

УДК 553.981+550.8.012

DOI 10.31087/0016-7894-2021-3-85-94

Использование ГИС-технологий при картировании потенциально газогидратоносных акваторий

© 2021 г. | А.А. Щур, Т.В. Матвеева, А.В. Бочкарев

ФГБУ «ВНИИОкеангеология», Санкт-Петербург, Россия; vniio_semenova@mail.ru; tv_matveeva@mail.ru; bochkarev_alex@inbox.ru

Поступила 01.04.2021 г.

Доработана 05.04.2021 г.

Принята к печати 20.04.2021 г.

Ключевые слова: зона стабильности газовых гидратов; потенциально гидратоносные акватории; ГИС-технологии.

Аннотация: ГИС-технологии являются эффективным инструментом для картирования потенциально гидратоносных акваторий и вычисления площадей и объемов зоны стабильности газовых гидратов. Практическое применение этих расчетов относится к области ресурсных оценок количества метана в газовых гидратах и прогнозирования инженерно-геологических опасностей, вызванных разложением гидратов на газ и воду при проведении морских строительных и буровых работ. Выполнение такого прогнозного картирования требует обработки крупных массивов данных, наличие регулярной сети и математических расчетов. Современные ГИС-технологии позволяют успешно справиться с этими трудностями и оптимизировать громоздкие вычисления и трудоемкое картирование. В статье представлены результаты успешного использования программного пакета ArcGIS при подготовке данных, картировании гидратоносных акваторий и вычислении площадей и объемов зоны стабильности газовых гидратов на примере акватории Северного Ледовитого океана.

Для цитирования: Щур А.А., Матвеева Т.В., Бочкарев А.В. Использование ГИС-технологий при картировании потенциально газогидратоносных акваторий // Геология нефти и газа. – 2021. – № 3. – С. 85–94. DOI: 10.31087/0016-7894-2021-3-85-94.

Geographic Information System for the forecast mapping of gas hydrate-bearing areas

© 2021 | A.A. Shchur, T.V. Matveeva, A.V. Bochkarev

VNIIOkeangeologia, Saint-Petersburg, Russia; vniio_semenova@mail.ru; tv_matveeva@mail.ru; bochkarev_alex@inbox.ru

Received 01.04.2021

Revised 05.04.2021

Accepted for publication 20.04.2021

Key words: gas hydrate stability zone; gas hydrate-bearing water areas; forecast mapping; Geographic Information System.

Abstract: GIS technologies are an efficient tool for mapping gas hydrate bearing water areas and calculating the acreage and volume of the gas hydrate stability zone. These calculations are useful in resource assessment of methane amount in gas hydrates and prediction of engineering-geological hazards responding to hydrate decomposition into gas and water in the course of offshore well construction. This predictive mapping requires processing of large datasets, a regular grid, and mathematical computing. State-of-the-art technologies allow successful meeting these challenges and optimising cumbersome calculations and labour-intensive mapping. By the example of the Arctic Ocean water area, the authors present the results of the successful use of the ArcGIS software package in data preparation, hydrate-bearing water areas mapping, and calculation of acreage and volume of gas hydrate stability zone.

Shchur A.A., Matveeva T.V., Bochkarev A.V. Geographic Information System for the forecast mapping of gas hydrate-bearing areas. *Geologiya nefi i gaza*. 2021;(3):85–94. DOI: 10.31087/0016-7894-2021-3-85-94. In Russ.

Введение

Газовые гидраты — кристаллические соединения, образующиеся из воды и газа при относительно низких температурах, достаточно высоких концентрациях и давлениях за счет нехимических вандерваальсовских взаимодействий между молекулами воды и газа. Большинство компонентов природных газов, за исключением водорода, гелия, неона, нормального бутана и более тяжелых УВ, способно к образованию газовых гидратов. Самым распространенным природным газом, образующим гидраты, является метан. Единица объема гидрата метана может содер-

жать до 164 объемов газа (при нормальных условиях) [1]. Этот феномен ставит гидраты УВ-газов в один ряд с полезными ископаемыми третьего тысячелетия — сланцевыми газами и солнечной энергией. Следует отметить, что гидраты УВ-газов — одна из форм существования обычного природного газа в недрах, наряду с газами, в свободном, водорастворенном и сорбированном состояниях. Отличает гидраты то, что их образование и сохранение в недрах в твердой фазе определяется жесткими термобарическими и геологическими условиями. Еще одной особенностью гидратов является их переменный состав — это нестехиометрические соединения, в состав которых,

помимо воды, может входить большинство УВ-газов и их смесей. Это обстоятельство вносит определенные сложности в прогнозирование условий газогидратообразования в недрах.

Благоприятные термобарические условия существования газовых гидратов характерны для большей части Мирового океана, начиная с глубин воды около 400 м в низких широтах и около 200 м — в высоких. Это объясняется тем, что необходимые для процесса образования гидратов барические условия в основном обеспечиваются давлением столба воды, т. е. глубиной моря. А самым главным фактором, контролирующим температуру, является поток тепла из недр. Именно эти два фактора — тепловое поле и глубина моря способствуют образованию в недрах особой зоны — интервала поддонного разреза, где метастабильные гидраты УВ-газов могут сохранять свое кристаллическое состояние. Эта зона получила название зоны стабильности газовых гидратов (ЗСГГ). Характеристиками ЗСГГ являются мощность и площадное распространение. В субаквальных обстановках ЗСГГ приурочена к так называемым потенциально газогидратоносным акваториям. Акваторию, где в осадочном чехле по термобарическим и геологическим условиям образование (и/или сохранение) гидратов УВ-газов в принципе возможно, называют потенциально газогидратоносной [1, 2]. На мелководных арктических шельфах, характеризующихся переохлажденностью, температурный режим контролируется также и наличием подводной мерзлоты и климатическими условиями. Но в данной статье рассмотрены условия образования гидратов не связанных с подводной мерзлотой, а образующихся в относительно глубоководной части Северного Ледовитого океана в ходе восходящей миграции УВ.

Поскольку ключевой характеристикой потенциально газогидратоносных акваторий является наличие ЗСГГ, практически эта задача сводится к картированию распространения зоны стабильности и вычислению ее мощности. Но в таком случае гидраты залегали бы сплошным слоем под дном Мирового океана, как это предполагалось еще в середине XX в. На деле, кроме наличия ЗСГГ, потенциально газогидратоносные акватории могут выделяться по целому ряду признаков — тектоническому положению, наличию флюидопроводников, условиям газогенерации и пр. [1]. Условия генерации газа в количествах, достаточных для гидратообразования, а также обстановки, благоприятные для переноса газосодержащих флюидов в направлении дна, реализуются в районах континентальных и островных склонов и подножий, в глубоководных районах внутренних и окраинных морей, т. е. в районах с мощным молодым осадочным чехлом, богатым органикой [2]. Остановимся лишь на двух ключевых признаках — наличии ЗСГГ и условиях для генерации УВ-газов, определяемых мощностью осадочных отложений.

