г. Флюидогенные образования: обоснование выделения новой генетической группы рельефа морского дна // VIII Щукинские чтения: рельеф и природопользование: материалы Всероссийской конференции с международным участием. М., 2020. С. 37–43.
- Миронюк С.Г., Колюбакин А.А., Голенок О.А. и др. Грязевулканические структуры (вулканоиды) Карского моря: морфологические особенности и строение: материалы XXIII Международной научной конферен-

- ции (Школы) по морской геологии «Геология морей и океанов». ИО РАН. Т. 5. М., 2019а. С. 192–196.
- Миронюк С.Г., Иванова А.А., Хлебникова О.А. Флюидогенные формы рельефа как индикаторы нефтегазонасыщенности недр шельфа // Труды VII Международной научно-практической конференции. Т. II(IV). М.: ПолиПРЕСС, 2019б. С. 120–131.
- Миронюк С.Г., Росляков А.Г. Типы, активность и закономерности распространения покровов в арктических морях / Труды VII Международной научно-практической конференции. Т. II(IV). М.: ПолиПРЕСС, 2019. С. 70–76.
- Мороз Е.А., Еременко Е.А., Денисова А.П. и др. Проявление дегазации в осадочном чехле и рельефе Южно-Новоземельского желоба (Печорское море) // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2023. Т. 512. № 1. С. 5–11. DOI: 10.31857/S2686739723600820.
- Соколов С.Ю., Мороз Е.А., Зарайская Ю.А. и др. Картирование опасных геологических объектов и процессов северной и центральной частей шельфа Баренцева моря по данным гидроакустического комплекса НИС «Академик Николай Страхов» // Арктика: экология и экономика. 2023. Т. 13. № 2. С. 164–179. DOI: 10.25283/2223-4594-2023-2-164-179.
- Тулапин А.В., Рокос С.И., Длугач А.Г. Скоростное моделирование и динамический анализ изображений диапироподобных структур в Печорском море // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. 2021. Вып. 8. С. 246–251. DOI: 10.24412/2687-1092-2021-8-246-251.
- Astrom E., Sen A., Carroll M., Carroll J. Cold Seeps in a Warming Arctic: Insights for Benthic Ecology, *Front. Mar. Sci.*, 2020, vol. 7, DOI: 10.3389/fmars.2020.00244.
- 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-Mar. Lett.*, 2020, vol. 40, p. 541–557, DOI: 10.1007/s00367-020-00655-7.
- Blasco S., Bennett R., Brent T. et al. 2010 State of Knowledge: Beaufort Sea seabed geohazards associated with offshore hydrocarbon development, Geological Survey of Canada, Open File 6989, 2013, 340 p., DOI: 10.4095/292616.
- Bogoyavlensky V., Kishankov A., Kazanin A. Evidence of large-scale absence of frozen ground and gas hydrates in the northern part of the East Siberian Arctic shelf, *Marine and Petroleum Geology*, 2023, vol. 148, 106050, DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2022.106050.
- Bogoyavlensky V., Kishankov A., Yanchevskaya A. et al. Forecast of Gas Hydrates Distribution Zones in the Arctic Ocean and Adjacent Offshore Areas, *Geosciences*, 2018, vol. 8(12), 453, DOI: 10.3390/geosciences8120453.
- Bukhanov B., Chuvilin E., Zhmaev M. et al. In situ bottom sediment temperatures in the Siberian Arctic seas: Current state of subsea permafrost in the Kara sea vs Laptev and East Siberian seas, *Marine and Petroleum Geology*, 2023, vol. 157, 106467, DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2023.106467.
- Chand S., Rise L., Ottesen D. et al. Pockmark-like depressions near the Goliat hydrocarbon field, Barents Sea; morphology and genesis, *Mar. and Pet. Geol.*, 2009, vol. 26, p. 1035–1042, DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2008.09.002.
