

ПОДЗЕМНАЯ УТИЛИЗАЦИЯ УГЛЕРОДА КАК ЭЛЕМЕНТ ДЕКАРБОНИЗАЦИИ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЧЕЛОВЕКА *

Д.С. Голдобин, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

А.А. Барях, *Горный институт УрО РАН*

Для цитирования:

Голдобин Д.С., Барях А.А. Подземная утилизация углерода как элемент декарбонизации деятельности человека // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. – 2023. – № 4. – С. 6–13. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2023.4.1>

В статье обсуждается, почему уместно говорить именно об утилизации углерода даже в тех случаях, когда целью является снижение выбросов углекислого газа в окружающую среду. Дается объяснение, почему подземное захоронение (геоутилизация) углекислого газа является основным возможным решением для декарбонизации деятельности человека в масштабах планеты. Приведен краткий обзор существующих или возможных практик захоронения углекислого газа. Затронут экономико-технологический аспект реализации проектов геоутилизации, влияющий на их осуществимость, а также обсуждается фактическая статистика реализации подобных проектов за первые два десятилетия XXI века. В частности, отмечается чрезвычайно низкий процент имплементации запланированных проектов в большей части секторов промышленности, использующих ископаемое углеводородное топливо. Рассматривается региональный аспект проблемы применительно к работе предприятий Пермского края и их внешнеэкономической деятельности в условиях принимаемого и планирующегося законодательства; отмечается имеющийся потенциал недр региона для геоутилизации углекислого газа – нефтяные коллекторы, угольные пласты ликвидированных шахт Кизеловского бассейна, соляные отложения Верхнекамского месторождения.

Ключевые слова: декарбонизация, геоутилизация углерода, углекислый газ, CCS.

Действующее и ожидаемое законодательство [1–7] в большинстве развитых стран мира предполагает неизбежное сокращение количества углекислого газа, которое промышленности будет разрешено выделять в окружающую среду. Более широко принято говорить о сокращении «углеродного следа» – carbon footprint, совокупности всех выбросов парниковых газов (включая углекислый газ и метан),

произведенных прямо или косвенно отдельным человеком, организацией, мероприятием или продуктом. Между тем, ожидается, что мировой спрос на энергию увеличится почти на 50% к 2030 году.

Уже в настоящее время примерно одна треть всех выбросов CO₂, образуемых в результате деятельности человека, приходится на ископаемое топливо, используемое для производства электроэнергии.

* Работа выполнена в рамках государственного задания: тема № 121112200078-7.

Многие другие промышленные процессы также сопровождаются выделением большого количества CO_2 , например, нефтепереработка, цементное и металлургическое производства. Эти выбросы могут быть существенно сокращены без значительных изменений основного процесса за счет улавливания и захоронения CO_2 . Есть много способов, которыми можно сократить выбросы CO_2 , например, за счет повышения эффективности производства электроэнергии или за счет использования возобновляемых источников энергии. Однако большинство сценариев предполагают, что сами по себе эти шаги не позволят в короткое время добиться необходимого сокращения выбросов CO_2 , и ископаемые виды топлива, такие как уголь, нефть и природный газ, вероятно, будут составлять значительную часть мирового энергетического баланса в течение многих последующих лет. В этой связи улавливание и геологическое захоронение CO_2 от сжигания ископаемого топлива может сыграть важную роль в решении этой проблемы.

Нужно отметить, что современная (Четвертичный период) биосфера активно и практически без потерь конвертирует различные углеродсодержащие соединения друг в друга ([8], популярное изложение вопроса можно найти в Интернет-статье [9]). Поэтому с точки зрения глобальных процессов, включая изменение климата, важен общий баланс углерода в системе, а не, например, количество CO_2 в атмосфере и гидросфере. Соответственно, следует ставить вопрос о декарбонизации производств или утилизации углерода вообще, а не выбросах углекислого газа в частности.

Эффективность современной биосферы в удержании углерода имеет и еще один аспект. Она ограничивает применимость растений для поглощения углекислого газа из атмосферы в масштабах планеты. В рамках естественного жизненного цикла весь углерод, связанный, например, деревом из атмосферы, по прошествии достаточного времени полностью возвращается в атмосферу: существуют классы грибов, разлагающие оказавшиеся в почве древесные останки.

