

ОПАСНЫЕ ГАЗОНАСЫЩЕННЫЕ ОБЪЕКТЫ НА АКВАТОРИЯХ МИРОВОГО ОКЕАНА: ВОСТОЧНО-СИБИРСКОЕ МОРЕ

В. И. Богоявленский, А. В. Кишанков

ФГБУН Институт проблем нефти и газа РАН (Москва, Российская Федерация)

А. Г. Казанин, Г. А. Казанин

АО «Морская арктическая геологоразведочная экспедиция» (Мурманск, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 10 марта 2022 г.

Впервые выполнена интерпретация верхней части временных разрезов сейсморазведки методом общей глубинной точки (МОГТ) в северо-западной части Восточно-Сибирского моря (ВСМ) по 44 сеймопрофилям АО «Морская арктическая геологоразведочная экспедиция» («МАГЭ») в объеме 8200 км. Обнаружено 129 аномальных объектов в придонных отложениях, потенциально связанных с залежами газа и каналами его субвертикальной миграции. При этом среднее расстояние между этими объектами вдоль профилей составило 63,6 км (в 5,2–6,2 раза реже, чем в морях Чукотском, Лаптевых и Беринговом). Установлено, что ВСМ характеризуется существенно меньшим количеством каналов миграции газа – активных разломов, достигающих до придонных отложений, по сравнению с перечисленными выше морями. Это согласуется с меньшей неотектонической активностью ВСМ и отсутствием значимых сейсмических событий. В районе исследований выявлено большое количество углублений в рельефе дна, вероятно, связанных с бороздами ледового выпахивания во времена трансгрессий-регрессий моря и на современном этапе. Также установлены существенные погрешности данных базы батиметрии GEBCO.

Ключевые слова: Восточно-Сибирское море, сейсморазведка МОГТ, временные разрезы, верхняя часть разреза, залежи газа, газовые карманы, газовые гидраты, ледовое выпахивание (ледовая экзарация), пflugмарки.

Введение

В последнее десятилетие вопросы дегазации Земли в морях российской Арктики вызвали внимание не только российских ученых, но и представителей многих других стран. При этом основной интерес сосредоточен на изучении районов активной эмиссии парниковых газов со дна огромного преимущественно мелководного шельфа Восточной Сибири и Дальнего Востока (моря Лаптевых, Восточно-Сибирское, Чукотское и Охотское) [1–15].

Авторы настоящей работы выполнили ряд исследований, направленных на изучение газоносности верхней части разреза (ВЧР — глубины от дна в несколько сотен метров) на различных акваториях Мирового океана, включая моря Лаптевых, Чукотское, Берингово, Охотское, Каспийское и др. [16–20].

Большая часть этих работ основана на анализе архивных материалов сейсморазведки методом общей глубинной точки (МОГТ). При этом в верхних частях временных разрезов МОГТ выявлялись потенциальные залежи газа в свободном и/или гидратном состоянии, анализировались глубины их распространения и латеральные размеры.

В указанных работах достаточно детально охарактеризованы актуальность и значимость проводимых нами исследований газоносности ВЧР, позволяющих: уточнить структурные построения за счет коррекции статических и кинематических искажений, выявить зоны миграции и аккумуляции углеводородов ВЧР, проанализировать распространение многолетнемерзлых пород и их влияние на газонасыщение ВЧР, выполнить картирование потенциально опасных газонасыщенных объектов и др. Добавим, что высокая значимость проводимых работ подтверждается результатами исследований

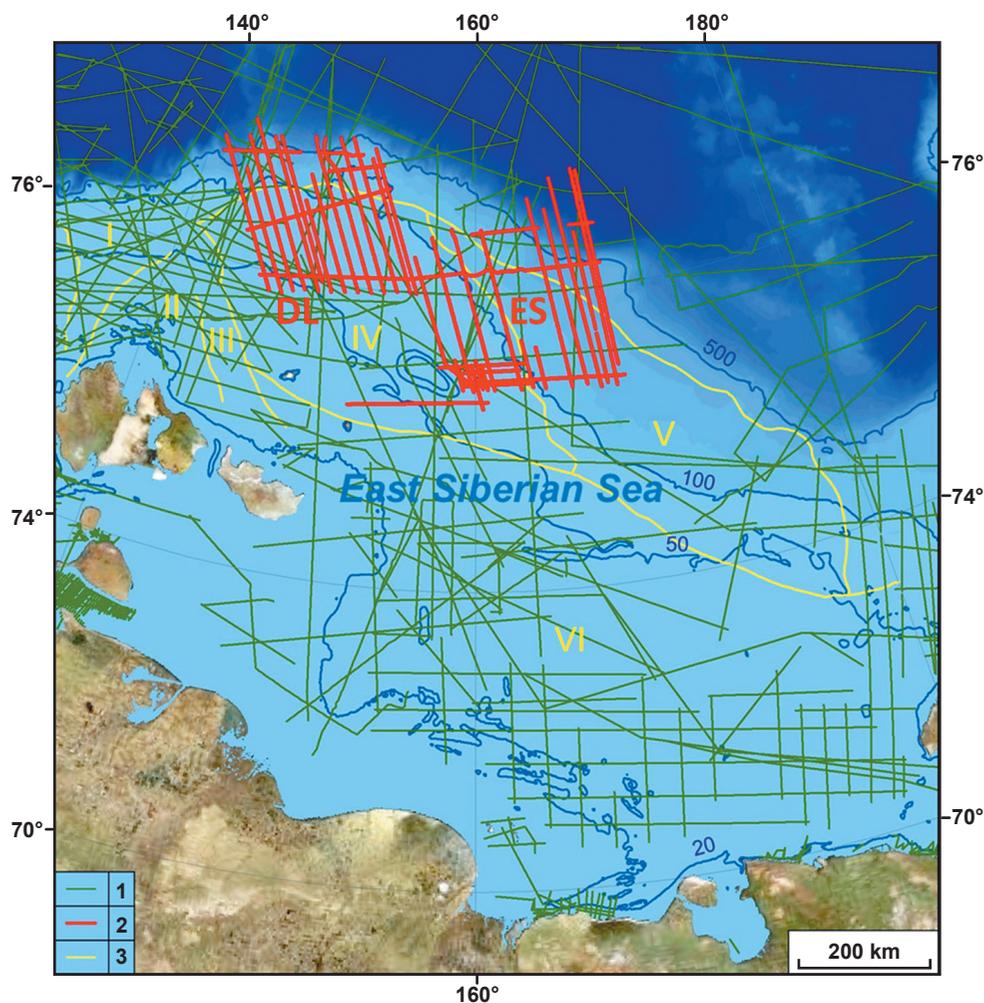


Рис. 1. Схема изученности Восточно-Сибирского моря сейсморазведкой МОГТ. Обозначения: 1 и 2 – сейсмпрофили МОГТ, в том числе в районах Де-Лонга (DL) и Восточно-Сибирском (ES) (2); 3 – границы геологических структур (I – Анисинский рифт, II – Котельное поднятие, III – Новосибирский рифт, IV – поднятие Де-Лонга, V – бассейн Вилькицкого, VI – Новосибирско-Чукотский складчатый пояс (по данным [37])). Основа рисунка – батиметрия GEBCO 2020 и космоснимок Bing
 Fig. 1. Study scheme of the East Siberian Sea by CDP seismic survey. Legend: 1 and 2 – CDP seismic lines, including those in the De Long (DL) and East Siberian (ES) regions (2); 3 – boundaries of geological structures (I – Anisinsky Rift, II – Kotelny Uplift, III – New Siberian Rift; IV – De Long Uplift, V – Vilkitsky Basin, VI – New Siberia – Chukchi Fold Belt (according to [37])). GEBCO 2020 bathymetry and Bing satellite image

нового явления — мощных выбросов и взрывов газа с формированием гигантских кратеров в Арктике на суше и дне термокарстовых озер [21—27], а также обнаружением подобных кратеров на дне арктических акваторий [28].

Основная цель данной работы заключается в развитии исследований газонасыщенности ВЧР и неоднородностей в рельефе дна по временным разрезам МОГТ применительно к северо-западной части шельфа и континентального склона Восточно-Сибирского моря.

Краткий геолого-географический очерк

Восточно-Сибирское море является окраинным морем Северного Ледовитого океана, прилегающим к побережью Восточной Сибири. На западе оно граничит с морем Лаптевых по Новосибирским остро-

вам, на востоке — с Чукотским морем по меридиану 180°, проходящему через остров Врангеля, на юге омывает берега Сибири, на севере переходит в глубоководную котловину Подводников (рис. 1) [29; 30]. Море по большей части характеризуется небольшими глубинами — до 50 м, при этом его западная часть мельководнее восточной. Наибольшая глубина на континентальном склоне составляет 915 м. Большую часть года (9—10 месяцев) акватория покрыта льдом.

Среди акваторий Арктики Восточно-Сибирское море характеризуется наименьшей геолого-геофизической изученностью (см. рис. 1): низкой плотностью сейсморазведки, проведенной в 1976—2018 гг. компаниями МАГЭ, ДМНГ, СМНГ, ПМГРЭ, BGR, TGS, ION по государственным заказам и контрактам недропользователей, — около 0,06 км/км²

и отсутствием глубоких скважин [31—34]. При этом суммарные локализованные ресурсы по состоянию на 2019 г. составили около 150 млн т нефтяного эквивалента [32].