Чтобы разграничить акватории, где гидратообразование возможно или невозможно, и вычислить соответствующие площади, необходимо иметь набор данных, включающий сведения о глубине моря (батиметрию) и изменчивости температуры у дна, а также подходящую равновесную кривую гидратообразования, вычисляемую эмпирически или в ходе лабораторных экспериментов. Чаще всего используется равновесная кривая гидрата метана, поскольку подавляющее большинство известных скоплений газовых гидратов на 99 % состоит именно из этого газа. Для расчета и картирования зоны стабильности гидратов требуются данные о тепловом режиме недр — о тепловом потоке и геотермическом градиенте в недрах, теплопроводности гидратовмещающих пород. Именно температурные данные вносят наибольшую неопределенность в расчеты ввиду общей низкой геотермической изученности акваторий. Геотермические исследования являются своеобразным камнем преткновения, негативно влияющим на точность термобарических расчетов. По этой причине для геотермического районирования используют дополнительные построения.

После того, как расчеты мощности ЗСГГ и ее картирование завершены, следующим важным этапом является районирование потенциально газогидратоносных акваторий по мощности осадочного чехла, т. е. исключение из акваторий с благоприятными термобарическими условиями тех участков, где малые мощности осадочной толщи не способствуют генерации УВ-газов в количестве, достаточном для газогидратообразования. Критерием здесь является пересыщение газом поровых вод в пределах ЗСГГ, что в условиях относительно низких температур и высоких давлений и является триггером для начала гидратообразования. Поскольку генерация газа (как биохимического, так и катагенетического) определяется мощностью осадочных толщ и содержанием в них ОВ, для гидратообразования, как и для генерации традиционных нефти и газа, минимальная мощность осадочных отложений составляет 2 км.

Работы по прогнозному картированию на гидраты начали проводиться с конца 1980-х гг. Ввиду очевидной плохой изученности акваторий в отношении гидратов и отсутствия компьютерной и вычислительной баз определения частично проводились при помощи номограмм — особых графиков, зависящих от многих параметров и позволяющих получить приближенное значение требуемых величин. Картирование по регулярной сети представляло собой весьма трудоемкий процесс и осуществлялось вручную. Неспоримым плюсом таких работ был профессиональный авторский подход, при котором все границы на прогнозных картах проводились с учетом знаний и опыта специалиста.

Картирование ЗСГГ и связанных с ними потенциально газогидратоносных акваторий представляет

сложность как из-за нехватки необходимых данных и плохой изученности многих акваторий, так и из-за отсутствия эффективных методических приемов. Поэтому в ходе таких работ часто используются математические модели и упрощенные решения, что существенно снижает качество и достоверность результатов.

Работы по прогнозному картированию на газовые гидраты ведутся во ВНИИОкеангеологии уже много лет. Опубликован ряд прогнозных карт, которые востребованы морскими геологами, нефтяниками, экологами [3, 4]. Однако именно работы последних 5 лет [1, 5–8], в ходе которых были разработаны, проанализированы и опробованы на практике различные методические подходы, программные и геоинформационные решения, позволили коллективу ВНИИОкеангеологии выйти на принципиально новый уровень прогнозного картирования условий газогидратоносности и дали возможность разработать авторскую методику, аналоги которой в российской литературе авторам данной статьи неизвестны. Ключевую роль в этих работах сыграло использование геоинформационных систем.

Цель данной статьи — представить авторский подход к прогнозному картированию потенциально газогидратоносных акваторий и оценке объема ЗСГТ фильтрогенных гидратов с помощью программной среды ArcGIS на примере российского сектора глубоководной части Северного Ледовитого океана.

Методика прогнозного картирования акваторий с благоприятными для гидратообразования термобарическими условиями на основе ArcGIS

Подготовка массивов данных. Выявление зон с благоприятными для газогидратообразования термобарическими условиями проводится на основе сопоставления распределения температуры в толще отложений с равновесными условиями гидратообразования. Для описания изменения температуры с глубиной необходимы сведения о температуре морского дна (обычно заменяется температурой морской придонной воды) и значении геотермического градиента и/или теплового потока и теплопроводности отложений. Для расчета равновесной кривой образования гидратов заданного состава необходимы сведения о глубине моря (давление газогидратообразователя соответствует гидростатическому давлению), составе гидратообразующего газа и солёности поровой воды. Точки пересечения температурного профиля и равновесной кривой позволяют выделить интервалы осадочного разреза или водной толщи с благоприятными для образования гидратов термобарическими условиями.

Сведения о придонных температурах могут быть получены из открытых глобальных баз данных и атласов [9], океанологических моделей [10], при использовании зависимости придонной темпера-

туры воды от глубины моря (при наличии таковой). В данной статье по картированию ЗСГТ на акватории Северного Ледовитого океана авторы использовали массив осредненных в узлы регулярной сетки ($0,083 \times 0,083^\circ$) океанологических данных физической модели GLORYS12V1 [11], включающий сведения о батиметрии и значениях придонной температуры.