Полный естественный цикл может быть разорван способом, первый взгляд на который у большинства людей вызовет недоумение, однако именно он предполагается на фермах по улавливанию атмосферного углерода с помощью мангровых насаждений (мангровые леса дают наибольшую экономическую рентабельность для проектов конверсии атмосферного углерода в древесную массу [10]). Деревья в момент их максимального разрастания, но до развития процессов старения, следует срубить и подвергать пиролизу — «сжигать» без достаточного доступа воздуха. Образующийся в результате пиролиза древесный уголь подлежит захоронению под землей, исключая дальнейшее окисление. Данный подход востребован и останется таковым в будущем, поскольку он позволяет улавливать CO_2 , поступающий в атмосферу от малых потребителей углеводородного топлива. Вместе с тем, реализация такого подхода в масштабах, сопоставимых с суммарными выбросами CO_2 , нецелесообразна. Основным путем декарбонизации хозяйственной деятельности человека оказывается подземное захоронение углерода CO_2 .

Улавливание и геоутилизация углерода

В комплексном подходе к проблеме улавливания и утилизации углерода (CCS, Carbon Capture and Storage / Sequestration), связанного с CO_2 , выделяют три типичных технологии улавливания: постсжигательные, предсжигательные и сжигание в кислороде [11]. При постсжигательном улавливании CO_2 удаляется после сжигания топлива, что применимо на электростанциях, работающих на органическом топливе. Данная технология хорошо проработана и в настоящее время также используется для иных технологических процессов в промышленности. В исследовательской литературе постсжигательное улавливание является наиболее популярным в силу того, что уже существующая электростанция может быть доработана для внедрения технологии улавливания. Предсжигательная технология применима

при производстве удобрений, химических веществ, газового топлива (водород, метан) и энергии. В рамках этой технологии топливо окисляется частично, с образованием синтез-газа ($\text{CO} + \text{H}_2$), далее CO реагирует с вводимыми водяными парами и дает CO_2 и H_2 . В данном решении CO_2 улавливается из сравнительно чистого выхлопного газа. Водород теперь может использоваться как топливо, не дающее CO_2 при сжигании; углекислый газ устранен из процесса до сжигания этого топлива. При сжигании в чистом кислороде (вместо воздуха) рециркуляция газообразных продуктов горения в зону сжигания и их охлаждение могут быть организованы таким образом, чтобы водяные пары полностью конденсировались в жидкую фазу, а итоговый выхлопной газ на 100% состоял из CO_2 . В этом случае утилизация облегчена тем, что не требуется отделять подлежащие и не подлежащие захоронению компоненты выхлопного газа.

При пост- и предсжигательном улавливании требуется сепарация CO_2 из выхлопных газов. Используемый в промышленности метод аминовой очистки выхлопных газов от CO_2 отличается высокой дороговизной, что ограничивает темпы его внедрения. Предполагают [12], что разрабатываемые новые технологические решения (например, применение ферментов, мембран и хемосорбентов) будут способствовать удешевлению данного метода и его более широкому внедрению.

Утилизация CO_2 путем захоронения в подземных геологических формациях в равной мере применима для всех технологий улавливания углерода.

Технологии геоутилизации предполагают закачку CO_2 , как правило, в сверхкритическом состоянии в нефтяные и газовые коллекторы, солевые водоносные горизонты, угольные пласты (не подлежащие разработке), насыщенные рассолом базальтовые образования. При этом надежное удержание CO_2 может обеспечиваться как физическими (непроницаемые покрышки), так и геохимическими механизмами [13].

Глобально установки CCS улавливают около 40 миллионов тонн (Мт) CO_2 в год [14]. Порядка 80% этого уловленного углерода используется для повышения нефтеотдачи [15]. Метод применяется для добычи трудноизвлекаемых запасов нефти из глубоких залежей путем закачки CO_2 и снижения вязкости нефтей [16]. Вместе с тем, по некоторым оценкам [17], использование этих нефтепродуктов приводит к увеличению выбросов CO_2 и может усугублять негативные последствия глобального потепления. Таким образом, закачка CO_2 в нефтеносные пласты для увеличения дебита скважин может иметь ограниченную применимость с точки зрения утилизации углерода, поскольку CO_2 растворяется в нефти и после сжигания нефтепродуктов будет попадать в атмосферу [18].