- Chand S., Thorsnes T., Rise L. et al. Multiple episodes of fluid flow in the SW Barents Sea (Loppa High) evidenced by gas flares, pockmarks and gas hydrate accumulation, *Earth and Planetary Science Letters*, 2012, vol. 331–332, p. 305–314, DOI: 10.1016/j.epsl.2012.03.021.
- Charkin A.N., Loeff van der M.R., Shakhova N. et al. Discovery and characterization of submarine groundwater discharge in the Siberian Arctic seas: a case study in the Buor-Khaya Gulf, Laptev Sea, *The Cryosphere*, 2017, vol. 11, p. 2305–2327, DOI: 10.5194/tc-11-2305-2017.
- Chuvilin E., Ekimova V., Davletshina D. et al. Evidence of Gas Emissions from Permafrost in the Russian Arctic, *Geosciences*, 2020, vol. 10(10), 383, DOI: 10.3390/geosciences10100383.
- Frederick J.M., Buffett B.A. Submarine groundwater discharge as a possible formation mechanism for permafrost-associated gas hydrate on the circum-Arctic continental shelf, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 2016, vol. 121, p. 1383–1404, DOI: 10.1002/2015JB012627.
- Gwiazda R., Paull C.K., Dallimore S.R. et al. Freshwater seepage into sediments of the shelf, shelf edge, and continental slope of the Canadian Beaufort Sea, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2019, vol. 19, p. 3039–3055, DOI: 10.1029/2018GC007623.
- Milkov A.V. Worldwide distribution of submarine mud volcanoes and associated gas hydrates, *Marine Geology*, 2000, vol. 167, p. 29–42, DOI: 10.1016/S0025-3227(00)00022-0.
- Overduin P., Von Deimling T.S., 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, DOI: 10.1029/2018JC014675.
- Paull C.K., Lii W.U., Dallimore S.R. et al. Origin of pingo-like features on the Beaufort Sea shelf and their possible relationship to decomposing methane gas hydrates, *Geoph. Res. Lett.*, 2007, vol. 34, L01603, DOI: 10.1029/2006GL027977.
- Paull C.K., Dallimore S.R., Jin Y.K. et al. Rapid seafloor changes associated with the degradation of Arctic submarine permafrost, *PNAS*, 2022, vol. 119, no. 12, DOI: 10.1073/pnas.2119105119.
- Portnov A., Smith A.J., Mienert J. et al. Offshore permafrost decay and massive seabed methane escape in water depths >20 m at the South Kara Sea shelf, *Geoph. Res. Lett.*, 2013, vol. 40, DOI: 10.1002/grl.50735.
- Rekant P., Bauch H., Schwenk T. et al. Evolution of subsea permafrost landscapes in Arctic Siberia since the Late Pleistocene: a synoptic insight from acoustic data of the Laptev Sea, *Arktos*, 2015, vol. 1, p. 1–15, DOI: 10.1007/s41063-015-0011-y.
- Rise L., Bellec V.K., Chand S. et al. Pockmarks in the southwestern Barents Sea and Finnmark fjords, *Norw. J. of Geol.*, 2015, vol. 94, p. 263–282, DOI: 10.17850/njg94-4-02.
- Sapart C., 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, p. 2283–2292, DOI: 10.5194/bg-14-2283-2017.
- Semenov P., Portnov A., Krylov A. et al. Geochemical evidence for seabed fluid flow linked to the subsea permafrost outer border in the South Kara Sea, *Geochemistry*, 2020, vol. 80, no. 3, 125509, DOI: 10.1016/j.chemer.2019.04.005.
- Serov P., Portnov A., Mienert J. et al. Methane release from pingo-like features across the South Kara Sea shelf, an area of thawing offshore permafrost, *J. Geophys. Res. Earth Surf.*, 2015, vol. 120, p. 1515–1529, DOI: 10.1002/2015JF003467.