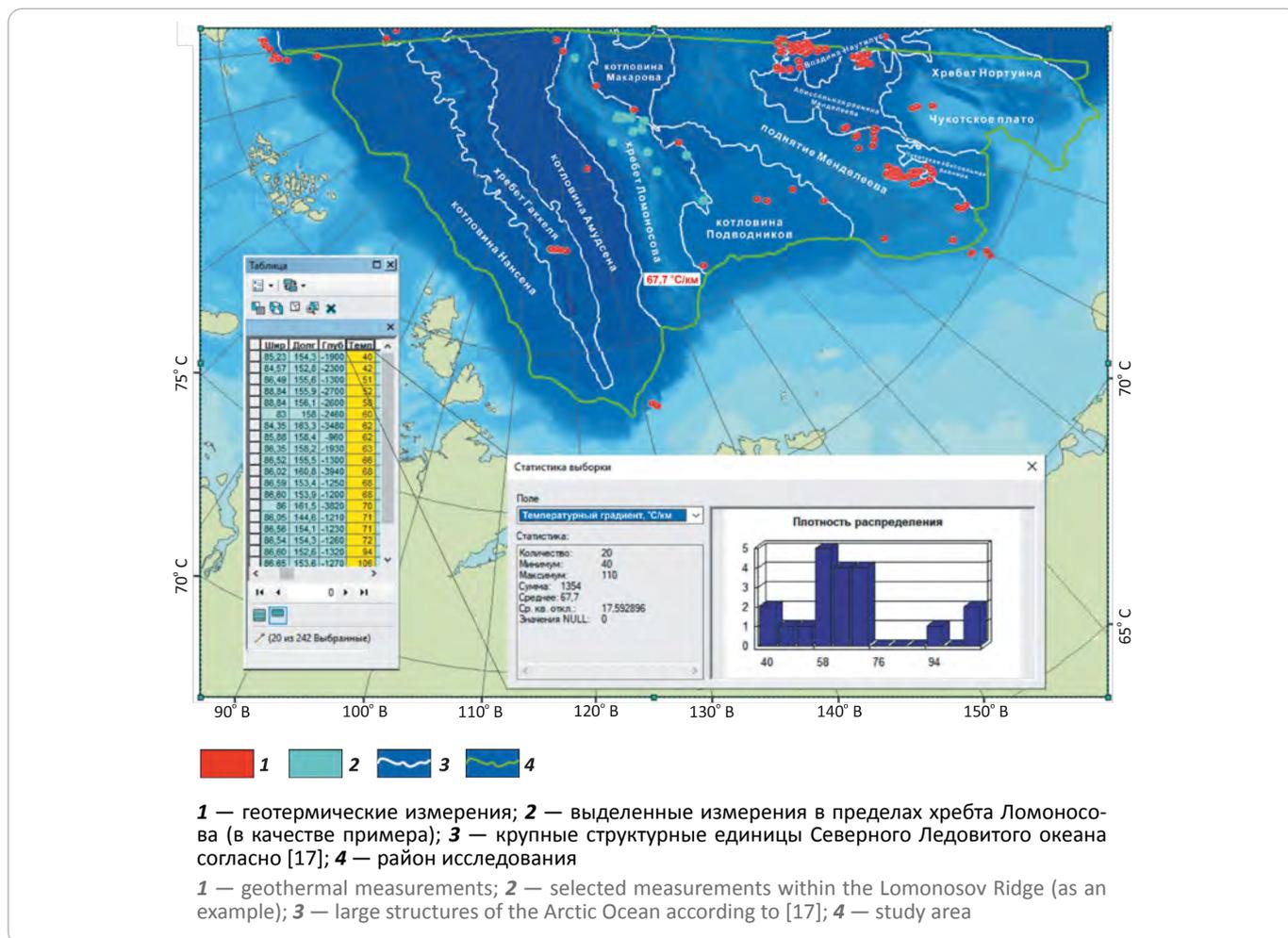
Сведения о геотермическом градиенте либо о тепловом потоке и теплопроводности отложений могут быть получены в результате геотермических измерений, многие из которых включены в глобальную базу данных теплового потока [12], или в ходе геотермического моделирования. В частности, при расчете мощности ЗСГТ авторы статьи использовали значения геотермического градиента из глобальной базы данных теплового потока [12] и некоторых региональных исследований, пока не вошедших в глобальную базу [13, 14]. Как известно, наиболее полные и точные данные о распределении температуры по разрезу можно получить при термокаротаже выстоявшихся скважин. Однако из-за отсутствия скважин в подавляющем большинстве случаев при проведении геотермических измерений на акваториях используется зондовый метод, позволяющий получить данные о геотермическом градиенте и теплопроводности поддонных отложений и значении глубинного теплового потока. Принимая во внимание, что значение геотермического градиента, полученное зондовым методом, характеризует лишь неглубокий поддонный горизонт, авторы статьи предполагают неизменность градиента либо его уменьшение в неконсолидированных отложениях глубоководной части Северного Ледовитого океана. Это предположение связано с повышением коэффициента теплопроводности отложений с глубиной и отчасти подтверждается результатами измерений теплопроводности в скважинах проекта ACEX [15]. Исходя из этого, значения геотермического градиента, полученные в верхней части разреза, могут не вполне корректно отражать реальную картину распределения температуры по всей глубине осадочной толщи. Можно предположить, что истинное (в противоположность измеренному) значение геотермического градиента будет уменьшаться с глубиной. Таким образом, если при расчете мощности ЗСГТ использовать измеренный зондом геотермический градиент, то это значение с большой долей вероятности будет максимальным из всех возможных для данной точки наблюдения. Также следует отметить, что чем выше температурный градиент (при прочих равных условиях), тем выше располагается точка пересечения линии температур с равновесной кривой образования газовых гидратов и, соответственно, уровень подошвы ЗСГТ. Следовательно, максимальному значению геотермического градиента будет соответствовать минимальная расчетная мощность ЗСГТ в данной точке. Исходя из вышесказанного, мощность ЗСГТ, рассчитанная на



GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS AND GIS PROJECTS

Рис. 1. Определение среднего значения геотермического градиента для отдельных структур Северного Ледовитого океана с помощью инструментов Выделение и Статистика (batimетрия из [16])

Fig. 1. Determining the average geothermal gradient for selected Arctic Ocean structures using the Selection and Statistics tools (bathymetry is taken from [16])



основании данных геотермического зондирования, будет минимальной, что необходимо учитывать при использовании полученных на этой основе прогнозных карт.

Согласно предлагаемой авторами статьи методике, следующим этапом является присвоение значений геотермического градиента каждой точке имеющегося массива океанологических данных. В случае достаточной плотности геотермических наблюдений на исследуемой акватории, распределение геотермического градиента по площади может быть определено различными методами интерполяции посредством дополнительных модулей программного пакета ArcGIS (Spatial Analyst, Geostatistic или 3D-Analyst). В случае же явной недостаточности геотермических данных, как например на акватории Северного Ледовитого океана (рис. 1), значения геотермического градиента, полученные в ходе зондирования, осредняются либо для всей области исследования, либо для отдельных структурных элементов