Использование соляных водоносных горизонтов для захоронения химических отходов может быть распространено на проблему утилизации CO_2 . Существенным плюсом горизонтов минерализованных рассолов является их большая потенциальная емкость. Высокая степень минерализации рассолов может послужить химическому связыванию утилизируемого CO_2 в дальней перспективе [13]. Положительный опыт реализации этих проектов уже имеется [19]. Первое в мире хранилище CO_2 в промышленных масштабах действует на месторождении Sleipner в Северном море с 1996 года. Углекислый газ закачивается на глубину около 1 000 м в песчаный пласт Утсира, крупный региональный соленосный водоносный горизонт. Проект по секвестрации Sleipner находится в центре внимания программы SACS (Saline Aquifer CO_2 Storage), цели которой включают мониторинг, моделирование состояния закачанного CO_2 , а также региональную характеристику Утсирского водохранилища и его покрывающих пород. В работе [19] описаны некоторые результаты исследований и выделены общие аспекты характеристики геологического коллектора, которые особенно хорошо применимы к закачке CO_2 в водоносные горизонты регионального масштаба с

низким структурным рельефом. Вместе с тем проблемой остается миграция CO₂ и опасность его выхода в разломных зонах покрывающих пород.

Близкой к этим подходам является утилизация CO₂ в искусственных хранилищах, создаваемых в мощных соляных формациях методом выщелачивания. В этом случае подземный резервуар полностью заполнен насыщенным соляным рассолом, в котором может растворяться закачиваемый CO₂.

Более дискуссионной является идея захоронения CO₂ непосредственно в океане. Основная проблема здесь в том, что углекислый газ реагирует с водой с образованием кислоты, поэтому океаны могут стать значительно более кислыми, что может иметь разрушительные последствия для морских экосистем.

Не подлежащие разработке каменноугольные пласты могут использоваться для геоутилизации в связи с их способностью абсорбировать CO₂. Техническая применимость данного подхода требует проницаемости пласта. При этом абсорбция CO₂ сопровождается высвобождением метана. На практике данная технология должна быть сопряжена с захватом метана, который далее может быть использован в качестве топлива. Это может оказать положительное влияние на рентабельность технологии. Хотя добываемый метан является новым потенциальным источником углерода, этот тип углеводородного топлива оказывает наименьшее негативное влияние на экологию. В качестве примера можно привести проект CARBOLAB, который финансируется европейской программой RFC (Исследовательский фонд угля и стали). В нем участвуют шесть партнеров из Испании, Франции и Польши. Одной из основных задач этого проекта является закачка CO₂ в угольный пласт, расположенный на глубине 464 м в карьере Монтсакро, Астурия, Испания. Проводятся исследования процессов абсорбции CO₂ и последующей десорбции метана [20].

Вместе с тем следует отметить, что в целом, к 2021 году многие проекты, связанные с утилизацией CO₂ в угольные пласты, были свернуты их операторами как чрезвычайно дорогие и нерентабельные, хотя немногим более 10 лет назад с ними были связаны большие ожидания. Кроме того, обвал цен на углеводороды во время пандемии COVID-19 обострил вопрос рентабельности: при низких ценах на энергоносители затраты 100 евро на 1 тонну закачанного CO₂, являются чрезвычайно высокими.

Показательна статистика реализации CCS-проектов по отраслям экономики США в 2000–2020 гг. Заинтересованный читатель найдет в открытой доступной публикации [21] ясное графическое представление систематизированных данных по этому вопросу. Коротко сформулируем некоторые основные моменты, которые можно видеть в тех данных. Имеет место постепенный рост фактических ежегодных объемов захоронений CO₂ в газопереработке и иной промышленности, не связанной с энергетикой. Планы по скачкообразному росту объемов захоронения в 2006 и 2009–2010 годах были не реализованы полностью. Некоторый скачок темпов фактического захоронения в 2010 году составляет 1/10 от того, что должно было быть реализовано с 2006 по 2010 год по плану. Рост объемов захоронения, планировавшийся на 2011–2020 годы, практически не состоялся. В итоге, по состоянию на 2021 год, в газопереработке реализовано 75% CCS-проектов, в остальных отраслях объемы захоронения опускаются вплоть до 10% от запланированного. При этом по плану на газопереработку, где показатели имплементации сравнительно удовлетворительны, к 2021 году должно было приходиться немногим более 1/5 объемов захоронения. Иными словами, в секторах, на которые предполагалось 4/5 объемов захоронения, степень имплементации планов составила 1/10.

В настоящем материале не учитываются изменения в работе энергоемких производств многих крупных экономик и изменения международных логистических цепочек в 2022 году и в настоящее время.