В 2007 г. Морская арктическая геологоразведочная экспедиция (МАГЭ) отработала профиль «Арктика-2007» и провела комплексные морские геофизические исследования хребта Ломоносова и зоны его сочленения со структурами поднятий Котельное Новосибирского архипелага и Де-Лонга. Объем работ МОГТ 2D с надводной гравиметрией и дифференциальной магнитометрией по линии регионального профиля А7 составил 820 км. В 2011—2012 гг. МАГЭ провела комплексные геофизические работы в северной части шельфа, переходящей в континентальный склон. В 2014 г. в рамках проекта «Арктика-2014» МАГЭ выполнила сейсмические работы МОГТ в районе котловин Нансена и Амундсена в Евразийском бассейне, в котловине Подводников, котловине Макарова, на хребте Ломоносова и на окраине морей Лаптевых и Восточно-Сибирского. В 2016 г. была исследована континентальная окраина Восточно-Сибирского моря.

Геологическая информация базируется на данных исследований берегового обрамления и островов [35], а также на результатах бурения в 2004 г. скважин в ходе Арктической буровой экспедиции IODP-302-ACEX (Integrated Ocean Drilling Program — 302 — Arctic Coring Expedition) в приполюсной части хребта Ломоносова [36].

В тектоническом плане акватория Восточно-Сибирского моря разделяется на две различные по строению зоны: в северной части — поднятие Де-Лонга (блок платформы с протерозойским фундаментом, не подвергшийся воздействию мезозойской складчатости), в южной части — Новосибирско-Чукотский складчатый пояс, образовавшийся при мезозойской складчатости [37]. В первой зоне осадочный чехол начинается с палеозоя (предположительно девон), во второй — с раннего мела (апт-альб).

В территориальном плане исследования в настоящей работе приурочены к двум районам исследований МАГЭ — Восточно-Сибирскому и Де-Лонга (ES и DL на рис. 1). Полигоны находятся в северо-западной части шельфа в месте его перехода в котловину Подводников Американо-Сибирского бассейна. В тектоническом плане этот район охватывает поднятие Де-Лонга и прогиб Вилькицкого. Отличительная черта строения поднятия Де-Лонга — наличие базальтовых комплексов апт-альбского возраста [37—39]. На острове Беннетта обнаружены два лавовых потока, подтверждающих его вулканическое происхождение [40].

По данным МАГЭ, на поднятии Де-Лонга кроме кристаллического фундамента также выделяется акустический или промежуточный структурный этаж. Кровля акустического фундамента является диахронным несогласием апт-альбского возраста, перекрывающим породы с возрастом от девона до

нижнего мела. Однако в промежуточном структурном этаже (домеловые отложения) также прослеживаются отражающие горизонты, которые могут соответствовать аналогу элсмирского комплекса, выделяемого на Северной Аляске [37]. По данным МАГЭ поднятие Де-Лонга и бассейн Вилькицкого имеют единый акустический фундамент, перекрываемый отложениями мелового-кайнозойского возраста [41].

Частично район исследования на севере охватывает котловину Подводников, где возможны более древние отложения осадочного чехла. В пределах поднятия Де-Лонга акустический фундамент находится близко к морскому дну, при этом основной объем осадочных пород в рассматриваемом регионе приурочен к прогибу Вилькицкого и верхней части континентального склона, ограничивающего на севере поднятие Де-Лонга и прогиб Вилькицкого.

Осадочный чехол (без учета промежуточного этажа), по данным МАГЭ, разделяется на пять сеймо-стратиграфических комплексов — палеозой-мезозойский, палеоцен-эоценовый, олигоцен-раннемиоценовый, среднемиоцен-позднемиоценовый, плиоцен-четвертичный. Нефтегазоматеринские толщи прогнозируются в верхнем мелу — палеоцене и олигоцене — нижнем миоцене [37].

К ВЧР в прогибе Вилькицкого относятся отложения среднемиоцен-четвертичного возраста, однако в местах повышения фундамента могут включаться более древние отложения. В районе поднятия Де-Лонга весь осадочный чехол может быть отнесен к ВЧР, при этом прогнозируется, что он сложен терригенными породами [37]. Основные потенциальные резервуары углеводородов в ВЧР относятся к олигоцен-миоценовым песчаным пластам, а региональными флюидоупорами могут быть глинистые миоцен-четвертичные отложения. Открытая информация о наличии сипов газа в районах DL и ES не обнаружена, однако они выявлены в центральной части Восточно-Сибирского моря.

Методика выделения потенциальных залежей газа в ВЧР

Анализ временных разрезов МОГТ МАГЭ в Восточно-Сибирском море проводился по двум районам — Де-Лонга и Восточно-Сибирскому (DL и ES на рис. 1). Полевые работы в районе DL велись в 2011—2012 гг. с научно-исследовательского судна (НИС) «Геолог Дмитрий Наливкин» по сети сеймопрофилей 20×100 км в объеме 3910 км, а в районе ES в 2016 г. — с НИС «Николай Трубяччинский» по сети 35×125 км — 4290 км [42]. На обоих судах использовались сейсмические косы SerCEL SEAL Sentinel Solid длиной 8100 м (648 каналов с шагом 12,5 м); интервал возбуждения — 37,5 м, минимальная кратность наблюдений — 120, длина записи — 12 с, дискретность — 2 мс. Эти данные являются самыми современными для акватории Восточно-Сибирского моря.

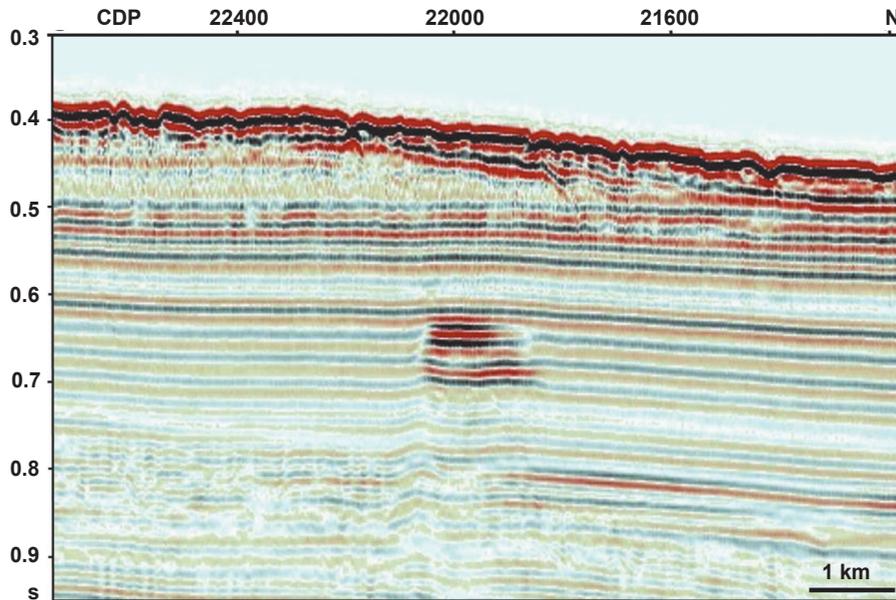


Рис. 2. Фрагмент временного разреза ESS1607 в Восточно-Сибирском море с аномальными объектами в ВЧР
 Fig. 2. Fragment of the ESS1607 seismic section in the East Siberian Sea with anomalous objects in the shallow subsurface

В ходе работы по временным разрезам МОГТ МАГЭ выделялись локальные аномальные объекты сейсмической записи в ВЧР, потенциально связанные с залежами свободного газа — газовыми карманами (англ. gas rockets). Под аномальным объектом в ВЧР здесь и далее мы понимаем обособленную неоднородность на временном разрезе МОГТ, выделяющуюся на общем монотонном фоне суммарных сигналов отраженных волн по амплитудно-частотным характеристикам, а также конфигурации формы осей синфазностей. Аномальный объект может отображать одну или несколько разнесенных по вертикали (времени/глубине) залежей газа. Аномальные объекты определяются по совокупности из шести основных признаков, которые для краткости изложения в тексте указаны в цифровой индексации, принятой в предыдущих работах авторов [3—6]:

- 1 — резкое локальное повышение амплитуды отраженных волн («яркое пятно»);
- 2 — инверсия фаз отражений (смена полярности);
- 3 — прогибание осей синфазности под аномалией, обусловленное уменьшением скорости распространения сейсмических волн в газонасыщенных отложениях;
- 4 — аномальное поглощение высоких частот сейсмических волн;
- 5 — наличие зоны акустической тени — ухудшение прослеживания сейсмических отражающих горизонтов под предполагаемой залежью газа;
- 6 — наличие плоских осей синфазности, соответствующих волнам, отраженным от газовой контактной поверхности.

Интерпретация временных разрезов МОГТ проводилась в программном обеспечении (ПО) Kingdom

(компания IHS, США). Картографические построения выполнены в ПО ArcGIS (компания ESRI, США).

В качестве батиметрической основы для картографических схем использованы данные компилятивной сетки глубин GEBCO 2020 (<https://www.gebco.net>). В процессе работы было установлено, что во многих местах эти данные по сравнению с фактическими расчетами глубин по временным разрезам МОГТ характеризуются существенными погрешностями. Например, по профилям ESS1622 и DL1212 в пределах пологого дна шельфа до глубин 300 м местами погрешность данных GEBCO достигает 20—30%, а в пределах континентального склона местами глубина GEBCO занижена до 25—44%. В связи с этим в нашей работе при определении глубин моря предпочтения были отданы временным разрезам.

Потенциально газонасыщенные аномальные объекты

На рис. 2 показан фрагмент временного разреза ESS1607 по району ES с глубинами дна около 270—320 м с примером ярко выделяющегося небольшого объекта (900—1400 м) многопластового аномального объекта, приуроченного к малоамплитудной антиклинали и состоящего из нескольких потенциальных газовых карманов на временах 0,6—0,7 с (глубины от дна — около 200—300 м). Данный объект характеризуется признаками 1, 2 и 3 — повышенной амплитудой, инвертированным сигналом и прогибанием нижележащих отражающих горизонтов.