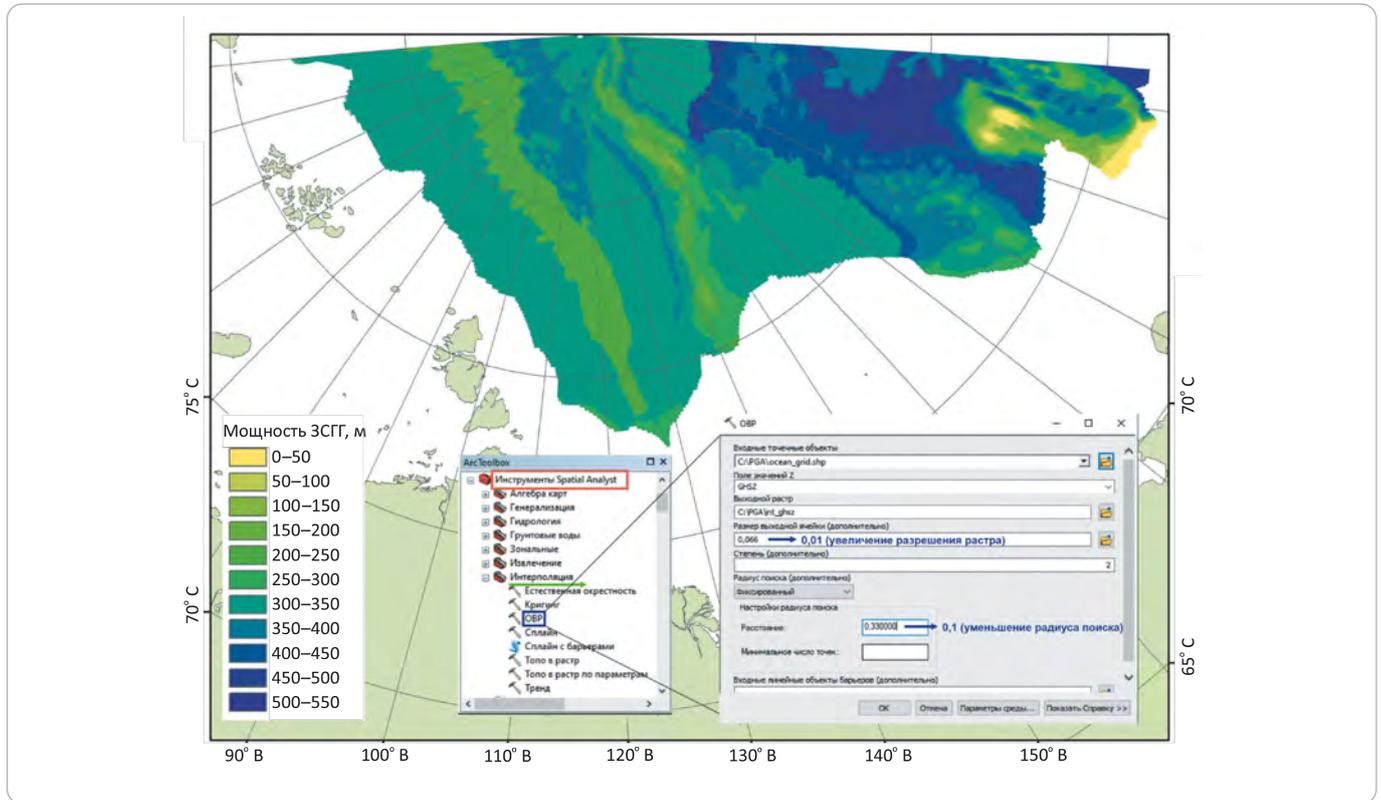
акватории. В настоящей статье осреднение значений геотермического градиента в пределах крупных структурных единиц Северного Ледовитого океана произведено с помощью инструментов **Выделение** и **Статистика**. Эти структурные единицы следующие: хребет Гаккеля, котловины Нансена и Амундсена, хребет Ломоносова, поднятие Менделеева, котловины Макарова и Подводников, абиссальные равнины Чукотская и Менделеева, Чукотское плато и хребет Нуртуинд, впадина Наутилус, выделенные согласно карте [17] (см. рис. 1).

Полученные для указанных структур средние значения геотермического градиента добавляются в общий массив океанологических данных с присвоением каждой точке массива соответствующего ей значения градиента.

Расчет мощности ЗСГТ. После того как все необходимые океанологические и геотермические данные собраны в единый массив, содержащий данные по колонкам «Широта», «Долгота», «Придонная

Рис. 2. Мощность зоны стабильности газовых гидратов в евразийском сегменте глубоководной части Северного Ледовитого океана — результат интерполяции методом OBP в модуле Spatial Analyst из программного пакета ArcGIS (инструменты отображены на врезках)

Fig. 2. Thickness of the zone of gas hydrate stability in the Eurasian part of the Arctic Ocean: the result of Inverse Distance Weighting in the Spatial Analyst module of the ArcGIS software system (the tools are shown in the insets)



температура», «Глубина моря», «Геотермический градиент», производится вычисление мощности ЗСГГ. Для этого в каждой точке массива по значениям придонной температуры и геотермического градиента строится температурный профиль (термограмма). При сопоставлении термограммы с равновесной кривой гидратообразования с помощью специализированного программного обеспечения «GHSZ_VNIIО» (разработка ФГБУ «ВНИИОкеангеология») вычисляется гидростатическое давление (глубина от уровня моря) в точке их пересечения.

В статье использована равновесная кривая для системы «гидрат – вода + 100 %-й метан + 3,5 %-й раствор NaCl», рассчитанная с помощью программного обеспечения Hydoff.exe [18], в предположении, что соленость поровых вод равна солености придонных вод (35 ‰). Как известно, присутствие в составе газогидратообразователя даже небольших примесей более тяжелых гомологов увеличивает мощность ЗСГГ при прочих равных условиях. Поэтому, придерживаясь принципа оценки минимальной мощности ЗСГГ, для расчетов в качестве газогидратообразователя авторы статьи приняли чистый метан. Разность между рассчитанной глубиной и глубиной моря является значением мощности ЗСГГ в осадочной толще для

данной точки измерения. Значения долготы и широты в созданном массиве данных «Долгота», «Широта», «Мощность ЗСГГ» соответствуют координатам узлов начального океанологического массива данных.

Согласно расчетам авторов статьи, мощность ЗСГГ фильтрогенных гидратов в пределах акватории Северного Ледовитого океана варьирует от 0 до 515 м при среднем значении 350 м.