Во-первых, эти изменения имеют политический характер, а не обусловлены экономическими механизмами и экологическими обстоятельствами. Во-вторых, прогнозирование развития этих изменений и оценки их временных рамок лежат вне поля естественнонаучных дисциплин.

По оценкам специалистов, использование CCS-технологий будет потреблять от 10 до 40% энергии, вырабатываемой электростанцией [22]. При этом 30% сверхпотребления будет приходиться на сжатие CO₂, а 10% – на работу насосов и вентиляторов [23]. Для газовых электростанций увеличение расхода топлива при внедрении CCS-технологий ожидается на уровне 15% [24]. Совокупное увеличение стоимости электроэнергии для потребителя ожидается на уровне 30–60% (для Великобритании [25]). Таким образом, можно отметить два момента:

- оптимизация процесса геоутилизации, на который приходится 40% сверхпотребления энергии, играет важную роль;
- наиболее перспективным, с экологической точки зрения, является использование газовых электростанций (увеличение расхода топлива существенно ниже, чем для других видов углеводородного топлива: 15%).

Региональный аспект проблемы подземной утилизации углерода в Пермском крае

Недра Пермского края предоставляют многофункциональный полигон для захоронения углерода. Это связано с наличием в пределах его территории нефтяных коллекторов, угольных пластов ликвидированных шахт Кизеловского бассейна, мощных соляных отложений Верхнекамского месторождения, пригодных для строительства специальных хранилищ. Представляет интерес изучение технологических возможностей формирования хранилищ в осадочных отложениях, обеспечивающих безопасную и надежную (бессрочную) утилизацию CO₂ в различных фазовых состояниях: газовом, сжиженном, газогидратном.

Особо следует отметить, что с консервацией Кизеловского угольного бассейна связан один из ключевых социально-экономических вызовов в Пермском крае.

Кроме того, с 2026 года начнет взиматься «Трансграничный углеродный налог» – дополнительный сбор за импорт товаров в Европейский союз и Великобританию (по сообщениям информационных агентств [3], по состоянию на 2023 год, Великобритания предполагает ввести этот налог совместно с ЕС). Этим налогом будут облагаться товары, при производстве которых эмиссия CO₂ осуществлялась выше устанавливаемых в ЕС норм: в первую очередь это цемент, сталь, алюминий, удобрения, электроэнергия и водород. Введение налога нацелено на предотвращение выноса производств, игнорирующих экологические стандарты ЕС, за пределы юрисдикции ЕС с целью получения конкурентного преимущества. В идеале, налог должен полностью нивелировать конкурентное преимущество, получаемое за счет экономии на несоблюдении экологических стандартов. Данный налог является инструментом Механизма трансграничного углеродного регулирования ЕС (Carbon Border Adjustment Mechanism, EU [1, 2]). Механизм официально вступил в силу на следующий день после публикации 16 мая 2023 г. в Официальном журнале ЕС (The Official Journal of the European Union). Переходный период начинается 1 октября 2023 г. и продлится до конца 2025 г., первый отчетный период для импортеров оканчивается 31 января 2024 г., цель – подготовка участников рынка к введению налога. По оценкам сотрудников Центра макроэкономических исследований НИФИ [26–28], вступление в силу трансграничного углеродного налога в странах ЕС может привести к ежегодному снижению российского ВВП на 0,17%, при более неблагоприятных сценариях потери возрастают до 0,47%. Законодательная и исполнительная власть Российской Федерации придерживается тех же взглядов на проблему декарбонизации,

что и Европейский союз: в 2023 году работы по развитию законодательства и материально-инструментальной базы в России продолжают в том же направлении, которое было задано законодательными актами 2021 года [4–7].

Введение Трансграничного углеродного налога важно для работы на международных рынках ряда ключевых для экономики региона и России предприятий: для этих предприятий рассчитанный по прави-

лам ESG углеродный след оказывается большим. Безусловно, высокие показатели углеродного следа свидетельствуют и о существенном влиянии работы предприятий на экологическую ситуацию в регионе. Территориальное же размещение этих предприятий благоприятствует использованию угольных пластов Кизеловского бассейна и соляных отложений Верхнекамского месторождения для захоронения собственных выбросов CO₂.

