

УДК 504.7:552.578.061.4:546.264-31

Сидорова К.И., Череповицын А.Е.Национальный Минерально-Сырьевой Университет «Горный», Санкт-Петербург, Россия, ksu_s1991@mail.ru, alekseicherepov@inbox.ru

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ ЗАХОРОНЕНИЯ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В ГЕОЛОГИЧЕСКИХ РЕЗЕРВУАРАХ

Сделан обзор возможных путей захоронения углекислого газа. Описана методика расчёта потенциальной ёмкости для различных резервуаров. Рассмотрено географическое расположение возможных хранилищ углекислого газа. Осуществлено сравнение ряда оценок потенциальной ёмкости объектов по странам и по типу резервуаров. Обозначены регионы России, перспективные для захоронения углекислого газа. В качестве примера рассчитана потенциальная ёмкость по захоронению углекислого газа ряда нефтяных месторождений Калининградской области. Проведён сравнительный анализ стоимости захоронения в различных типах геологических резервуаров. Обоснована возможность применения технологий захоронения углекислого газа на территории России.

Ключевые слова: *секвестрация, углекислый газ, потенциальная ёмкость, объекты захоронения, потенциал России.*

Проблема глобального потепления является одной из ключевых экологических проблем Земли. В результате антропогенных воздействий содержание углекислого газа (и других газов, поглощающих излучение в инфракрасном диапазоне) в атмосфере Земли постепенно возрастает, вследствие чего растёт средняя годовая температура поверхностного слоя атмосферы Земли и Мирового океана.

Существуют различные проекты стабилизации эмиссий парниковых газов (в первую очередь углекислого газа (CO₂): использование энергоэффективных и ресурсосберегающих технологий, сокращение доли органического топлива, развитие ядерной энергетики, использование возобновляемых источников энергии, секвестрация парниковых газов и т.д. Несмотря на свою малую известность в РФ, технологии секвестрации CO₂, то есть захвата углекислого газа и его длительного хранения в геологических формациях – на настоящее время оценивается рядом экспертов как наиболее перспективный механизм, обладающий большим потенциалом.

Три основных элемента цепи секвестрации включают: захват, транспортировку и захоронение. В данной статье рассматривается последний элемент – захоронение CO₂, поскольку именно от типа потенциального хранилища зависит возможность получения экономической выгоды от секвестрации – повышенное извлечение метана из угольных пластов, повышение нефте- и газоотдачи.

Обзор вариантов захоронения CO₂

Как правило, выделяют три основных опции захоронения CO₂ – геологическое захоронение, захоронение на дне океана и карбонизация минералов. Так как два последних варианта на сегодняшний день находятся на исследовательском этапе, то большинство экспертов соглашаются, что в краткосрочной перспективе единственный реально осуществимый вариант – геологическое захоронение CO₂ (рис. 1).