Ряд многопластовых крупных (до 2—2,5 км) аномальных объектов в ВЧР выделяется на двух участках А и В временного разреза DL1213 (район DL) на глубине воды около 90 м (рис. 3). Потенциаль-

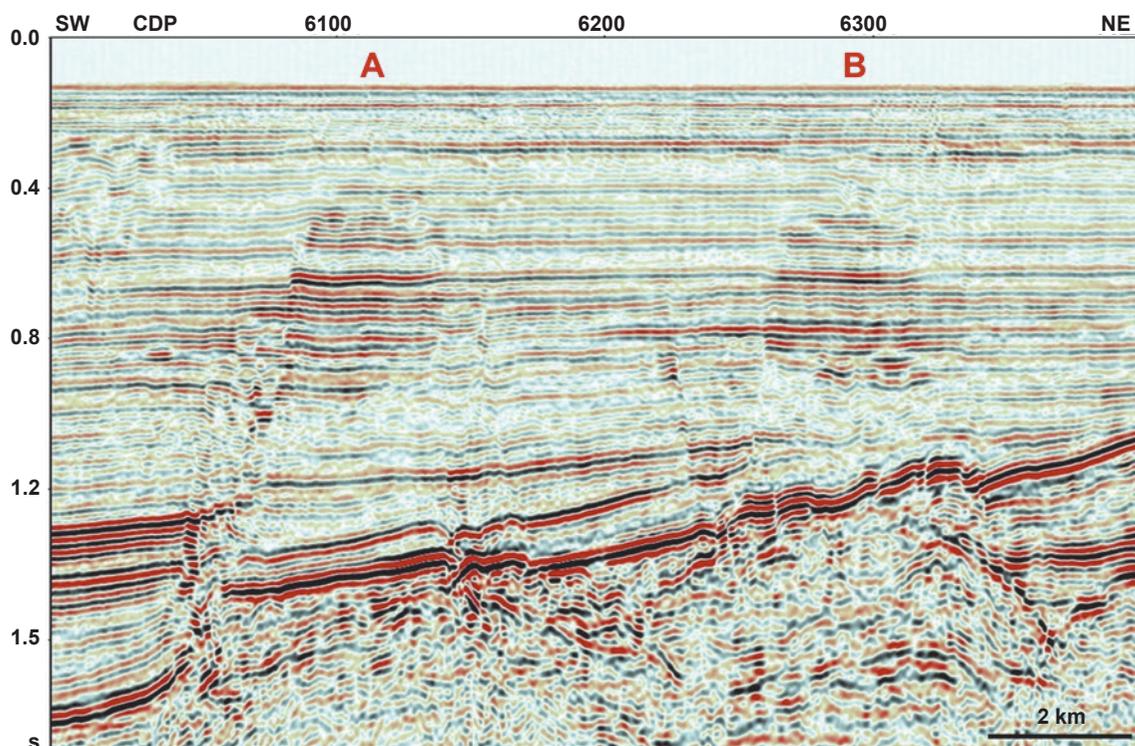


Рис. 3. Фрагмент временного разреза DL1213 в Восточно-Сибирском море с аномальными объектами (А и В)
 Fig. 3. Fragment of the DL1213 seismic section in the East Siberian Sea with anomalous objects (A and B)

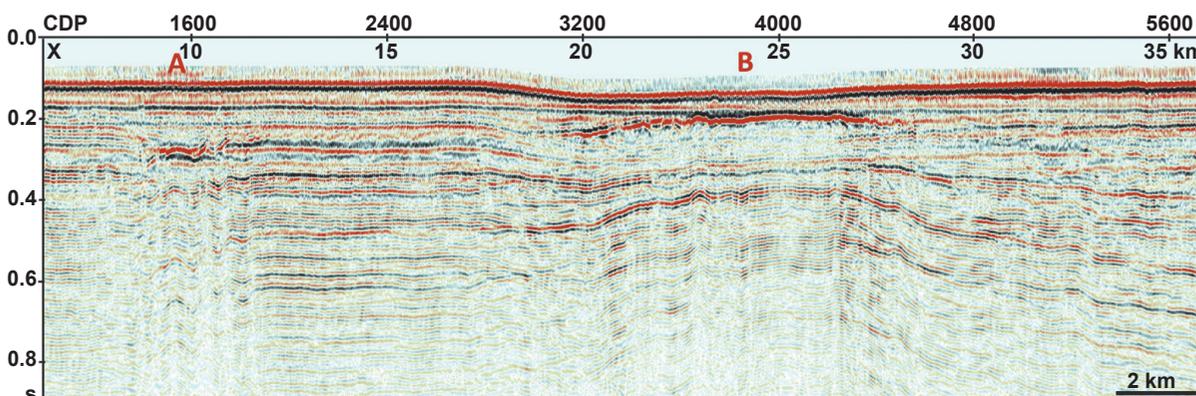


Рис. 4. Фрагмент временного разреза ESS1624 в Восточно-Сибирском море с двумя аномальными объектами (А и В)
 Fig. 4. Fragment of the ESS1624 seismic section in the East Siberian Sea with two anomalous objects (A and B)

ные тектонически экранированные залежи газа на временах около 0,45—0,95 с (глубины от дна — 300—800 м) приурочены к разрывным нарушениям, идущим от акустического фундамента, имеющего блоковое строение. Наблюдаемые аномальные объекты характеризуются признаками 1, 3, 4 и 5 — повышенными амплитудами, пониженными частотами, прогибаниями отражающих горизонтов и незначительно выраженными зонами тени. Эти объекты расположены близко по глубине к консолидированным породам акустического фундамента, что указывает на возможность существования в нем (или прямо над ним) залежей углеводородов.

На фрагменте временного разреза ESS1624 (рис. 4) с глубинами дна около 70—90 м выделяют два аномальных объекта на временах около 0,3 с (А) и 0,2 с (В). Первый из них имеет длину около 2 км, расположен на глубине около 200 м от дна и характеризуется признаками 1, 2, 3, 4 и 5 — повышенными амплитудами, инверсией сигнала, пониженными частотами, прогибаниями отражающих горизонтов и наличием зоны тени. Второй объект характеризуется признаками 1, 2, 4 и 5, расположен на глубине около 100 м от дна над крупным антиклинальным поднятием, имеет унаследованную форму и протяженность около 7,5 км.

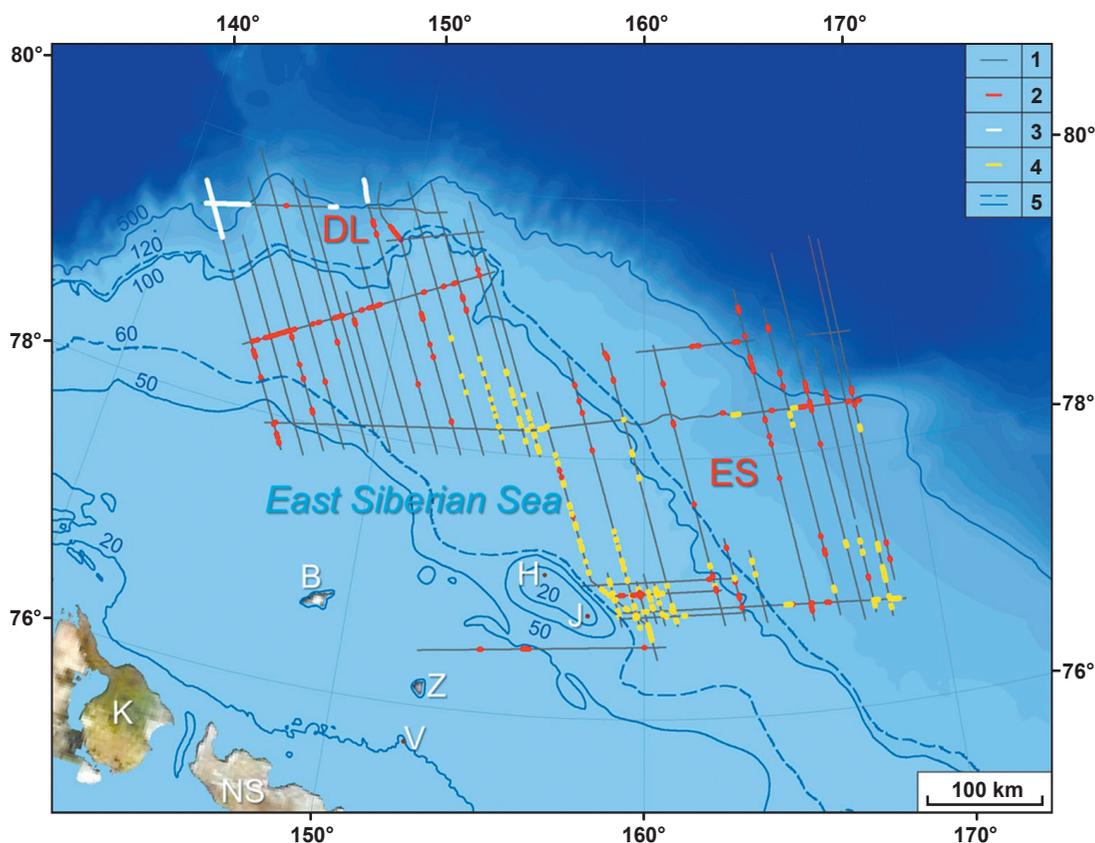


Рис. 5. Положение аномальных объектов в ВЧР временных разрезов в районах работ DL и ES АО «МАГЭ» в Восточно-Сибирском море. Обозначения: 1 – сейсмопрофили; 2 и 3 – аномальные объекты, отождествляемые с залежами свободного газа (2) и газовых гидратов (3); 4 – углубления в рельефе дна, предположительно связанные с бороздами ледовой экзарации; 5 – изобаты (м); острова К – Котельный, NS – Новая Сибирь, В – Беннетта, Z – Жохова, H – Генриэтты, J – Жанетты, V – Вилькицкого. Основа рисунка – батиметрия GEBCO 2020 и космоснимок из базы данных Bing

Fig. 5. Location of anomalous objects in the near-surface seismic sections in the DL and ES study areas of JSC “MAGE” in the East Siberian Sea. Legend: 1 – seismic lines; 2 and 3 – anomalous objects associated with free gas accumulations (2) and gas hydrates (3); 4 – depressions in the bottom relief, presumably associated with the furrows of ice gouging; 5 – isobaths (m); islands K – Kotelny, NS – New Siberia, B – Bennett, Z – Zhokhov, H – Henrietta, J – Jeannette, V – Vilkitsky. GEBCO 2020 bathymetry and the Bing satellite image

Всего в ходе исследований в северо-западной части Восточно-Сибирского моря было проанализировано 8200 км сейсмопрофилей по районам Восточно-Сибирскому (4290 км — 52,3%) и Де-Лонга (3910 км — 47,7%). В результате выявлено 129 аномалий, указывающих на потенциальные газонасыщенные объекты (рис. 5), в том числе 74 на участке ES (57,4%) и 55 на участке DL (42,6%).