- Shakhova N., Semiletov I., Leifer I. et al. Ebullition and storm-induced methane release from the East Siberian Arctic Shelf, *Nature Geoscience*, 2013, vol. 7, p. 64–70, DOI: 10.1038/NNGEO2007.
- Shakhova N., Semiletov I., Sergienko N. et al. The East Siberian Arctic Shelf: towards further assessment of permafrost-related methane fluxes and role of sea ice, *Phil. Trans. R. Soc. A.*, 2015, vol. 373, 20140451, DOI: 10.1098/rsta.2014.0451.
- Shearer J.M., Macnab R.F., Pelletier B.R., Smith T.B. Submarine pingoes in the Beaufort Sea, *Science*, 1971, vol. 174, no. 4011, p. 816–818.
- Steinbach J., Holmstrand H., Shcherbakova K. et al. Source apportionment of methane escaping the subsea permafrost system in the outer Eurasian Arctic Shelf, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2021, vol. 118(10), DOI: 10.1073/pnas.2019672118.
- Svendsen J.I., Alexanderson H., Astakhov V.I. et al. Late Quaternary ice sheet history of northern Eurasia, *Quaternary Science Reviews*, 2004, vol. 23, iss. 11–13, p. 1229–1271, DOI: 10.1016/j.quascirev.2003.12.008.
- Tasianas A., Bunz S., Bellwald B. et al. High-resolution 3D seismic study of pockmarks and shallow fluid flow systems at the Snøhvit hydrocarbon field in the SW Barents Sea, *Marine Geology*, 2018, vol. 403, p. 247–261, DOI: 10.1016/j.margeo.2018.06.012.
- Thorsnes T., Chand S., Bellec V.K. et al. Gas seeps in Norwegian waters – distribution and mechanisms, *Norwegian Journal of Geology*, 2023, vol. 103, 202309, DOI: 10.17850/njg103-2-4.
- Van Rensbergen P., De Batist M., Klerkx J. et al. Sublacustrine mud volcanoes and methane seeps caused by dissociation of gas hydrates in Lake Baikal, *Geology*, 2002, vol. 30(7), p. 631–634, DOI: 10.1130/0091-7613(2002)030<0631:SM-VAMS>2.0.CO;2.
- Velichko A.A., Isayeva L.L., Oorshkin D.B., Faustova M.A. The last glaciation of Eurasia, *The Arctic seas, climatology, oceanography, geology and biology*, New York, 1989, p. 729–758.
- Waage M., Portnov A., Serov P. et al. Geological controls on fluid flow and gas hydrate pingo development on the Barents Sea margin, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2019, vol. 20, p. 630–650, DOI: 10.1029/2018GC007930.
- Waage M., Serov P., Andreassen K. et al. Geological controls of giant crater development on the Arctic seafloor, *Sci. Rep.*, 2020, vol. 10, no. 8450, DOI: 10.1038/s41598-020-65018-9.
- Weidner E., Weber T., Mayer L. et al. A wideband acoustic method for direct assessment of bubble-mediated methane flux, *Continental Shelf Research*, 2019, vol. 173, p. 104–115, DOI: 10.1016/j.csr.2018.12.005.
- Электронный ресурс
Salt diapir and gas leakage on Tiddlybanken, Mareano, Collecting marine knowledge, 2023, URL: https://mareano.no/en/news/news_2013/salt_diapir_and_gas_leakage_on_tiddlybanken (дата обращения 04.10.2022).

