DOI: 10.25283/2223-4594-2018-3-42-55
УДК 553.981.2

ГАЗОВЫЕ ГИДРАТЫ НА АКВАТОРИЯХ ЦИРКУМАРКТИЧЕСКОГО РЕГИОНА

В. И. Богоявленский
ФГБУН Институт проблем нефти и газа РАН, ФГБОУ ВО Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И. М. Губкина (Москва, Российская Федерация)

А. С. Янчевская
ФГБОУ ВО Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И. М. Губкина (Москва, Российская Федерация)

И. В. Богоявленский, А. В. Кишанков
ФГБУН Институт проблем нефти и газа РАН, ФГБОУ ВО Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И. М. Губкина (Москва, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 1 августа 2018 г.

Создана и постоянно развивается геоинформационная система «Арктика и Мировой океан», включающая 1153 объекта (зоны и отдельные площади) распространения газовых гидратов. На основе анализа сейсмических материалов выявлены отражающие горизонты, повторяющие дно (BSR), соответствующие подошве потенциально газогидратонасыщенных донных отложений, в том числе впервые на континентальном склоне моря Лаптевых и во впадине ТИНРО в Охотском море. Для Циркумарктического региона изучены температуры водной толщи вблизи дна, выявлены зоны с благоприятными термобарическими условиями для образования и сохранения газовых гидратов и построена картографическая схема их возможного распространения. Обоснована необходимость проведения комплексных исследований ресурсов газогидратов и природно-техногенных опасностей в строении осадочных отложений суши и акваторий Арктики и Мирового океана.

Ключевые слова: *Арктика, Мировой океан, Северный Ледовитый океан, термобарические условия, газогидраты, метаногидраты, BSR, Штокмановское месторождение.*

Введение

Общепризнано, что в Мировом океане и особенно в его арктической части сосредоточен самый высокий углеводородный потенциал, включающий колоссальные ресурсы жидких углеводородов и газа в свободном и гидратном состояниях. Несмотря на недостаточный уровень изученности сейсморазведкой и особенно бурением, не вызывает сомнений, что к России относится самая крупная нефтегазоперспективная часть шельфа Арктики. Открытия ряда институтов РАН и других российских и зарубежных организаций, сделанные в последние два десятилетия в Мировом океане, в том числе в Северном Ледовитом океане (СЛО), показали недостаточную изученность не только глубоких отложений, но и строения дна и процессов, происходящих в верхней части разреза (ВЧР — глубины до 500—900 м) [1—34].

Во многих регионах Мирового океана, включая акватории Арктики, выявлены зоны, дно которых усеяно огромным количеством углублений (pockmarks/покмарки) — кратеров выброса газа нередко с брустверами выброшенной породы [1; 2; 7; 20; 26]. На полуострове Ямал обнаружено около 300 озер с десятками, сотнями и даже тысячами подобных кратеров на дне. Кроме того, на суше российской Арктики найдено более 10 гигантских кратеров (многие из них образовались со взрывом и воспламенением

© Богоявленский В. И., Янчевская А. С., Богоявленский И. В., Кишанков А. В., 2018

выброшенного из недр газа). Все эти кратеры являются свидетельством активной дегазации недр, при этом источником могут быть залежи газа в свободном или гидратном состоянии, а генезис газа может быть биогенным, катагенетическим или смешанным.

Проведенный нами анализ около 30 тыс. км временны́х разрезов сейсморазведки методом общей глубинной точки (МОГТ), построенных при исследованиях в Охотском море (более 7 тыс. км, ОАО «Дальморнефтегеофизика»), в море Лаптевых (около 3,5 тыс. км, ОАО «МАГЭ»[1]), в Беринговом море (около 6 тыс. км, USGS [2]), в море Бофорта (около 4,6 тыс. км, USGS) и Чукотском море (около 9,6 тыс. км, USGS), наглядно иллюстрирует, что в ВЧР Циркумарктического региона содержатся многие тысячи залежей газа в свободном и гидратном состояниях [3; 5; 6].

Неглубокие придонные отложения содержат гигантские ресурсы газа (особенно в гидратной форме) и, несомненно, будут представлять интерес для освоения в будущем, но в ряде стран их освоение уже началось. На шельфе Нидерландов в ВЧР по данным сейсморазведки выявлено около 150 газоперспективных объектов [5; 21]. В 2007—2011 гг. в северной части сектора началась газодобыча на первых трех месторождениях в ВЧР и подготовлены к разработке еще пять. При этом по состоянию на 2014 г. на них добыто более 8 млрд м^3 газа.

Длительное время в ряде стран, включая США, Канаду, Японию и Китай, уделяется большое внимание выявлению и изучению распространения газогидратных зон, а также пробной добыче из них газа. В прошлом веке Россия была одним из лидеров исследований в области газовых гидратов (ГГ), однако трагические для страны 1990-е годы затормозили их развитие.

ГГ содержат огромные ресурсы метана, превышающие на несколько порядков все мировые ресурсы газа традиционных месторождений. Согласно различным оценкам, включая USGS и EIA [3], ресурсы залежей ГГ содержат 280—2800 трлн м^3 газа. Поэтому важность ГГ для обеспечения человечества энергетическими ресурсами в будущем не вызывает сомнений.

Зона стабильности ГГ на акваториях Мирового океана приурочена к районам с глубиной морского дна от 200 м для приполярных регионов и от 500—700 м для экваториальных условий [14]. Органическое вещество на акваториях накапливается в основном в периферических зонах океана, включающих шельфы и континентальные склоны. Значительно меньше органического вещества осаждается на абиссальных равнинах глубоководных океанических зон. В связи с этим наиболее благоприятными обстановками образования ГГ являются области глубоководного шельфа и континентального склона. По современным оценкам, в акваториях Мирового океана сосредоточено 98% всех ресурсов газогидратов, в то время как на суше — только 2% [14].

Наибольшая часть открытых залежей ГГ расположена на континентальных склонах Мирового океана и в Арктике, что видно на карте (рис. 1), построенной в геоинформационной системе «Арктика и Мировой океан» (ГИС «АМО» [1; 5—7]) Института проблем нефти и газа РАН и публикуемой впервые. Данная ГИС содержит информацию о 1153 объектах фактического (476) и возможного (677) существования ГГ, прогнозируемого с разной степенью вероятности по каротажным данным (466) и косвенным (211) признакам, что отражено ниже. По нашим представлениям, это самая крупная в мире ГИС, обобщающая многочисленные источники информации по распространению ГГ [1; 3; 5; 8; 16; 18—34 и др.].

Среди пионерских проектов освоения ГГ на акваториях Мирового океана отметим успехи Японии, опробовавшей технологии добычи газа на континентальном склоне в 2013 и 2017 гг., и Китая с пробной добычей в Южно-Китайском море в 2017 г. Один из авторов данной статьи в 2014 г. был в Японии в составе делегации РАН и убедился, что «газогидратные проблемы» активно исследуются, но результаты развития технологий добычи газа не раскрываются.

Несмотря на большой позитивный потенциал, залежи ГГ, как и залежи газа в свободном состоянии в ВЧР, представляют угрозу при освоении традиционных ресурсов углеводородов, особенно в зоне развития многолетнемерзлых пород (ММП). Снижение давления и повышение температуры при бурении скважин в зонах существования ГГ приводит к их диссоциации (распаду) на газ и воду, что может создать аварийные и даже катастрофические ситуации, включая выбросы и взрывы газа [1; 2; 7; 26]. Техногенное гидратообразование в скважинах и трубопроводах является большой проблемой нефтегазовой отрасли при освоении ресурсов газа в Арктике и в глубоководных зонах Мирового океана.

Кроме того, гидраты метана могут играть важную роль в изменении глобального климата на Земле, что способно привести к катастрофическим последствиям, так как метан является более сильным парниковым газом, чем CO_2. Масштабная эмиссия метана в атмосферу из гидрата природного газа способна привести к глобальному потеплению, что чревато дополнительной эмиссией метана, особенно из Арктики, где уже и так идет аномальное потепление. ГГ, как и ММП, являются хорошей покрышкой на пути субвертикальной миграции свободного газа, который может формировать под слоем ГГ крупные залежи, мигрировать в субгоризонтальном направлении и прорываться

[1] ОАО «Морская арктическая геологоразведочная экспедиция».

[2] Геологическая служба США (United States Geological Survey).

[3] Energy Information Administration — независимое агентство в составе федеральной статистической системы США, ответственное за сбор, анализ и распространение информации об энергии и энергетике.

на поверхность через ослабленные зоны (талики), формируя гигантские кратеры.

Газогидраты в Арктике

В результате целенаправленных программ исследований Мирового океана были взяты образцы ГГ со дна различных акваторий. Также они были обнаружены в керне скважин на ряде площадей Мирового океана и на суше, включая скважины в Циркумарктическом регионе на Аляске в зоне Prudhoe Bay — Kuparuk River (Mount Elbert-1, NW Eileen St-2, Kuparuk St-1 (BP), Beechy St-1, KRU 1H-6 и др.) и в Канаде в дельте реки Маккензи (Ivik, Mallik и др.) (см. рис. 1, красный цвет) [1; 15; 25 и др.]. Наличие залежей ГГ на месторождении Mallik (ресурсы газа около 100 млрд м^3), расположенном на побережье моря Бофорта, подтверждено бурением четырех скважин — одной в 1998 г. и трех в 2002 г. [25]. Здесь международным консорциумом (Япония — JNOC и JAPEX, Канада — GSC и США — USGS) были проведены первые эксперименты по добыче газа из гидратонасыщенных интервалов.

