

Природный барьер для удержания высоких концентраций газов: метана и углекислого газа, метана и водорода при гидротермальных выбросах

Т.А. Смагличенко

Институт проблем нефти и газа РАН, г. Москва

E-mail: tasmaglichr@gmail.com

Аннотация. Впервые представлена предполагаемая сейсмическая модель окрестностей полей высоких концентраций газов CH_4 и CO_2 , CH_4 и H_2 , растворенных в гидротермальных выбросах. Модель так называемого природного барьера для удержания скоплений газов выявлена по результатам применения разработанного автором инновационного метода 3D сейсмической томографии и по данным геохимического анализа, проведенного ранее другими исследователями в научных экспедициях и университетских лабораториях. Построенная модель согласуется с распределением сейсмичности (M 2.5–4.5) в области газовых полей, зарегистрированной в течение последних 5 лет. Сопоставление диффузионных параметров метана в термальных пластах при различных температурах и в горных породах, а также соответствующее сравнение геологических структур позволяет сделать предположение о возможности использования предлагаемой модели для выбора месторасположения подземных хранилищ указанных газов.

Ключевые слова: скопления метана, водорода, углекислого газа; сейсмическая томография, гидротермальные выбросы.

Для цитирования: Смагличенко Т.А. Природный барьер для удержания высоких концентраций газов: метана и углекислого газа, метана и водорода при гидротермальных выбросах // Актуальные проблемы нефти и газа. 2019. Вып. 4(27). <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2019-27.art11>

Введение

Для обеспечения технической безопасности функционирования подземных хранилищ газа требуется глубокое знание горных пород, окружающих хранилище, контроль их плотности, а также проницаемости покрышек, что в совокупности является важным фактором предотвращения вспышек возможных выработок сероводорода при реакции с воздухом [1]. Целостность газохранилища также зависит от напряженного состояния геологической среды внутри и вокруг него, что приводит к необходимости получения оценок корреляции сейсмичности с естественными условиями присутствия разломов и с процессами закачек газа, которые создают пластовые давления [2, 3]. В то же время существует другая проблема, которая заключается в значительной неопределенности гидравлических свойств пород, разных по проницаемости и по

изотропии, что приводит к необходимости моделирования диффузионных процессов в недрах для предотвращения утечки больших объемов газа [4].

Перечисленные трудности могут быть частично предотвращены при выборе мест подземных хранилищ газа (ПХГ), если внимательно рассмотреть природный опыт удержания газов в неглубоких подземных структурах, где их добыча не производится по определенным причинам. Примером резервуаров для природного хранения газов являются горячие пласты высокого давления, содержащие высокие концентрации растворенных газов, выходящих на поверхность при гидротермальных выбросах из осадочных толщ морского дна. В данной статье в качестве природных резервуаров метана совместно с углекислым газом и метана совместно с водородом рассмотрены малые по площади гидротермальные поля Гримсей и Стейнхолл на северо-востоке и на юго-западе Исландии в море и океане. Берутся во внимание показания датчиков, измеривших содержание газов в гидротермальных выбросах [5–9], исследуются модели, построенные по данным геохимического анализа образцов [10] и по данным вступлений продольных сейсмических волн [11].

Отметим, что в последнем случае 3D модели скорости распространения продольных волн получены путем применения нового дифференцированного подхода к построению изображений сейсмической томографии. Дифференцированный подход предложен и разработан автором [12]. В отличие от общепринятых методов томографии, которые восстанавливают характеристики объекта, одновременно используя весь набор измерений, разработанный метод основан на дифференциации измерений с выделением параметров регистрации волн от кластеров событий. Численной основой инновации является новая модификация алгебраического метода исключения Гаусса для решения систем линейных уравнений, также разработанная автором [13]. Отличительной чертой созданного способа обращения сейсмических данных является возможность получения для рассматриваемого блока среды решения, обладающего свойством изотропии (то есть значение сейсмической скорости утверждается для блока только в том случае, когда она одинакова для всех направлений существующей системы наблюдений).

Определяя характеристики геологических структур в окрестностях газовых полей, а также сейсмические обстановки, удерживающие высокие концентрации совместного существования газов и природных рассолов, можно предполагать необходимые условия для ПХГ с закачкой в них метана, природного углекислого газа и водорода.