Поступила в редакцию 04.10.2023

После доработки 11.11.2023

Принята к публикации 04.12.2023

FLUIDOGENIC LANDFORMS ON THE ARCTIC SHELVES

A.V. Kokhan¹, E.A. Eremenko², E.A. Moroz³, A.V. Ermakov⁴, S.Yu. Sokolov⁵

^{1-3,5} *Geological Institute of the Russian Academy of Sciences, Laboratory of Ocean Floor Geomorphology and Tectonics*

⁴ *Geological Institute of the Russian Academy of Sciences, Laboratory of Heat and Mass Transfer*

² *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Geomorphology and Paleogeography*

¹ *Junior Scientific Researcher, Ph.D. in Geology; e-mail: kkkkk1987@mail.ru*

² *Associate Professor, Ph.D. in Geography; e-mail: eremenkoeaig@gmail.com*

³ *Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Geology; e-mail: morozzea@gmail.com*

⁴ *Scientific Researcher; e-mail: a.v.ermakov@gmail.com*

⁵ *Chief Scientific Researcher, D.Sc. in Geology; e-mail: sysokolov@yandex.ru*

The paper summarizes and systematizes available data on geological and geomorphologic structure of fluidogenic landforms on the Arctic shelves, in particular, pockmarks, pingo-like features, domes and craters. A small-scale map of the spatial distribution of fluidogenic landforms has been compiled. Geographical patterns of distribution of different types of fluidogenic landforms in the Arctic seas were identified, as well as main factors and conditions that determine their localization, morphology and modern activity. It is shown that fluidogenic landforms are complex formations with a multi-component source of fluids. Their distribution and accompanying gas manifestations in bottom sediments and water column are determined by complex combinations of factors. Among them the most significant are distribution and thickness of subaquatic permafrost and subpermafrost and the near-surface deep-sea gas hydrates. The amount of fluidogenic landforms at the bottom is influenced by specific features of oil and gas bearing structures and rocks with reservoir properties, as well as the influx of fresh land waters along the base of permafrost on the shelf, the degree of salinity of bottom sediments and the temperature of near-bottom water. In addition, fluidogenic morpholithogenesis is facilitated by the presence of structural channels for the influx of fluids to the surface in the form of faults and gas pipes

in bottom sediments with the possible contribution of the jet degassing effect to the new formation of frozen rocks, accompanied by bottom heaving. Morphological differences in the structure of fluidogenic landforms are associated, in addition to the factors indicated above, with the history of the geological development of the shelf, in particular, with the time of submersion during the Holocene transgression and the impact of glaciation.

Keywords: degassing, pockmarks, pingo-like features, gas manifestation, acoustic anomalies, morpholithogenesis, fluids

Acknowledgments. The work was financially supported by the Russian Science Foundation (project 22-77-10091 “Spatial Patterns of Degassing Manifestation on the Barents-Kara Shelf and Its Influence on Relief and Bottom Sediments”).