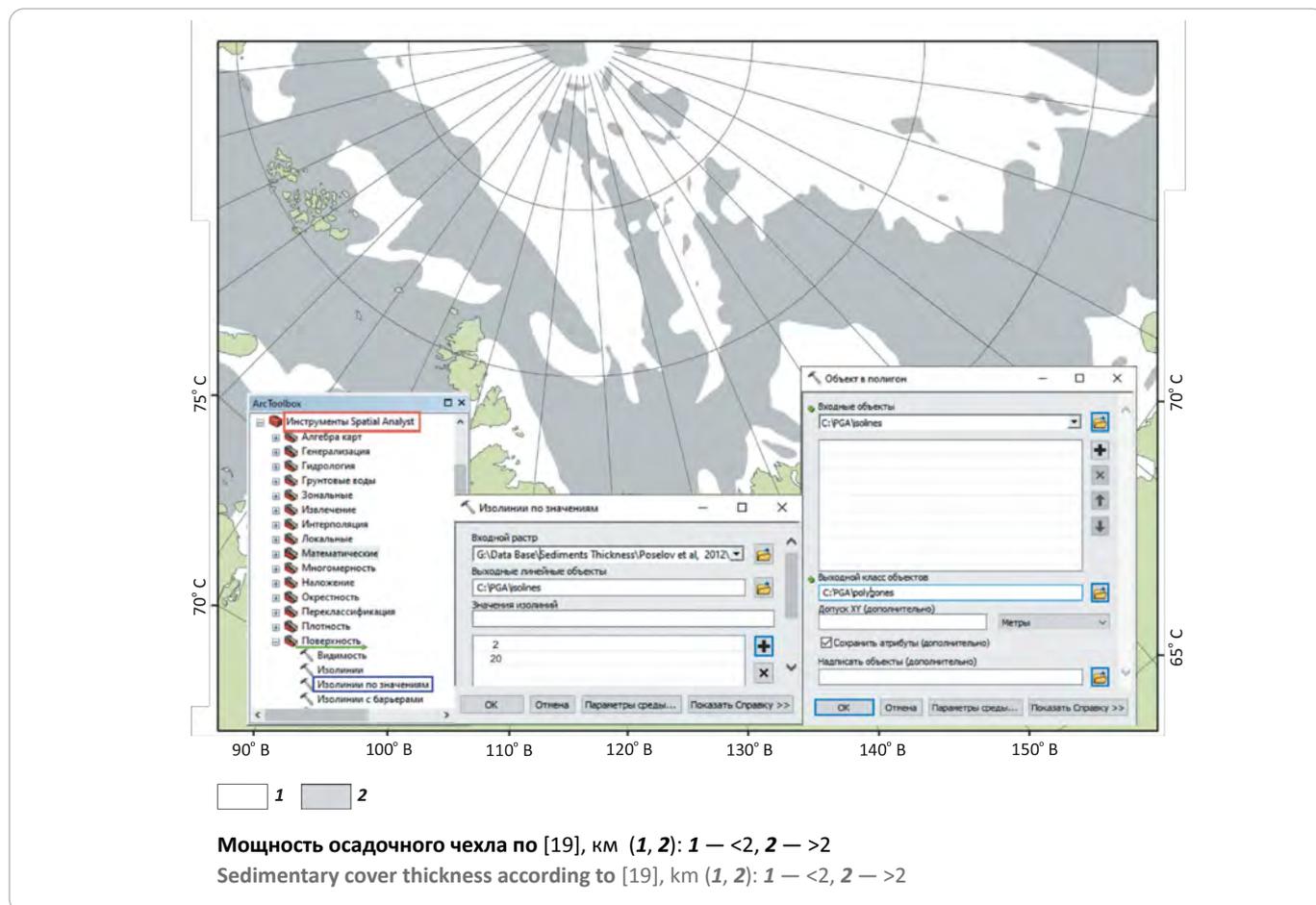
Картирование мощности ЗСГГ в ArcGIS. На основе полученного массива данных в ArcGIS создается точечный шейп-файл, содержащий информацию о мощности ЗСГГ. Для картирования ЗСГГ с отображением ее мощности в определенной цветовой схеме необходимо на основании значений в точках шейп-файла провести интерполяцию. Выбор метода интерполяции в модулях Spatial Analyst, Geostatistic или 3D-Analyst обусловлен решаемой задачей, регулярностью и плотностью данных. Последнее важно учитывать, поскольку при низкой плотности и нерегулярности сети данных достоверность полученных результатов в значительной степени зависит от применения того или иного метода интерполяции. Подбор метода интерполяции при нерегулярной сети наблюдений — довольно сложная задача, и решаться она должна путем проведения детального исследо-



GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS AND GIS PROJECTS

Рис. 3. Районирование акватории по мощности осадочного чехла

Fig. 3. Zoning of water area according to sedimentary cover thickness



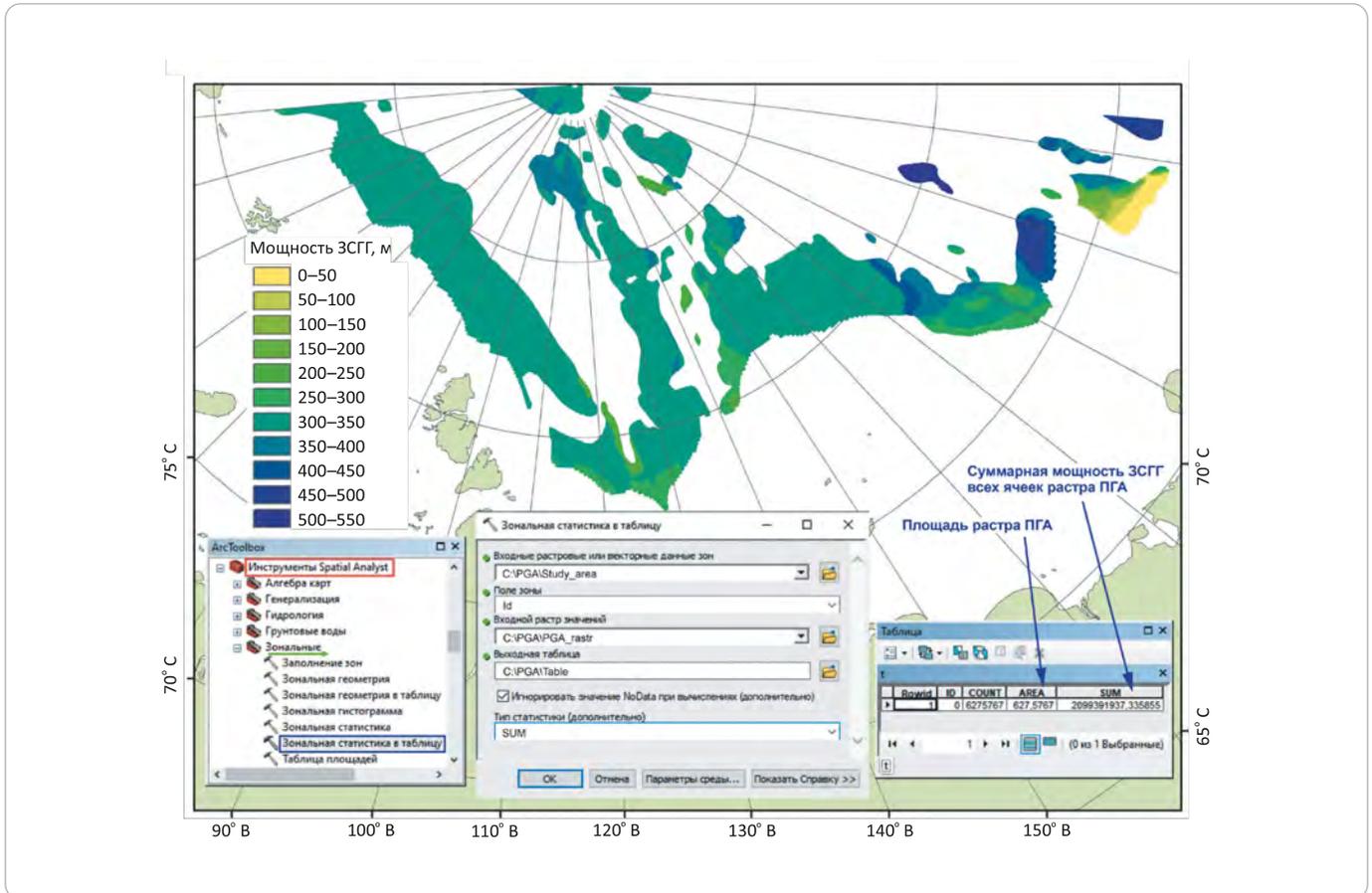
вания применимости и корректности использования того или иного метода интерполяции. Одним из критериев правильности метода является совпадение разброса фактических значений с тем, который предлагает метод. Для построения интерполяции мощности ЗСГГ авторы статьи использовали регулярный массив (созданный на базе регулярного массива океанологических данных, которые, в свою очередь, получены в ходе моделирования на базе нерегулярной сети наблюдений) с достаточно высокой плотностью данных. Поэтому использование того или иного метода интерполяции не столь принципиально. В частности, применение детерминированного метода «Обратно взвешенных расстояний» (ОВР) и геостатистического универсального метода «Кригинг» показало незначительно отличающиеся друг от друга результаты. В качестве рабочего варианта выбран метод ОВР, при котором разброс значений мощности ЗСГГ наиболее точно соответствует разбросу значений мощности ЗСГГ массива фактических данных. В результате интерполяции значений мощности ЗСГГ в опорных точках получена растровая прогнозная карта мощности ЗСГГ для всей исследуемой акватории (рис. 2).