Для выявленных аномалий по аналогии с работами [3—6; 16] построены гистограммы их распределения по горизонтальным размерам и глубинам верхних границ потенциального газонасыщения, приведенные на рис. 6. Большинство (83,0%) объектов имеет верхние границы газонасыщения на глубинах до 300 м от морского дна, до 100 м от дна — менее трети (31,8%), а средняя глубина составила 203 м. По протяженности большинство аномалий характеризуется размером до 1,5 км (72,1%), при этом более трети (38,8%) имеет размеры менее 500 м. Всего одна залежь (0,8%) имеет размеры более 6,5 км (7,5 км). Средний размер залежей — 1192 м.

Отметим также, что на континентальном склоне Восточно-Сибирского моря в районе Де-Лонга в северных частях трех профилей (DL1101, DL1212 и DL1207) предположительно выявлен сейсмический горизонт BSR (bottom simulating reflector) — псевдодонный отражающий горизонт, отождествляемый с наличием газогидратов (см. рис. 5). Оси синфазности отраженных волн от BSR имеют обратную полярность из-за экранирования нижележащих залежей свободного газа [3; 16; 22; 43]. При этом надежность и однозначность прослеживания BSR значительно ниже, чем в море Лаптевых [3; 6]. Это может быть связано с относительно более низким газонасыщением ВЧР (в свободном и гидратном состояниях), а также с тем, что выделяемый горизонт просто относится к кровле пласта с пониженной скоростью.

Аномальные углубления в рельефе дна

На ряде сейсмопрофилей в районах исследований ES и DL преимущественно в пределах поднятия Де-Лонга на временных разрезах наблюдается множе-

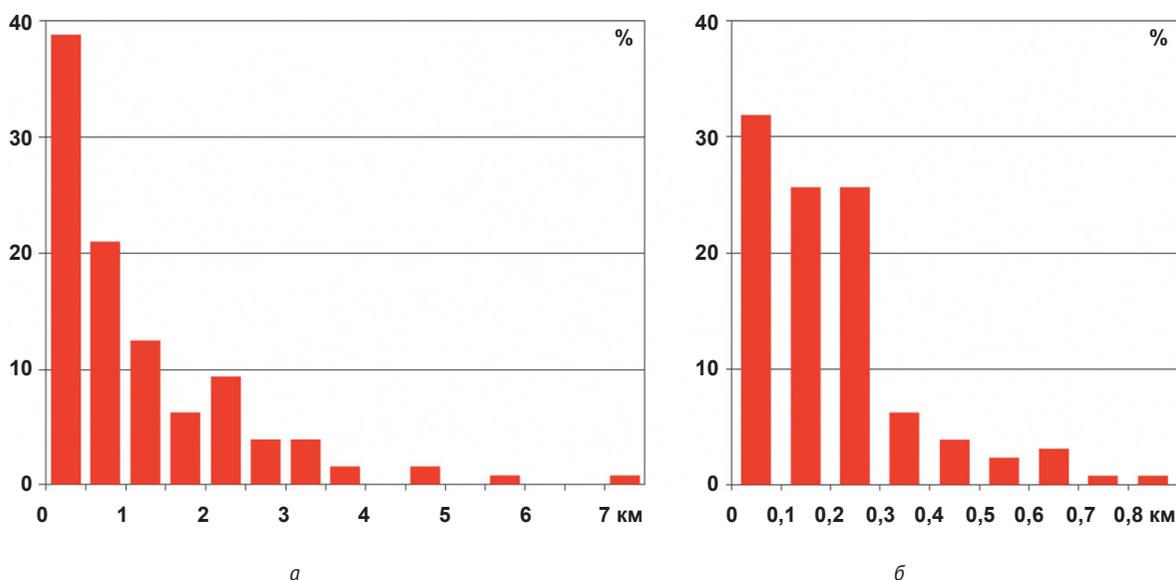


Рис. 6. Распределение предполагаемых газонасыщенных объектов в ВЧР по горизонтальным размерам (а) и глубинам верхних границ газонасыщения (б)

Fig. 6. Distribution of assumed gas-saturated objects in the shallow subsurface by horizontal dimensions (a) and depths of the upper limits of gas saturation (b)

ство локальных углублений в рельефе дна, протяженность большей части которых не превышает 2 км (см. рис. 5). По району DL они расположены на глубинах от 78 до 92 м, а по району ES — на глубинах от 61 до 390 м. Здесь необходимо отметить, что геофизические работы проводились в основном на глубинах свыше 50 м, поэтому распространение локальных углублений на мелководье до 50 м не исследовано.

На рис. 7 приведен фрагмент временного разреза по профилю ESS1628, на котором на глубине дна около 80 м выделяются пять углублений (А, В, С, D и E) в его рельефе до 5—10 м с горизонтальными размерами от 900 до 1600 м. По виду многие из них напоминают покмарки (англ. rockmarks), однако по пересечению одним профилем делать такой вывод некорректно. Почти под всеми этими углублениями не наблюдаются аномальные потенциально газонасыщенные объекты и тектонические нарушения — каналы притока газа, характерные для покмарок. Исключение составляют наблюдаемые под ними небольшие прогибы осей синфазности отраженных волн, образование которых может быть объяснено временными задержками их регистрации, возникающими за счет локального снижения средних скоростей. Наиболее вероятно, что углубления в рельефе дна связаны с ледовой экзарацией (от лат. exaratio — выпаживание) — как современной, так и во времена трансгрессий-регрессий моря. Отметим, что в эпоху последнего оледенения уровень моря был примерно на 120 м ниже современного [9; 44].

Обсуждение результатов

Ледовая экзарация

Ледово-экзарационное обоснование природы углублений в рельефе дна базируется на том, что борозды выпаживания — плугмарки (англ. plough

marks) могут быть образованы киями айсбергов, формирующихся на близлежащих островах Де-Лонга и на их крупном источнике на архипелаге Северная Земля [45]. В частности, на острове Беннетта (размер 12×29 км) известен ледник Зееберга на горе Толля (координаты центра 76,6874° N, 148,9595° E), размеры которого в последние десятилетия значительно уменьшились (до 7×10 км). Самая высокая точка на острове (426 м) находится на леднике горы Де-Лонга. В районе острова Де-Лонга обнаружена обширная зона айсбергового воздействия [45].

Кроме того, плугмарки могут быть образованы дрейфующими частями торосов и стамух, известная мощность которых достигает 50 м [45]. Согласно [46], под торосами понимаются «холмообразные нагромождения взломанного льда, образовавшиеся в результате сжатия», а под стамухами — «торосистые ледяные образования, севшие на мель». Обычно плугмарки имеют V-образную или U-образную форму поперечного сечения, а по краям борозд наблюдаются валы вывернутого грунта (отвалы) [47; 48].

Среди акваторий Северного Ледовитого океана Восточно-Сибирское море характеризуется самым широким распространением стамух — около 70% общего числа стамух Арктики [49]. При этом, по данным дистанционного зондирования Земли из космоса, стамухи в основном образуются в относительно мелководных южной и западной частях моря, преимущественно на глубинах до 25—40 м [49]. В регионе наших исследований зоны существования стамух зафиксированы не только вблизи побережий (например, севернее острова Котельный), но и на значительных удалениях, в частности в 50 км восточнее острова Беннетта, в 50—100 км северо-восточнее острова Новая Сибирь (особенно крупная зона) и в других районах. По данным исследований [45;

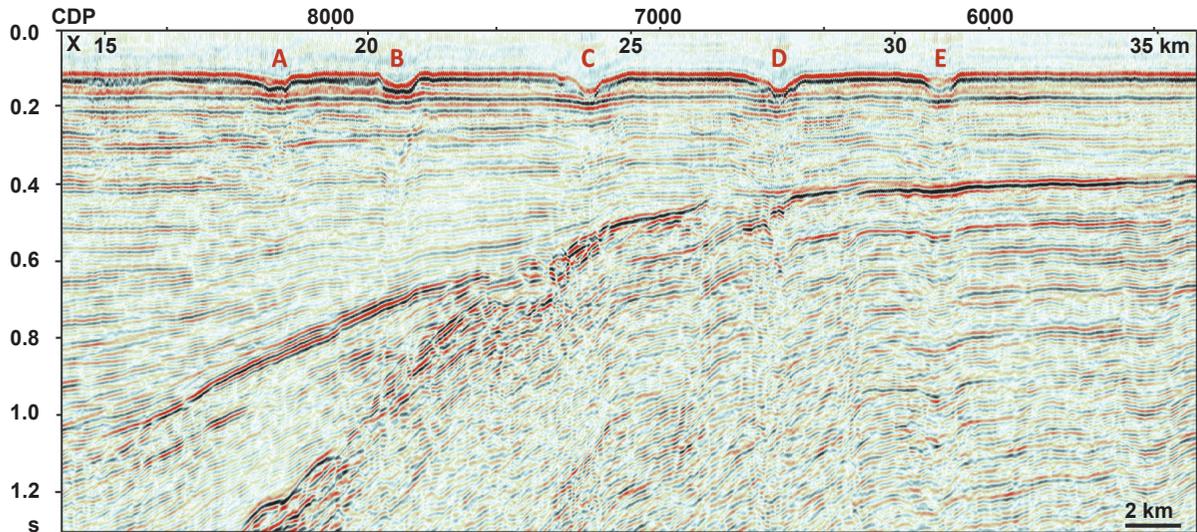


Рис. 7. Неоднородности (углубления) в рельефе дна фрагмента временного разреза профиля ESS1628 в Восточно-Сибирском море

Fig. 7. Local heterogeneities (depressions) in the bottom relief of a fragment of the seismic section of the ESS1628 line in the East Siberian Sea

50] известно, что севернее Новосибирских островов находится зона дрейфующих льдов с интенсивной экзарацией дна.

