

УДК 551.46

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПАРАМЕТРОВ ВЕРХНЕЙ ГРАНИЦЫ ЗОНЫ СТАБИЛЬНОСТИ ГИДРАТОВ МЕТАНА В ВОДНОЙ ТОЛЩЕ ОХОТСКОГО МОРЯ

© 2024 г. Р. Б. Шакиров, В. А. Лучин, Е. А. Петрова*

Представлено академиком РАН С.А. Добролюбовым 24.02.2024 г.

Поступило 24.02.2024 г.

После доработки 11.03.2024 г.

Принято к публикации 18.03.2024 г.

На основе всей доступной океанологической информации (131 286 станций, выполненных с 1929 по 2020 гг.) впервые для Охотского моря представлены пространственные закономерности распределения параметров верхней границы зоны стабильности гидратов метана (температура воды, солёность, глубина залегания верхней границы в водной толще). Рассмотрена модель зоны стабильности газогидратов (ЗСГГ), эквивалентная зоне стабильности гидратов метана. Показано, что в Охотском море минимальная температура воды и минимальное заглубление верхней границы зоны стабильности газогидратов (менее 1°C и 300–320 м соответственно) выделяются у восточного склона о-ва Сахалин. Максимальная температура воды и максимальное заглубление верхней границы (1.5–1.7°C и 340–350 м соответственно) характерны для района, прилегающего к центральным и северным проливам Курильской гряды, а также над склоном полуострова Камчатка. Значения солёности на верхней границе ЗСГГ в Охотском море варьируют в довольно узких пределах от 33.4 до 33.6 psu, что достаточно близко к принятым нами условиям стабильности гидрата метана в морской воде. Выделена акватория, где в толще вод отсутствуют термобарические условия для формирования и существования гидратов метана.

Ключевые слова: газогидраты, метан, верхняя граница зоны стабильности, температура воды, солёность, Охотское море

DOI: 10.31857/S2686739724070169

Газовые гидраты (ГГ) — кристаллические соединения, образующиеся при определённых термобарических условиях из воды и газа, с низкой молекулярной массой. В ГГ молекулы газа заключены в кристаллические ячейки, состоящие из молекул воды, удерживаемых водородной связью. При понижении давления или повышении температуры водородная связь легко распадается. Кроме термобарических условий, важными факторами гидратообразования являются и другие, например, литологические: наличие пористых и проницаемых осадочных пород [1, 2].

Зона стабильности газогидратов (ЗСГГ) — часть литосферы и гидросферы Земли, где термобарические и литолого-геохимические условия удовлетворяют устойчивому существованию ГГ определённого состава. Верхняя граница

образования ГГ в акваториях всегда находится в толще воды, нижняя — в толще осадочных пород [1, 3].

ГГ крайне чувствительны к изменениям внешних параметров среды. Даже при небольших изменениях температуры или давления возможна их диссоциация, которая сопровождается освобождением огромного количества газа в свободной фазе: 1 м³ газогидрата даёт около 160 м³ метана [1, 4]. По разным оценкам, в Мировом океане сосредоточено до 98% всех ресурсов ГГ, в то время как на суше — оценки занижаются до 2%. ЗСГГ на акваториях Мирового океана приурочена к районам с глубинами от 200 м для приполярных регионов и от 500–700 м для экваториальных [5].

Известные залежи и проявления ГГ обычно представлены метаном с незначительными примесями других газов (этан, пропан, бутан, диоксид углерода и др.). Например, содержание метана в гидратах, поднятых в Охотском море,

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской Академии наук, Владивосток, Россия
*E-mail: petrova@poi.dvo.ru

составило 97.80%, этана — 0.04%, двуокиси углерода — 0.09% [6]. Присутствие даже небольшого процента газообразных гомологов метана смещает границу фаз в область более высоких температур, а наличие пропана в смеси газов оказывает максимальное влияние на равновесную температуру по сравнению с другими газами [7].

Помимо изучения природных ГГ как потенциального ресурса углеводородного сырья, исследование районов их залегания имеет большое значение в рамках экологических и климатических аспектов. При повышении придонной температуры воды происходит уменьшение мощности ЗСГГ, что может вызвать диссоциацию ГГ и привести к выделению метана [2, 8]. Газ, высвобождающийся при разложении гидрата, поступает в придонные воды. Затем он течениями, диффузией и пузырьковым переносом мигрирует в атмосферу, усиливая парниковый эффект [9]. Поскольку метан является мощным парниковым газом (радиационный эффект CH_4 превосходит CO_2 в 28–34 раза [4], такой выброс может иметь серьёзные климатические последствия [2, 5].

