

УДК 553.981

## НЕОДНОРОДНОСТИ ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ РАЗРЕЗА ОСАДОЧНОЙ ТОЛЩИ ВОСТОЧНО-СИБИРСКОГО МОРЯ: ЗАЛЕЖИ ГАЗА И СЛЕДЫ ЛЕДОВОЙ ЭКЗАРАЦИИ

© 2022 г. Член-корреспондент РАН В. И. Богоявленский<sup>1,\*</sup>, А. В. Кишанков<sup>1</sup>, А. Г. Казанин<sup>2</sup>

Поступило 16.03.2022 г.

После доработки 24.03.2022 г.

Принято к публикации 29.03.2022 г.

Впервые выполнена интерпретация верхней части временных разрезов сейсморазведки методом общей глубинной точки АО “МАГЭ” в северо-западном районе Восточно-Сибирского моря в объеме 8200 км. Обнаружено 129 локальных неоднородностей – потенциальных залежей газа, расположенных со средним расстоянием вдоль профилей 63.6 км, что в 5.2–6.2 раз реже, чем в морях Чукотском, Лаптевых и Беринговом. Установлено, что район исследований характеризуется меньшим количеством активных разломов, доходящих до придонных отложений, по сравнению с тремя перечисленными морями, что свидетельствует о его меньшей неотектонической активности. В районе исследований выявлено 123 локальных углубления в рельефе дна, отождествляемых с бороздами ледового выпаживания – плугмарками.

*Ключевые слова:* Восточно-Сибирское море, сейсморазведка МОГТ, временные разрезы, верхняя часть разреза, залежи газа, газогидраты, ледовая экзарация, плугмарки

**DOI:** 10.31857/S2686739722070040

### ВВЕДЕНИЕ

В последние годы значительно активизировались исследования газонасыщенности верхней части разреза (ВЧР – глубины от дна до нескольких сотен метров) на суше и акваториях Арктики и процессов дегазации Земли с эмиссией газа в атмосферу [1–14]. В значительной степени это связано с глобальным потеплением, одной из основных причин которого считается рост содержания парниковых газов в атмосфере, включая метан в Арктике [5, 7, 9, 12–14].

Авторы данной статьи исследовали газонасыщенность ВЧР по архивным материалам сейсморазведки методом общей глубинной точки (МОГТ) на акваториях арктических и субарктических регионов, включая моря Лаптевых, Чукотское, Бофорта, Берингово и Охотское ([1–3, 12] и др.), в том числе в районах существования и отсутствия субаквальных многолетнемерзлых пород и газовых гидратов на мелководном шельфе и континентальном склоне моря Лаптевых [2, 3, 12]. Кроме того, выполнены многолетние комплексные

исследования процессов взрывной дегазации криолитозоны на суше Западной Сибири с формированием гигантских кратеров выбросов газа [10, 11]. Подобные кратеры были также обнаружены на дне Баренцева моря [8].

Основной целью настоящей работы является изучение потенциальной газонасыщенности ВЧР шельфа и континентального склона северо-запада Восточно-Сибирского моря в районах Де-Лонга (DL) и Восточно-Сибирском (ES) по материалам сейсморазведки МОГТ АО “МАГЭ” (рис. 1).