Отметим, что в море Лаптевых борозды выпахивания зафиксированы не только на мелководье (до 40—50 м), но и на глубинах до 70,5—83,6 м и даже до 90 м (глубже исследования не проводились) [48]. При этом во всех приведенных примерах по краям борозд наблюдаются валы вывернутого грунта (англ. side berm). В абсолютном большинстве углублений, выявленных в Восточно-Сибирском море по материалам сейсморазведки (A, C, D и E на рис. 7), валы не наблюдаются. Это можно объяснить двумя основными причинами. Наиболее вероятно, что подводные течения смыли вывернутый грунт в углубления. Это подтверждает предположение о палеоэкзарации, хотя на краях отдельных углублений они все же видны (B на рис. 7). При этом мы предполагаем, что грунт валов, осевший на дно углублений, полностью их не заполнил за счет уплотнения придонных отложений в процессе экзарации вертикальным давлением мигрирующих ледовых массивов. Второй (менее значимой) причиной отсутствия на временных разрезах МОГТ на краях углублений валов является то, что в процессе суммирования сейсмотрасс происходит небольшое сглаживание сейсмических горизонтов, и небольшие объекты (менее половины длины волны) практически неразличимы.

В ряде случаев в других регионах Мирового океана пугмарки встречаются на глубинах свыше 300 м, а их протяженности могут достигать многих километров в длину. На Штокмановской площади в Баренцевом море зафиксированы борозды выпахивания на глубинах до 360 м [22; 47], в Северной Атлантике — до 500 м [51], а в Северном Ледовитом океане — даже на глубинах около 1000 м [52]. Это свидетельствует о возможном существенном изме-

нении уровня моря в недалеком прошлом или о гигантских размерах айсбергов.

В статистическом плане в двух районах Восточно-Сибирского моря (ES и DL) всего выделено 123 объекта углублений в рельефе дна, отождествляемых со следами ледовой экзарации, включая 95 в ES (77,2%) и 28 в DL (22,8%). Большинство из них имеет протяженность до 2 км (82,9%). Также имеется 21 объект (17,1%) протяженностью от 2 до 5 км — все они расположены в районе ES. Широкий диапазон латеральных размеров углублений, определенных на временных разрезах, объясняется главным образом разными углами пересечения пугмарок сейсмопрофилями.

С учетом новых данных по канадскому сектору моря Бофорта [53] мы не исключаем, что генезис изучаемых углублений также может быть связан с плавлением (оттаиванием) сильно льдонасыщенных участков дна, в том числе пингоподобных объектов (PLFs).

Изучение распространения и корректное картирование пугмарок и покмарок по данным сейсморазведки возможны только при высокой плотности сейсмопрофилей, достигаемой при работах 3D. При этом очевидно, что работы 3D ставятся только на площадях, высокоперспективных в нефтегазоносном отношении, и в исследуемом районе данных 3D нет. Поэтому указанная задача на больших площадях может быть решена только с применением детального изучения рельефа дна, достигаемого с помощью комплексов гидрографических исследований, включая многолучевое эхолотирование [48; 53].

Особенности распространения потенциально газонасыщенных объектов

В северо-западной части Восточно-Сибирского моря выявлено относительно равномерное распре-

деление потенциальных газонасыщенных объектов по глубинам верхних границ газонасыщения в первых трех стометровых интервалах от дна до 300 м: 31,8%, 25,6% и 25,6%. Эти данные существенно отличаются от подобных распределений по трем другим северным акваториям: в море Лаптевых — 66,5%, 16,1% и 4,8%, в Чукотском море — 57,5%, 17,4% и 6,5%, в Беринговом море (Анадырский и Наваринский бассейны) — 50,6%, 21,1% и 14,5% [3—6]. В указанных трех акваториях большая часть аномальных объектов (от 50,6% до 66,5%) доходит практически до дна (до 100 м), что может быть объяснено тектоническими движениями на поздних стадиях осадконакопления, при которых образовались разломы — потенциальные каналы миграции газа, доходящие близко к морскому дну.

При анализе временных разрезов по Восточно-Сибирскому морю в районах DL и ES было отмечено относительно малое количество разломов, доходящих до морского дна. Это объясняется имеющимися представлениями об истории геологического развития региона, согласно которым здесь отсутствовали активные тектонические движения на поздних стадиях осадконакопления [37]. Прослеживаемые разломы, вероятно, образовались в эоцене — среднем миоцене в обстановке трансенсии, большинство из них идут от акустического фундамента и затухают в толще осадочного чехла.

Анализ распространения сейсмических аномалий в ВЧР, указывающих на потенциальные газонасыщенные объекты, свидетельствует о возможности миграции газа из акустического фундамента. Как указано выше, эти породы могут служить аналогом отложений элсмирского комплекса, который является продуктивным на Северном склоне Аляски [54]. Однако также предполагается наличие органического вещества, генерирующего газ, в верхнемеловых — миоценовых отложениях осадочного чехла [37].

Завершая обсуждение результатов, мы не можем не коснуться уникального явления, обнаруженного американскими учеными в результате дешифрирования космоснимков в инфракрасном диапазоне со спутника NOAA-7 в Восточно-Сибирском море [55—58]. 18 февраля 1983 г. был выявлен сначала один, а затем несколько гигантских (сотни километров в длину и 10—25 км в ширину) шлейфов (плюмов) газа, распространявшихся из прибрежной акватории острова Беннетта и имевших температуру ниже -40°C [55]. Высказывались различные гипотезы об антропогенном и природном происхождении этих шлейфов, в том числе о секретных испытаниях СССР, вулканическая, углекислотная и метаногидратная гипотезы, при этом последняя имела наиболее веские обоснования [55—58].

В апреле 1992 г. в результате совместной экспедиции NOAA и РАН на самолете АН-26 Т. Хансен (Tony Hansen, Lawrence Berkley Laboratory) было доказано отсутствие в плюме аномального содержания метана, а на поверхности обнаруженной гигантской полыньи сипы газа не были выявлены [59—61]. Уди-

вительно, что столь значимое открытие было опубликовано лишь в двух указанных нами небольших редакционных заметках и аннотации доклада, на которые практически нет ссылок, в том числе и в работе [58]. Согласно объяснению одного из участников данных исследований R. C. Schnell, открытие «не получило широкой огласки по политическим причинам» (<https://gml.noaa.gov/staff/Russell.C.Schnell/>). В итоге отметим, что феномен образования плюма может быть отнесен к комплексным гидрометеорологическим явлениям (ветровое испарение воды из полыньи, поднятие и переохлаждение пара, микрокристаллизация и шлейфовое распространение в атмосфере) [62].

Заключение

В результате анализа временных разрезов МОГТ АО «МАГЭ» по 44 сейсмопрофилям в северо-западной части Восточно-Сибирского моря в суммарном объеме 8200 км выявлено 129 аномальных объектов в ВЧР, потенциально связанных с газовыми залежами. Средняя плотность их распространения (расстояние между объектами) составила 63,6 км, что в 5,2—6,2 раза реже, чем в морях Чукотском, Лаптевых и Беринговом (расстояния соответственно 12,2, 11,4 и 10,3 км).

Придонные отложения до глубин 100 м в северо-западной части Восточно-Сибирского моря характеризуются пониженным долевым газонасыщением (31,8% аномальных объектов) по сравнению с морями Беринговым, Чукотским и Лаптевых (50,6—66,5%).

Перечисленные показатели обусловлены тем, что Восточно-Сибирское море характеризуется существенно меньшим количеством каналов миграции газа — активных разломов, доходящих до придонных отложений, по сравнению с морями Лаптевых, Чукотским и Беринговым. Данный факт подтверждается характером проанализированных нами временных разрезов и согласуется с меньшей неотектонической активностью Восточно-Сибирского моря и отсутствием значимых сейсмических событий.

В районах исследований выявлено большое количество углублений в рельефе дна (123), основным объяснением существования которых является ледовая экзарация во времена трансгрессий-регрессий моря и на современном этапе. Однозначное объяснение может быть дано после специальных гидрографических исследований дна.

В процессе комплексного анализа на отдельных участках шельфа Восточно-Сибирского моря установлены существенные (до 20—30%) отличия информации о глубинах моря по данным временных разрезов МОГТ от базы батиметрических данных GEBCO 2020. Это свидетельствует о необходимости ее дальнейшего совершенствования на основе новых данных.