1. Скопления метана и углекислого газа в осадочных породах моря: геохимическая и сейсмическая модели

Гидротермальное поле Гримсей с преобладающими газами CH_4 и CO_2 расположено на северо-востоке Исландии в зоне разломов Тьёднес. Приблизительно в 20 км от поля находится крошечный остров Гримсей площадью 5.3 км². Тем не менее, на острове живут люди, занимающиеся рыболовством. До 80-х годов подозрение о необычном месторасположении газа возникло у рыбаков, которые видели появление множества пузырьков в море [10]. Предположения о существующем источнике газов были подтверждены результатами глубинного сейсмического зондирования, полученными путем инверсии волнового поля отраженных волн, а также путем анализа каталогов микросейсмических событий [14]. Гидротермальные отверстия были обнаружены по результатам нескольких экспедиций с использованием пилотируемого людьми швейцарского подводного аппарата «GEO» [5] и немецкого исследовательского пилотируемого подводного аппарата «JAGO» [6, 7]. С помощью датчиков, установленных на подводных судах и работающих в режиме реального времени, были сделаны измерения содержания газов в гидротермальных выбросах, основной столб которых поднимался из земли выше уровня морской воды. Измерения показали высокие концентрации двух газов: CH_4 и CO_2 : у подножия отверстий и вблизи морской поверхности.

Предполагалось, что в основном участок гидротермальной активности занимает площадь 1000 × 300 м, но при этом окружен ангидритом, расположенным в осадочной толще до глубины 400 м и теряющим со временем свойство растворимости в воде. Минералогические образцы были взяты в различных точках поля и изучены в лаборатории университета Фрайберг, Германия [14]. В северной части поля обнаружен темно-серый игольчатый ангидрит. На северном конце – массивный пористый ангидрит, в центральной части поля – серый и розовый ангидриты. Гидротермальные насыпи состоят из ангидрита, гипса, обломочной и гидротермальной глины, талька. Поле с преобладающими газами CH_4 и CO_2 характеризуется низкой соленостью, отсутствием дыма и низким содержанием металла и серы во флюидах [9, 14]. Температурный режим поля имеет диапазон 131–249 °C [7]. Детальный анализ образцов поля Гримсей, изотопного состава стронция, изотопных отношений стронция и кальция был сделан в [10]. По этим и другим данным была построена геохимическая модель поля [10, 14].

Важно заметить, что показатель концентрации газа CO_2 указывал на источник магматического происхождения, в то время как высокое содержание CH_4 было обусловлено термическим разложением осадочных органических веществ [15]. При этом выявленные показатели концентрации CH_4 предполагали присутствие высших углеводородов вплоть до бутана [15].

Сейсмическая модель окрестностей поля скопления газов, включающих метан и диоксид углерода, может быть получена в результате исследования 3D томографических изображений разломной зоны Тьёднес путем применения инновационной технологии для реконструкции данных реальных вступлений продольных Р-волн [11–13]. Для томографического просвечивания разломной зоны использовалось множество данных, ограниченное 574 сейсмическими событиями, которые в основном происходили вдоль линеамента Гримсей с 1986 по 1989 гг.

Для проверки эффективности метода в сотрудничестве с проф. В.Р. Якоби (университет Майнц, Германия) при поддержке немецкого фонда DAAD была построена тестовая модель, включающая существующую информацию о батиметрии, сведения морфологических и топографических карт, а также данные о гравитационных аномалиях и аномалиях Буге [11]. Рис. 1, а иллюстрирует тестовую модель для верхнего слоя (0–5 км), включающего газовый гидротермальный пласт. Для этой модели были вычислены синтетические данные невязок времен пробега. Результаты реконструкции при обработке точных синтетических данных и данных, в которые включена ошибка гипоцентров, имеющая нормальное распределение, показаны соответственно на рис. 1, б и 1, в.