К настоящему времени сведений по пространственным изменениям параметров верхней границы зоны стабильности ГГ в толще вод Охотского моря нет. В работе [10] представлены картографические схемы (включая Охотское море) распределения ГГ, придонных температур воды и прогноз возможного распределения (да/нет по термобарическим условиям) гидратов метана (ГМ) в Арктике и северной части Мирового океана (от 45° до 90° с. ш.). Базовые данные для расчётов включали: температуру придонной воды; минерализацию пластовой воды (34.5 psu и 0 psu) и состав газа-гидратообразователя (100% метана).

Знание глубины залегания верхней границы ЗСГГ необходимо:

- для моделирования динамики растворения всплывающих пузырьков газа в водной толще [11, 12];
- при моделировании сценариев реакции ГГ на изменения температуры воды и оценки возможности выделения метана в экосистему (необходимыми условиями являются положение границ (верхней и нижней) и протяжённость ЗСГГ) [2, 13, 14];
- для оценки чувствительности ГГ к изменению внешних факторов среды (их диссоциация и образование зависят от расстояния от верхней границы до дна) [15];

— для планирования поисковых работ по обнаружению и исследованию ГГ на морских акваториях [16];

— для классификации “факелов” на мелководные и глубоководные [12].

Целью авторов является выявление закономерностей пространственного распределения параметров верхней границы зоны стабильности гидратов метана (температуры воды, солёности, глубины залегания верхней границы в толще вод) на основе всей доступной океанологической информации в Охотском море.

В настоящем исследовании рассматривается только верхняя граница ЗСГГ в водной толще. Для её расчёта были использованы данные глубоководных океанологических наблюдений в Охотском море: батометрические наблюдения (OSD), CTD-наблюдения и данные дрейфующих буев проекта “Argo”, данные Mechanical Bathythermograph Data (MBT) и наблюдения Expendable Bathythermograph Data (XBT). Дополнительно, с сайта GEBCO (The General Bathymetric Chart of the Oceans: <https://www.gebco.net/>) выбирали значения глубины места выполнения каждой океанологической станции.

После исключения недостоверных и дублированных данных, в результирующем массиве океанологической информации осталось 131 286 станций, выполненных с 1929 по 2020 гг. Вся акватория Охотского моря в целом достаточно хорошо освещена наблюдениями. Однако океанологических станций, выполненных в холодный период года на акватории моря, очень мало. Особенно это актуально для обширного шельфа, который в зимний период покрыт льдом. Поэтому с января по апрель в северной и западной частях моря данные наблюдений практически отсутствуют.

Верхнюю границу ЗСГГ определяли пересечением равновесной кривой диссоциации ГГ (которая, помимо термобарических условий, зависит от состава газа и солёности) с кривой распределения температуры в толще воды. Исходя из материалов экспедиционных исследований ТОИ ДВО РАН в Охотском море, а также публикаций [6, 16], в настоящей работе мы предполагаем, что основным компонентом ГГ является чистый метан. Условия стабильности ГМ взяты из работы [8] для системы “чистый метан—морская вода” (100% CH_4 ; $S=33.5$ psu). Как следует из работы [5], при различных принимаемых значениях солёности (от 0 до 36 psu) равновесная кривая стабильности ГМ смещается на десятки

метров. В этой связи можно отметить, что принятые нами условия (по солёности) наиболее подходят к акватории Охотского моря.

Отметим, что расчёт глубины залегания верхней границы ЗСГГ выполнялся на всех 131 286 станциях. При этом, на преобладающей части станций (99 105), произведённых на мелководных участках Охотского моря, верхняя граница ЗСГГ не выделяется. Вертикальные распределения температуры на этих океанологических станциях, а также значения придонного давления свидетельствуют о том, что в воде этой мелководной части моря нет соответствующих условий для образования и стабильного состояния ГГ. Необходимые термобарические условия были выявлены только на 32 181 станции. По географическому положению периферийных станций этого массива данных (32 181 станция) была определена внешняя граница распространения зоны стабильности гидратов метана в водной толще Охотского моря.