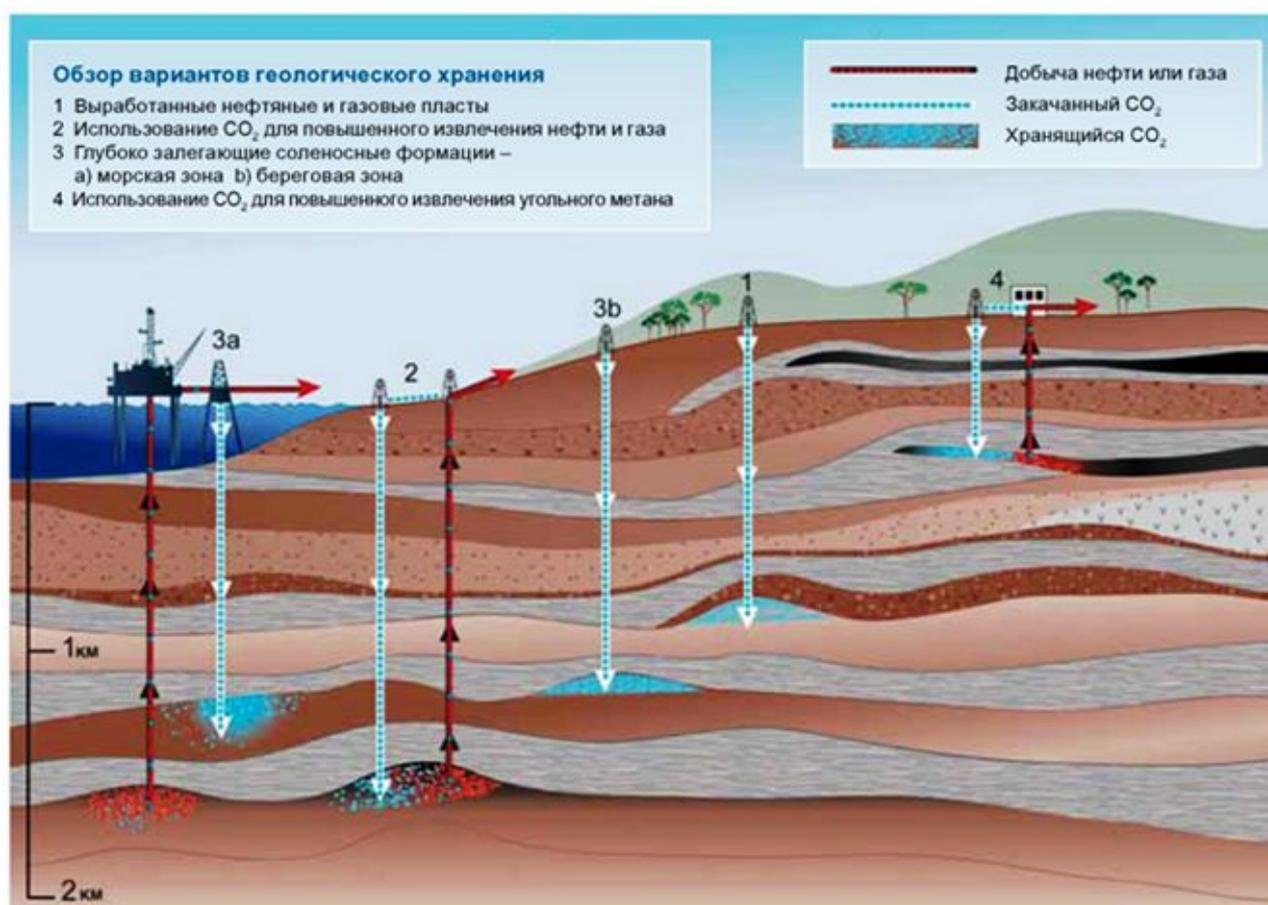


Рис. 1. Обзор вариантов геологического захоронения [МГЭИК, 2005]

Геологическое захоронение CO₂ возможно в глубинных соленосных формациях, выработанных нефтегазовых месторождениях и неразрабатываемых угольных пластах.

При закачивании CO₂ в подходящие соленосные формации или нефтегазовые месторождения на глубины более 800 м различные физические и геохимические улавливающие механизмы не позволят ему выйти на поверхность. Обычно основным физическим механизмом улавливания является наличие перекрывающей породы.

Хранение в угольном пласте может осуществляться в малых глубинах и основано на адсорбции CO₂ на угле, однако техническая осуществимость в значительной степени зависит от проницаемости угольного пласта.

Сочетание хранения CO₂ с повышением нефтеотдачи (ПНО) или повышенным извлечением угольного метана (ПИУМ) может дать дополнительные выгоды в результате добычи нефти или газа.

Методика расчёта потенциальной ёмкости резервуаров

На территории Канады, Австралии, США, ЕС и Великобритании общепринятой считается методика [Final Report... 2007], разработанная для следующих типов объектов:

1. *Неразрабатываемые угольные пласты*

Начальные запасы газа (Initial Gas In Place) определяются по формуле

$$IGIP = A \cdot h \cdot \tilde{n}_c \cdot G_c \cdot (1 - f_a - f_m), \text{ м}^3 \quad (1)$$

где A и h - площадь и мощность пласта, соответственно (м² и м); \tilde{n}_c - плотность угля (т/м³); G_c - газовый фактор (м³/т); f_a и f_m - зольность и влажность угля, соответственно (доли ед.).