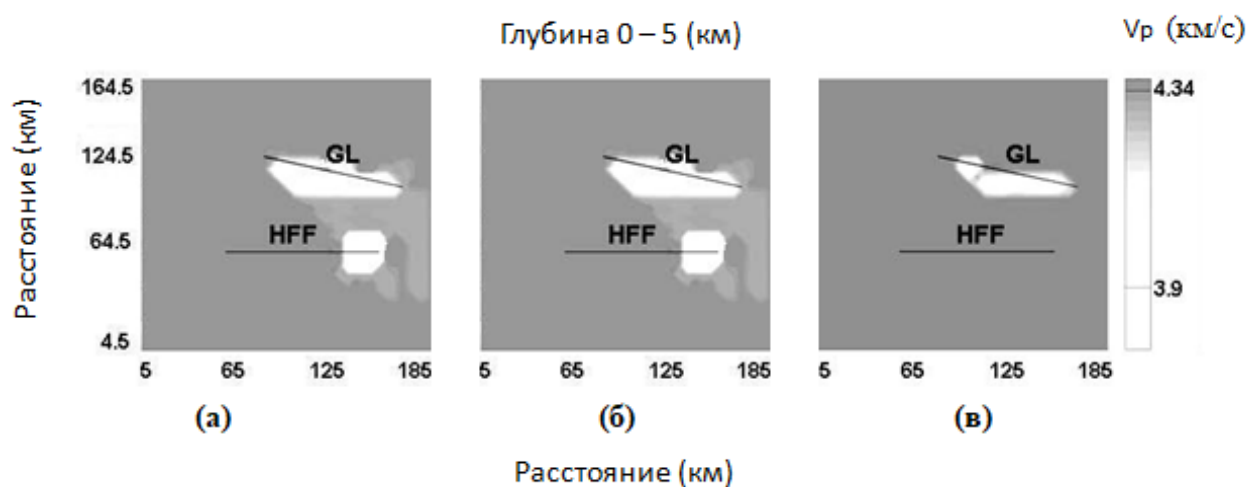


Рис. 1. Тестовая модель и результаты обращения синтетических данных невязок времен пробега: (а) – тестовая модель, (б) – восстановленная модель при условии точных синтетических данных, (в) – восстановленная модель при наличии в синтетических данных ошибок гипоцентров [11]

Тестовые результаты подтвердили, что достаточно высокое разрешение можно ожидать вдоль линиамента Гримсей как в случае точных данных, так и при их зашумлении [11].

Томографическое изображение, построенное для верхнего слоя по данным реальных вступлений сейсмических волн, выявило следующее. Газовое поле Гримсей площадью 1.0×0.3 км (рис. 2) находится внутри высокоскоростного блока, имеющего площадь 20.0×9.0 км, простирающегося до глубины 5 км (см. рис. 2, а, б). Найденная скорость Р-волны равна 4.89 км/с и предположительно соответствует плотному базальту. Так как сейсмические приемники были расположены на берегу, а источники – в море, то просвечивание геологической среды обеспечивалось с южной и юго-западной стороны. Таким образом, в силу особенностей алгебраической реконструкции методом модификации Гауссовского исключения, блок являлся изотропным для этих направлений.