Расчёты средних годовых значений всех параметров верхней границы ЗСГГ выполнялись в пределах трапеций $0.35^\circ \times 0.55^\circ$ по меридиану и параллели соответственно. В каждой трапеции применялось медианное осреднение исходных данных. Отметим также, что при расчётах средних многолетних статистических характеристик во всех трапециях (для нормирования вклада суточных, многосерийных станций, а также возможных дублированных значений) выполнялась следующая операция. Вначале в каждой трапеции проводилось осреднение всех данных, выполненных за конкретные сутки. Полученные средние за сутки значения в дальнейших расчётах климатических величин принимались с единственным вкладом.

Результаты проведённых нами расчётов глубины залегания верхней границы ЗСГГ сравнивались с положением нижней границы деятельного слоя вод Охотского моря, на которой сезонные колебания температуры воды статистически не значимы [17]. Было получено, что на преобладающей части Охотского моря верхняя граница ЗСГГ расположена существенно глубже, чем нижняя граница деятельного слоя. Исключением является только зона вблизи Курильской гряды и локальный регион над впадиной ТИНРО.

На рис. 1 представлено пространственное распределение параметров верхней границы ЗСГГ. По значениям температуры на верхней границе ЗСГГ исследуемую акваторию можно разделить на две части, границей между которыми является изотерма 1.4°C (рис. 1 а). В сравнительно тёплом

восточном секторе моря максимальные значения температуры воды ($1.5\text{--}1.7^\circ\text{C}$) выделяются в проливах Курильской гряды (с прилегающей к ним акваторией Охотского моря) и в присклоновых районах западной Камчатки. Термический режим этих регионов определяется адвекцией тихоокеанских вод, а также интенсивным приливным перемешиванием в проливах, в результате которого происходит передача тепла на глубину верхней границы ЗСГГ с выше- и нижележащих горизонтов. Пространственные распределения температуры воды на верхней границе ЗСГГ также хорошо согласуются с циклонической системой течений в море, представленной в работах [18–20].

В холодном секторе моря область с наиболее низкими значениями температуры (менее 1°C) на верхней границе ЗСГГ выделяется в крайней западной части моря. На севере эта акватория ограничена каньоном, расположенным к югу от острова Ионы и банки Кашеварова, а на юге — склоном залива Терпения. Эта область формируется за счёт двух основных факторов. Во-первых, осенне-зимней конвекции и образования льда на северном шельфе моря. Эта плотная и переохлаждённая шельфовая вода формируется зимой в прибрежных районах северо-западной части моря и имеет наиболее низкую температуру воды в Охотском море [21, 22], а затем системой течений перемещается в район материкового склона. Дополнительным эффектом, при формировании области пониженных значений температуры воды в крайней западной части исследуемого региона, является интенсификация приливных и непериодических течений над материковым склоном моря, а также на мелководьях вблизи острова Ионы и банки Кашеварова. По конфигурации изотермы 1°C выделяется перемещение переохлаждённых вод на юг (до параллели мыса Анива), а затем на восток (в соответствии с циклонической системой движения вод в море).

Как следует из рис. 1 б, значения солёности на верхней границе ЗСГГ в Охотском море варьируют в довольно узких пределах от 33.4 до 33.6 psu, что достаточно близко к принятым нами условиям стабильности гидрата метана в морской воде, согласно [8]. Минимальные значения солёности на верхней границе ЗСГГ выделяются на периферийных участках Охотского моря (рис. 1 б). Исключением являются локальные участки, где происходит основное поступление тихоокеанских вод в море (вблизи центральных и северных проливов Курильской