По факту нахождения ГГ в ряде арктических скважин были сформулированы критерии поиска ГГ по каротажным кривым (высокие скорости и удельные электрические сопротивления, повышенное газосодержание в буровом растворе и др.). При анализе данных по 445 скважинам с Северного склона Аляски и сопредельных районов установлено высоковероятное наличие ГГ в 50 [24]. Выявлено до шести гидратонасыщенных горизонтов в интервалах глубин кровли от 207 до 255 м и подошвы от 423 до 1036 м. При этом минимальная глубина подошвы ММП — 286 м, а максимальная — 616 м. В скважине Prudhoe Bay Unit R-1 ГГ выявлены в самом протяженном интервале 207—1036 м (829 м). Также доказано, что в абсолютном большинстве скважин кроме биогенного присутствует катагенетический газ, мигрировавший из глубоких отложений. Таким образом, было обосновано, что ГГ имеют широкое распространение на Северном склоне Аляски.

По данным GSC [4], в арктических регионах Канады на суше (Северо-Западные территории, Юкон, Арктические острова и дельта реки Маккензи), в море Бофорта и в Атлантическом океане ГГ в разной степени вероятности существуют в 416 скважинах из 661 [34 и др.]. В итоге на рис. 1 розовыми точками обозначены 466 скважин с возможным содержанием ГГ.

На северном шельфе Норвегии образцы ГГ были выявлены в грунтовых колонках, поднятых в ходе ряда экспедиций в Норвежском море, в том числе на площади подводного грязевого вулкана Haakon Mosby на глубине около 1250 м и на дне покмарки Nyegga [31 и др.].

В базе данных ГИС «АМО» также приведена информация о 211 объектах (зоны и отдельные площади), на которых существование ГГ прогнозируется по косвенным показателям (см. рис. 1, желтые точки). Отметим, что в ГИС «АМО» среди этих объектов имеется значительное количество зон и площадей, где ГГ прогнозируются по нескольким независимым исследованиям. В частности, на континентальных склонах моря Лаптевых это 4 сейсмопрофиля, а моря Бофорта — 20.

Преимущественно прогноз по косвенным признакам сделан при анализе временны́х разрезов сейсморазведки МОГТ, на которых в ВЧР нередко выделяются высокоамплитудные отражающие горизонты BSR [5] с инвертированными осями синфазности, субпараллельными дну. Инверсия отраженных волн происходит за счет экранирования гидратонасыщенной толщей с относительно высокой акустической жесткостью (плотностью пород и скоростями распространения упругих волн) нижележащих пористых отложений с залежами свободного газа, характеризующихся меньшей акустической жесткостью [3; 5; 12 и др.]. Обычно выше горизонта BSR наблюдается акустически прозрачная толща с ослабленными отражениями, а ниже — интенсивные отражения. Это связано с тем, что твердые гидратонасыщенные породы обладают относительно однородной акустической жесткостью, в то время как нижележащие отложения имеют слои с существенным различием акустических импедансов. Наиболее ярко BSR выделяется при пересечении им осей синфазности волн, отраженных от границ осадочных толщ с различными акустическими импедансами.

Однако геологическое строение реальной среды гораздо сложнее, чем кажется. Часто идентификация на временны́х разрезах BSR затруднена и неоднозначна, например при пологом рельефе дна или при отсутствии залежей свободного газа ниже подошвы ГГ. Бурение ряда скважин показало, что присутствие на временны́х разрезах BSR не является однозначным подтверждением наличия газогидратов и наоборот, газогидраты выявлялись в зонах, где не было BSR [18]. В частности в Беринговом море в пределах Алеутской котловины BSR был отмечен сейсмической съемкой в нескольких местах, однако скважины, пробуренные в рамках программы глубоководного бурения DSDP, показали отсутствие ГГ. Выяснилось, что BSR был обусловлен диагенетическим преобразованием кремнистых пород и связанным с ним изменением (ростом) плотности отложений [32]. Анализируя данные сейсморазведки USGS в Беринговом и Охотском морях, мы также наблюдали подобные горизонты, но в этих случаях отраженные волны не инвертируются [3].

При анализе данных сейсморазведки по континентальному склону Норвежского моря выявлены границы BSR во многих зонах, в том числе и в райо-

[4] Геологическая служба Канады (Geological Survey of Canada).

[5] Bottom Simulating Reflector (BSR) — отражающий горизонт, повторяющий дно (псевдодонный отражающий горизонт).

Рис. 1. Распространение газовых гидратов в Арктике и Мировом океане. Условные обозначения: 1 — доказано прямыми исследованиями, включая бурение, 2 — прогноз по каротажу скважин, 3 — косвенные признаки, включая данные сейсморазведки (BSR). Примечание. Все рисунки, схемы и графики разработаны авторским коллективом

не гигантского оползня Storegga, при этом по характеру BSR предполагается, что он произошел из-за разложения ГГ [22; 30]. На основе анализа 30 тыс. км сейсмопрофилей в указанных выше акваториях Циркумарктического региона по выявленным нами BSR спрогнозировано наличие ряда зон распространения ГГ, в том числе впервые во впадине ТИНРО Охотского моря и на континентальном склоне моря Лаптевых [3; 5].

Термобарические условия для образования ГГ существуют на большей части акватории СЛО и почти на всем российском шельфе Арктики, включая район Штокмановского газоконденсатного месторождения (ГКМ) в Баренцевом море, на котором на глубине дна более 300 м замерена отрицательная температура воды (около –1,5°С). Этот факт существенно усложнил проект освоения данного месторождения, так как возникли дополнительные проблемы, связанные с возможным образованием техногенных ГГ в скважинах и подводных трубопроводах.

За счет огромной площади российского шельфа Арктики и практически повсеместного существования криолитозоны обоснованно предполагается, что здесь сосредоточены самые большие ресурсы ГГ. Однако ГГ до сих пор не выявлены ни на одной из площадей российских акваторий Арктики, а на прилегающей суше они прогнозируются в разной степени вероятности лишь в нескольких местах, включая доказанное существование по образцам керна из скважин Бованенковского и Ямбургского месторождений (см. рис. 1). На известном Мессояхском месторождении прогнозируется наличие ГГ, а прямых доказательств до сих пор не получено. Это не подтверждает редкость ГГ, а свидетельствует о недостатках поисковых работ, если можно говорить, что они целенаправленно проводились. Традиционные технологии бурения скважин, ориентированных на глубокие отложения, не предполагают исследований наличия ГГ. В то же время в результате целенаправленных исследований в пределах других акваторий России и СНГ залежи ГГ обнаружены на многих площадях Охотского, Каспийского и Черного морей, а также на дне озера Байкал.

В связи с важностью прогноза зон распространения ГГ для Циркумарктического региона, ограниченного широтой 64°, выполнены комплексные исследования, включая анализ фактических термобарических условий, результаты которого представлены ниже.

Анализ термобарических условий в Циркумарктическом регионе

Для прогноза зон возможного распространения ГГ в донных отложениях Мирового океана необходима информация о существующих термобарических условиях. Уровень солнечной радиации оказывает значительное влияние на температуры атмосферы и поверхностной части гидросферы, зависящее от времени года. При этом глубинные и придонные воды практически не подвержены сезонным изменениям температуры на поверхности. При прогнозе зон распространения ГГ особенно важно учитывать температурный режим в придонной части океана, зависящий от глубины дна, теплового потока Земли и термохалинных течений. На Земле за счет неравномерного поступления солнечной энергии,