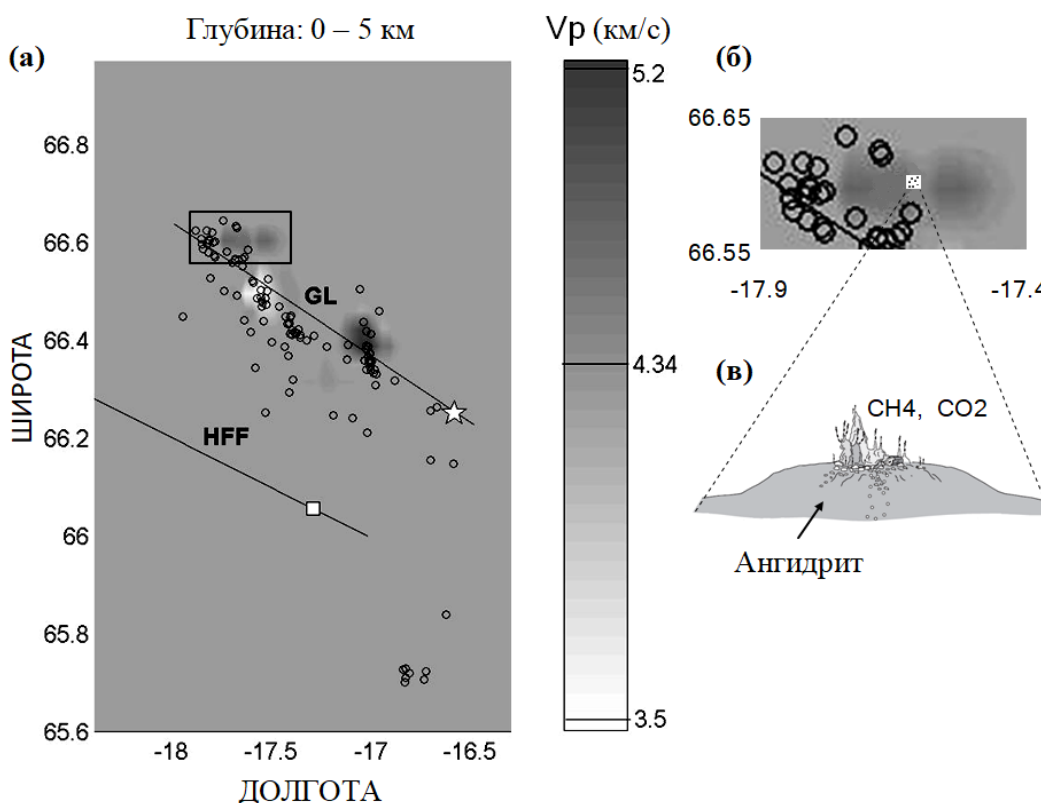


Рис. 2. Распределение скоростей продольной волны V_p в разломной зоне Тъёднес: GL – линиамент Гримсей, HFF – разлом Хусавик; (а) – выделенный прямоугольником район, включающий газовое поле Гримсей (окружности соответствуют гипоцентрам микросейсмичности [11]); (б) – полученная аномальная высокоскоростная структура (темный цвет среды) в окрестностях поля Гримсей, обозначенного белым квадратом; (в) – геохимическая модель поля Гримсей [14]

Важно отметить, что гипоцентры сейсмических событий находятся за пределами блока, создающего защитный барьер для изучаемого газового поля (см. рис. 2, б). Анализ распределения сейсмических событий с магнитудами 2.5–4.5 за последние 5 лет (с ноября 2014 г. по ноябрь 2019 г.) показывает, что все произошедшие недавние события также находятся за пределами указанного блока (рис. 3) [16].

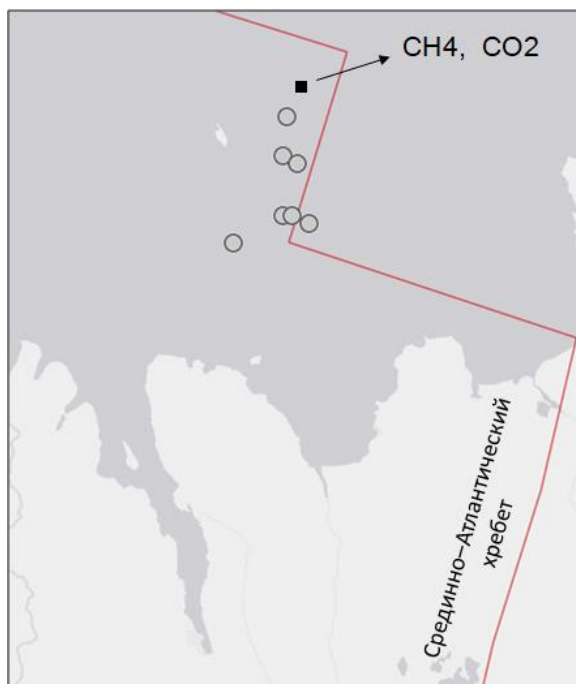


Рис. 3. Распределение сейсмических событий с магнитудами 2.5–4.5 с ноября 2014 г. по ноябрь 2019 г., построенное с использованием веб-сервиса сайта Геологической Службы США [16]; окружности соответствуют эпицентрам событий в диапазоне магнитуд 2.5–4.5; глубина событий – около 10 км

2. Природный резервуар совместного скопления метана и водорода в океане: геохимические данные, сейсмическая обстановка

По данным работы [9], предположение о существовании гидротермального поля Стайнхолл (63.1°N, 24.533°W) в океане вблизи хребта Рейкьянесс было впервые сделано в 1993 г. по результатам проведенной научной экспедиции на судне, которое принадлежало Бьярни Саемундссону. Судно останавливалось в окрестности гидротермального выброса для того, чтобы взять образцы воды в 175 точках через каждые 2 км вдоль хребта. Соответствующие замеры производились с помощью датчиков, определяющих проводимость, глубину и температуру, нефелометра для определения интенсивности рассеянного светового потока и прибора, показывающего значение коэффициента

пропускания среды [8]. Присутствие в образцах метана, водорода, серы и марганца было подтверждено химическим анализом, проведенным с использованием лабораторного оборудования, установленного на судне.

В поле гидротермальных выбросов с помощью портативного газового хроматографа получены необычайно высокие преобладающие концентрации CH_4 и H_2 [17]. Участок расположен в осадочной подземной толще мощностью 250–350 м. Образование многочисленных пузырьков было зафиксировано высокочастотным (38 кГц) эхолотом. Концентрации растворенного газа метана до 18 нмоль/л и водорода до 30 нмоль/л соответствуют расположению этих пузырьков. Предполагаемая температура – 220 °C.