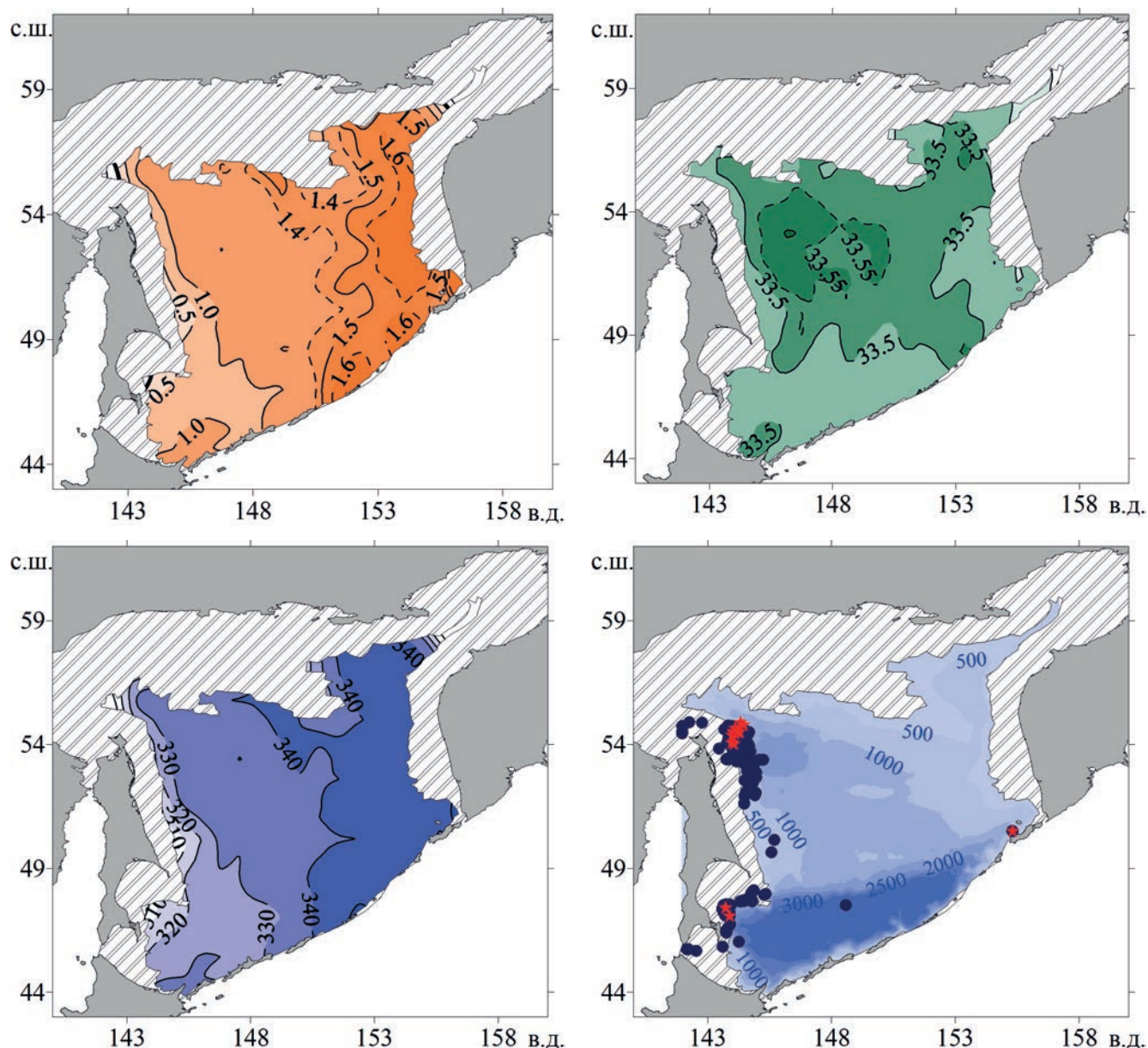


Рис. 1. Пространственное распределение средних годовых значений параметров верхней границы ЗСГ: (а) – температура воды ($^{\circ}\text{C}$); (б) – солёность (psu); (в) – глубина положения верхней границы ЗСГ в Охотском море (м). (г) – известные скопления ГГ (1), подтвержденные прямыми методами, и “факелов” (2) метана (цифрами даны глубины в метрах). Заштрихована акватория, где в толще вод отсутствуют благоприятные термобарические условия для формирования и существования ГГ.

гряды). Область с повышенной солёностью у полуострова Сиретоко на острове Хоккайдо связана с адвекцией соленых вод из Японского моря течением Соя. Здесь повышенные значения солёности формируются за счёт взаимодействия и вертикального перемешивания вод течения Соя и собственных вод Охотского моря [21, 22], что приводит к росту температуры и солёности (рис. 1 а, б).

Самая обширная область с пониженной солёностью (и низкой температурой воды)

наблюдаются у склона о. Сахалин и в западной части Курильской котловины Охотского моря. Здесь, как известно [21, 22], на формирование солёности воды доминирующее влияние оказывают придонные шельфовые воды северо-западной части моря (с низкой температурой и солёностью), которые формируются в результате осенне-зимней конвекции. Эта стационарная область с пониженными значениями солёности восточнее Сахалина также зависит и от адвекции сравнительно пресных вод, режим

которых находится в сильной зависимости от стока р. Амур. Как следует из конфигурации области с солёностью ниже 33.5 psu (рис. 1 б), по мере достижения этой опреснённой воды южной части моря, происходит её выход в Тихий океан, что способствует формированию в его северо-западной части промежуточной водной массы с пониженной солёностью [21, 22]. Более того, согласно существующим схемам течений моря [18–20], на южной периферии циклонического круговорота вод моря происходит перемещение этих распреснённых вод на восток до меридиана центральных проливов Курильской гряды.