REFERENCES

- Aleshin M.I., Gaynanov V.G., Tokarev M.Yu. et al. Izuchenie pridonnyh osadkov v Petrozavodskoj gube Onezhskogo ozera s pomosh'yu kompleksirovaniya geologo-geofizicheskikh metodov izucheniya donnyh otlozhenij [Study of Onega lake Petrozavodsk bay sub-bottom sediments using complex geophysical and geological data analysis], *Mos. Un-ty Bulletin, Ser. 4, Geology*, 2019, no. 4, p. 98–104, DOI: 10.33623/0579-9406-2019-4-98-104. (In Russian)
- Astakhov A.S., Kolesnik A.N., Obrezkova M.S. et al. Possible conditions and the formation time of the Chukchi Plateau pockmarks, *Oceanology*, 2014, vol. 54, no. 5, p. 624–636, DOI: 10.1134/S000143701404002X.
- Astrom E., Sen A., Carroll M., Carroll J. Cold Seeps in a Warming Arctic: Insights for Benthic Ecology // *Front. Mar. Sci*, 2020, vol. 7, DOI: 10.3389/fmars.2020.00244.
- 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-Mar. Lett.*, 2020, vol. 40, p. 541–557, DOI: 10.1007/s00367-020-00655-7.
- Blasco S., Bennett R., Brent T. et al. *2010 State of Knowledge: Beaufort Sea seabed geohazards associated with offshore hydrocarbon development*, Geological Survey of Canada, Open File 6989, 2013, 340 p., DOI: 10.4095/292616.
- Bogoyavlensky V., Kishankov A., Kazanin A. Evidence of large-scale absence of frozen ground and gas hydrates in the northern part of the East Siberian Arctic shelf, *Mar. and Petr. Geol.*, 2023, vol. 148, 106050, DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2022.106050.
- Bogoyavlensky V., Kishankov A., Yanchevskaya A. et al. Forecast of Gas Hydrates Distribution Zones in the Arctic Ocean and Adjacent Offshore Areas, *Geosciences*, 2018, vol. 8(12), 453, DOI:10.3390/geosciences8120453.
- Bondarev V.N., Rokos S.I., Kostin D.A. et al. Podmerzlotnye skopleniya gaza v verhnej chasti osadochnogo chehla Pechorskogo morja [Underpermafrost accumulations of gas in the upper part of the sedimentary cover of the Pechora Sea], *Geologija i geofizika*, 2002, vol. 43, no. 7, p. 587–598. (In Russian)
- Bukhanov B., Chuvilin E., Zhmaev M. et al. In situ bottom sediment temperatures in the Siberian Arctic seas: Current state of subsea permafrost in the Kara sea vs Laptev and East Siberian seas, *Mar. and Petr. Geol.*, 2023, vol. 157, 106467, DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2023.106467.
- Chand S., Rise L., Ottesen D. et al. Pockmark-like depressions near the Goliat hydrocarbon field, Barents Sea; morphology and genesis, *Mar. and Pet. Geol.*, 2009, vol. 26, p. 1035–1042, DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2008.09.002.
- Chand S., Thorsnes T., Rise L. et al. Multiple episodes of fluid flow in the SW Barents Sea (Loppa High) evidenced by gas flares, pockmarks and gas hydrate accumulation, *Earth and Planetary Science Letters*, 2012, vol. 331–332, p. 305–314, DOI: 10.1016/j.epsl.2012.03.021.
- Charkin A.N., Loeff van der M.R., Shakhova N. et al. Discovery and characterization of submarine groundwater discharge in the Siberian Arctic seas: a case study in the Buor-Khaya Gulf, Laptev Sea, *The Cryosphere*, 2017, vol. 11, p. 2305–2327, DOI: 10.5194/tc-11-2305-2017.
- Chuvilin E., Ekimova V., Davletshina D. et al. Evidence of Gas Emissions from Permafrost in the Russian Arctic, *Geosciences*, 2020, vol. 10(10), no. 383, DOI:10.3390/geosciences10100383.
- Frederick J.M., Buffett B.A. Submarine groundwater discharge as a possible formation mechanism for permafrost-associated gas hydrate on the circum-Arctic continental shelf, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 2016, vol. 121, p. 1383–1404, DOI: 10.1002/2015JB012627.
- Gwiazda R., Paull C.K., Dallimore S.R. et al. Freshwater seepage into sediments of the shelf, shelf edge, and continental slope of the Canadian Beaufort Sea, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2019, vol. 19, p. 3039–3055, DOI: 10.1029/2018GC007623.
- Ivanov M.K. *Fokusirovannye uglevodородные потоки на глубокководных окраинах континентов* [Focused hydrocarbon flows at deep-sea continental margins], D.Sc. Thesis in Geology and Mineralogy, Moscow, 1999, 222 p. (In Russian)
- Kokhan A.V., Moroz E.A., Eremenko E.A. et al. Flyuidogenyj relief raionov rasprostraneniya mnogoletnej merzloty na shelfe Pechorskogo i Karskogo morej [Fluidogenic landforms within the permafrost zone on the shelf of the Pechora and Kara seas], *Vestn. Mosk. Un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2023, vol. 78, no. 3, p. 104–124. DOI:10.55959/MSU0579-9414.5.78.3.9. (In Russian)
- Kolyubakin A.A., Mironyuk S.G., Roslyakov A.G. et al. Primenenie kompleksa geofizicheskikh metodov dlya vyavleniya opasnih geologicheskikh protsessov i yavlenij na shelfe moray Laptevyyh [Using a complex of geophysical methods to reveal dangerous geological processes and phenomena on the Laptev Sea shelf], *Engineering Survey*, 2016, no. 10–11, p. 38–51. (In Russian)
- Krapivner R.B. Indications of neotectonic activity at the Barents Sea shelf, *Geotektonics*, 2007, vol. 41, no. 2, p. 149–162.
- Mel'nikov V.P., Fedorov K.M., Vol'f A.A., Spesivcev V.I. Analiz vozmozhnogo scenarija obrazovaniya pridonnyh ledjanyh bugrov na shel'fe Pechorskogo morja [Analysis of possible scenario of ice column formation on the bottom of the Pechora Sea shelf], *Kriosfera Zemli*, 1998, vol. 11, no. 4, p. 51–57. (In Russian)