Полученные результаты подтверждают возможность извлечения из архивных материалов сейсмо-разведки МОГТ важной дополнительной геолого-

геофизической информации об опасных неоднородностях в строении ВЧР, а также позволяют уточнить базу батиметрических данных. Последнее особенно актуально в районах активного судоходства, в первую очередь по Северному морскому пути.

Работа выполнена по государственному заданию ИПНГ РАН по теме «Повышение эффективности и экологической безопасности освоения нефтегазовых ресурсов арктической и субарктической зон Земли в условиях меняющегося климата» (№ 122022800264-9).

Литература/References

1. Анисимов О. А., Забойкина Ю. Г., Кокарев В. А., Юрганов Л. Н. Возможные причины эмиссии метана на шельфе морей Восточной Арктики // Лед и Снег. — 2014. — № 54 (2). — С. 69—81.
2. Anisimov O. A., Zaboikina Yu. G., Kokorev V. A., Yurganov L. N. Possible causes of methane release from the East Arctic seas shelf. *Led i Sneg*, 2015, no. 54 (2), pp. 69—81. (In Russian).
3. Baranov B., Galkin S., Vedinin A., Dozorova K., Gebruk A., Flint M. Methane seeps on the outer shelf of the Laptev Sea: characteristic features, structural control, and benthic fauna. *Geo-Marine Letters*, 2020, vol. 40, pp. 541—557.
4. 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—28.
5. Bogoyavlensky V. I., Kazanin G. S., Kishankov A. V. Dangerous gas-saturated objects in the World Ocean: the Laptev Sea. *Burenie i neft'*, 2018, no. 5, pp. 20—28. (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.
7. Bogoyavlensky V. I., Kishankov A. V. Dangerous gas-saturated objects in the World Ocean: the Bering Sea. *Burenie i neft'*, 2018, no. 9, pp. 4—12. (In Russian).
8. Богоявленский В. И., Кишанков А. В. Опасные газонасыщенные объекты на акваториях Мирового океана: Чукотское море (Россия и США) // Арктика: экология и экономика. — 2020. — № 2 (38). — С. 45—58.
9. Bogoyavlensky V. I., Kishankov A. V. Dangerous gas-saturated objects in the World Ocean: the Chukchi Sea (Russia and the USA). *Arktika: ekologiya i ekonomika*. [Arctic: Ecology and Economy], 2020, no. 2 (38), pp. 45—58. (In Russian).
10. Богоявленский В. И., Казанин А. Г., Кишанков А. В., Казанин Г. А. Дегазация Земли в Арктике: комплексный анализ факторов мощной эмиссии газа в море Лаптевых // Арктика: экология и экономика. — 2021. — Т. 11. — № 2. — С. 178—194.
11. Bogoyavlensky V. I., Kazanin A. G., Kishankov A. V., Kazanin G. A. Earth degassing in the Arctic: comprehensive analysis of factors of powerful gas emission in the Laptev Sea. *Arktika: ekologiya i ekonomika*. [Arctic: Ecology and Economy], 2021, vol. 11, no. 2, pp. 178—194. (In Russian).
12. Богоявленский В. И., Кишанков А. В., Казанин А. Г. Мерзлота, газогидраты и сипы газа в центральной части моря Лаптевых // Докл. Акад. наук. Науки о Земле. — 2021. — Т. 500, № 1. — С. 83—89. — DOI: 10.31857/S2686739721090048.
13. Bogoyavlensky V. I., Kishakov A. V., Kazanin A. G. Permafrost, Gas Hydrates, and Gas Seeps in the Central Part of the Laptev Sea. *Doklady Earth Sciences*, 2021, vol. 500, no. 1, pp. 766—771.
14. Bogoyavlensky V., Kishankov A., Kazanin A. Central Laptev Zone of Gas Seeps: Comprehensive Analysis of Seismic Data. *EAGE, Conference Proceedings, Geomodel 2021*, Sept. 2021, vol. 2021, pp. 1—6. Available at: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202157116>.
15. Bogoyavlensky V., Kishankov A., Kazanin A., Kazanin G. Distribution of permafrost and gas hydrates in relation to intensive gas emission in the central part of the Laptev Sea (Russian Arctic). *Marine and Petroleum Geology*, 2022, vol. 138, p. 105527.
16. Сергиенко В. И., Лобковский Л. И., Семилетов И. П. и др. Деградация подводной мерзлоты и разрушение гидратов шельфа морей Восточной Арктики как возможная причина «метановой катастрофы»: некоторые результаты комплексных исследований 2011 года // Докл. Акад. наук. — 2012. — Т. 446, № 3. — С. 330—335.
17. Sergienko V. I., Lobkovsky L. I., Semiletov I. P. et al. The degradation of submarine permafrost and the destruction of hydrates on the shelf of east arctic seas as a potential cause of the “Methane Catastrophe”: some results of integrated studies in 2011. *Doklady Earth Sciences*, 2012, vol. 446 (1), pp. 1132—1137.
18. Shakhova N., Semiletov I., Salyuk A., Yusupov V., Kostach D., Gustafsson O. Extensive methane venting to the atmosphere from sediments of the east Siberian Arctic shelf. *Science*, 2010, no. 327, pp. 1246—1250.
19. Шахова Н. Е., Сергиенко В. И., Семилетов И. П. Вклад Восточно-Сибирского шельфа в современный цикл метана // Вестн. Рос. акад. наук. — 2009. — Т. 79, № 6. — С. 507—518.
20. Shakhova N. E., Sergienko V. I., Semiletov I. P. Contribution of the east siberian shelf to modern methane cycle. *Vestn. Ros. akad. nauk*, 2009, vol. 79, no. 6, pp. 507—518. (In Russian).
21. Шакиров Р. Б. Газогеохимические поля окраинных морей Восточной Азии. — М.: ГЕОС, 2018. — 341 с.
22. Shakirov R. B. Gasgeochemical fields of the Eastern Asia marginal seas. — Moscow, GEOS Publ., 2018, 341 p. (In Russian).
23. Steinbach J., Holmstrand H., Shcherbakova K., Kostach D., Brüchert V., Shakhova N. et al. Source apportionment of methane escaping the subsea permafrost system in the outer Eurasian Arctic Shelf. *Proc. Natl. Acad. Sci. Unit. States Am.*, 2021, vol. 118 (10).
24. Юсупов В. И., Салюк А. Н., Карнаух В. Н., Семилетов И. П., Шахова Н. Е. Обнаружение областей пузырьковой разгрузки метана на шельфе моря Лап-

тевых в Восточной Арктике // Докл. Акад. наук. — 2010. — Т. 430, № 6. — С. 820—823.

Yusupov V. I., Salyuk A. N., Karnaukh V. N., Semiletov I. P., Shakhova N. E. Detection of methane ebullition in shelf waters of the Laptev Sea in the Eastern Arctic Region. *Doklady Earth Sciences*, 2010, vol. 430, no. 2, pp. 261—264.

16. 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. Dangerous gas-saturated objects in the world ocean: the Sea of Okhotsk. *Neftyanoye khoz-vo*, 2016, no. 6, pp. 43—47. (In Russian).

17. Bogoyavlensky V., Kishankov A., Yanchevskaya A., Bogoyavlensky I. Forecast of Gas Hydrates Distribution Zones in the Arctic Ocean and Adjacent Offshore Areas. *Geosciences*, 2018, vol. 8, p. 453.

18. Bogoyavlensky V. I., Kishankov A. V., Yanchevskaya A. S., Bogoyavlensky I. V. Gas Hydrates Potential of the Arctic and Caspian Offshore Areas. EAGE, Third International Conference on Geology of the Caspian Sea and Adjacent Areas (Baku, 2019), 2019, pp. 1—5. DOI: 10.3997/2214-4609.201952029.

19. Bogoyavlensky V., Yanchevskaya A., Kishankov A. Forecast of the distribution and thickness of gas hydrate stability zone at the bottom of the Caspian Sea. *Energies* 2021, 2021, vol. 14, 6019.

20. Bogoyavlensky V., Yanchevskaya A., Kishankov A. Forecast of The Distribution and Thickness of Gas Hydrate Stability Zone at The Bottom of The Caspian Sea. *Conference Proceedings, Geomodel.*, Sep. 2021, vol. 2021, pp. 1—6.

21. Bogoyavlensky V., Bogoyavlensky I., Nikonov R., Sizov O., Kishankov A., Kargina T. Seyakha catastrophic gas blowout and explosion from the cryosphere of the Arctic Yamal Peninsula. *Cold Regions Science and Technology*, 2022, vol. 196, 103507. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2022.103507>.

22. Богоявленский В. И. Арктика и Мировой океан: современное состояние, перспективы и проблемы освоения ресурсов углеводородов: Монография // Труды ВЭО России. — 2014. — Т. 182, № 3. — С. 12—175.

Bogoyavlensky V. I. Arctic and the World Ocean: Current State, Perspectives and Challenges of Hydrocarbon Production. *Trudy VEO Russia*, 2014, vol. 182, no. 3, pp. 12—175. (In Russian).

23. Богоявленский В. И. Природные и техногенные угрозы при освоении месторождений горючих ископаемых в криолитосфере Земли // Гор. пром-сть. — 2020. — № 1 (149). — С. 97—118.

Bogoyavlensky V. I. Natural and technogenic threats in fossil fuels production in the Earth cryolithosphere. *Gornaya promyshlennost'*, 2020, pp. 97—118. DOI: 10.30686/1609-9192-2020-1-97-118. (In Russian).

24. Богоявленский В. И. Фундаментальные аспекты генезиса катастрофических выбросов газа и образования гигантских кратеров в Арктике // Арктика: экология и экономика. — 2021. — Т. 11, № 1. — С. 51—66.