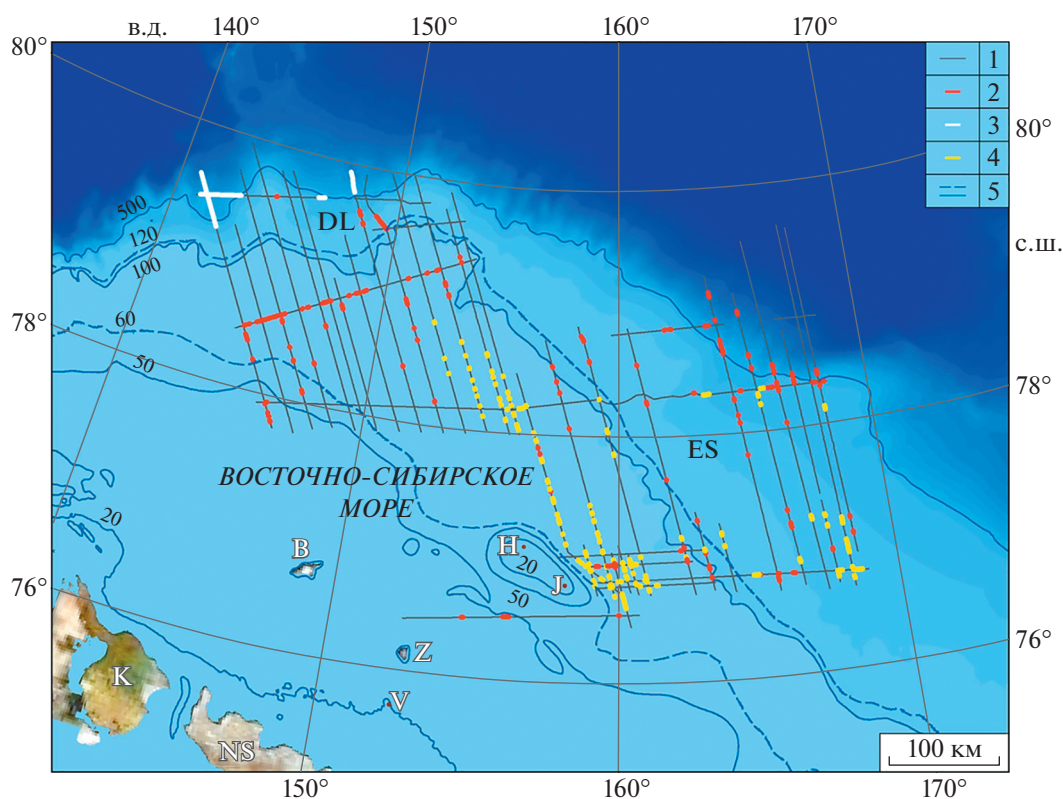
### МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИСХОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Исследования основаны на выявлении и анализе в верхней части временных разрезов МОГТ МАГЭ локальных неоднородностей (аномальных объектов), потенциально связанных с залежами газа. Аномальный объект может отображать одну или несколько разнесенных по вертикали (времени/глубине) залежей газа – газовых карманов. Потенциальные залежи газа определяются на качественном уровне по совокупности признаков, которые для формализации в геоинформационной системе “Арктика и Мировой океана” (ГИС “АМО”) ИПНГ РАН [1–3, 10–12] кодировались принятыми ранее цифровыми индексами [1, 2]:

<sup>1</sup>Институт проблем нефти и газа Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>2</sup>АО “Морская арктическая геологоразведочная экспедиция”, Мурманск, Россия

\*e-mail: geo.ecology17@gmail.com



**Рис. 1.** 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, Н – Генриетты, J – Жанетты, V – Вилькицкого. Основа рисунка – батиметрия GEBCO и космоснимок из базы данных ESRI.

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 отраженным волнам от газодляного контакта.

Морская сейсморазведка МОГТ по 120-кратной системе наблюдений в районе DL проводилась в 2011–2012 гг. с научно-исследовательского судна (НИС) “Георгий Дмитриевич Наливкин” по сети плановых сейсмопрофилей  $20 \times 100$  км в объеме 3910 км (см. рис. 1), а в районе ES – в 2016 г. с НИС “Николай Трубяччинский” по сети  $35 \times 125$  км в объеме 4290 км [15]. На обоих судах использова-

лись твердотельные сейсмические косы Sercel SEAL Sentinel Solid длиной 8100 м.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве примера неоднородностей в ВЧР на рис. 2а приведен фрагмент временного разреза ESS1607 по району ES с глубинами дна около 270–320 м с локальными аномальными объектами протяженностью от 900 до 1400 м на временах 0.6–0.7 с (глубины от дна около 200–300 м), отождествляемыми с многопластовыми залежами газа, сформировавшимися в ловушке антиклинального типа. Данные потенциальные залежи газа характеризуется признаками 1, 2 и 3 – повышенной амплитудой, инвертированным сигналом и прогибанием нижележащих отражающих горизонтов.