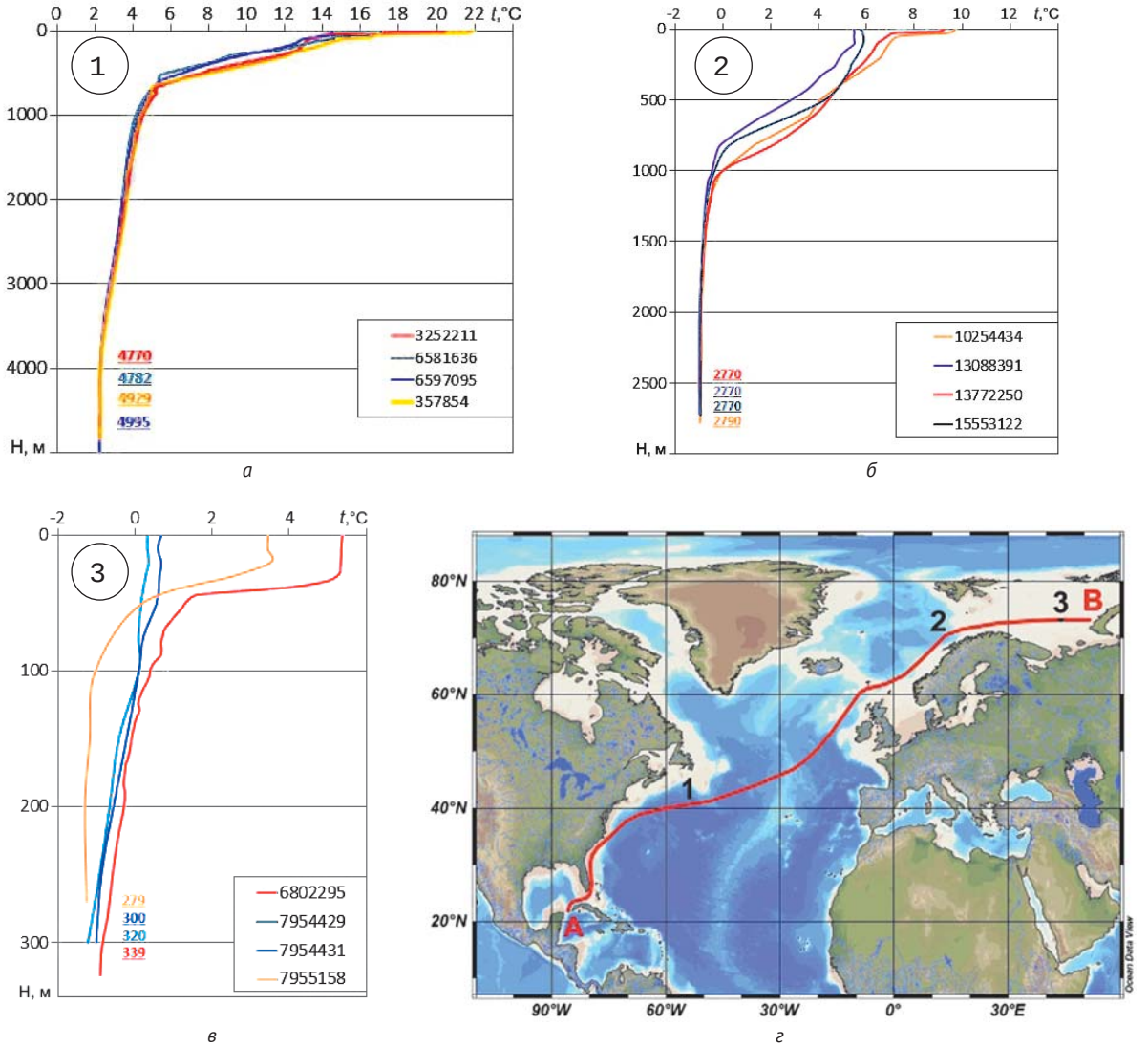

Рис. 2. Изменения температур водной толщи в трех зонах Мирового океана (*а—в*) и положение мегарегионального трансатлантико-арктического разреза температур (*г*). Условные обозначения: зона 1 — к юго-западу от Большой Ньюфаундлендской банки, зона 2 — в глубоководной части Норвежского моря, зона 3 — на Штокмановском ГКМ; многозначные числа около графиков — номера станций и глубины дна в точках измерений

вращения Земли и превалирующих направлений ветров существуют глобальные водовороты в Мировом океане — термохалинная (температурно-соленостная) циркуляция. От температурно-соленостных физико-химических характеристик морской воды зависит ее плотность. В упрощенном виде отметим, что теплые воды, формирующиеся в экваториальной части, включая Мексиканский залив, устремляются на север Атлантического океана, создавая теплое течение Гольфстрим (Gulf Stream — поток из залива), выходящее через Флоридский пролив (рис. 2г). Его ширина местами достигает 100 км, а скорость — 5—8 км/ч.

Продолжение Гольфстрима северо-восточнее Большой Ньюфаундлендской банки также называют Северо-Атлантическим течением (см. рис. 2г). Вода этого течения за счет охлаждения в субарктической части Атлантического океана опускается вниз и формирует течение в противоположном направлении, в итоге уходящее в Индийский и Тихий океаны, в которых вода, постепенно нагреваясь, поднимается вверх и движется в обратном направлении, формируя «большой океанический конвейер». Из-за дефицита поступающей солнечной энергии в Циркумарктическом регионе температура воды в придонной части преимущественно отрицательная за исключением зоны захода Северо-Атлантического течения в Баренцево море. За счет него температурный режим западной и центральной частей Баренцева моря кардинально отличается от других регионов Арктики.

Для анализа температур используются батитермографы разных типов, в том числе автономные, с помощью которых акватория Мирового океана покрыта сетью разной плотности наблюдений. Национальное управление океанических

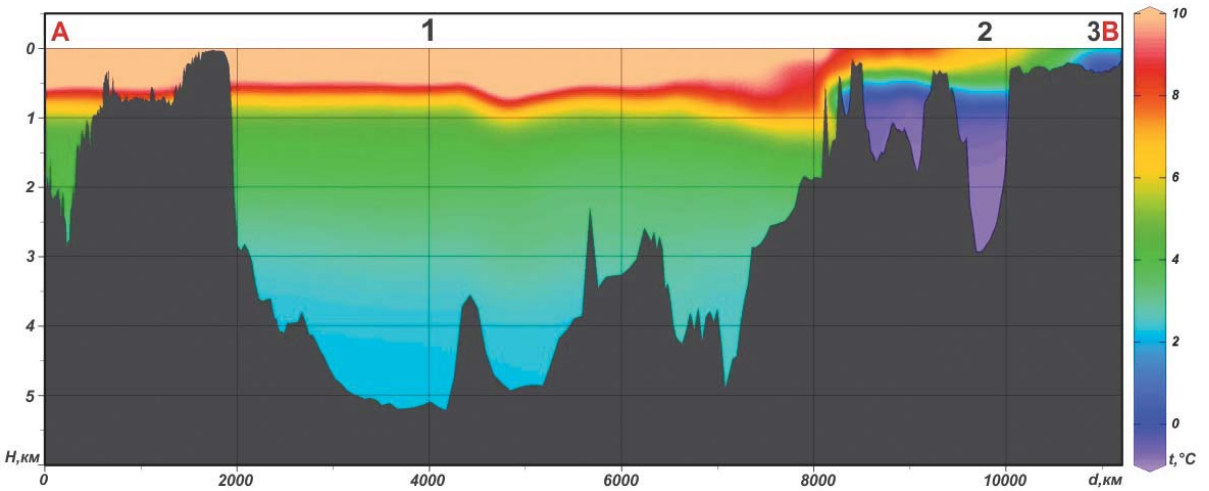

Рис. 3. Мегарегиональный трансатлантико-арктический разрез температур водной толщи «Мексиканский залив — Новая Земля» (А-В)

и атмосферных исследований NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), созданное в США в 1970 г., начиная с 1994 г. сформировало самую крупную геоинформационную океанографическую базу данных. В 2013 г. версия этой базы WOD13 (World Ocean Database 2013 г.) включала около 12,76 млн точек (станций) измерений температур в Мировом океане, а по состоянию на май 2018 г. их было уже более 15,6 млн. По понятным причинам в глубоководной труднодоступной части СЛО плотность размещения таких станций наименьшая.

На карте (см. рис. 2г), построенной с помощью программного обеспечения ODV (Ocean Data View), показана линия мегарегионального трансатлантико-арктического профиля «Мексиканский залив — Новая Земля» (А-В), проходящего вдоль Гольфстрима и Северо-Атлантического течения с заходом в Баренцево море с пересечением Штокмановского ГКМ. На профиле А-В отмечены три характерных участка (1, 2, 3), где эти течения оказывают различное влияние на температурный режим водной толщи. При этом два участка (1, 2) выбраны в Атлантическом океане к юго-западу от Большой Ньюфаундлендской банки (координаты 41,2° с. ш., 54,8° з. д.) и в глубоководной части Норвежского моря (70,0° с. ш., 12,5° в. д.). Третий участок (3) задан на площади Штокмановского ГКМ (73,1° с. ш., 43,9° в. д.) в Баренцевом море.

С использованием данных базы WOD13 и программного обеспечения ODV NOAA можно построить зависимости температур для любых точек Мирового океана или по любым профилям. На рис. 2а—2в для каждого из трех выделенных участков приведены зависимости температур по четырем соседним станциям, исследования на которых выполнены в зимнее (синий и фиолетовый цвета) и летнее (красный и желтый цвета) времена года. Обобщенный анализ этих термограмм позволяет сделать следующие выводы: сезонные различия температур влияют только на верхнюю толщу воды (около 50 м); согревающее влияние Гольфстрима на станциях участков 1 и 2 проявляется до глубин не более 1000 м, а на станции участка 3 влияет очень мало; на протяженных интервалах глубин для участков 1 и 2 (ниже глубины 1000 м), а также для участка 3 (глубже 300 м) значения температур соседних станций практически совпадают; средние температуры около дна на участке 1 превышают +2,5°С, а на заполярных (2 и 3) они составляют около –1°С.

На рис. 3 показан глубинный разрез температур, построенный по мегарегиональному профилю А-В (см. рис. 2г) с применением программы ODV. По этому разрезу видно, что вдоль его большей части до западных берегов Норвегии придонные температуры положительны и только примерно севернее широты 61° они становятся отрицательными, включая участок Штокмановского ГКМ.

Для построения картографической схемы придонных температур в Циркумарктическом регионе, включающем СЛО, а также прилегающие к нему акватории северных частей Атлантического и Тихого океанов до 45° с. ш., из базы WOD13 были выгружены фактические замеры температур. Общее количество станций замеров температур в данной области составляет 2 689 737, из них на 882 138 проводились измерения на различных глубинах. Эти данные представлены в виде точек с координатами и замерами температур от поверхности до различных глубин, не всегда доходящих до придонного слоя. Поэтому сначала были отобраны только самые глубокие измерения для каждой точки, а затем проведена отбраковка данных по критерию приближенности ко дну не менее 10% его глубины. После такой фильтрации общий массив замеренных придонных температур составил 622 451 значение. На рис. 4 приведена картографическая схема распределения придонных температур воды в Циркумарктическом регионе (в цветовой кодировке), ограниченная широтой 64°.