Картирование потенциально газогидратоносных акваторий. Как отмечалось выше, еще одним важным критерием, определяющим и возможность газогенерации, и дальнейшее образование газовых гидратов, является мощность осадочного чехла. Газогидратоносные акватории (по аналогии с нефтегазоносными бассейнами) всегда приурочены к достаточно мощным толщам отложений. Согласно данным, приведенным в работе [1], оптимальной мощностью отложений, обеспечивающей генерацию как биохимического, так и катагенетического газа, является мощность осадочного чехла 2 км.

Для картирования областей с недостаточной для газогенерации мощностью отложений в пределах акватории Северного Ледовитого океана была выбрана модель мощности осадочного чехла арктических морей и Северного Ледовитого океана из работы [19]. Исходная модель представлена в растровом виде. Используя инструмент **Spatial Analyst/Поверхность/Изолинии по значениям**, на основе растра создаются линейные шейп-файлы с заданными изолиниями мощности осадочного чехла. Авторы статьи задали граничное значение 2 км. После

Рис. 4. Потенциально газогидратоносные акватории в пределах акватории Северного Ледовитого океана с отображением площади потенциально газогидратоносных акваторий (ПГА) и мощности ЗСГГ (батиметрия из [16])

Fig. 4. Potentially gas hydrate bearing water areas (ПГА) and gas hydrate stability zone (ЗСГГ) in the Arctic Ocean (bathymetry from [16])



удаления разрывов в полученных линейных объектах линейные шейп-файлы были преобразованы с помощью инструмента **Управление данными/Пространственные объекты/Объект в полигон**. В результате получены полигональные шейп-файлы с участками мощностей осадочного чехла менее 2 км и более 2 км (рис. 3).

На следующем этапе с помощью инструмента **Вырезание** из точечного шейп-файла со значениями мощности ЗСГГ и полигонального шейп-файла с участками акватории Северного Ледовитого океана с мощностью осадочного чехла более 2 км был создан результирующий точечный шейп-файл, представляющий собой карту потенциально газогидратоносных акваторий в пределах акватории Северного Ледовитого океана, созданную на основе двух критериев — наличия зоны стабильности гидратов метанового состава и достаточной для генерации УВ мощности осадочных отложений. Для отображения мощности ЗСГГ в цветовой схеме проведена интерполяция конечного точечного шейп-файла и получен растр с непрерывной поверхностью мощности ЗСГГ в пределах потенциально газогидратоносных акваторий (рис. 4).

Вычисление площади и объема ЗСГГ. 2D-картирование ЗСГГ — предварительный этап работ по ресурсной оценке количества метана в газовых гидратах Северного Ледовитого океана и логическое завершение картирования потенциально газогидратоносных акваторий. Инструмент **Spatial Analyst/Зональные/Зональная статистика в таблицу** позволяет оценить общую площадь потенциально газогидратоносных акваторий — 628 тыс. км² (для сравнения, площадь распространения ЗСГГ на рис. 2 составляет 1634 тыс. км²) и сумму значений мощности ЗСГГ всех ячеек растра (см. рис. 4).

Произведение суммы мощностей ЗСГГ во всех ячейках на площадь ячейки растра с помощью инструмента **Spatial Analyst/Зональные/Таблица площадей** позволяет оценить объем ЗСГГ в пределах потенциально газогидратоносных акваторий. Перед применением данного инструмента необходимо предварительно преобразовать имеющийся растр интерполяции в целочисленный растр. Минимальное значение объема ЗСГГ в пределах потенциально газогидратоносных акваторий в российском секторе глубоководной части Северного Ледовитого

GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS AND GIS PROJECTS

океана по предварительным оценкам авторов статьи составляет $2,1 \cdot 10^{10} \text{ м}^3$.

Заключение

Опыт применения ArcGIS для прогнозирования условий гидратообразования показал, что ГИС-технологии являются эффективным инструментом для картирования потенциально гидратоносных акваторий и вычисления площадей и объемов зоны стабильности газовых гидратов. В данной статье с помощью программного пакета ArcGIS показаны решения следующих задач:

- создан массив океанологических (значений придонных температур и глубины моря) и геотермических данных в пределах евразийского сектора глубоководной части Северного Ледовитого океана — точечный шейп-файл с данными в атрибутивной таблице;

- рассчитана мощность ЗСГГ фильтрогенных гидратов в пределах района исследования в акватории Северного Ледовитого океана, значения которой варьируют от 0 до 515 м при среднем 350 м;

- проведено выделение областей акватории Северного Ледовитого океана с благоприятными термобарическими условиями с расчетной площадью 1634 тыс. км² — получен растр, содержащий информацию о мощности ЗСГГ;

- проведено районирование акватории Северного Ледовитого океана по благоприятным геолого-структурным условиям, в результате выделены области акватории с мощностью осадочного чехла более 2 км согласно карте [19];

- произведено картирование потенциально газогидратоносных акваторий Северного Ледовитого океана, оценена площадь 628 тыс. км² и объем ЗСГГ в пределах потенциально газогидратоносных акваторий, который составил не менее $2 \cdot 10^{10} \text{ м}^3$.

Отметим, что при помощи GIS-систем можно оценивать и другие критерии газогидратоносности в пределах потенциально газогидратоносных акваторий, используя для этого растры различных карт специального назначения и геологических, а также необходимые массивы данных.