Всего в ходе исследований в северо-западной части Восточно-Сибирского моря были проанализированы временные разрезы по 44 сейсмопрофилям общей протяженностью 8200 км, в результате чего в ВЧР выявлено 129 аномальных объектов, указывающих на потенциальные залежи газа (см. рис. 1), в том числе 74 на участке ES

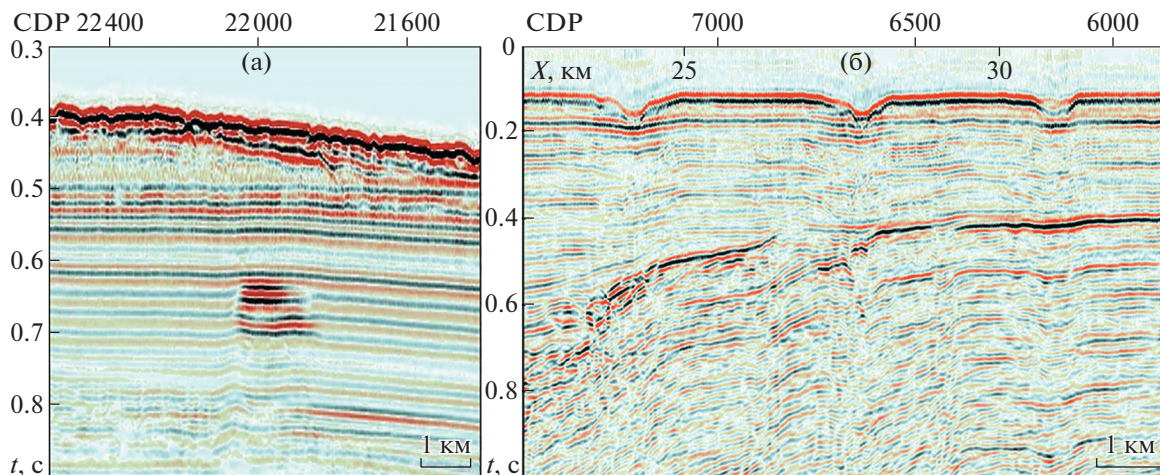


Рис. 2. Фрагменты временных разрезов с потенциальными залежами газа в ВЧР (а) и углублениями в рельефе дна (б).

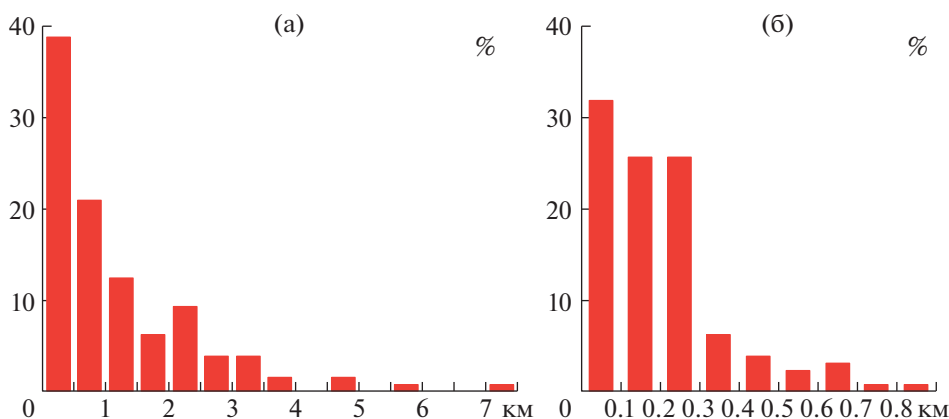


Рис. 3. Гистограммы распределения потенциальных залежей газа в ВЧР по горизонтальным размерам (а) и глубинам верхних границ газонасыщения (б).