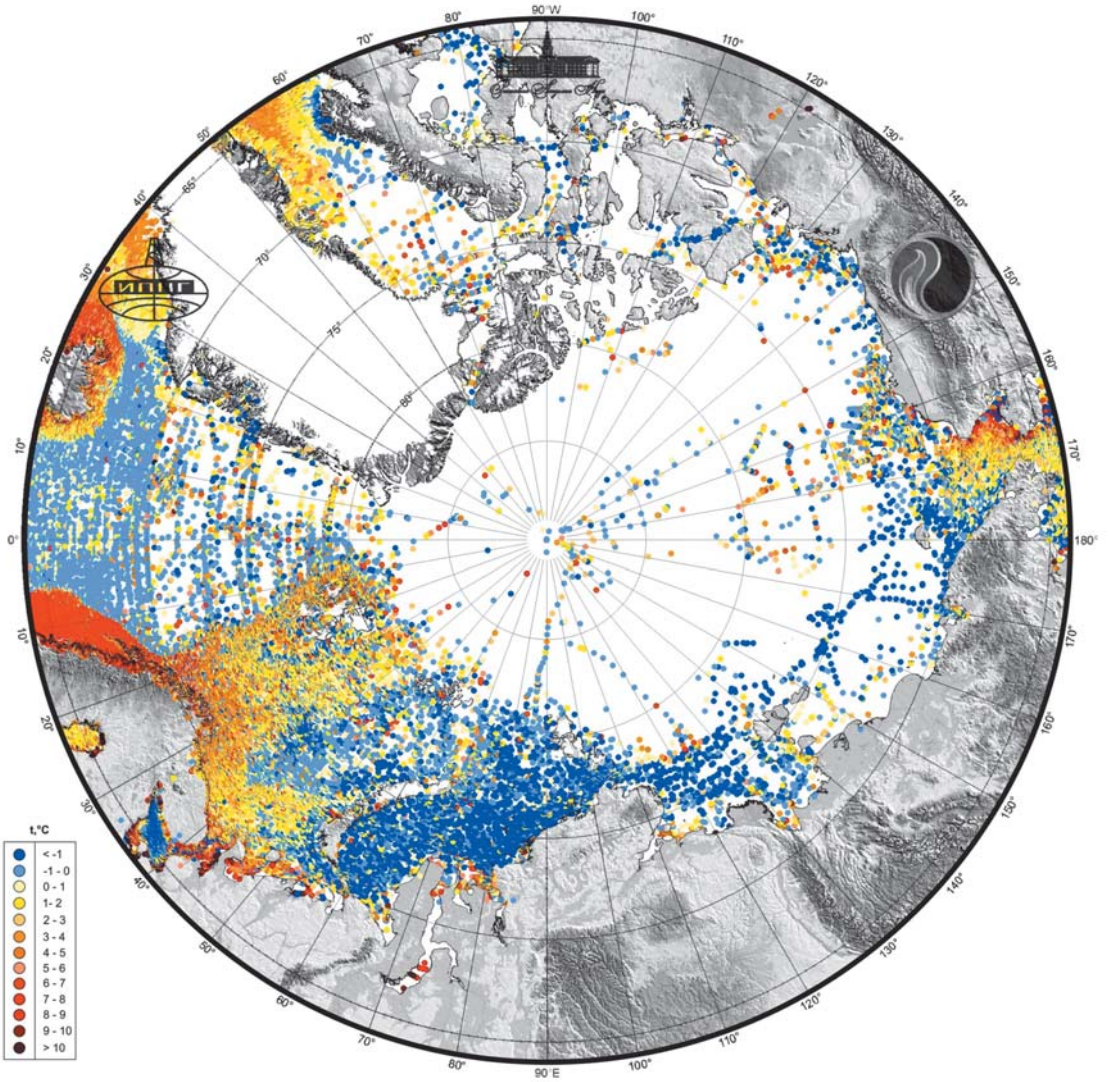

Рис.4. Картографическая схема распределения придонных температур воды в Циркумарктическом регионе

В южной части Баренцева моря вблизи берегов Скандинавского полуострова благодаря Гольфстриму придонные температуры положительны и достигают +4°C (см. рис. 4). Они также стабильно позитивны вокруг Исландии и южнее вдоль глубоководного Срединно-Атлантического хребта — зоны океанического спрединга с высоким тепловым потоком Земли. Однако такие локальные объекты, как грязевой вулкан Haakon Mosby с максимальной замеренной придонной температурой +25,8°C [28], к сожалению, в мегарегиональном масштабе не выделяются, так как являются единичной экстремальной точкой в большом массиве данных фоновой температуры вокруг вулкана около 0°C.

Отметим, что температуры мелководных зон стоков северных рек и прибрежных зон очень подвержены сезонным изменениям. Из-за этого в Беринговом проливе и южной части Чукотского моря на рис. 4 наблюдаются сезонные положительные придонные температуры. Это связано с Аляскинским течением, привносящим в СЛО тихоокеанские воды, повышающие в летний сезон температуру Чукотского моря. Часть течения поступает на север через Берингов пролив, другая часть (изменяя направление) идет в Беринговом море, движется на юго-запад вдоль побережья Азии и далее переходит в Камчатское течение.

Картографическая схема (рис. 4) была подвергнута кропотливой интерпретации в контрастной цветовой кодировке температур, в результате чего построена осредненная мегарегиональная картографическая схема изотерм с шагом 1°C, необходимая для последующего выявления благоприятных зон для образования ГГ.

При расчете термобарических условий стабильности ГГ для известных глубин дна (например, батиметрическая база GEBCO) и температуры обычно используют эмпирические зависимости [9; 19]. С поддержкой компании ARCO (ныне часть компании BP) E. D. Sloan разработал статистическое

термодинамическое программное обеспечение CSMHYD (Hydoff), позволяющее промоделировать термобарические условия гидратообразования с учетом состава газа и минерализации (солености S) воды, вступающей в реакцию [33]. На рис. 5 приведены расчетные графики зависимости равновесной кривой стабильности метановых гидратов от солености воды. По приведенным кривым видно, что при одинаковых температурах для пресной воды зона стабильности газогидратов будет расположена на меньших глубинах, чем для соленых вод. Причем чем больше температура воды, тем больше разница необходимых глубин стабильности ГГ для пресной и соленой воды. Это объясняется тем, что при образовании ГГ в них переходит только пресная вода, а ионы солей препятствуют этому процессу, снижая активность воды [11]. Для температуры 0°С эта разница составляет 49 м (для пресной воды –248 м, для солености 36‰ –297 м), а для температуры +10°С — 120 м (для пресной воды –678 м, для солености 36‰ –798 м). По графику на рис. 5 видно, что кривая 0‰ резко изгибается при температуре 0°С, что связано с замерзанием пресной воды при данной температуре.

Для построения картографической схемы стабильности метаногидратов в Циркумарктическом регионе использовались массивы данных придонных температур (см. рис. 4) и в первом приближении (модель 1) значение солености в 34,5‰ (см. рис. 5) как среднее значение придонной солености по данным NOAA. Расчетные глубины по модели 1 при температуре –2°С составили 244 м, при 0°С — 295 м, а при 9°С — 714 м (это значение характерно для придонных отложений Черного моря). Результирующая картографическая схема распространения газогидратов в Циркумарктическом регионе приведена на рис. 6.

Отметим, что показанные на рис. 6 построения по модели 1 выполнены в допущении, что в придонных осадках минерализация такая же, как и в придонных водах. Такой подход справедлив, если отложения ВЧР хорошо проницаемы и свободно сообщаются с морской водой. Однако в резервуарах ВЧР возможно наличие резервуаров, экранированных от морской воды непроницаемыми отложениями. В таком случае вероятно, что пластовые воды имеют меньшую минерализацию и, в частности, могут быть практически пресными. Например, соленость в альб-сеноманских отложениях на полуострове Ямал составляет около 15‰ [17].

Расчетные глубины по модели 2 с пресной пластовой водой в придонных отложениях (см. рис. 5) при температуре –2°С составили 238 м, при 0°С — 248 м, а при 9°С — 612 м. Для условий СЛО с температурами вблизи дна –2°С и 0°С различия по моделям 1 и 2 составили всего 6 и 47 м. Таким образом, по модели 2 границы возможного образования ГГ в СЛО немного расширяются. Это особенно хорошо видно

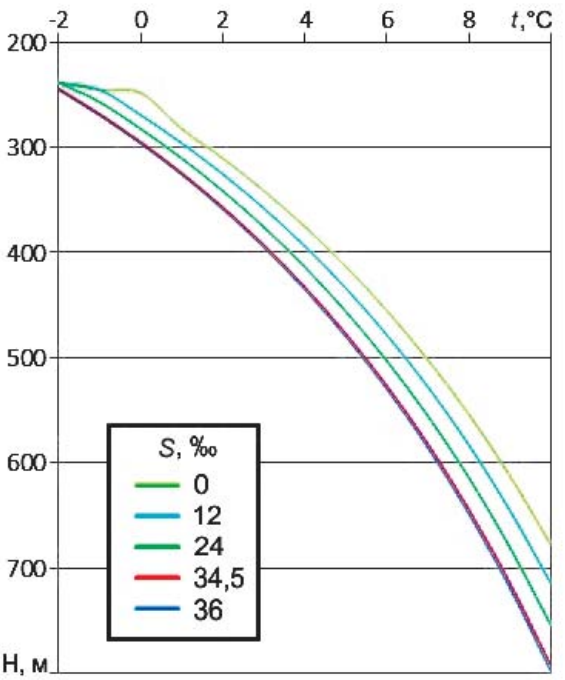

Рис. 5. Расчетные зависимости равновесной кривой стабильности метановых гидратов от солености воды

на шельфовых участках Баренцева моря с пологим залеганием дна (рис. 7).