25. Богоявленский В. И., Богоявленский И. В., Каргина Т. Н. Катастрофический выброс газа в 2020 г. на полуострове Ямал в Арктике. Результаты комплексного анализа данных аэрокосмического зондирования // Арктика: экология и экономика. — 2021. — Т. 11, № 3. — С. 363—374.

Bogoyavlensky V. I. Fundamental aspects of the catastrophic gas blowout genesis and the formation of giant craters in the Arctic. *Arktika: ekologiya i ekonomika*. [Arctic: Ecology and Economy], 2021, vol. 11, no. 1, pp. 51—66. DOI: 10.25283/2223-4594-2021-1-51-66. (In Russian).

26. Богоявленский В. И., Богоявленский И. В., Каргина Т. Н. Катастрофический выброс газа в 2020 г. на полуострове Ямал в Арктике. Результаты комплексного анализа данных аэрокосмического зондирования // Арктика: экология и экономика. — 2021. — Т. 11, № 3. — С. 363—374.

Bogoyavlensky V. I., Bogoyavlensky I. V., Kargina T. N. Catastrophic gas blowout in 2020 on the Yamal Peninsula in the Arctic. Results of comprehensive analysis of aerospace RS data. *Arktika: ekologiya i ekonomika*. [Arctic: Ecology and Economy], 2021, vol. 11, no. 3, pp. 363—374. DOI: 10.25283/2223-4594-2021-3-362-374. (In Russian).

27. Богоявленский В. И., Богоявленский И. В., Каргина Т. Н., Чувилин Е., Буханов В., Умников А. Новый катастрофический выброс газа и гигантский кратер на полуострове Ямал в Арктике. Результаты экспедиции и обработки данных. *Geosciences* 2021, vol. 11, 71, 20 p. Available at: <https://doi.org/10.3390/geosciences11020071>.

28. Andreassen K., Hubbard A., Winsborrow M., Patton H. et al. Massive blow-out craters formed by hydrate-controlled methane expulsion from the Arctic seafloor. *Science*, 2017, vol. 356, no. 6341, pp. 948—953.

29. Атлас Арктики / Под ред. А. Ф. Трешникова. — М.: Гл. упр. геодезии и картографии при Совете Министров СССР, 1985. — 203 с.

Atlas of the Arctic. A. F. Treshnikov (ed.). Head department of geodesy and cartography of the Ministerial Council of USSR. Moscow, 1985. 203 p. (In Russian).

30. Национальный атлас Арктики. Ред. Н. С. Касимов. М: АО «Роскартография», 2017. — 496 с.

National atlas of the Arctic. Ed. N. S. Kasimov. Moscow, JSC Roskartografiya, 2017, 496 p. (In Russian).

31. Богоявленский В. И. Поиск, разведка и разработка месторождений углеводородов в Циркумарктическом регионе // Арктика: экология и экономика. — 2013. — № 2 (10). — С. 62—71.

Bogoyavlensky V. I. Search, exploration and production of hydrocarbon deposits in the Circumarctic region. *Arktika: ekologiya i ekonomika*. [Arctic: Ecology and Economy], 2013, no. 2 (10), pp. 62—71. (In Russian).

32. Мельников П. Н., Скворцов М. Б., Кравченко М. Н. и др. Итоги геолого-разведочных работ на арктическом шельфе России в 2014—2019 гг. и перспективы проведения работ на ближайшее время // Геология нефти и газа. — 2019. — № 6. — С. 5—18.

- Mel'nikov P. N., Skvortsov M. B., Kravchenko M. N., Agadzhanants I. G., Grushevskaya O. V., Uvarova I. V. Results of exploration work on the Russian Arctic shelf in 2014—2019 and prospects for work in the near future. *Geologiya nefi i gaza*, 2019, no. 6, pp. 5—18. (In Russian).
33. Сенин Б. В., Леончик М. И. Стратегические направления развития минерально-сырьевой базы углеводородов нераспределенного фонда морских акваторий // *Минер. ресурсы России. Экономика и управление*. — 2016. — № 6. — С. 3—14.
 Senin B. V., Leonchik M. I. Strategic directions for the development of the oil and gas industry of the unallocated fund of marine areas. *Miner. resursy Rossii. Ekonomika i upravleniye*, 2016, no. 6, pp. 3—14. (In Russian).
34. Roeser H. A., Block M., Hinz K., Reichert C. Marine geophysical investigation in the Laptev Sea and Western Part of the East Siberian Sea. *Berichte zur Polarforschung*, 1995, pp. 367—377.
35. Коско М. К., Соболев Н. Н., Кораго Е. А. и др. Геология Новосибирских островов — основа интерпретации геофизических данных по Восточно-Арктическому шельфу России // *Нефтегаз. геология. Теория и практика*. — 2013. — Т. 8, № 2. — С. 1—36.
 Kosko M. K., Sobolev N. N., Korago E. A. et al. Geology of the New Siberian Islands as the Basis for Interpreting Geophysical Data on the East Arctic Shelf of Russia. *Neftegaz. geologiya. Teoriya i praktika*, 2013, vol. 8, no. 2, pp. 1—36. (In Russian).
36. Backman J., Jakobsson M., Frank M. et al. Age model and core seismic integration for the Cenozoic Arctic Coring Expedition sediments from the Lomonosov Ridge. *Paleoceanography*, 2008, vol. 23, no. 1.
37. Drachev S. S., Malyshev N. A., Nikishin A. M. Tectonic history and petroleum geology of the Russian Arctic Shelves: an overview. *Geological society, London. Petroleum geology conference series*, 2010, vol. 7, no. 1, pp. 591—619.
38. Драчев С. С., Елистратов А. В., Савостин Л. А. Структура и сейсмостратиграфия шельфа Восточно-Сибирского моря вдоль сейсмического профиля «Индибирский залив — остров Жаннетты» // *Докл. Акад. наук*. — 2001. — Т. 377, № 4. — С. 521—525.
 Drachev S. S., Elistratov A. V., Savostin L. A. Structure and seismostratigraphy of the East Siberian Sea shelf along the Indigirka Bay-Jannetta Island seismic profile. *Doklady Earth Sciences*, 2001, vol. 337, no. 3, pp. 293—297.
39. Никишин А. М., Старцева К. Ф., Вержбицкий В. Е. и др. Сейсмостратиграфия и этапы геологической истории осадочных бассейнов Восточно-Сибирского и Чукотского морей и сопряженной части Американо-Сибирского бассейна // *Геотектоника*. — 2019. — № 6. — С. 3—26.
 Nikishin A. M., Startseva K. F., Verzhbitsky V. E. et al. Sedimentary basins of the East Siberian Sea and the Chukchi sea region and the adjacent area of Amerasia basin: seismic stratigraphy and stages of geological history. *Geotektonika*, 2019, no. 6, pp. 3—26. (In Russian).
40. Fujita K., Cook D. B. The Arctic continental margin of eastern Siberia. *The Arctic Ocean region, The Geology of North America*, 1990, vol. 50, pp. 289—304.
41. Казанин Г. С., Барабанова Ю. Б., Кириллова-Покровская Т. А. и др. Континентальная окраина Восточно-Сибирского моря: геологическое строение и перспективы нефтегазоносности // *Разведка и охрана недр*. — 2017. — Т. 10. — С. 51—55.
 Kazanin G. S., Barabanova Y. B., Kirillova-Pokrovskaya T. A. et al. Continental margin of the East Siberian Sea: geological structure and perspectives of oil and gas bearing. *Razvedka i okhrana nedr*, 2017, vol. 10, pp. 51—55. (In Russian).
42. Казанин Г. С., Казанин А. Г., Базилевич С. О. Основные результаты геофизического изучения акваторий Арктики ОАО «МАГЭ», проблемы разработки и применения отечественных геофизических комплексов морской сейсморазведки // *Арктика: экология и экономика*. — 2020. — № 3 (39). — С. 99—111.
 Kazanin G. S., Kazanin A. G., Bazilevich S. O. Main results of geophysical studies of the Arctic offshore areas at JSC “MAGE”, development and implementation problems of domestic geophysical equipment for marine seismic survey. *Arktika: ekologiya i ekonomika. [Arctic: Ecology and Economy]*, 2020, no. 3 (39), pp. 99—111. DOI: 10.25283/2223-4594-2020-3-99-111. (In Russian).
43. Kvenvolden K. A., Ginsburg G. D., Soloviev V. A. Worldwide distribution of subaquatic gas hydrates. *Geo-Marine Letters*, 1993, vol. 13 (1), pp. 32—40.
44. Collett T. S., Dallimore S. R. Permafrost-Associated Gas Hydrate. *Natural Gas Hydrate. Coastal Systems and Continental Margins*, 2000, vol. 5, pp. 43—60.
45. Огородов С. А., Баранская А. В., Белова Н. Г. и др. Атлас абразионной и ледово-экзарационной опасности прибрежно-шельфовой зоны Российской Арктики. — М.: МГУ, 2020. — 69 с.
 Ogorodov S. A., Baranskaya A. V., Belova N. G. et al. Atlas of coastal erosion and ice-gouging hazards of the Russian Arctic coastal-shelf zone. Moscow, Lomonosov Moscow State Univ., 2020, 69 p.
46. ГОСТ Р 58112-2018. Нефтяная и газовая промышленность. Арктические операции. Управление ледовой обстановкой. Сбор гидрометеорологических данных. — М.: Стандартинформ, 2018. — 20 с.
 GOST R 58112-2018. Petroleum and natural gas industries. Arctic operations. Ice management. Collection of hydrometeorological data. Moscow, Standardinform, 2018, 20 p. (In Russian).
47. Миронюк С. Г. Учет палеогеографических условий при выполнении инженерных изысканий на шельфе западного сектора Российской Арктики // *Инженер. изыскания*. — 2015. — № 7. — С. 28—38.
 Mironyuk S. G. Taking into account paleogeographic conditions for engineering surveys on the shelf of Russian Arctic west sector. *Inzhener. izyskaniya*, 2015, no. 7, pp. 28—38. (In Russian).
48. Либина Н. В., Никифоров С. Л. Экзарационные явления на восточном арктическом шельфе России // *Вестн. МГТУ*. — 2018. — Т. 21, № 1. — С. 139—149.