2. *Нефтяные и газовые месторождения*

Выделяют теоретическую массу CO₂, которая может быть закачана:

1) в газовое месторождение исходя из начальных запасов газа:

$$M_{CO_2 \tau} = \rho_{CO_2} \cdot R_f \cdot (1 - F_{IG}) \cdot OGIP \cdot \frac{P_s \cdot Z_r \cdot T_r}{P_r \cdot Z_s \cdot T_s}, \text{ т} \quad (2)$$

где ρ_{CO_2} - плотность CO₂ в резервуаре (т/м³); R_f - коэффициент газоотдачи (доли ед.); F_{IG} - доля закачиваемого газа (доли ед.); $OGIP$ (*Original Gas In Place*) - начальные запасы газа (м³); P_s и P_r - давление на поверхности и в резервуаре (МПа); Z_s и Z_r - коэффициент сжатия на поверхности и в резервуаре (доли ед.); T_s и T_r - температура на поверхности и в резервуаре (°C).

2) в нефтяное месторождение исходя из начальных запасов нефти:

$$M_{CO_2 \tau} = \rho_{CO_2} \cdot (R_f \cdot \frac{OOIP}{B_f} - V_{iw} + V_{pw}), \text{ т} \quad (3)$$

где R_f - коэффициент нефтеотдачи (доли ед.); $OOIP$ (*Original Oil In Place*) - начальные запасы нефти (м³); B_f - объёмный коэффициент пласта (доли ед.); V_{iw} и V_{pw} - объём закачанной и извлечённой воды соответственно (м³).

3) в нефтегазовое месторождение исходя из геометрии резервуара:

$$M_{CO_2 t} = \rho_{CO_2} \cdot ((R_f \cdot A \cdot h \cdot \varphi \cdot (1 - S_w) - V_{iw} + V_{pw}), T \quad (4)$$

где A - площадь резервуара (m^2); h - мощность пласта (м); φ – коэффициент пористости (доли ед.); S_w – коэффициент водонасыщенности (доли ед.).

3. Глубинные соленосные формации

Методика расчёта несколько различается для разных типов ловушек, однако, как правило, учитывает геометрию резервуара, давление, температуру и химический состав воды.

$$M_{CO_2 t} = A \cdot h \cdot \varphi (\rho_s X_s^{CO_2} - \rho_o X_o^{CO_2}), T \quad (5)$$

где ρ_s и ρ_o - плотность воды, насыщенной и ненасыщенной CO_2 (t/m^3); $X_s^{CO_2}$ и $X_o^{CO_2}$ - массовая доля CO_2 в воде при насыщении и изначально (доли ед.)

Однако при оценке потенциальной ёмкости тех или иных резервуаров необходимо различать такие понятия, как теоретическая, эффективная и реальная ёмкость (рис. 2).



Рис. 2. Различия между теоретической, эффективной и реальной ёмкостью захоронения [IEA, 2008]

Эффективная потенциальная ёмкость определяется по формуле:

$$M_{CO_2 e} = M_{CO_2 t} \cdot C, T \quad (6)$$

где C - коэффициент, учитывающий все факторы, влияющие на распространение и растворение CO_2 в воде (включая время).

Географическое расположение и объёмы потенциальных резервуаров

Потенциальные геологические хранилища существуют во всем мире. На рис. 3 представлены перспективные районы в седиментационных бассейнах, в которых могут быть найдены подходящие соленосные образования, нефтяные или газовые месторождения или угольные пласты (места для хранения в угольных пластах включены только частично). Наибольшим потенциалом обладают США, Канада, Россия (Сибирь), Ближний Восток и Северная Африка. Однако следует учитывать, что иллюстрация основана на частичных данных и имеет общеознакомительный характер.

Согласно имеющимся данным, во всём мире существует технический потенциал, обеспечивающий ёмкость хранения в геологических формациях как минимум порядка 2000 Гт CO₂ [Carbon Sequestration Atlas, 2010]. Потенциал для хранения в геологических соленосных формациях мог бы быть гораздо больше, однако оценки верхнего предела являются неопределёнными из-за отсутствия информации и согласованной методологии. Данные о ёмкости нефтяных и газовых месторождений характеризуются большей точностью. Техническая ёмкость для хранения в угольных пластах является значительно меньшей и не столь хорошо известной.