Глубина залегания верхней границы ЗСГГ в Охотском море (рис. 1 в) находится в полном соответствии с рассмотренными выше океанологическими условиями и представленными основными факторами их формирования (осенне-зимняя конвекция, боковое и вертикальное перемешивание на границах течений и в проливах Курильской гряды, адвекции тихоокеанских вод и вод Японского моря, а также интенсификации приливных и непериодических течений в районах резких перепадов глубин) и изменяется от 300 до 350 м. Причём, максимально она заглублена (до 340–350 м) вблизи центральных и северных проливов Курильской гряды. Если следовать конфигурации изолиний 330 и 340 м, то топография верхней границы ЗСГГ ограничивает, соответственно, западную и восточную периферии циклонического круговорота вод Охотского моря (рис. 1 в).

Следует отметить, что полученное нами (на всех картах рис. 1) деление акватории Охотского моря на благоприятные/неблагоприятные условия для образования и существования ГГ хорошо согласуется с данными работ [10, 23]. В тоже время, представленное деление акватории на рис. 1 более детально, а различия с работами [10, 23], в основном, связаны с использованием в настоящем исследовании более полной базы исходных океанологических данных, учётом в расчётах фактической термической структуры вод Охотского моря и более реальным принятием условия стабильности ГГ для системы “чистый метан–морская вода” ($S=33.5$ psu).

В настоящей работе не рассматривается возможность существования криогенных ГГ (хотя на преобладающей части шельфа Охотского моря существуют отрицательные значения температуры). Эта проблема, во-первых, находится за пределами настоящего исследования (толща вод моря). Во-вторых, обоснование возможности существования криогенных ГГ и их

предполагаемая локализация в пределах Охотского моря, достаточно подробно изложены в работе [10].

Реальность полученных в настоящей работе результатов оценена по местоположению выявленных скоплений ГГ и “факелов” метана. Эти данные получены в рамках многолетних экспедиционных наблюдений ТОИ ДВО РАН за период 1988–2021 гг. и частично опубликованы в отчётах и [16]. Как следует из рис. 1 г, обнаруженные контактными методами скопления ГГ располагаются и тяготеют к акватории, где верхняя граница ЗСГГ находится в водной толще.

Более сложная, но объяснимая, картина распределения выявленных “факелов” метана на акватории Охотского моря (рис. 1 г). Они распределены не только в зоне, где в толще вод отсутствуют термобарические условия для формирования и существования ГГ, но и в глубоководной части моря. Существование “факелов” метана на мелководных участках исследуемой акватории связано, во-первых, с наличием залежей нефти и газа, активных разломов, с одной стороны, и, частично, с отсутствием термобарических условий для формирования и существования ГГ, которые, “цементируя” донные отложения, могут выполнять роль флюидоупора, с другой стороны. Во-вторых, на этих участках моря верхняя граница ЗСГГ может располагаться как на дне моря, так и в верхней части осадочного слоя. Поэтому здесь могут формироваться благоприятные термические условия для диссоциации ГГ. Подтверждением этому могут служить известные факты как сезонных, так и межгодовых колебаний температуры воды в Охотском море [17, 22, 24, 25].

Наличие “факелов” метана в глубоководной части моря, где в толще вод имеются благоприятные термобарические условия для формирования и существования ГГ, можно объяснить наличием следующих факторов. Так, за счет сейсмо-тектонических процессов могут происходить нарушения структуры вмещающей толщи осадков, особенно в зонах разломов, которые могут быть причиной газовых выбросов. Как известно, в настоящее время в охотоморском регионе наблюдаются эпизоды сейсмической и вулкано-магматической активности. Вторым фактором могут быть дополнительные источники, в виде скоплений углеводородов, очагов постмагматической активности и др., но это планируется к рассмотрению в другой публикации авторов.

В результате проведённого исследования по средним годовым данным за период 1929–2020 гг.