Известно, что в 1990 г. вблизи поля был зафиксирован большой кластер сейсмических событий с небольшими магнитудами. Однако поле расположено в 120 км от острова и регистрируемые данные оказались недостаточно точны, чтобы подтвердить расположение кластера [9].

Необходимо отметить следующее. В близости газового поля с помощью драг (экскаваторов на судне) было выявлено присутствие базальта, который никогда не извергался и не имел признаков гидротермальных включений [9]. Таким образом, гипотеза природного плотного барьера для поля Стайнхолл также может иметь место, как и для поля Гримсей. Более того, эта гипотеза подтверждается тем, что оба поля расположены в окрестностях сегментов единой разломной системы Срединно-Атлантического хребта, пересекающего Исландию. Поле Стайнхолл – в близости к хребту Рейкьянес, юго-западный сегмент Срединно-Атлантического хребта; поле Гримсей – в близости к хребту Колбенсей, северо-восточный сегмент.

Анализ распределения сейсмических событий с магнитудами 2.5–4.5 за последние 5 лет (с ноября 2014 г. по ноябрь 2019 г.) показывает, что все произошедшие события находятся далеко за пределами окрестностей газового поля Стайнхолл [16].

Обсуждение и заключение

Между рассмотренными резервуарами скоплений метана, углекислого газа, метана и водорода в толще моря и океана и подземными хранениями этих газов на суше не существует полной аналогии. В то же время имеет место некоторая корреляция между значениями коэффициентов диффузионных параметров метана для геотермальных подземных пластов и для горных пород. Так, в геотермальных пластах, содержащих метан

под высоким давлением, значения коэффициента диффузии в диапазоне температур (26.85–226.85 °C) меняются от $2.37 \cdot 10^{-9}$ до $6.02 \cdot 10^{-9}$ см²/с [18]. Эти значения сопоставимы с найденными достаточно низкими коэффициентами диффузии метана (порядка 10^{-9} см²/с) для образцов горных осадочных пород (аргиллиты, кварцевые песчаники и алевролиты, известняки) в условиях природной влажности при температуре 20 °C [19]. Соответствующие измерения были проведены для девонских отложений в районах Заволжья и карбона Верхне-Печорской площади [19].

Для сравнения – коэффициент диффузии метана для образцов каменной соли, взятых на глубинах 250–400 м из различных по тектоническому строению областей, имел порядок 10^{-6} – 10^{-7} см²/с и, таким образом, был близок к минимальным значениям [20]. В то же время, по мнению авторов [20], масштабы миграции газов под большим давлением в солевых отложениях могут быть значительными в связи с трещинами в кристаллах солей, но с другой стороны, это не мешает присутствию соляных блоков. Учитывая эти данные, рассмотренный в статье природный опыт условий удержания подземных скоплений газа при гидротермальных выбросах может быть полезным. Проведенные исследования показывают, что локальное удерживание подземного метана происходит с помощью покрышки, состоящей, в основном, из ангидрита с примесью глины и талька. Известно, что соляные купола могут быть покрыты большим количеством ангидрита, включая гипс и кальцит [21, 22]. В отличие от гидротермального происхождения ангидрита, образованного в виде осадка от взаимодействия соленой морской воды и гидротермального потока [10], покрышка из ангидрита в случае соляных куполов является результатом обратного процесса, а именно, взаимодействия восходящих растворов сульфата кальция и верхних слоев соли [21]. Следовательно, соляные купола могут быть перспективными для хранения метана, что и подтверждается опытом использования соляных каверн для ПХГ во многих странах.

Отличительные особенности распределения скорости сейсмической волны в окрестностях газового поля Гримсей, выявленные по томографическим изображениям, характеризующимся высокой степенью разрешения (см раздел 1 настоящей статьи), а также предположение о плотном базальте, окружающем поле Стайнхолл (см раздел 2 настоящей статьи), позволяют создать схематическую модель защитного окружения скоплений газов в подземных термальных пластах на небольших глубинах. Блок плотных пород, размерность которого может превышать размеры резервуара в 10–20 раз, является

природным барьером для удержания газов и для обеспечения безопасной сейсмической обстановки вокруг мест их скоплений (рис. 4).