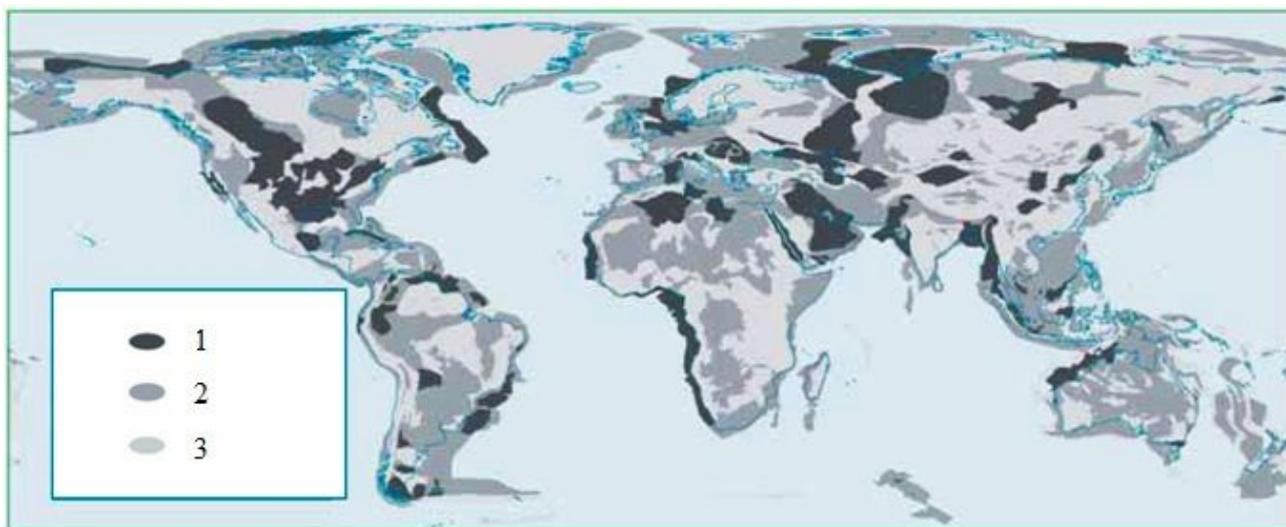


Рис. 3. Перспективные районы для геологического захоронения CO₂ [МГЭИК, 2005]

1-3 – перспективность хранения: 1 – весьма перспективные седиментационные бассейны; 2 - перспективные седиментационные бассейны; 3 - неперспективные седиментационные бассейны, метаморфическая и магматическая порода. Качество и наличие данных меняются в зависимости от региона.

В табл. 1 представлена оценка потенциальной ёмкости различных типов резервуаров, выполненные МГЭИК (2005) и МЭА (2008). В табл. 2 представлена детализированная оценка МЭА по некоторым странам.

Таблица 1

Оценка потенциальной ёмкости резервуаров (мир) [МГЭИК, 2005, IEA, 2008]

Тип резервуара	МГЭИК (2005), млрд. т		МЭА (2008), млрд. т	
	Нижняя граница	Верхняя граница	Нижняя граница	Верхняя граница
Соленосные формации	1000	10000	2000	20000
Нефтяные и газовые месторождения	675	900	675	1200
Неразрабатываемые угольные пласты	3-15	200	146	228

Таблица 2

Оценка потенциальной ёмкости резервуаров (по странам) [IEA, 2008]

Страна/ группа стран	Неразрабатываемые угольные пласты		Соленосные формации	
	н.г., млрд. т	в.г., млрд. т	н.г., млрд. т	в.г., млрд. т
США	35	90	900	3400
Австралия	30		н/д	н/д
Индонезия	24		н/д	н/д
Страны бывшего СССР	20	25	н/д	н/д
Китай	12	16	н/д	н/д
Канада	10	15	1000	4000
Индия	4	8	н/д	н/д
Африка	6	8	н/д	н/д
Европа	5	12	30	577

Обзор ряда исследовательских работ, также посвящённых определению потенциальных объёмов захоронения для всего мира и отдельных стран, представлен на рис. 4. Несмотря на кажущуюся простоту методики, полученные разными исследователями результаты имеют очень большой разброс. Так, некоторые интегральные оценки по всему миру (область а) оказались даже ниже, чем потенциальная ёмкость отдельных регионов (область б).