выявлены основные закономерности пространственного распределения параметров верхней границы ЗСГГ (температуры воды, солёности, глубины залегания верхней границы в толще вод) в Охотском море. Получено, что минимальные температура воды и заглубление верхней границы ЗСГГ выделяются у восточного склона о-ва Сахалин, а максимальные — характерны для района, прилегающего к центральным и северным проливам Курильской гряды. Реальность полученных результатов оценена по фактическим данным экспедиционных наблюдений (наличие ГГ и “факелов” метана).

Представленные результаты будут востребованы для постановки поисковых работ по ГГ в Охотском море, а также при исследовании влияния ГГ и последствий их диссоциации на распространение бентосной фауны. Кроме того, положение верхней границы и протяжённость ЗСГГ в водной толще являются необходимыми условиями при моделировании сценариев реакции ГГ на изменения температуры у морского дна и оценки возможности выделения метана в экосистему. Выявленные в представленной работе закономерности найдут применение в модельных расчётах при исследовании динамики растворения всплывающих пузырьков газа в водной толще.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают признательность рецензентам за конструктивные замечания. Работа способствует достижению целей проекта ГЕОМИР в рамках национального плана действий в Десятилетии ООН наук об океане в интересах устойчивого развития (2021–2030 гг.) и рабочей группы ВЕСТПАК “Газогидраты и потоки метана в Индо-Тихоокеанском регионе”.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено в рамках темы государственного задания ТОИ ДВО РАН на 2024–2026 гг. “Исследование структуры и динамики вод Мирового океана в условиях современных климатических изменений”, регистрационный номер 124022100079-4.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макогон Ю. Ф. Газогидраты. История изучения и перспективы освоения // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2010. № 2. С. 5–21.
2. Reagan M. T., Moridis G. J., Elliott S. M., Maltrud M. Contribution of oceanic gas hydrate dissociation to

the formation of Arctic Ocean methane plumes // J. Geophys. Res. 2011. V. 116. C09014.

3. Трофимук А. А., Черский Н. В., Царев В. П. Особенности накопления природных газов в зонах гидратообразования Мирового океана // Доклады Академии наук СССР. 1973. Т. 212. № 4. С. 931–934.
4. Метан и климатические изменения: научные проблемы и технологические аспекты / Под ред. акад. РАН В. Г. Бондура, акад. РАН И. И. Мохова, чл.-кор. РАН А. А. Макоско. М.: Российская академия наук, 2022. 388 с.
5. 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.
6. Веселов О. В., Гордиенко В. В., Куделькин В. В. Термобарические условия формирования газогидратов в Охотском море // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2006. № 3(5). С. 62–68.
7. Chen Z., Bai W., Xu W. Prediction of stability zones and occurrence zones of multiple composition natural gas hydrate in marine sediments // Chinese Journal of Geophysics. 2005. V. 48. № 4. P. 936–945.
8. Dickens G. R., Quinby-Hunt M. S. Methane hydrate stability in seawater // Geophys. Res. Lett. 1994. V. 21. № 19. P. 2115–2118.
9. Елисеев А. В. Глобальный цикл метана: обзор // Фундаментальная и прикладная климатология. 2018. Т. 1. С. 52–70.
10. Bogoyavlensky V., Kishankov A., Yanchevskaya A., Bogoyavlensky I. Forecast of Gas Hydrates Distribution Zones in the Arctic Ocean and Adjacent Offshore Areas // Geosciences. 2018. V. 8. № 12. P. 453. <https://doi.org/10.3390/geosciences8120453>
11. McGinnis D. F., Greinert J., Artemov Y., Beaubien S. E., Wuest A. Fate of rising methane bubbles in stratified waters: How much methane reaches the atmosphere? // Journal of Geophysical Research. 2006. V. 111. C09007. <https://doi.org/10.1029/2005JC003183>.
12. Granin N. G., Makarov M. M., Kucher K. M., Gnatovsky R. Y. Gas seeps in Lake Baikal-detection, distribution, and implications for water column mixing // Geo-Marine Letters. 2010. V. 30. № 3-4. P. 399–409. <https://doi.org/10.1007/s00367-010-0201-3>
13. Biastoch A., Treude T., Rüpke L. H., Riebesell U., Roth C., Burwicz E. B., Park W., Latif M., Böning C. W., Madec G., Wallmann K. Rising Arctic Ocean temperatures cause gas hydrate destabilization and ocean acidification // Geophys. Res. Lett. 2011. V. 38. L08602. <https://doi.org/10.1029/2011GL047222>