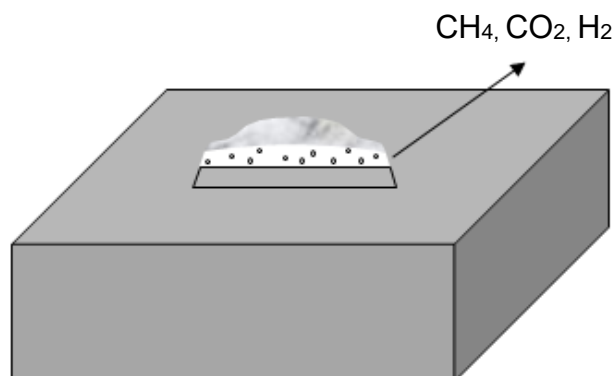


Рис. 4. Предполагаемая модель природного барьера – блока, удерживающего скопления газов

Можно сделать заключение о свойствах этого блока:

1. Скорость продольных волн внутри блока превышает значения скоростей вокруг него, что характерно для плотных горных пород.
2. Блок предположительно является изотропным.

Присутствие подобного блока в окрестностях планируемого ПХГ может быть одним из условий его надежного функционирования.

Статья написана в рамках выполнения государственного задания (тема «Научное обоснование оптимальных условий подземного хранения водорода совместно с метаном», № АААА-А19-119101690016-9).

Литература

1. *Farnsworth B.E.* Photography methods to understand rural resilience and environmental literacy: the example of fracking in the Bakken. PhD dissertation. Grand Forks. University of North Dakota, 2019. 254 p.
2. *Gibbons S.J., Ringdal F.* The detection of low magnitude seismic events using array-based waveform correlation // *Geophysical Journal International*. 2006. Vol. 165, No. 1. P. 149–166. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2006.02865.x>
3. *Goertz-Allmann B.P., Kuhn D., Oye V. et al.* Combining microseismic and geomechanical observations to interpret storage integrity at the In Salah CCS site // *Geophysical Journal International*. 2014. Vol. 198. P. 447–461. <https://doi.org/10.1093/gji/ggu010>

4. Zhou Q., Oldenburg C.M., Spangler L.H., Birkholzer J.T. Approximate solutions for diffusive fracture-matrix transfer: application to storage of dissolved CO₂ in fractured rocks // *Water Resources Research*. 2017. Vol. 53. P. 1746–1762. <https://doi.org/10.1002/2016WR019868>
5. Fricke H., Giere O., Stetter K. et al. Hydrothermal vent communities at the shallow subpolar Mid-Atlantic ridge // *Marine Biology*. 1989. Vol. 102. P. 429–435.
6. Stoffers P., Botz R., Garbe-Schonberg D. et al. Kolbeinsey Ridge. Cruise Report Poseidon 229. University of Kiel, 1997. 58 p.
7. Scholten J., Blaschek H., Becker K.P. et al. Hydrothermalism at the Kolbeinsey Ridge, Iceland. Technical Cruise Report PO 253. University of Kiel, 2000. P. 22–43.
8. German C.R. Hydrothermal activity on the Reykjanes Ridge: an ODP Site survey. RS Bjarni Saemundsonn cruise B8-93. Wormley, UK: Institute of Oceanographic Sciences Deacon Laboratory, 1993. 22 p.
9. Atkins D. Exploration techniques for locating offshore geothermal resources. Master of Science in Sustainable Energy thesis. Reykjavik University, 2013. 125 p.
10. Kuhn T., Herzig P.M., Hannington M.D. et al. Origin of fluids and anhydrite precipitation in the sediment-hosted Grimsey hydrothermal field North of Iceland // *Chemical Geology*. 2003. Vol. 202. P. 5–21. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(03\)00207-9](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(03)00207-9)
11. Smaglichenko T.A., Jacoby W. Differentiated approach in tomography: Model reconstruction with mislocation errors and testing of the Tjorness Fracture Zone, Iceland // *EGU General Assembly*, 19–24 April 2009: Proceedings. Vienna, Austria. Geophysical Research Abstracts. 2009. Vol. 11. EGU2009-279.
12. Smaglichenko T.A., Horiuchi S., Takai K. A differentiated approach to the seismic tomography problem: Method, testing and application to the Western Nagano fault area (Japan) // *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*. 2012. Vol. 16. P. 27–41. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2011.11.010>
13. Smaglichenko T.A. Modification of gaussian elimination for the complex system of seismic observations // *Complex Systems*. 2012. Vol. 20, No 3. P. 229–241. <https://doi.org/10.25088/ComplexSystems.20.3.229>
14. Hannington M., Herzig P., Stoffers P. et al. Shipboard scientific party: first observations of high temperature submarine hydrothermal vent and massive anhydrite deposits off the North Coast of Iceland // *Marine Geology*. 2001. Vol. 177. P. 199–220. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(01\)00172-4](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(01)00172-4)