Кроме зоны благоприятных термобарических условий для современного образования и сохранения ГГ на шельфе Арктики существует область предполагаемого развития субаквальных ММП, являющаяся зоной метастабильности ГГ, в которой за счет эффекта самоконсервации могут сохраняться реликтовые газогидраты [10; 19]. Последний ледниковый максимум произошел в конце позднего плейстоцена (25—19 тыс. лет назад) [23]. В это время уровень Мирового океана значительно упал (по разным данным на 105—163 м), так как большие объемы воды ушли из гидросферы Мирового океана и перешли в замороженное состояние в ледовых покровах толщиной до 3—4 км [23]. Обширные площади современного шельфа СЛО стали сушей и в низменных частях сформировались мощные (местами более 1 км, как в Якутии) зоны ММП и связанные с ними ГГ. После завершения ледникового периода (около 9 тыс. лет назад) и потепления климата в последние тысячелетия оледенение отступило, и уровень Мирового океана поднялся примерно на 120 м [30]. При этом начался процесс постепенной деградации субаквальных ММП. Одной из причин того, что ММП не деградировали полностью до сих пор, является низкая (отрицательная) температура придонной воды. Это означает, что в настоящее время на шельфе до глубины 120 м можно прогнозировать распространение реликтовых метастабильных ГГ.

Таким образом, за счет эффекта самоконсервации ГГ на шельфе Циркумарктического региона площади зон, благоприятных для существования

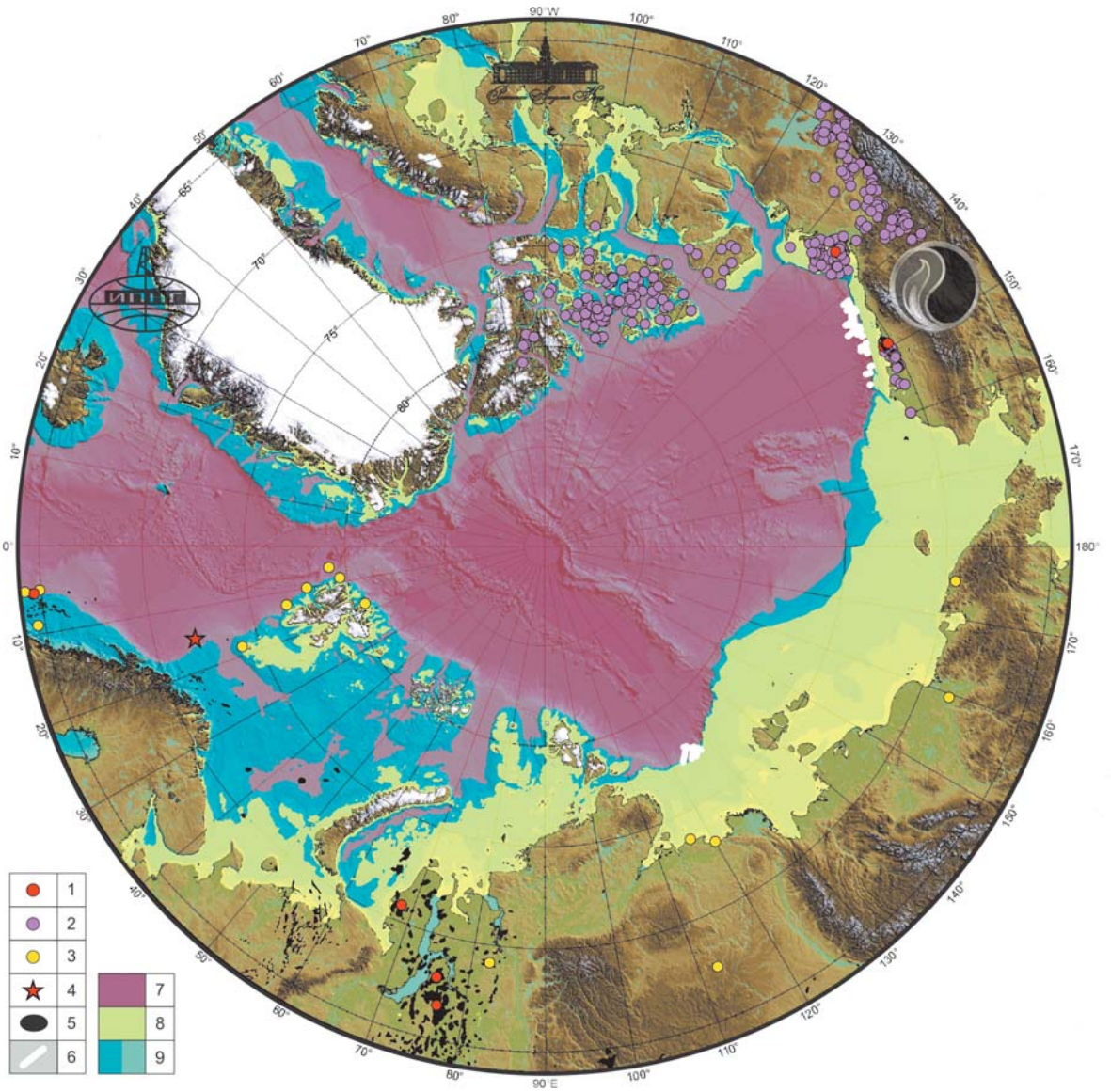

Рис. 6. Схема распространения газогидратов в Циркумарктическом регионе по модели 1 (картографическая основа IBCAO). Условные обозначения: 1 — ГГ подтверждены образцами со дна и из скважин, 2 — высоковероятный прогноз ГГ по каротажу скважин, 3 — BSR и другие косвенные признаки ГГ, 4 — вулкан Haakon Mosby с ГГ, 5 — традиционные месторождения нефти и газа, 6 — зоны BSR в морях Лаптевых и Бофорта, 7 — зона благоприятных термобарических условий, 8 — благоприятная зона субаквальных ММП, 9 — отсутствие условий для формирования и существования ГГ на акваториях

ГГ, значительно увеличиваются (см. рис. 6 и 7). Однако в мелководных зонах стоков крупных северных рек ММП деградировали, особенно в Обской и Тазовской губах, в которых ММП сохранились лишь в прибрежной узкой полосе их выклинивания, а на большей части акватории образовались обширные талики. В ходе формирования таликов ГГ диссоциировались, а выделившийся газ ушел в атмосферу.

Контроль результатов с учетом BSR

На севере акватории моря Лаптевых существует переход от шельфа через континентальный склон к океаническому ложу в котловине Амундсена. Поскольку континентальный склон является наиболее распространенной зоной существования ГГ, была поставлена задача выделить BSR в этой зоне и установить, где он прекращает прослеживаться или выклинивается. При анализе предоставленных нам ОАО «МАГЭ» временны́х разрезов МОГТ в море Лаптевых на четырех сейсмопрофилях (LS0914, LS0923, LS0924 и LS0927), выходящих за пределы шельфа на континентальный склон, были выделены горизонты BSR (рис. 8) [5]. Отметим, что цветовая кодировка акватории на рис. 8 отображает распространение зон возможного существования ГГ (аналогично рис. 6 и 7). В частности, на разрезе LS0927 горизонт BSR прослеживается от бровки континентального шельфа на юго-западе (пикет 7090, время 0,97 с) до северо-восточного окончания разреза.