Libina N. V., Nikiforov S. L. Ice gouging effects on the eastern Arctic shelf of Russia. *Vestn. of MSTU*, 2018, vol. 21, no. 1, pp. 139—149. DOI: 10.21443/1560-9278-2018-21-1-139-149. (In Russian).

49. Платонова Е. В., Бычкова И. А. Многолетние наблюдения за стамухами Восточно-Сибирского моря с использованием спутниковых данных // Ученые зап. РГГМУ. — 2018. — № 53. — С. 103—112. *Platonova E. V., Bychkova I. A. Long-term observation of grounded hummocks in the eastern siberian sea on satellite data. Uchenyye zap. RGGMU*, 2018, no. 53, pp. 103—112. (In Russian).

50. Бузин И. В., Миронов Е. У., Сухих Н. А. и др. Исследование дрейфа ледяных образований на шельфе Российской Арктики с помощью автоматических радио-маяков спутниковой системы ARGOS // Науч.-техн. вестн. ОАО «НК «Роснефть». — 2016. — № 4. — С. 4—9. *Buzin I. V., Mironov E. Yu., Sukhikh N. A., Pavlov V. A., Ko-rnishin K. A., Efimov Ya. O. Investigation of drift of the ice features on the Russian Arctic offshore with the help of automatic radio beacons based on the ARGOS satellite system. Nauchno-tehnicheskij vestnik ОАО “НК “Rosneft”*, 2016, no. 4, pp. 4—9. (In Russian).

51. Belderson R. H., Kenyon N. H., Wilson J. B. Iceberg plough marks in the northeast Atlantic. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1973, vol. 13, iss. 3, pp. 215—224.

52. Jakobsson M., Polyak L., Edwards M. et al. Glacial geomorphology of the Central Arctic Ocean: the Chukchi Borderland and the Lomonosov Ridge. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2008, vol. 33, pp. 526—545. DOI: 10.1002/esp.1667.

53. Paull C. K., Dallimore S. R., Jin Y. K., Caress D. W., Lundsten E., Gwiazda R., Anderson K., Clarke J. H., Youngblut S., Melling H. Rapid seafloor changes associated with the degradation of Arctic submarine permafrost. *PNAS*, 2022, vol. 119, no. 12, e2119105119, 8 p. <https://doi.org/10.1073/pnas.2119105119>.

54. Grantz A., May S. D., Hart P. E. Geology of the Arctic continental margin of Alaska. *The Geology of Alaska. Geological Society of America. The Geology of North America*, 1994, vol. G-1, pp. 17—48.

55. Kienle J., Roederer J. G., Shaw G. E. Volcanic event in Soviet Arctic. *EOS*, 1983, vol. 64, no. 20, p. 377.

56. Бондур В. Г., Кузнецова Т. В. Выявление газовых сипов в акваториях арктических морей с использованием данных дистанционного зондирования // Исслед. Земли из космоса. — 2015. — № 4. — С. 30—43.

Bondur V. G., Kuznetsova T. V. Detecting Gas Seeps in Arctic Sea Water Areas Using Remote Sensing Data. Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics, 2015, vol. 51, no. 9, pp. 1060—1072. DOI: 10.1134/S0001433815090066.

57. Богоявленский В. И., Сизов О. С., Богоявленский И. В., Никонов Р. А. Дистанционное выявление участков поверхностных газопроявлений и газовых выбросов в Арктике: полуостров Ямал // Арктика: экология и экономика. — 2016. — № 3 (23). — С. 4—15.

Bogoyavlensky V. I., Sizov O. S., Bogoyavlensky I. V., Nikonov R. A. Remote identification of areas of surface gas and gas emissions in the Arctic: Yamal Peninsula. Arktika: ekologiya i ekonomika. [Arctic: Ecology and Economy], 2016, no. 3 (23), pp. 4—15. (In Russian).

58. Масуренков Ю. П., Слёзин Ю. Б., Собисевич А. Л. Газовые шлейфы у острова Беннетта // Изв. РАН. Сер. Геогр. — 2013. — № 3. — С. 86—95. *Masurenkov Y. P., Slezin Y. B., Sobisevich A. P. Gas plumes near the Bennett Island. Izv. RAN. Ser. Geogr.*, 2013, no. 3, pp. 86—95. (In Russian).

59. LaMacchia D. LBL physicist solves Cold War mystery. July 24, 1992. Available at: <https://www2.lbl.gov/Science-Articles/Archive/arctic-plume.explored.html>.

60. Dethleff D. Polynyas as a possible source for enigmatic Bennett Island atmospheric plumes. *The Polar Oceans and Their Role in Shaping the Global Environment. Geophys. Monogr. Ser.* 1994, vol. 85, pp. 475—483 (AGU, Washington).

Информация об авторах

Богоявленский Василий Игоревич, доктор технических наук, член-корреспондент РАН, заместитель директора по научной работе, заведующий лабораторией «Шельф», главный научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа РАН (119333, Россия, Москва, ул. Губкина, д. 3), e-mail: geo.ecology17@gmail.com.

Кишаннов Алексей Владимирович, научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа РАН (119333, Россия, Москва, ул. Губкина, д. 3), e-mail: alexey137k@yandex.ru.

Казанин Алексей Геннадьевич, кандидат технических наук, генеральный директор, АО «МАГЭ» (183038, Россия, Мурманск, ул. Софьи Перовской, д. 26), e-mail: a.kazanin@mage.ru.

Казанин Геннадий Алексеевич, заместитель начальника управления обработки и интерпретации геолого-геофизической информации, АО «МАГЭ» (183038, Россия, Мурманск, ул. Софьи Перовской, д. 26), e-mail: g.kazanin@mage.ru.

Библиографическое описание данной статьи

Богоявленский В. И., Кишаннов А. В., Казанин А. Г., Казанин Г. А. Опасные газонасыщенные объекты на акваториях Мирового океана: Восточно-Сибирское море // Арктика: экология и экономика. — 2022. — Т. 12, № 2. — С. 158—171. — DOI: 10.25283/2223-4594-2022-2-158-171.

DANGEROUS GAS-SATURATED OBJECTS IN THE WORLD OCEAN: THE EAST SIBERIAN SEA

Bogoyavlensky, V. I., Kishankov, A. V.

Oil and Gas Research Institute of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation)

Kazanin, A. G., Kazanin, G. A.

Marine Arctic Geological Expedition (Murmansk, Russian Federation)

The article was received on March 10, 2022

Abstract

For the first time, the researchers performed the interpretation of the upper part of the common depth point (CDP) seismic sections in the northwestern part of the East Siberian Sea (ESS) along the 44 lines of JSC MAGE in the amount of 8200 km. They revealed 129 anomalous objects in near-bottom sediments, potentially associated with gas accumulations and channels of its subvertical migration. The average distance between these objects along the lines was 63.6 km — 5.2—6.2 times less than in the Chukchi, Laptev and Bering seas. The authors substantiate that the ESS is characterized by a significantly smaller number of gas migration channels — active faults reaching the near-bottom sediments, compared to the seas mentioned above. This is consistent with the lower neotectonic activity of the ESS and the absence of significant seismic events. In the study area, the researchers revealed a large number of depressions in the bottom relief, which are associated with the furrows of ice gouging during the transgressions-regressions of the sea and at the present stage. Significant errors in the GEBCO bathymetry database were also revealed.

Keywords: *East Siberian Sea, CDP seismic survey, seismic sections, upper part of the section, gas accumulations, gas pockets, gas hydrates, ice gouging, plough marks.*

The research was carried out according to the state assignment of the Oil and Gas Research Institute, Russian Academy of Sciences on the topic “Improving the efficiency and environmental safety of the oil and gas resources development in the Arctic and Subarctic zones of the Earth in a changing climate” (No. 122022800264-9).

Information about the authors

Bogoyavlensky, Vasily Igorevich, Doctor of Engineering Science, Corresponding member of RAS, Deputy Director for Science, Head of “Shelf” Laboratory, Chief Researcher, Oil and Gas Research Institute of RAS (3, Gubkina St., Moscow, Russia, 119333), e-mail: geo.ecology17@gmail.com.

Kishankov, Aleksei Vladimirovich, Researcher, Oil and Gas Research Institute of RAS (3, Gubkina St., Moscow, Russia, 119333), e-mail: alexey137k@yandex.ru.

Kazanin, Aleksey Gennadyevich, PhD of Engineering Science, Director General, Marine Arctic Geological Expedition (26, Sofia Perovskaya str., Murmansk, Russia, 183038), e-mail: a.kazanin@mage.ru.

Kazanin, Gennady Alekseyevich, Deputy Head of Department of Processing and Interpretation of Geological and Geophysical Information, Marine Arctic Geological Expedition (26, Sofia Perovskaya str., Murmansk, Russia, 183038), e-mail: g.kazanin@mage.ru.

Bibliographic description

Bogoyavlensky, V. I., Kishankov, A. V., Kazanin, A. G., Kazanin, G. A. Dangerous gas-saturated objects in the World Ocean: the East Siberian Sea. *Arktika: ekologiya i ekonomika* [Arctic: Ecology and Economy], 2022, vol. 12, no. 2, pp. 158—171. DOI: 10.25283/2223-4594-2022-2-158-171. (In Russian).

© Bogoyavlensky V. I., Kishankov A. V., Kazanin A. G., Kazanin G. A., 2022