Потенциал России по захоронению CO₂

Потенциально большие резервуары в осадочных породах на территории России могут наблюдаться в крупнейших нефтегазоносных провинциях. Однако большинство из них находятся в районах, удаленных от основных источников выбросов. Не представляется ни экономически, ни технологически возможным транспортировать углекислый газ из Центрально-Европейской части России в Западную Сибирь, не говоря уже о Европе.

Одним из наиболее актуальных районов для поиска подземных резервуаров представляется Северо-Западный регион (включая Калининградскую область).

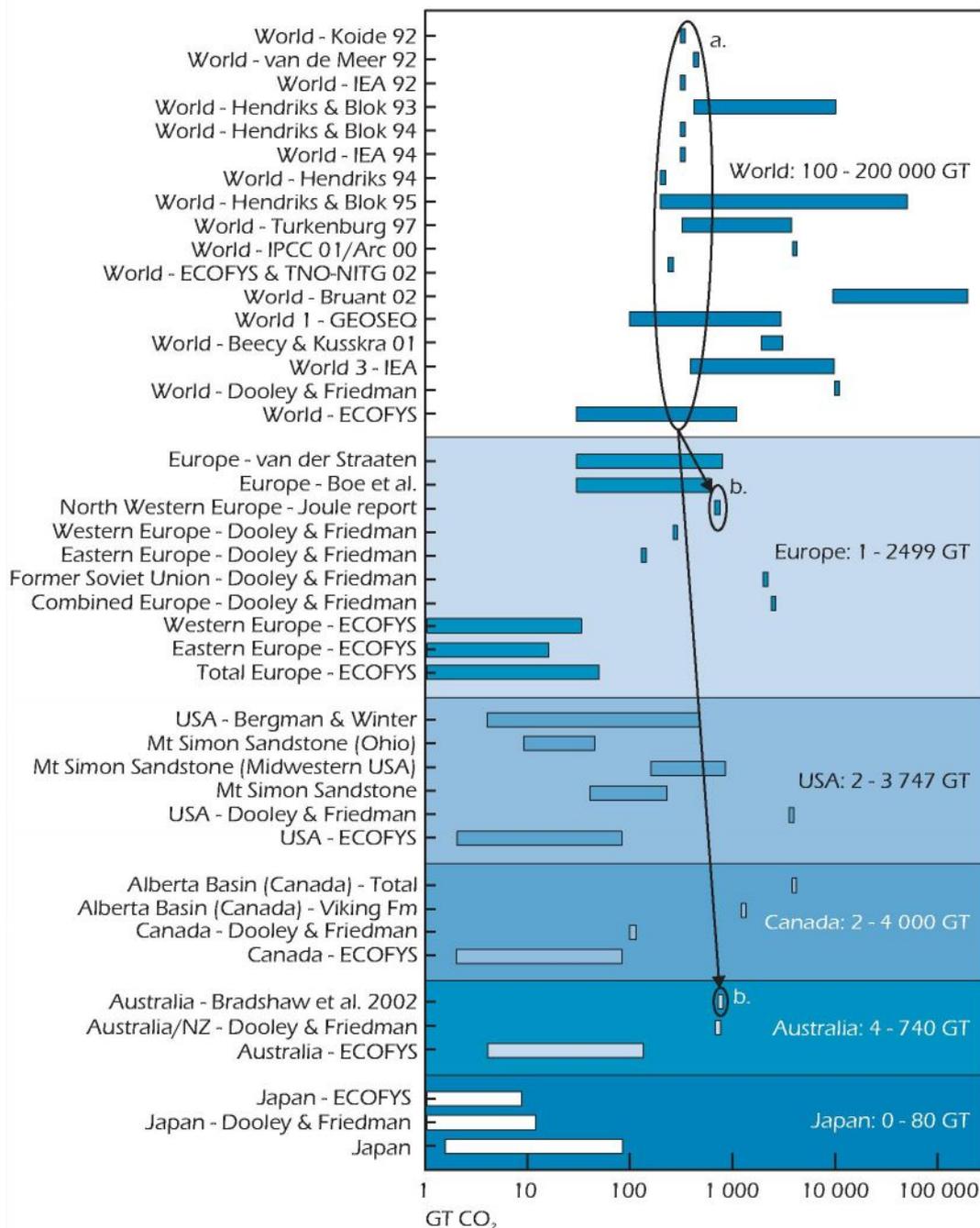


Рис. 4. Оценка потенциальных объёмов захоронения [IEA, 2008]