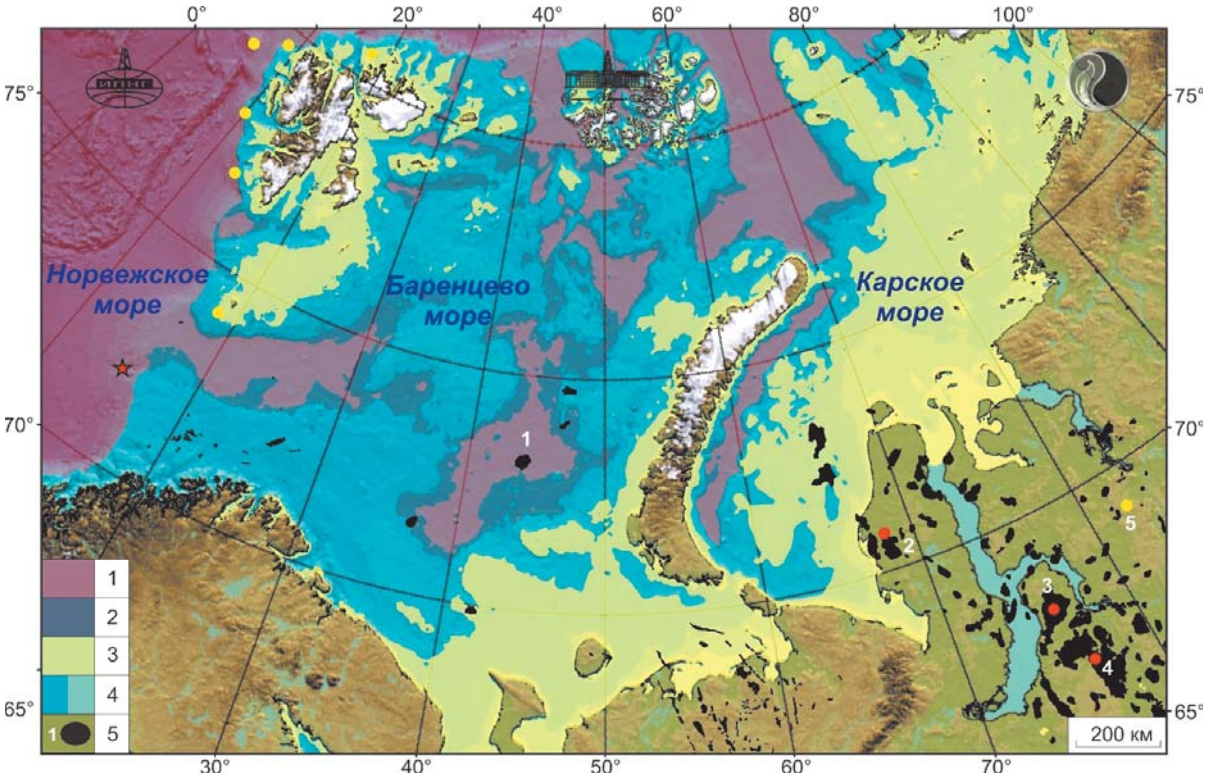

Рис. 7. Схема распространения газогидратов в Норвежском, Баренцевом и Карском морях по модели 2 (картографическая основа IBCAO). Условные обозначения: 1 и 2 — зоны благоприятных термобарических условий по моделям 1 и 2; 3 — благоприятная зона субаквальных ММП; 4 — отсутствие условий для формирования и существования ГГ на акваториях; 5 — традиционные месторождения нефти и газа, включая показанные белыми цифрами Штокмановское (1), Бованенковское (2), Ямбургское (3), Уренгойское (4) и Мессояхское (5)

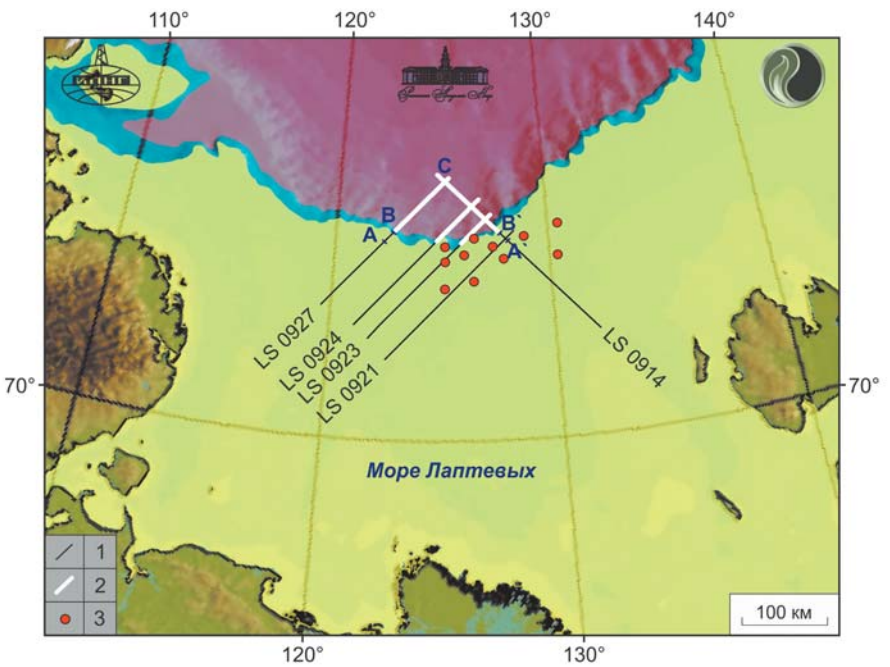

Рис. 8. Расположение сейсмопрофилей МОГТ (1) с зонами выделения горизонта BSR (2) и мест эмиссии газа в море Лаптевых (3)

Выделяемый горизонт BSR имеет все характерные для него признаки, перечисленные выше.

В точках пересечения перечисленных выше временны́х разрезов горизонт BSR расположен на одних и тех же временах (глубинах). На рис. 9 показан композитный временной разрез длиной около 190 км по двум пересекающимся под прямым углом (ортогональным) профилям LS0927 и LS0914 с увеличенным

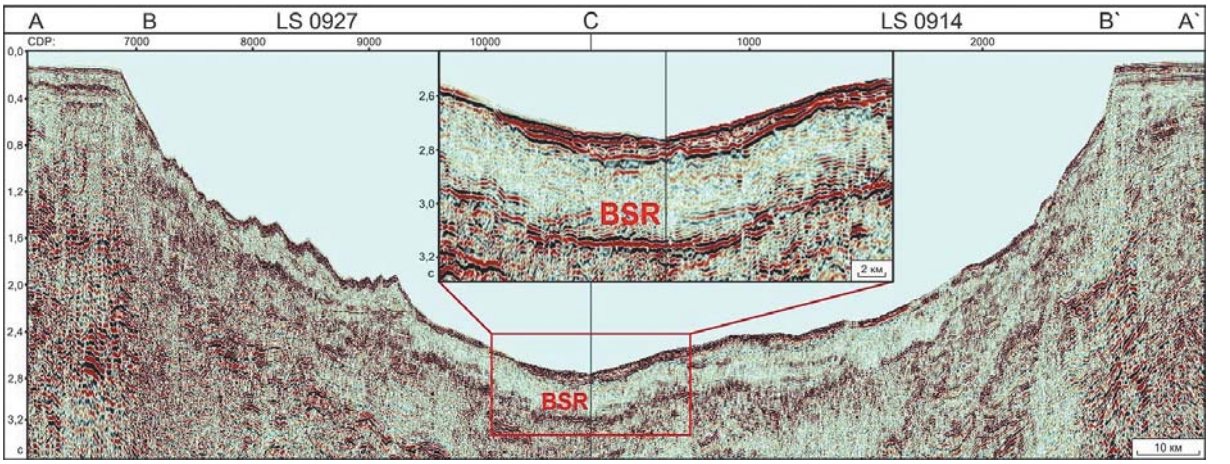

Рис. 9. Композитный временной разрез по сейсмопрофилям LS0927 и LS0914 на шельфе и континентальном склоне моря Лаптевых

фрагментом зоны их пересечения длиной 33 км. На обеих частях композитного разреза BSR прослеживается от бровки шельфа вниз по континентальному склону до точки пересечения профилей С (участки ВС и СВ`), где горизонт находится на времени 3,15 с (0,35 с, или около 600 м от дна моря при скорости распространения упругих волн в отложениях с ГГ 3500 м/с). На увеличенном фрагменте отчетливо видна инверсия отраженных волн от границы BSR. Кроме того, в зоне пересечения профилей (см. увеличенный фрагмент) вблизи дна (около 0,1 с) наблюдается выклинивающийся горизонт, на котором также происходит инверсия отраженных волн. Возможно, это вызвано наличием нескольких слоев ГГ подобно зоне Prudhoe Bay (см. выше). В центральной части профиля LS0927 видны крупные неровности рельефа дна, наиболее вероятно, связанные с оползневыми процессами на континентальном склоне.

Отметим, что зоны существования BSR на континентальном склоне моря Бофорта, выделенные нами по сейсмопрофилям USGS (см. рис. 6), также как и для моря Лаптевых, хорошо согласуются с прогнозной зоной стабильности ГГ.

На мелководном арктическом шельфе сибирских морей в ряде зон были обнаружены субаквальные ММП и выходы (сипы) газа в водную толщу, формирующие на эхограммах «факелы газа». На севере шельфа моря Лаптевых вблизи от его континентальной бровки во время ряда экспедиций, включая SWERUS-C3, была выявлена зона масштабной эмиссии газа [13 и др.]. Найденные в ряде точек сипы газа (факелы газа), возможно, связаны с диссоциацией ГГ в процессе деградации ММП.

Кроме того, практически все зоны доказанного существования ГГ в СЛО, включая вулкан Haakon Mosby, а также прогнозные данные по каротажным кривым и BSR попали в зону прогноза существования ГГ в Циркумарктическом регионе (см. рис. 6 и 7).

Необходимо отметить, что ГГ существуют не повсеместно там, где есть благоприятные термобарические условия для образования и сохранения, а лишь на отдельных площадях и зонах, в которых существует газ in situ или имеется приток газа из глубин по разломам, субвертикальным трещинам, «газовым трубам», каналам грязевых вулканов и пр.

Заключение

1. В результате многолетних исследований создана и постоянно развивается ГИС «АМО», насчитывающая 1153 объекта (зоны и отдельные площади) геоинформационных ресурсов о распространении ГГ в Арктике и Мировом океане.

2. При анализе сейсмических материалов выявлен ряд зон распространения ГГ, в том числе впервые на континентальном склоне моря Лаптевых и во впадине ТИНРО в Охотском море.