Представленная в статье методика прогнозного картирования условий газогидратоносности будет служить основой для качественных и количественных оценок ресурсов гидратного газа, выполняемых в настоящее время коллективом ФГБУ «ВНИИ-Океангеология» в рамках государственного задания Федерального агентства по недропользованию. Результатом этой работы будет комплект прогнозных карт для всех акваторий морей России. Представляется, что полученные авторами статьи результаты, а также наработанные методы и подходы могут быть интересны широкому кругу специалистов — геологам-нефтяникам, инженерам-геологам, океанологам и экологам, мерзлотоведам — для прогноза зон нефтегазогенерации, природных и антропогенных опасностей, связанных с образованием и разложением газовых гидратов и многих других.

Представленная методика представляется теоретически хорошо обоснованной и интуитивно понятной. Авторам не известны российские аналоги выполненной работы и представленных результатов.

Литература

1. Матвеева Т.В., Семенова А.А., Щур Н.А., Логвина Е.А., Назарова О.В. Перспективы газогидратоносности Чукотского моря // Записки Горного института. – 2017. – Т. 226. – С. 387–396. DOI: 10.25515/PMI.2017.4.387.
2. Матвеева Т.В. Образование гидратов углеводородных газов в субаквальных обстановках // Мировой океан. Т. 3: Твердые полезные ископаемые и газовые гидраты в океане. – М.: Научный мир, 2018. – С. 586–697.
3. Соловьев В.А. Глобальные оценки количества газа в субмаринных скоплениях газовых гидратов // Геология и геофизика. – 2002. – Т. 43. – № 7. – С. 648–661.
4. Соловьев В.А. Арктические моря России. Условия газогидратоносности и потенциально гидратоносные акватории / Под ред. М.Н. Алексеева // Геология и полезные ископаемые шельфов России (атлас). – М.: Научный мир, 2004. – 108 с.
5. Semenova A., Nazarova O., Matveeva T., Shchur N. Prediction of gas hydrate formation in the shallow Arctic seas offshore Russia using measured gas composition // Abstracts from 9th International Conference on Gas Hydrates (ICGH9) (June 25–30, 2017). – Denver: Colorado School of Mines, 2017. – 3 p.
6. Semenova A.A., Matveeva T.V., Shchur N.A. Mapping of Gas Hydrate Stability Zone within the Arctic seas offshore Russia // Abstracts from the 13th International Conference on Gas in Marine Sediments (GIMS13) (19–22 September 2016, Tromsø). – Tromsø: The Gateway to the Arctic; 2016.
7. Matveeva T.V., Semenova A.A., Shchur N.A. Inferred permafrost-associated gas hydrate stability zone on the Siberian Arctic shelf // Geosciences. Special Issue: Gas Emissions and Crater Formation in Arctic. В печати.
8. Семенова А.А., Матвеева Т.В., Щур Н.А. Методические аспекты моделирования реликтовой субаквальной мерзлоты и зоны стабильности газовых гидратов на шельфе арктических морей // Криосфера Земли. В печати.
9. Национальное управление океанологическими и атмосферными исследованиями [Электронный ресурс] // NOAA. – Режим доступа: <https://www.ngdc.noaa.gov/> (дата обращения: 16.07.2020).
10. Физические модели Морской службы [Электронный ресурс] // Коперникус (Copernicus Marine Environment Monitoring Service, CMEMS). – Режим доступа: http://marine.copernicus.eu/services-portfolio/access-to-products/?option=com_csw&task=results&goback=1 (дата обращения: 16.07.2020).

11. *Global ocean physics reanalysis* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://resources.marine.copernicus.eu/?option=com_csw&view=details&product_id=GLOBAL_REANALYSIS_PHY_001_030 (дата обращения 16.07.2020).
12. *Глобальная База Данных Теплового Потока* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://heatflow.org/> (дата обращения 16.07.2020).
13. *Lachenbruch A.H., Marshall B.V., Ruppel C.D.* Post-expedition report for USGS T-3 Ice island heat flow measurements in the High Arctic ocean // U.S. Geological Survey data release. – 2016. DOI:10.5066/P91XQ3IS.
14. *O'Regan M., Pedro P., Stranne C., Jakobsson M., Koshurnikov A.* Surface heat flow measurements from the East Siberian continental slope and southern Lomonosov Ridge, Arctic Ocean // *Geochemistry Geophysics Geosystems*. – 2016. – № 17. – С. 1608–1622. DOI:10.1002/2016GC006284.
15. *O'Regan M., Moran K.* Deep water methane hydrates in the Arctic Ocean: Reassessing the significance of a shallow BSR on the Lomonosov Ridge // *Journal of Geophysical Research*. – 2010. – V. 115, B05102. – С. 1–13. DOI:10.1029/2009JB006820.
16. *Глобальная модель рельефа дна Земной поверхности GEBCO 2020* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/ (дата обращения 16.07.2020).
17. *Геоморфологическая карта Северного Ледовитого океана масштаба 1:5 000 000* // Отчет о результатах тематических и опытно-методических работ, связанных с геологическим изучением недр, выполненных за 2018 год. Приложение № 13. – СПб. : ВНИИОкеангеология, 2018.
18. *Sloan E.D.* Clathrate of Hydrates of Natural Gases. – New-York : Dekker, 1998. – 641 с. DOI:10.1201/9781420008494.
19. *Поселов В.А., Жолондз С.М., Трухалев А.И., Косьюк М.К., Поселова Л.Г., Буценко В.В., Павленкин А.Д., Верба В.В., Ким Б.И.* Карта мощности осадочного чехла Северного Ледовитого океана // *Геолого-геофизические характеристики литосферы Арктического региона*. – СПб : ВНИИОкеангеология, 2012. – Т. 233. – Вып. 8. – С. 8–14.