14. Giustiniani M., Tinivella U., Jakobsson M., Rebesco M. Arctic ocean gas hydrate stability in a changing climate // *J. Geol. Res.* 2013. V. 2013. 783969. <https://doi.org/10.1155/2013/783969>
15. Reagan M. T., Moridis G. J. Oceanic gas hydrate instability and dissociation under climate change scenarios // *Geophys. Res. Lett.* 2007. V. 34. L22709. <https://doi.org/10.1029/2007GL031671>
16. Обжуров А. И., Шакиров Р. Б. Комплексные геолого-геофизические исследования газогидратов в Охотском море / В кн.: Геология и геоэкология континентальных окраин Евразии. Вып. 4. Специальный выпуск. Геология и полезные ископаемые окраинных морей Евразии. М.: ГЕОС, 2012. С. 122–136.
17. Лучин В. А. Сезонная изменчивость температуры воды в деятельном слое дальневосточных морей / В кн.: Дальневосточные моря России. Т. 1. М.: Наука, 2007. С. 232–252.
18. Морешкин К. В. Новая схема поверхностных течений Охотского моря // *Океанология.* 1964. Т. 4. С. 641–643.
19. Лучин В. А. Диагностический расчет циркуляции вод Охотского моря в летний период // *Тр. ДВНИИ.* 1982. Вып. 96. С. 69–76.
20. Fayman P. A., Prants S. V., Budyansky M. V., Uleysky M. Y. Simulated pathways of the northwestern pacific water in the Okhotsk Sea // *Izv. Atmospheric and Oceanic Physics.* 2021. V. 57. № 3. P. 329–340.
21. Talley L. D. An Okhotsk water anomaly: Implications for ventilation in the North Pacific // *Deep Sea Res.* 1991. Part A. № 38. Suppl. 1. P. 171–190.
22. Gladyshev S., Talley L., Kantakov G., Khen G., Wakatsuchi M. Distribution, formation, and seasonal variability of Okhotsk Sea Mode Water // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108. № C6. 3186. <https://doi.org/10.1029/2001JC000877>
23. Гинсбург Г. Д., Грамберг И. С., Соловьев В. А. Геология субмаринных газовых гидратов // *Советская геология.* 1990. № 11. С. 12–19.
24. Лучин В. А., Матвеев В. И. Межгодовая изменчивость термического состояния холодного подповерхностного слоя Охотского моря // *Изв. ТИНРО.* 2016. Т. 187. С. 205–216.
25. Фигуркин А. Л. Изменчивость термохалинного состояния придонных вод северной части Охотского моря // *Изв. ТИНРО.* 2011. Т. 166. С. 255–274.

SPATIAL VARIABILITY OF THE METHANE HYDRATES STABILITY ZONE UPPER BOUNDARY PARAMETERS IN THE WATER COLUMN OF THE SEA OF OKHOTSK

R. B. Shakirov, V. A. Luchin, E. A. Petrova[#]

Presented by Academician of the RAS S.A. Dobrolyubov February 24, 2024.

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russian Federation

[#]*E-mail: petrova@poi.dvo.ru*

Based on all available oceanological information (131, 286 stations carried out from 1929 to 2020), for the first time for the Sea of Okhotsk, spatial patterns of the methane hydrate stability zone upper boundary (water temperature, salinity, depth of the upper boundary in the water column) parameters distribution are presented and discussed. The methane hydrate stability zone model is considered. We are revealed that in the Sea of Okhotsk, the minimum water temperature and the minimum depth of the upper boundary of the gas hydrate stability zone (less than 1°C and 300–320 m, respectively) are located near the eastern slope of Sakhalin Island. The maximum water temperature and maximum depth of the upper boundary (1.5–1.7°C and 340–350 m, respectively) are characteristic of the area adjacent to the central and northern straits of the Kuril Islands Arc, as well as above the slope of the Kamchatka Peninsula. The salinity values at the upper boundary of the methane hydrate stability zone in the Sea of Okhotsk vary within a narrow range from 33.4 to 33.6 psu, which is quite close to conditions for the stability of methane hydrate in seawater obtained by us. An area where in the water column there are no favorable thermobaric conditions for the formation and existence of methane hydrates has been identified.

Keywords: gas hydrates, methane, upper boundary of the stability zone, water temperature, salinity, Sea of Okhotsk