(57.4%) и 55 на участке DL (42.6%). При этом средняя плотность их распространения (расстояние между объектами) составила 63.6 км. По аналогии с работами [1, 2] выполнен анализ распределения выявленных объектов по горизонтальным размерам и глубинам верхних границ потенциального газонасыщения, результаты которого приведены на гистограммах рис. 3.

Результаты анализа рис. 3б показывают, что большинство (83.0%) аномальных объектов имеют верхние границы газонасыщения на глубинах до 300 м от морского дна, до 100 м от дна доходят менее трети объектов (31.8%), а средняя глубина составила 203 м. По протяженности большинство аномалий характеризуются размером до 1500 м (72.1%), при этом более трети (38.8%) имеют размеры менее 500 м. Всего два объекта (1.55%) имеют размеры более 5 км (5.7 и 7.5 км). Средний размер потенциальных залежей газа составил 1192 м.

Также отметим, что на континентальном склоне 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. 1). Оси синфазности отраженных волн от BSR имеют обратную полярность из-за экранирования нижележащих залежей свободного газа [2, 3, 12, 16]. Отметим, что надежность и однозначность прослеживания BSR в районе DL значительно ниже, чем в море Лаптевых [2, 3, 12]. Это может быть связано с относительно более низким газонасыщением ВЧР (в свободном и/или гидратном состояниях), а также с тем, что выделяемый горизонт просто может относиться к кровле пласта с пониженной скоростью.

Неожиданным результатом явилось то, что на ряде временных разрезов в районах ES и DL (пре-

имущественно в пределах поднятия Де-Лонга) выделяются локальные углубления в рельефе дна (рис. 2б), протяженность большей части которых не превышает 2 км (см. рис. 1). По району DL они расположены на глубинах дна от 78 до 92 м, а по району ES — от 61 до 390 м. Здесь необходимо отметить, что сейсморазведочные работы проводились, в основном, на глубинах свыше 50 м, поэтому распространение подобных локальных углублений на меньших глубинах не исследовано.

На рис. 2б приведен фрагмент временного разреза по профилю ESS1628, на котором на глубине дна около 80 м выделяются три углубления в его рельефе до 15–30 м с горизонтальными размерами от 700 до 1200 м. По своему виду многие из них напоминают покмарки (англ. rockmarks) — подводные кратеры выбросов газа. Однако по пересечению одним профилем сделать такой вывод некорректно.

### ОБСУЖДЕНИЕ

Почти под всеми углублениями в рельефе дна не наблюдаются аномальные потенциально газонасыщенные объекты (см. признаки 1–6) и тектонические нарушения — каналы притока газа, характерные для покмарок. Исключение составляют наблюдаемые под ними небольшие прогибы осей синфазности, видимо, связанные с временными задержками в приходе отраженных волн, возникающими за счет локального снижения средних скоростей. Наиболее вероятно, что углубления в рельефе дна связаны с ледовой экзарацией как современной, так и во времена трансгрессий-регрессий моря. Отметим, что в эпоху последнего оледенения уровень моря был на примерно 120 м ниже современного [12, 17].

Ледово-экзарационное обоснование природы углублений в рельефе дна базируется на том, что борозды выпаживания — плугмарки — могут быть образованы киями айсбергов, формирующихся на ледниках острова Беннетта и архипелага Северная Земля [18]. В районе острова Де-Лонга выявлена обширная зона айсбергового воздействия. Кроме того, плугмарки могут быть образованы дрейфующими частями торосов и стамух, известная мощность которых достигает 50 м [18]. Обычно плугмарки имеют V-образную или U-образную формы поперечного сечения, а по краям борозд наблюдаются валы вывернутого грунта [19]. Среди акваторий Северного Ледовитого океана Восточно-Сибирское море характеризуется самым широким распространением стамух — около 70% от их общего числа.