15. Botz R., Winckler G., Bayer R. et al. Origin of trace gases in submarine hydrothermal vents of the Kolbeinsey Ridge, North Iceland // *Earth Planetary Science Letters*. 1999. Vol. 171. P. 83–89. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(99\)00128-4](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(99)00128-4)
16. U.S. Geological Survey. USGS. Earthquake hazard program. <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/> (Дата обращения 14.11.2019).
17. German C.R., Briem J., Chin C. et al. Hydrothermal activity on the Reykjanes Ridge: the Steinahóll vent-field at 63°06'N // *Earth and Planetary Science Letters*. 1994. Vol. 121, No. 3–4. P. 647–654.
18. Clauser C. Geothermal energy // *Renewable energies*. Landolt-Börnstein, Group VIII. Advanced materials and technologies. Vol. 3. Energy technologies. Heidelberg-Berlin: Springer Verlag, 2006. P. 480–595.
19. Антонов П.Л. О масштабах диффузионной проницаемости горных пород // Прямые методы поисков нефти и газа (нефтепоисковая геохимия): Сб. ст. Всесоюзный научно-исследовательский институт ядерной физики и геохимии ВНИИЯГГ. М.: Недра, 1964. С. 5–13.
20. Антонов П.Л., Гладышева Г.А., Козлов В.П. Диффузия углеводородных газов через каменную соль // *Геология нефти и газа*. 1958. № 2. С. 47–50.
21. Walker C.W. Origin of Gulf Coast salt-dome cap rock // *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*. 1976. Vol. 60, No. 12. P. 2162–2166.
22. Холодов В.Н. Термобарические обстановки осадочно-породных бассейнов и их флюидодинамика. Сообщение 3. Сверхвысокие давления в стратифере и соляные диапиры // *Литология и полезные ископаемые*. 2019. № 2. С. 130–148. <https://doi.org/10.31857/S0024-497X20192130-148>

The natural barrier to retention of the high concentration of gases: methane and carbon dioxide, methane and hydrogen under hydrothermal vents

T.A. Smaglichenko

Oil and Gas Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow

E-mail: tasmaglichr@gmail.com

Abstract. The assumed seismic model of the area around fields having high concentrations of CH₄ and CO₂, CH₄ and H₂ dissolved in hydrothermal vents is first introduced. The model of so-called natural barrier to retention of gases accumulation has been revealed using outcomes of 3D seismic tomography method, which has been developed by the author and utilizing geochemical data that were earlier obtained by other researchers in scientific cruises and university laboratories. The built model is in agreement with a distribution of seismicity (M 2.5–4.5) that occurred during last 5 years. A comparison of diffusion parameters of methane for thermal reservoirs and rocks, and corresponding comparison of geological structures permits to suppose that the presented model can be used to find appropriated area for underground storage of gases mentioned above.

Keywords: accumulations of methane, hydrogen, carbon dioxide; seismic tomography, hydrothermal vents.

Citation: *Smaglichenko T.A.* The natural barrier to retention of the high concentration of gases: methane and carbon dioxide, methane and hydrogen under hydrothermal vents // Actual Problems of Oil and Gas. 2019. Iss. 4(27). <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2019-27.art11> (In Russ.).

References

1. *Farnsworth B.E.* Photography methods to understand rural resilience and environmental literacy: the example of fracking in the Bakken. PhD dissertation. Grand Forks. University of North Dakota, 2019. 254 p.
2. *Gibbons S.J., Ringdal F.* The detection of low magnitude seismic events using array-based waveform correlation // *Geophysical Journal International*. 2006. Vol. 165, No. 1. P. 149–166. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2006.02865.x>
3. *Goertz-Allmann B.P., Kuhn D., Oye V. et al.* Combining microseismic and geomechanical observations to interpret storage integrity at the In Salah CCS site // *Geophysical Journal International*. 2014. Vol. 198. P. 447–461. <https://doi.org/10.1093/gji/ggu010>
4. *Zhou Q., Oldenburg C.M., Spangler L.H., Birkholzer J.T.* Approximate solutions for diffusive fracture-matrix transfer: application to storage of dissolved CO₂ in fractured rocks // *Water Resources Research*. 2017. Vol.53. P. 1746–1762. <https://doi.org/10.1002/2016WR019868>