В качестве примера была определена потенциальная ёмкость трёх нефтяных месторождений Калининградской области: Кравцовского, Красноборского и Малиновского. Для расчёта потенциальной массы CO₂, которую можно закачать в резервуар, использовалась формула:

$$M_{CO_2} = \frac{m_{\text{нефти}}}{\rho_{\text{нефти}}} \cdot \rho_{CO_2} \quad (7)$$

где $m_{\text{нефти}}$ - накопленная добыча нефти, т; $\rho_{\text{нефти}}$, ρ_{CO_2} - плотности соответственно нефти и углекислого газа в пластовых условиях, т/м³.

В табл. 3 представлены интервалы потенциальной ёмкости месторождений, полученные с помощью метода Монте-Карло.

Таблица 3

Доверительные интервалы ёмкости по месторождениям

Месторождение	Накопленная добыча, тыс. т	Плотность нефти, кг/куб. м	Плотность CO ₂ , кг/куб. м	Потенциальная ёмкость, тыс. т
Кравцовское	3200	760-793	743-770	3033-3207
Красноборское	5605	778-831	734 -761	5025-5420
Малиновское	3812	753-790	686 - 741	3360-3680

Суммарный потенциал месторождений, таким образом, составляет 11,5-12 млн. т CO₂, что сравнимо с ёмкостью резервуаров, используемых для пилотных проектов секвестрации в США и ЕС.

Экономика захоронения CO₂

Как видно из рис. 2, реальная ёмкость резервуара отличается от эффективной тем, что к ней помимо технических и технологических применяются ещё и экономические критерии. Затраты на захоронение CO₂ в среднем составляют 10-20% от общей стоимости технологии захоронения CO₂, однако могут существенно варьироваться в зависимости от типа используемого резервуара.

В табл. 4 представлены интервалы стоимости захоронения CO₂ в различных резервуарах. В целом, можно сделать вывод, что стоимость захоронения CO₂ в выработанных нефтяных месторождениях без ПНО и в глубинных соленосных пластах находится примерно на одном стоимостном уровне, по сравнению с ними захоронение в выработанных газовых месторождениях может быть несколько дороже. В случаях ПНО и ПИУМ CO₂ совершает положительную работу по вытеснению нефти (метана), что может сделать захоронение экономически более привлекательным. Однако степень неопределённости и широта диапазона в данных случаях резко увеличиваются за счёт влияния множественных факторов (эффективность технологии, цены на нефть/метан и т.д.).

На рис. 5 представлена структура стоимости захоронения CO₂ в различных типах резервуаров. Капитальные затраты (нагнетательное и добычное оборудование, контроль и оценка) – составляют 80-90% от общей стоимости. Практически во всех случаях наибольшая часть капитальных затрат приходится на оборудование нагнетательных скважин, только при

захоронении CO₂ в угольных пластах с целью повышения извлечения метана (ПИУМ) преобладает доля стоимости добычного оборудования.

Таблица 4

Сравнительный анализ стоимости захоронения CO₂ в различных геологических резервуарах
[Toth, Miketa, 2011]

Стоимость/Тип	ПНО	ПИУМ	выработанные газовые месторождения	выработанные нефтяные месторождения	глубинные соленосные пласты
Верхняя граница, USD \$/т CO ₂	73,84	18,88	19,43	11,16	11,71
Среднее значение, USD \$/т CO ₂	-12,21	-5,59	4,87	3,82	2,93
Нижняя граница, USD \$/т CO ₂	-91,26	-25,72	1,2	1,2	1,14