3. Из-за согревающего действия Северо-Атлантического течения (арктического продолжения Гольфстрима) в Баренцевом море существует неравномерное распределение температуры водной толщи, что оказывает значительное влияние на распространение отрицательных температур вблизи дна и зон, благоприятных для образования ГГ.

4. На основе выявления зон с благоприятными термобарическими условиями для образования и сохранения ГГ построена картографическая схема их возможного распространения на акваториях Циркумарктического региона.

5. Рассмотренная «газогидратная проблема» свидетельствует о необходимости проведения комплексных геолого-геофизических исследований ресурсов ГГ и природно-техногенных опасностей в строении осадочных отложений суши и акваторий Арктики и Мирового океана.

Работа выполнена при поддержке программы фундаментальных исследований РАН «Проведение комплексных геолого-геофизических исследований с целями прогноза, безопасного и эффективного освоения нефтегазовых ресурсов арктической и субарктической зон Земли».

Литература/References

1. *Богоявленский В. И.* Арктика и Мировой океан: современное состояние, перспективы и проблемы освоения ресурсов углеводородов: Монография // Труды Вольного экономического общества России. — Т. 182. — М.: ВЭО, 2014. — С. 11—175.
Bogoyavlensky V. I. Arktika i Mirovoy okean: sovremennoye sostoyaniye, perspektivy i problemy osvoyeniya resursov uglevodorodov. Monografiya. [The Arctic and the World Ocean: Current Status, Prospects and Challenges of Development of Hydrocarbon Resources. Monography]. Trudy Vol'nogo ekonomicheskogo obshchestva Rossii. Vol. 182. Moscow, VEO Publ., 2014, pp. 11—175. (In Russian).
2. *Богоявленский В. И.* Выбросы газа и нефти на суше и акваториях Арктики и Мирового океана // Бурение и нефть. — 2015. — № 6. — С. 4—9.
Bogoyavlensky V. I. Vybrosy gaza i nefti na sushe i akvatoriyakh Arktiki i Mirovogo okeana. [Emissions of gas and oil on land and offshore Arctic and the World Ocean]. Bureniye i neft', 2015, no. 6, pp. 4—9. (In Russian).
3. *Богоявленский В. И., Керимов В. Ю., Ольховская О. О.* Опасные газонасыщенные объекты на акваториях Мирового океана: Охотское море // Нефтяное хоз-во. — 2016. — № 6. — С. 43—47.
Bogoyavlensky V. I., Kerimov V. Yu., Olkhovskaya O. O. Opasnyye gazonasyshchennyye ob'yekty na akvatoriyakh Mirovogo okeana: Okhotskoye more. [Dangerous gas-saturated objects in the World Ocean: the Sea of Okhotsk]. Neftyanoye khoz-vo, 2016, no. 6, pp. 43—47. (In Russian).
4. *Богоявленский В. И., Богоявленский И. В., Богоявленская О. В., Никонов Р. А.* Перспективы нефтегазоносности седиментационных бассейнов и фундамента Циркумарктического региона // Геология нефти и газа. — 2017. — № 5. — С. 5—20.
Bogoyavlensky V. I., Bogoyavlensky I. V., Bogoyavlenskaya O. V., Nikonov R. A. Perspektivy neftegazonosnosti sedimentatsyonnykh basseinov i fundamenta Tsyrkumarkticheckogo regiona. [Perspectives of petroleum potential of sedimentary basins and basement of the Circum-Arctic Region]. Geologia nefti i gaza, 2017, no. 5, pp. 520. (In Russian).
5. *Богоявленский В. И., Казанин Г. С., Кишанков А. В.* Опасные газонасыщенные объекты на акваториях Мирового океана: море Лаптевых // Бурение и нефть. — 2018. — № 5. — С. 20—29.
Bogoyavlensky V. I., Kazanin G. S., Kishankov A. V. Opasnyye gazonasyschennyye ob'yekty na akvatoriyakh Mirovogo okeana: More Laptevykh. [Dangerous gas-saturated objects in the World Ocean: the Laptev Sea]. Bureniye i neft', 2018, no. 5, pp. 20—29. (In Russian).
6. *Богоявленский В. И., Кишанков А. В.* Опасные газонасыщенные объекты на акваториях Мирового океана: Берингово море // Бурение и нефть. — 2018. — № 9. — С. 4—12.
Bogoyavlensky V. I., Kishankov A. V. Opasnyye gazonasyschennyye ob'yekty na akvatoriyakh Mirovogo okeana. Beringovo more. [Dangerous gas-saturated objects in the World Ocean: the Bering Sea]. Bureniye i neft', 2018, no. 9, pp. 4—12. (In Russian).
7. *Богоявленский В. И., Богоявленский И. В.* Природные и техногенные угрозы при поиске, разведке и разработке месторождений углеводородов в Арктике // Минер. ресурсы. — 2018. — № 2. — С. 60—70.
Bogoyavlensky V. I., Bogoyavlensky I. V. Prirodnye i tekhnogennye ugrozy pri poiske, razvedke i razrabotke mestorozhdeniy uglevodorodov v Arktike. [Natural and technogenic threats in Arctic hydrocarbon fields search, prospecting and development]. Miner. resursy, 2018, no. 2, pp. 60—70. (In Russian).
8. *Гинсбург Г. Д., Соловьев В. А.* Субмаринные газовые гидраты / ВНИИОкеанология. — СПб., 1994. — 199 с.
Ginsburg G. D., Soloviev V. A. Submarinnye gazovye gidraty [Submarine gas hydrates]. VNIIOkeangeologia. St. Petersburg, 1994, 199 p. (In Russian).
9. *Истомин В. А., Якушев В. С.* Газовые гидраты в природных условиях. — М.: Недра, 1992. — 236 с.
Istomin V. A., Yakushev V. S. Gazovye gidraty v prirodnykh usloviyakh [Gas hydrates in natural conditions]. Moscow, Nedra, 1992, 236 p. (In Russian).
10. *Истомин В. А., Якушев В. С., Махонина Н. А. и др.* Эффект самоконсервации газовых гидратов // Газовая пром-сть: Спецвып. «Газовые гидраты». — 2006. — С. 36—46.
Istomin V. A., Yakushev V. S., Makhonina N. A. et al. Effekt samokonservatsyi gazovykh gidratov. [Effect of gas hydrates self-conservation]. Gazovaya prom-st', "Gazovye gidraty", 2006, pp. 36—41. (In Russian).
11. *Калачева Л. П., Федорова А. Ф.* Исследование свойств гидратов природного газа, полученных из растворов хлорида натрия // Наука и образование. — 2016. — № 3. — С. 50—54.
Kalacheva L. P., Fyodorova A. F. Issledovaniya svoistv gidratov prirodnogo gaza, poluchennykh iz rastvora khlorida natriya. [Research of properties of natural gas hydrates obtained from sodium chloride solution]. Nauka i obrazovaniye, 2016, no. 3, pp. 50—54. (In Russian).
12. *Кремлев А. Н., Соловьев В. А., Гинсбург Г. Д.* Отражающий сейсмический горизонт в основании субмаринной зоны стабильности газовых гидратов // Геология и геофизика. — 1997. — Т. 38. — С. 1747—1759.
Kremlev A. N., Soloviev V. A., Ginsburg G. D. Otrazhayuschiy seismicheskiy gorizont v osnovanii submarinnoy zony stabilnosti gazovykh gidratov. [Reflecting seismic horizon at the base of the submarine zone of gas hydrate stability]. Geologiya i geofizika, 1997, vol. 38, pp. 1747—1759. (In Russian).
13. *Лобковский Л. И., Никифоров С. Л., Ананьев Р. А. и др.* Современные геолого-геоморфологические процессы на Восточно-Арктическом шельфе по результатам экспедиции на ледоколе «Оден» в 2014 г. // Океанология. — 2015. — Т. 55, № 6. — С. 1023—1027.
Lobkovsky L. I., Nikiforov S. L., Ananyev R. A. et al. Sovremennye geologo-geomorfologicheskiye protsessy na Vostochno-Arkticheskom shelfe po rezultatam ekspeditsyi na ledokole "Oden" v 2014 g. [Recent Geological–Geomorphological Processes on the East Arctic Shelf: Results of the Expedition of the Icebreaker Oden