5. *Fricke H., Giere O., Stetter K.* et al. Hydrothermal vent communities at the shallow subpolar Mid-Atlantic ridge // *Marine Biology*. 1989. Vol. 102. P. 429–435.
6. *Stoffers P., Botz R., Garbe-Schonberg D.* et al. Kolbeinsey Ridge. Cruise Report Poseidon 229. University of Kiel, 1997. 58 p.
7. *Scholten J., Blaschek H., Becker K.P.* et al. Hydrothermalism at the Kolbeinsey Ridge, Iceland. Technical Cruise Report PO 253. University of Kiel, 2000. P. 22–43.
8. *German C.R.* Hydrothermal activity on the Reykjanes Ridge an ODP Site Survey. RS Bjarni Saemundsonn cruise B8-93. Wormley, UK: Institute of Oceanographic Sciences Deacon Laboratory, 1993. 22 p.
9. *Atkins D.* Exploration techniques for locating offshore geothermal resources. Master of Science in Sustainable Energy thesis. Reykjavik University, 2013. 125 p.
10. *Kuhn T., Herzig P.M., Hannington M.D.* et al. Origin of fluids and anhydrite precipitation in the sediment-hosted Grimsey hydrothermal field North of Iceland // *Chemical Geology*. 2003. Vol. 202. P. 5–21. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(03\)00207-9](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(03)00207-9)
11. *Smaglichenko T.A., Jacoby W.* Differentiated approach in tomography: Model reconstruction with Mislocation Errors and Testing of the Tjorness Fracture Zone, Iceland // EGU General Assembly, 19–24 April 2009: Proceedings. Vienna, Austria. Geophysical Research Abstracts. 2009. Vol. 11. EGU2009-279.
12. *Smaglichenko T.A., Horiuchi S., Takai K.* A differentiated approach to the seismic tomography problem: Method, testing and application to the Western Nagano fault area (Japan) // *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*. 2012. Vol. 16. P. 27–41. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2011.11.010>
13. *Smaglichenko T.A.* Modification of Gaussian elimination for the Complex System of Seismic Observations // *Complex Systems*. 2012. Vol. 20, No 3. P. 229–241. <https://doi.org/10.25088/ComplexSystems.20.3.229>
14. *Hannington M., Herzig P., Stoffers P.* et al. Shipboard scientific party: first observations of high temperature submarine hydrothermal vent and massive anhydrite deposits off the North Coast of Iceland // *Marine Geology*. 2001. Vol. 177. P. 199–220. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(01\)00172-4](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(01)00172-4)
15. *Botz R., Winckler G., Bayer R.* et al. Origin of trace gases in submarine hydrothermal vents of the Kolbeinsey Ridge, North Iceland // *Earth Planetary Science Letters*. 1999. Vol. 171. P. 83–89. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(99\)00128-4](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(99)00128-4)

16. U.S. Geological Survey. USGS. Earthquake hazard program. <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/> (Accessed on 14.11.2019).
17. *German C.R., Briem J., Chin C.* et al. Hydrothermal activity on the Reykjanes Ridge: the Steinahóll vent-field at 63°06'N // *Earth and Planetary Science Letters*. 1994. Vol. 121, No. 3–4. P. 647–654.
18. *Clauser C.* Geothermal energy // *Renewable energies*. Landolt-Börnstein, Group VIII. Advanced materials and technologies. Vol. 3. Energy technologies. Heidelberg-Berlin: Springer Verlag, 2006. P. 480–595.
19. *Antonov P.L.* About the scale for the diffusion permeability of rocks // *Direct methods for the oil and gas search (oil prospecting geochemistry): Collected papers*. All-Soviet Scientific Research Institute of Nuclear Physics and Geochemistry. VNIYAGT. Moscow: Nedra, 1964. P. 5–13 (In Russ.).
20. *Antonov P.L., Gladysheva G.A., Kozlov V.P.* Diffusion of hydrocarbon gases through rock salt // *Geologiya Nefti i Gaza*. 1958. No. 2. P. 47–50 (In Russ.).
21. *Walker C.W.* Origin of Gulf Coast salt-dome cap rock // *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*. 1976. Vol. 60, No. 12. P. 2162–2166.
22. *Kholodov V.N.* Thermobaric conditions of sedimentary-rock basins and their fluid dynamics. Report 3. Ultrahigh pressures in the stratosphere and salt diapirs // *Lithology and Mineral Resources*. 2019. Vol. 54. No. 2. P. 103–118. <https://doi.org/10.1134/S0024490219020032>