Отметим, что в море Лаптевых борозды выпаживания 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)

[19]. В ряде случаев в других регионах Мирового океана плугмарки встречаются на глубинах свыше 300 м, а их протяженности могут достигать многих километров в длину. На Штокмановской площади в Баренцевом море зафиксированы борозды выпаживания на глубинах до 360 м, а в центральной части Северного Ледовитого океана даже на глубинах около 1000 м [20]. Это свидетельствует о возможном существенном изменении уровня моря в недалеком прошлом и/или о гигантских размерах айсбергов. Таким образом, обнаруженные нами в Восточно-Сибирском море углубления в рельефе дна на глубине моря 61–390 м вполне могут быть реликтовыми плугмарками.

Касательно особенностей распространения потенциально газонасыщенных объектов отметим, что в северо-западной части Восточно-Сибирского моря выявлено относительно равномерное распределение аномалий 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%, на мелководье Берингова моря — 50.6, 21.1 и 14.5% ([1, 2] и др.). 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 наблюдаемые на временных разрезах разломы — потенциальные каналы миграции газа, подходящие близко к морскому дну.

По сравнению с акваториями соседних морей, в Восточно-Сибирском море в районах DL и ES на временных разрезах отмечено меньшее количество разломов, доходящих до морского дна. Это согласуется с известными представлениями об истории геологического развития региона, согласно которым здесь отсутствовали активные тектонические движения на поздних стадиях осадконакопления. Прослеживаемые разломы, вероятно, образовались в эоцене—среднем миоцене, большинство из них идут от акустического фундамента и затухают в ВЧР осадочного чехла.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате анализа временных разрезов МОГТ 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 раз реже, чем в морях Чукотском, Лаптевых и на мелководье Берингова моря (расстояния соответственно 12.2, 11.4 и

10.3 км). По сравнению с этими морями в северо-западной части Восточно-Сибирского моря придонные отложения до глубин 100 м характеризуются пониженным газонасыщением (31.8% аномальных объектов). Установленные закономерности подтверждаются характером проанализированных временных разрезов и согласуются с меньшей неотектонической активностью Восточно-Сибирского моря.

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. Для подтверждения сказанного рекомендуется постановка специальных площадных исследований с помощью комплекса гидролокатора бокового обзора и эхолота-профилографа.

Наличие потенциальных залежей газа в ВЧР и пугмарок необходимо учитывать при уточнении структурных построений по данным сейсморазведки и для повышения безопасности геологоразведочных работ.

#### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

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

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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.
2. *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.
3. *Богоявленский В.И., Кишанков А.В., Казанин А.Г.* Мерзлота, газогидраты и сипы газа в центральной части моря Лаптевых // ДАН. Науки о Земле. 2021. Т. 500. № 1. С. 70–76.
4. *Бондур В.Г., Кузнецова Т.В.* Выявление газовых сипов в акваториях арктических морей с использованием данных дистанционного зондирования // Иссл. Земли из космоса. 2015. № 4. С. 30–43.
5. *Сергиенко В.И., Лобковский Л.И., Шахова Н.Е. и др.* Деграляция подводной мерзлоты и разрушение гидратов шельфа морей Восточной Арктики как возможная причина “метановой катастрофы”: некоторые результаты комплексных исследований 2011 года // ДАН. 2012. Т. 446. № 3. С. 330–335.
6. *Шакиров Р.* Газогеохимические поля окраинных морей Восточной Азии. М.: ГЕОС, 2018. 341 с.
7. *Юсупов В.И., Салюк А.Н., Карнаух В.Н. и др.* Обнаружение областей пузырьковой разгрузки метана на шельфе моря Лаптевых в Восточной Арктике // ДАН. 2010. Т. 430. № 6. С. 820–823.
8. *Andreassen K., Hubbard A., Winsborrow M., et al.* Massive Blow-out Craters Formed by Hydrate-controlled Methane Expulsion from the Arctic Seafloor // Science. 2017. V. 356. 6341. P. 948–953.
9. *Baranov B., Galkin S., Vedenin A., et al.* Methane Seeps on the Outer Shelf of the Laptev Sea: Characteristic Features, Structural Control, and Benthic Fauna // Geo-Marine Letters. 2020. V. 40. P. 541–557.
10. *Bogoyavlensky V., Bogoyavlensky I., Nikonov R., et al.* Permanent Gas Emission from the Seyakha Crater of Gas Blowout, Yamal Peninsula, Russian Arctic // Energies. 2021. 14. 5345. 22 p.
11. *Bogoyavlensky V., Bogoyavlensky I., Nikonov R., et al.* New Catastrophic Gas Blowout and Giant Crater on the Yamal Peninsula in 2020: Results of the Expedition and Data Processing // Geosciences. 2021. 11. 71. 20 p.
12. *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. V. 138. P. 1–15. 105527.
13. *Shakhova N., Semiletov I., Sergienko V., et al.* The East Siberian Arctic Shelf: Towards Further Assessment of Permafrost-related Methane Fluxes and Role of Sea Ice // Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2015. V. 373. 20140451.
14. *Steinbach J., Holmstrand H., Shcherbakova K., et al.* Source Apportionment of Methane Escaping the Subsea Permafrost System in the Outer Eurasian Arctic Shelf // PNAS. 2021. V. 118. № 10. e2019672118. P. 1–9.
15. *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.
16. *Kvenvolden K.A., Ginsburg G.D., Soloviev V.A.* Worldwide Distribution of Subaquatic Gas Hydrates // Geo-Marine Letters. 1993. 13 (1). P. 32–40.
17. *Collett T.S., Dallimore S.R.* Permafrost-Associated Gas Hydrate. In: Natural Gas Hydrate // Coastal Systems and Continental Margins 2000. V. 5. P. 43–60.
18. *Огородов С.А., Баранская А.В., Белова Н.Г. и др.* Атлас абразионной и ледово-экзарационной опасности прибрежно-шельфовой зоны Российской Арктики. МГУ. 2020. 69 с. <https://arcticcoast.ru/>
19. *Либина Н.В., Никифоров С.Л.* Экзарационные явления на восточном арктическом шельфе России // Вестник МГТУ. 2018. Т. 21. № 1. С. 139–149.
20. *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. V. 33. P. 526–545. <https://doi.org/10.1002/esp.1667>

## HETEROGENEITIES IN THE UPPER PART OF THE SECTION OF THE EAST SIBERIAN SEA SEDIMENTARY COVER: GAS ACCUMULATIONS AND SIGNS OF ICE GOUGING

Corresponding Member of the RAS **V. I. Bogoyavlensky<sup>a,#</sup>, A. V. Kishankov<sup>a</sup>, and A. G. Kazanin<sup>b</sup>**

<sup>a</sup>*Oil and Gas Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

<sup>b</sup>*Marine Arctic Geological Expedition, Murmansk, Russian Federation*

<sup>#</sup>*e-mail: geo.ecology17@gmail.com*

For the first time, the interpretation of the upper part of the sections of common depth point seismic survey of JSC MAGE in the north-western area of the East Siberian Sea in the volume of 8200 km was conducted. 129 local heterogeneities – potential gas deposits were revealed, located with an average distance of 63.6 km along the lines, which is 5.2–6.2 times rarer than in the Chukchi, Laptev and Bering seas. It is established that the study area is characterized by a smaller number of active faults reaching near-bottom sediments compared to the three mentioned seas, which indicates its lower neotectonic activity. In the study area, 123 local depressions in the bottom topography were revealed, associated with ice gouging furrows – plough marks.

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