References

1. *Matveeva T.V., Semenova A.A., Shchur N.A., Logvina E.A., Nazarova O.V.* Perspektivy gazogidratonosnosti Chukotskogo moray [Prospects of gas hydrate presence in the chukchi sea]. *Zapiski Gornogo instituta*. 2017;226:387–396. DOI: 10.25515/PMI.2017.4.387. In Russ.
2. *Matveeva T.V.* Obrazovanie gidratov uglevodorodnykh gazov v subakval'nykh obstanovkakh [Formation of hydrocarbon gas hydrates in subaqueous settings.]. In: L.I. Lobkovskii, G.A. Cherkashev eds. *Mirovoi ocean T. 3: Tverdye poleznye iskopaemye i gazovye gidraty v okeane*. Moscow: Nauchnyi mir; 2018. pp. 586–697. In Russ.
3. *Solov'ev V.A.* Global'nye otsenki kolichestva gaza v submarinnykh skopleniyakh gazovykh gidratov [Global estimates of gas amount in subsea gas hydrate accumulations]. *Geologiya i Geofizika*, 2002;43(7);648–661. In Russ.
4. *Solov'ev V.A.* Arkticheskie morya Rossii. Usloviya gazogidratonosnosti i potentsial'no gidratonosnye akvatorii [Russian Arctic seas. Conditions for gas hydrate bearing capacity and potentially hydrate bearing water areas]. In: M.N. Alekseeva, ed. *Geologiya i poleznye iskopaemye shel'fov Rossii (atlas)*. Moscow: Nauchnyi Mir; 2004. 108 p. In Russ.
5. *Semenova A., Nazarova O., Matveeva T., Shchur N.* Prediction of gas hydrate formation in the shallow Arctic seas offshore Russia using measured gas composition // Abstracts from 9th International Conference on Gas Hydrates (ICGH9), June 25-30, 2017. Denver: Colorado School of Mines; 2017. 3 p.
6. *Semenova A.A., Matveeva T.V., Shchur N.A.* Mapping of Gas Hydrate Stability Zone within the Arctic seas offshore Russia. In: Abstracts from the 13th International Conference on Gas in Marine Sediments (GIMS13) (19–22 September 2016, Tromse). Tromse: The Gateway to the Arctic; 2016.
7. *Matveeva T.V., Semenova A.A., Shchur N.A.* Inferred permafrost-associated gas hydrate stability zone on the Siberian arctic shelf. *Geosciences. Special Issue: Gas Emissions and Crater Formation in Arctic*. In press.
8. *Semenova A.A., Matveeva T.V., Shchur N.A.* Metodicheskie aspekty modelirovaniya reliktovoi subakval'noi merzloty i zony stabil'nosti gazovykh gidratov na shel'fe arkticheskikh morei [Methodological aspects of modeling relict subaquatic permafrost and zones of gas hydrates stability on the shelf of the Arctic seas]. *Kriosfera Zemli*. In press.
9. *Natsional'noe upravlenie okeanologicheskimi i atmosferynymi issledovaniyami* [National Oceanological and Atmospheric Administration]. NOAA. Available at: <https://www.ngdc.noaa.gov/> (accessed 16.07.2020). In Russ.
10. *Fizicheskie modeli Morskoj sluzhby* [Physical models by Maritime Service] Copernicus (Copernicus Marine Environment Monitoring Service, CMEMS) Available at: http://marine.copernicus.eu/services-portfolio/access-to-products/?option=com_csw&task=results&go-back=1 accessed 16.07.2020). In Russ.
11. *Global Ocean Physics Reanalysis*. Available at: https://resources.marine.copernicus.eu/?option=com_csw&view=details&product_id=GLOBAL_REANALYSIS_PHY_001_030 (accessed 16.07.2020).
12. *Global'naya Baza Danykh Teplovogo Potoka* [Global Heat Flow Database]. Available at: <http://heatflow.org/> (accessed 16.07.2020). In Russ.
13. *Lachenbruch A.H., Marshall B.V., Ruppel C.D.* Post-expedition report for USGS T-3 Ice island heat flow measurements in the High Arctic ocean. U.S. Geological Survey data release. 2019. DOI:10.5066/P91XQ3IS.
14. *O'Regan M., Pedro P., Stranne C., Jakobsson M., Koshurnikov A.* Surface heat flow measurements from the East Siberian continental slope and southern Lomonosov Ridge, Arctic Ocean. *Geochemistry Geophysics Geosystems*. 2016;17(5):1608–1622. DOI:10.1002/2016GC006284.
15. *O'Regan M., Moran K.* Deep water methane hydrates in the Arctic Ocean: Reassessing the significance of a shallow BSR on the Lomonosov Ridge. *Journal of Geophysical Research*. 2010;115(B05102). DOI:10.1029/2009JB006820.

GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS AND GIS PROJECTS

16. *Global'naya model' rel'efa dna Zemnoi poverkhnosti GEBCO 2020* [GEBCO 2020 global bathymetric model]. Available at: https://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/ (accessed 16.07.2020). In Russ.
17. *Geomorfologicheskaya karta Severnogo Ledovitogo okeana masshtaba 1:5 000 000* [Geomorphological map, the Arctic Ocean, 1:5,000,000 scale]. In: *Otchet o rezul'tatakh tematicheskikh i opytно-metodicheskikh rabot, svyazannykh s geologicheskim izucheniem neдр, vypolnennykh za 2018 god. Prilozhenie № 13*. St. Petersburg: VNIIOkeangeologiya; 2018. In Russ.
18. *Sloan E.D., Carolyn A.K. Clathrate of Hydrates of Natural Gases*. New-York, Dekker; 1998. 641 p. DOI:10.1201/9781420008494.
19. *Poselov V.A., Zholondz S.M., Trukhalev A.I., Kos'ko M.K., Poselova L.G., Butsenko V.V., Pavlenkin A.D., Verba V.V., Kim B.I. Karta moshchnosti osadochnogo chekhla Severnogo Ledovitogo okeana* [Map of thickness of the sedimentary cover of the Arctic Ocean]. In: *Geologo-geofizicheskie kharakteristiki litosfery Arkticheskogo regiona*. St. Petersburg: VNIIOkeangeologiya; 2012. V. 233. Issue 8. pp. 8–14. In Russ.

Информация об авторах**Анастасия Андреевна Цур**

Научный сотрудник

ФГБУ «ВНИИОкеангеология»,

190121 Санкт-Петербург, Английский пр-т, д. 1

e-mail: vniiio_semenova@mail.ru

Матвеева Татьяна Валерьевна

Кандидат геолого-минералогических наук,

заведующая сектором, ученый секретарь

ФГБУ «ВНИИОкеангеология»,

190121 Санкт-Петербург, Английский пр-т, д. 1

e-mail: tv_matveeva@mail.ru

Бочкарев Алексей Викторович

Ведущий инженер

ФГБУ «ВНИИОкеангеология»,

190121 Санкт-Петербург, Английский пр-т, д. 1

e-mail: bochkarev_alex@inbox.ru

Information about authors**Anastasiia A. Shchur**

Researcher

VNIIOkeangeologia,

1 Angliysky Avenue, Saint-Petersburg, 190121, Russia

e-mail: vniiio_semenova@mail.ru

Tatiana V. Matveeva

Candidate of Geological and Mineralogical Sciences,

Head of Laboratory, Academic Secretary

VNIIOkeangeologia,

1, Angliysky Avenue, Saint-Petersburg, 190121, Russia

e-mail: tv_matveeva@mail.ru

Aleksei V. Bochkarev

Lead Engineer Researcher

VNIIOkeangeologia,

1, Angliysky Avenue, Saint-Petersburg, 190121, Russia

e-mail: bochkarev_alex@inbox.ru