- Milkov A.V. Worldwide distribution of submarine mud volcanoes and associated gas hydrates, *Marine Geology*, 2000, vol. 167, p. 29–42, DOI: 10.1016/S0025-3227(00)00022-0.
- Mironyuk S.G. [Fluidogenic Formations: Substantiation of the Identification of a New Genetic Group of the Seabed Relief], *VIII Shhukinskie chtenija: rel'ef i prirodopol'zovanie* [VIII Schukin Conference: Relief and Nature Management], materialy Vserossijskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem, 2020, p. 37–43. (In Russian)
- Mironyuk S.G., Ivanova A.A., Hlebnikova O.A. [Fluidogenic landforms as indicators of oil and gas potential of the shelf subsurface], *trudy VII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii* [Proceedings of the VII International Scientific and Practical Conference], vol. II(IV), 2019, PoliPRESS Publ., p. 120–131. (In Russian)
- Mironyuk S.G., Kolyubakin A.A., Golenok O.A. et al. [The mud volcanic structures (vulcanoides) of the Kara Sea: morphological features and structure], *Geologiya morej i okeanov, materialy XXIII Mezhdunarodnoj nauchnoj konferentsii po morskoy geologii* [Geology of seas and oceans. Proceedings of XXIII International Conference on Marine Geology], Moscow, IO RAN, 2019, vol. 5, p. 192–196. (In Russian)
- Mironyuk S.G., Roslyakov A.G. [Types, activity and patterns of distribution of pockmarks in the Arctic seas], *trudy VII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii* [Proceedings of the VII International Scientific and Practical Conference], vol. II(IV), 2019, PoliPRESS Publ., p. 70–76. (In Russian)
- Moroz E.A., Eremenko E.A., Denisova A.P. et al. The manifestation of degassing in the sedimentary cover and relief of the Southern Novaya Zemlya trench (Pechora sea), *Doklady Earth Sciences*, 2023, vol. 512, pt 1, p. 773–778, DOI: 10.31857/S2686739723600820.
- Overduin P., Von Deimling T.S., 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, DOI: 10.1029/2018JC014675.
- Paull C.K., Dallimore S.R., Jin Y.K. et al. Rapid seafloor changes associated with the degradation of Arctic submarine permafrost, *PNAS*, 2022, vol. 119, no. 12, DOI: 10.1073/pnas.2119105119.
- Paull C.K., Lii W.U., Dallimore S.R. et al. Origin of pingo-like features on the Beaufort Sea shelf and their possible relationship to decomposing methane gas hydrates, *Geoph. Res. Lett.*, 2007, vol. 34, L01603, DOI: 10.1029/2006GL027977.
- Portnov A., Smith A.J., Mienert J. et al. Offshore permafrost decay and massive seabed methane escape in water depths >20 m at the South Kara Sea shelf, *Geoph. Res. Lett.*, 2013, vol. 40, DOI: 10.1002/grl.50735.
- Rekant P., Bauch H., Schwenk T. et al. Evolution of subsea permafrost landscapes in Arctic Siberia since the Late Pleistocene: a synoptic insight from acoustic data of the Laptev Sea, *Arktos*, 2015, vol. 1, p. 1–15, DOI: 10.1007/s41063-015-0011-y.
- Rise L., Bellec V.K., Chand S. et al. Pockmarks in the southwestern Barents Sea and Finnmark fjords, *Norw. J. of Geol.*, 2015, vol. 94, p. 263–282, DOI: 10.17850/njg94-4-02.
- Sapart C., 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, p. 2283–2292, DOI: 10.5194/bg-14-2283-2017.
- Semenov P., Portnov A., Krylov A. et al. Geochemical evidence for seabed fluid flow linked to the subsea permafrost outer border in the South Kara Sea, *Geochemistry*, 2020, vol. 80, no. 3, 125509, DOI: 10.1016/j.chemer.2019.04.005.
- Serov P., Portnov A., Mienert J. et al. Methane release from pingo-like features across the South Kara Sea shelf, an area of thawing offshore permafrost, *J. Geophys. Res. Earth Surf.*, 2015, vol. 120, p. 1515–1529, DOI: 10.1002/2015JF003467.