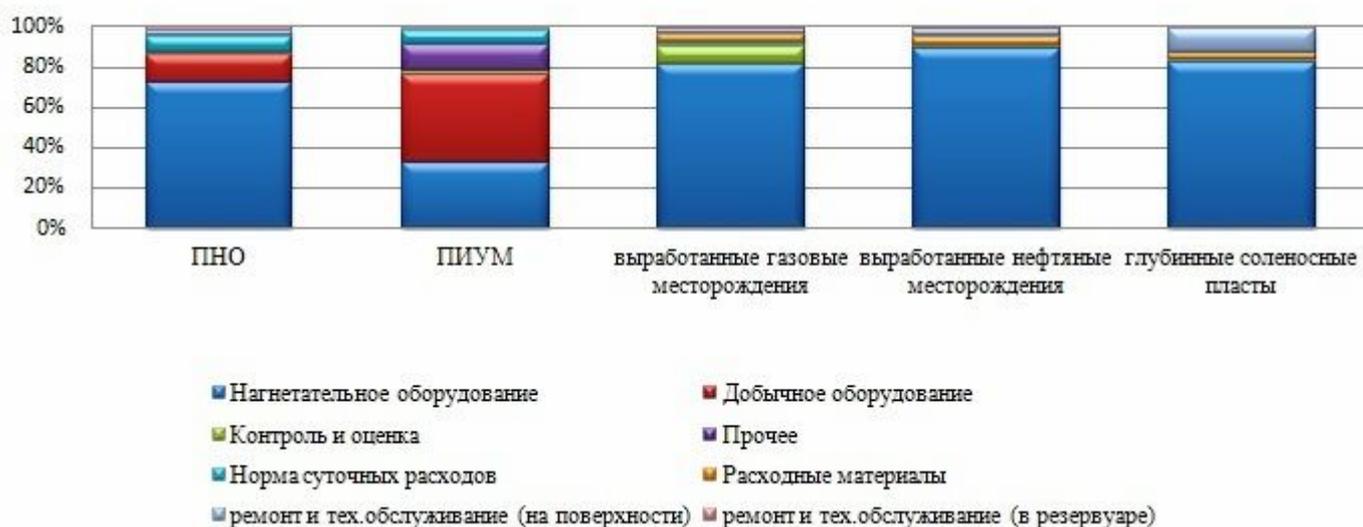


Рис. 5. Сравнительный анализ стоимости захоронения в различных резервуарах
[Heddle, Herzog, Klett, 2003]

Заключение

В мире всё большее внимание уделяется вопросам устойчивого развития и экологической безопасности, в том числе снижению антропогенного воздействия на климат. Одну из ключевых проблем в этом направлении - сокращение и стабилизацию эмиссий парниковых газов – можно решить путём секвестрации и закачки CO₂ в геологические резервуары.

В России технология пока не получила должного развития, однако в Евросоюзе, США и ряде других стран активно ведутся исследования данного вопроса и запускаются демонстрационные проекты. Учитывая богатство недр России и накопленный опыт исследований, связанных с поиском природных подземных резервуаров, в частности, в

нефтегазовой промышленности, можно предположить, что у страны существует богатый потенциал по захоронению CO₂.

В качестве примера была выбрана Калининградская область – регион, имеющий в своём расположении как крупные источники выбросов CO₂, так и нефтяные месторождения высокой степени выработанности. Был произведён расчёт потенциальной ёмкости трёх месторождений региона, показавший, что объёмы подземного пространства Калининградской области подходят для пилотных, а в дальнейшем и для коммерческих проектов.

Также приведён обзор стоимости различных вариантов захоронения в зависимости от типа резервуара. Из ряда существующих опций особый интерес с экономической точки зрения представляет захоронение в выработанных нефтяных месторождениях, позволяющее получить дополнительный доход за счёт повышения нефтеотдачи.

На настоящее время перед мировой общественностью встают вопросы, решить которые можно, лишь объединив усилия исследователей, инвесторов и промышленников всех стран. К ним относится разработка и внедрение технологий секвестрации CO₂. Для российской науки данное направление во многом является новым, однако имеющийся у страны потенциал и возможность помимо экологической получить ещё и экономическую выгоду от захоронения CO₂ должны стимулировать исследования в данном направлении.

Исследование выполнено в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых, МД-3181.2013.5.