in 2014]. Okeanologiya, 2015, vol. 55, no. 6, pp.1023—1027. (In Russian).
14. *Макогон Ю. Ф.* Природные газовые гидраты: распространение, модели образования, ресурсы // Рос. хим. журн. — 2003. — Т. 47, № 3. — С. 70—79.
Makogon Yu. F. Prirodnye gazovye gidraty: rasprostraneniye, modeli obrazovaniya, resursy. [Natural gas hydrates: distribution, models of formation, resources]. Ros. khim. zhurn., 2003, vol. 47, no. 3, pp. 70—79. (In Russian).
15. Национальный атлас Арктики / АО «Роскартография». — М., 2017. — 496 с.
Natsionalnyi atlas Arktiki. [National atlas of the Arctic]. AO "Roskartografiya". Moscow, 2017, 496 p. (In Russian).
16. *Обжиров А. И.* Газогидраты и потоки метана в Охотском море // Мор. информ.-управляющие системы. — 2013. — № 1 (2). — С. 56—65.
Obzhirov A. I. Gazogidraty i potoki metana v Okhotskom more. [Gas hydrates and methane streams in the Sea of Okhotsk]. Mor. inform.-upravlyayushchiye sistemy, 2013, no. 1 (2), pp. 56—65. (In Russian).
17. *Скоробогатов В. А., Строганов Л. В., Копеев В. Д.* Геологическое строение и газонефтеносность Ямала. — М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2003. — 352 с.
Skorobogatov V. A., Stroganov L. V., Kopeev V. D. Geologicheskoye stroyeniye i gazoneftenosnost Yamala. [Geological structure and gas and oil content in Yamal]. Moscow, OOO "Nedra-Biznestsentr", 2003, 352 p. (In Russian).
18. *Соловьев В. А.* Природные газовые гидраты как потенциальное полезное ископаемое // Рос. хим. журн. — 2003. — Т. 157, № 3. — С. 59—69.
Soloviev V. A. Prirodnye gazovye gidraty kak potentsialnoye poleznoye iskopayemoye. [Natural gas hydrates as a potential mineral resource]. Ros. khim. zhurn., 2003, vol. 157, no. 3, pp. 59—69. (In Russian).
19. *Якушев В. С.* Природный газ и газовые гидраты в криолитозоне. — М.: ВНИИГАЗ, 2009. — 192 с.
Yakushev V. S. Prirodnyi gaz i gazovye gidraty v kriolitozone. [Natural gas and gas hydrates in cryolithic zone]. Moscow, VNIIGAZ, 2009, 192 p. (In Russian).
20. *Andreassen K., Hubbard A., Winsborrow M. et al.* Massive blow-out craters formed by hydrate-controlled methane expulsion from the Arctic seafloor. Science, 2017, vol. 356, pp. 948—953.
21. *Boogaard M., Hoetz G.* Seismic characterisation of shallow gas in the Netherlands. Abstract FORCE Seminar Stavanger 8-9 April 2015. 3 p.
22. *Brown H. E., Hobrook W. S., Hornbach M. J., Nealon J.* Slide structure and role of gas hydrate at the northern boundary of the Storegga Slide, offshore Norway. Marine Geology, 2006, vol. 229, iss. 3-4, pp. 179—186.
23. *Clark P. U., Mix A. C.* Ice sheets and sea level of the Last Glacial Maximum. Quaternary Science Reviews, 2002, vol. 21, no. 1-3, pp. 1—7.
24. *Collett T. S.* Natural Gas Hydrates of the Prudhoe Bay and Kuparuk River area, North Slope Alaska. AAPG Bulletin 77, 1993, May, no. 5, pp. 793—812.
25. *Dallimore S., Collett T., Uchida T.* Scientific Results from JAPEX/JNOC/GSC Mallik 2L-38 Gas Hydrate research Well, Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada. Geological Survey of Canada. Bulletin 544, 1999, p. 403.
26. *Folder P.* Gas Hydrates: Resource and Hazard. CRS Report for Congress, 2011, Jan. 24, 7 p.
27. *Judd A., Hovland M.* Seabed Fluid Flow. The Impact on Geology, Biology, and the Marine Environment. Cambridge, 2007, 475 p.
28. *Kaul N., Foncher Y. P., Heesemann M.* Estimating mud expulsion rates from temperature measurements on Haakon Mosby Mud Volcano, SW Barents Sea. Mar. Geol., 2006, vol. 229, pp. 1—14.
29. *Lorenson T. D., Collett T. S.* Gas Hydrate Prospecting Using Well Cuttings and Mud-Gas Geochemistry from 35 Wells, North Slope, Alaska. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2011-5195, 2011, 27 p. Available at: http://pubs.usgs.gov/sir/2011/5195/).
30. *Mienert J.* Methane hydrate and submarine slides. Encyclopedia of Ocean Sciences (Second Edition). [S. l.], Academic Press, 2009, pp. 790—798.
31. *Pape T., Feseker T., Kasten S. et al.* Distribution and abundance of gas hydrates in near-surface deposits of the Håkon Mosby Mud Volcano, SW Barents Sea. Geochemistry Geophysics Geosystems, 2011, vol. 12, no. 9, Sept. 17, 22 p.
32. *Scholl D. W., Creager J. S.* Geologic Synthesis of Leg 19 (DSDP) Results; Far North Pacific, and Aleutian Ridge, and Bering Sea. DSDP, 1973, vol. 19, pp. 897—913.
33. *Sloan E. D.* Offshore hydrate engineering handbook. Center for Hydrate Research, Colorado School of Mines. Golden, Colorado, 1998, 255 p.
34. *Smith S. L., Judge A. S.* Estimates of methane hydrate volumes in the Beaufort-Mackenzie region, Northwest Territories. Current research 1995-B Interior plans and Arctic Canada. GSC, 1995, pp. 81—88.

Информация об авторах

Богоявленский Василий Игоревич, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН, заместитель директора по научной работе, Институт проблем нефти и газа РАН (119333, Россия, Москва, ул. Губкина, 3), заведующий кафедрой геоэкологии, Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина (119991, Россия, Москва, Ленинский просп., 65), e-mail: vib@pgc.su.

Янчевская Алиса Станиславовна, магистрант, Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина (119991, Россия, Москва, Ленинский просп., 65), e-mail: alisa.yanchevskaya@mail.ru.

Богоявленский Игорь Васильевич, научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа РАН (119333, Россия, Москва, ул. Губкина, 3), заведующий лабораторией, Российский государственный университет нефти

и газа (НИУ) имени И. М. Губкина (119991, Россия, Москва, Ленинский просп., 65), e-mail: igorbogoyavlenskiy@gmail.com.

Кишанков Алексей Владимирович, инженер, Институт проблем нефти и газа РАН (119333, Россия, Москва, ул. Губкина, 3), магистрант, Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина (119991, Россия, Москва, Ленинский просп., 65), e-mail: alexey137k@yandex.ru.

Библиографическое описание данной статьи

Богоявленский В. И., Янчевская А. С., Богоявленский И. В., Кишанков А. В. Газовые гидраты на акваториях Циркумарктического региона // Арктика: экология и экономика. — 2018. — № 3 (31). — С. 42—55. — DOI: 10.25283/2223-4594-2018-3-42-55.

GAS HYDRATES IN THE CIRCUM-ARCTIC REGION AQUATORIES

Bogoyavlensky V. I.

Oil and Gas Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University) (Moscow, Russian Federation)

Yanchevskaya A. S.

Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University) (Moscow, Russian Federation)

Bogoyavlensky I. V., Kishankov A. V.

Oil and Gas Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University) (Moscow, Russian Federation)

Abstract

Geo-information system “Arctic and World Ocean” (GIS AWO), consisting of 1153 objects (zones and separate areas) of gas hydrates distribution, has been created is constantly developing. On the base of seismic data analysis, the BSR (Bottom Simulating Reflectors) were revealed that correspond to the bottom piece of potential hydrate-saturated shallow deposits, including for the first time on the continental slope of the Laptev Sea and in the TINRO Trench within the Sea of Okhotsk. For the Circum-Arctic Region the temperatures of the water column near the bottom were studied, zones with favorable thermobaric conditions for formation and conservation of gas hydrates were identified, and a cartographic scheme of their probable distribution was constructed. The necessity of conducting complex studies of gas hydrate resources and natural and man-caused hazards in the structure of sedimentary deposits of the land and water areas of the Arctic and the World Ocean was justified.

Keywords: *the Arctic, the World Ocean, the Arctic Ocean, thermobaric conditions, gas hydrates, methane hydrates, BSR (Bottom Simulating Reflector), Shtokman Field.*

The study was carried out with the support of RAS fundamental research program “Conducting complex geological and geophysical research with the purposes of forecast, safe and efficient development of petroleum resources of the Arctic and Subarctic zones of the Earth”.

Information about the authors

Bogoyavlensky Vasily Igorevich, Corresponding member of RAS, Doctor of Technical Science, Professor, Deputy Director for Science, Oil and Gas Research Institute of the RAS (3, Gubkina st., Moscow, Russia, 119333), Head of the Geoecology Department, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University) (65, Leninsky Prosp., Moscow, Russia, 119991), e-mail: vib@pgc.su.

Yanchevskaya Alisa Stanislavovna, Master student, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University) (65, Leninsky Prosp., Moscow, Russia, 119991), e-mail: alisa.yanchevskaya@mail.ru.

Bogoyavlensky Igor Vasilyevich, Researcher, Oil and Gas Research Institute of the RAS (3, Gubkina st., Moscow, 119333, Russia), Head of Laboratory, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University) (65, Leninsky Prosp., Moscow, Russia, 119991), e-mail: igorbogoyavlenskiy@gmail.com.

Kishankov Aleksei Vladimirovich, engineer, Oil and Gas Research Institute of the RAS (3, Gubkina st., Moscow, 119333, Russia), Master student, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University) (65, Leninsky Prosp., Moscow, Russia, 119991), e-mail: alexey137k@yandex.ru.

Bibliographic description

Bogoyavlensky V. I., Yanchevskaya A. S., Bogoyavlensky I. V., Kishankov A. V. Gas hydrates in the Circum-Arctic Region aquatories. Arctic: ecology and economy, 2018, no. 3 (31), pp. 42—55. DOI: 10.25283/2223-4594-2018-3-42-55. (In Russian).

© Bogoyavlensky V. I., Yanchevskaya A. S., Bogoyavlensky I. V., Kishankov A. V., 2018