- Shakhova N., Semiletov I., Leifer I. et al. Ebullition and storm-induced methane release from the East Siberian Arctic Shelf, *Nature Geoscience*, 2013, vol. 7, p. 64–70, DOI: 10.1038/NNGEO2007.
- Shakhova N., Semiletov I., Sergienko N. et al. The East Siberian Arctic Shelf: towards further assessment of permafrost-related methane fluxes and role of sea ice, *Phil. Trans. R. Soc. A.*, 2015, vol. 373, 20140451, DOI: 10.1098/rsta.2014.0451.
- Shearer J.M., Macnab R.F., Pelletier B.R., Smith T.B. Submarine pingoes in the Beaufort Sea, *Science*, 1971, vol. 174, no. 4011, p. 816–818.
- Sokolov S.Yu., Moroz E.A., Zarajskaya Yu.A. et al. Kartirovanie opasnyh geologicheskikh ob'ektov i processov severnoj i central'noj chastej shel'fa Barenceva morya po dannym gidroakusticheskogo kompleksa NIS "Akademik Nikolaj Strahov" [Mapping of dangerous geological objects and processes at the northern and central parts of the Barents Sea shelf according to the hydroacoustic data from RV "Akademik Nikolai Strakhov"], *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2023, vol. 13, no. 2, p. 164–179, DOI: 10.25283/2223-4594-2023-2-164-179. (In Russian)
- Steinbach J., Holmstrand H., Shcherbakova K. et al. Source apportionment of methane escaping the subsea permafrost system in the outer Eurasian Arctic Shelf, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2021, vol. 118(10), DOI: 10.1073/pnas.2019672118.
- Svendsen J.I., Alexanderson H., Astakhov V.I. et al. Late Quaternary ice sheet history of northern Eurasia, *Quaternary Science Reviews*, 2004, vol. 23, iss. 11–13, p. 1229–1271, DOI: 10.1016/j.quascirev.2003.12.008.
- Tasianas A., Bunz S., Bellwald B. et al. High-resolution 3D seismic study of pockmarks and shallow fluid flow systems at the Snøhvit hydrocarbon field in the SW Barents Sea, *Marine Geology*, 2018, vol. 403, p. 247–261, DOI: 10.1016/j.margeo.2018.06.012.
- Thorsnes T., Chand S., Bellec V.K. et al. Gas seeps in Norwegian waters – distribution and mechanisms, *Norwegian Journal of Geology*, 2023, vol. 103, 202309, DOI: 10.17850/njg103-2-4.
- Tulapin A.V., Rokos S.I., Dlugach A.G. Skorostnoe modelirovanie i dinamicheskij analiz izobrazhenij diapropodobnyh struktur v Pechorskome more [Seismic velocity modeling and dynamic analysis of PLF images in Pechora Sea], *Relief and Quaternary deposits of the Arctic, Subarctic and North-West Russia*, 2021, iss. 8, p. 246–251. (In Russian)
- Van Rensbergen P., De Batist M., Klerkx J. et al. Sublacustrine mud volcanoes and methane seeps caused by dissociation of gas hydrates in Lake Baikal, *Geology*, 2002, vol. 30(7), p. 631–634, DOI: 10.1130/0091-7613(2002)030<0631:SM-VAMS>2.0.CO;2.

- Velichko A.A., Isayeva L.L., Oorshkin D.B., Faustova M.A. The last glaciation of Eurasia, in *The Arctic seas, climatology, oceanography, geology and biology*, 1989, New York, p. 729–758.
- Waage M., Portnov A., Serov P. et al. Geological controls on fluid flow and gas hydrate pingo development on the Barents Sea margin, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2019, vol. 20, p. 630–650, DOI: 10.1029/2018GC007930.
- Waage M., Serov P., Andreassen K. et al. Geological controls of giant crater development on the Arctic seafloor, *Sci. Rep.*, 2020, vol. 10, no. 8450, DOI: 10.1038/s41598-020-65018-9.
- Weidner E., Weber T., Mayer L. et al. A wideband acoustic method for direct assessment of bubble-mediated methane flux, *Continental Shelf Research*, 2019, vol. 173, p. 104–115, DOI: 10.1016/j.csr.2018.12.005.

Web source

Salt diapir and gas leakage on Tiddlybanken, Mareano, Collecting marine knowledge, 2023, URL: https://mareano.no/en/news/news_2013/salt_diapir_and_gas_leakage_on_tiddlybanken (access date 04.10.2022).

Received 04.10.2023

Revised 11.11.2023

Accepted 04.12.2023