Литература

МГЭИК – Улавливание и хранение двуокиси углерода. - Специальный доклад по просьбе Рамочной конвенции ООН об изменении климата, Кембридж, Великобритания. – 2005. - 66 с. - URL: http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srccs/srccs_spm_ts_ru.pdf (дата обращения: 08.11.2013)

Ferenc L. Toth, Asami Miketa. The Costs of the Geological Disposal of Carbon Dioxide and Radioactive Waste. – Springer. – 2011. - С. 215-262.

Final Report from the Task Force for Review and Identification of Standards for CO₂ Storage Capacity Estimation. – Carbon Sequestration Leadership Forum. – 2007. 43 с. URL: <http://www.cslforum.org/publications/documents/PhaseIIReportStorageCapacityMeasurementTaskForce.pdf> (дата обращения: 08.11.2013)

Heddle G., Herzog H., Klett M. The Economics of CO₂ Storage. – Massachusetts Institute of Technology, Laboratory for Energy and Environment. - 2003. - 115 с. - URL: http://sequestration.mit.edu/pdf/LFEE_2003-003_RP.pdf (дата обращения: 08.11.2013)

IEA – CO₂ Capture and Storage: a Key Carbon Abatement Option. - OECD/IEA, Париж, Франция – 2008. – 266 с. - URL: http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/CCS_2008.pdf (дата обращения: 08.11.2013)

National Energy Technology Laboratory - Carbon Sequestration Atlas of the United States and Canada. - DOE NETL. – 2010. - 162 с. - URL: http://www.netl.doe.gov/technologies/carbon_seq/refshelf/atlasIII/2010atlasIII.pdf (дата обращения: 08.11.2013)

Sidorova K.I., Cherepovitsyn A.E.

National Mineral Resources University (Mining University), St. Petersburg, Russia, ksu_s1991@mail.ru, alekseicherepov@inbox.ru

EVALUATION OF THE POSSIBILITY OF CARBON DIOXIDE GEOLOGICAL STORAGE

A review of possible ways of carbon dioxide storage is made. A calculation methodology for potential storage capacity of different reservoirs is described. Geographic location of possible carbon dioxide storage sites is reviewed. A number of potential capacity estimates by country and by reservoir type are compared. Regions of Russia, which are perspective in terms of carbon dioxide storage, are highlighted. As an example, potential carbon dioxide storage capacity of several oil deposits in the Kaliningrad region is calculated. A comparative analysis of storage costs for different reservoir types is carried out.

Keywords: *sequestration, carbon dioxide, potential capacity, storage sites, potential of Russia.*

References

Ferenc L. Toth, Asami Miketa. The Costs of the Geological Disposal of Carbon Dioxide and Radioactive Waste. Springer, 2011, p. 215-262.

Final Report from the Task Force for Review and Identification of Standards for CO₂ Storage Capacity Estimation. Carbon Sequestration Leadership Forum, 2007, 43 p, available at: <http://www.cslforum.org/publications/documents/PhaseIIReportStorageCapacityMeasurementTaskForce.pdf> (retrieved: 8th November, 2013)

Heddle G., Herzog H., Klett M. The Economics of CO₂ Storage. Massachusetts Institute of Technology, Laboratory for Energy and Environment, 2003, 115 p, available at: http://sequestration.mit.edu/pdf/LFEE_2003-003_RP.pdf (retrieved: 8th November, 2013)

IEA – CO₂ Capture and Storage: a Key Carbon Abatement Option. OECD/IEA. Paris, France, 2008, 266 p, available at: http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/CCS_2008.pdf (retrieved: 8th November, 2013)

MGEIK – *Ulavlivanie i khranenie dvuokisi ugleroda* [Intergovernmental Panel on Climate Change climate - Carbon dioxide capture and storage]. Cambridge, United Kingdom, 2005, 66 p, available at: http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srccs/srccs_spm_ts_ru.pdf (retrieved: 8th November, 2013)

National Energy Technology Laboratory - Carbon Sequestration Atlas of the United States and Canada. DOE NETL, 2010, 162 p, available at: http://www.netl.doe.gov/technologies/carbon_seq/refshelf/atlasIII/2010atlasIII.pdf (retrieved: 8th November, 2013)

© Сидорова К.И., Череповицын А.Е., 2013