Библиографический список

1. The European Parliament and the Council of the European Union. Regulation (EU) 2023/956 of the European Parliament and of the Council of 10 May 2023 establishing a carbon border adjustment mechanism // Official Journal of the European Union. – 2023. – Vol. 66. – L. 130. – P. 52–104.
2. An official website of the European Union. Taxation and Customs Union. Carbon Border Adjustment Mechanism [Электронный ресурс] – URL: https://taxation-customs.ec.europa.eu/carbon-border-adjustment-mechanism_en/ (дата обращения: 04.09.2023).
3. ТАСС. FT: ЕС и Британия хотят ввести совместный трансграничный углеродный налог (Лондон, 30 марта 2023) [Электронный ресурс] – URL: <https://tass.ru/ekonomika/17405445> (дата обращения: 04.09.2023).
4. Федеральный закон от 2 июля 2021 г. № 296-ФЗ «Об ограничении выбросов парниковых газов» // Российская газета – Федеральный выпуск. – 2021. – № 147 (8498). – URL: <https://rg.ru/documents/2021/07/07/fz-ob-ograni4enii-vybrosov-parnikovyyh-gazov-dok.html> (дата обращения: 04.09.2023).
5. Федеральный закон от 6 марта 2022 г. № 34-ФЗ «О проведении эксперимента по ограничению выбросов парниковых газов в отдельных субъектах Российской Федерации» // Российская газета – Федеральный выпуск. – 2022. – № 52 (8700). – URL: <https://rg.ru/documents/2022/03/11/parnik.html> (дата обращения: 04.09.2023).
6. *Калмацкий М.* Климатические проекты в России будут снижать выбросы парниковых газов // Российская газета – Спецвыпуск: Экология. – 2023. – № 121 (9066). – URL: <https://rg.ru/2023/06/05/reg-dfo/uglerod-ne-ostavit-sleda.html> (дата обращения: 04.09.2023).
7. *Задера С.* Компании начнут платить штрафы за неверные данные в отчетах о выбросах парниковых газов // Российская газета – Федеральный выпуск. – 2023. – № 131 (9076). – URL: <https://rg.ru/2023/06/18/otvetiat-za-vybrosy.html> (дата обращения: 04.09.2023).
8. *Floudas D., Binder M., Riley R., Barry K., Blanchette R.A.* The Paleozoic Origin of Enzymatic Lignin Decomposition Reconstructed from 31 Fungal Genomes // Science. – 2012. – Vol. 336. – № 6089. – P. 1715–1719.
9. *Евсеев А.* Образование каменного угля прекратилось из-за грибов. Правда.Ру (6 июля 2012) [Электронный ресурс] – URL: <https://www.pravda.ru/mysterious/1121121-agaricomycetes/> (дата обращения: 04.09.2023).
10. *De Groot R., Brander L., van der Ploeg S., Costanza R.* [et al.] Global estimates of the value of ecosystems and their services in monetary units // Ecosystem Services. – 2012. – Vol. 1. – P. 50–61.
11. *Kanniche M., Gros-Bonnivard R., Jaud P., Valle-Marcos J., Amann J.-M., Bouallou C.* Pre-combustion, post-combustion and oxy-combustion in thermal power plant for CO₂ capture // Applied Thermal Engineering. – 2010. – Vol. 30. – № 1. – P. 53–62.
12. Рациональное природопользование. Технологии улавливания и захоронения углерода. Трендлеттер #6, 2017. [Электронный ресурс] – URL: <https://issek.hse.ru/trendletter/news/206229435.html> (дата обращения: 04.09.2023).
13. Good plant design and operation for onshore carbon capture installations and onshore pipelines. A Recommended Practice Guidance Document. – London: Energy Institute, 2010. – 126 p.
14. International Energy Agency. Carbon capture, utilisation and storage – Fuels & Technologies [Электронный ресурс] – URL: <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/carbon-capture-utilisation-and-storage/> (дата обращения: 04.09.2023).
15. International Energy Agency. CCUS in Clean Energy Transitions – Analysis. [Электронный ресурс] – URL: <https://www.iea.org/reports/ccus-in-clean-energy-transitions/> (дата обращения: 04.09.2023).

16. Enhanced Oil Recovery – an overview. ScienceDirect Topics. [Электронный ресурс] – URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/enhanced-oil-recovery/> (дата обращения: 04.09.2023).
17. NRDC. *Denchak M.* Fossil Fuels: The Dirty Facts (01 June 2018). [Электронный ресурс] – URL: <https://www.nrdc.org/stories/fossil-fuels-dirty-facts/> (дата обращения: 04.09.2023).
18. Watt-Logic. Smoke & mirrors: a new report into the viability of CCS (21 July 2018) [Электронный ресурс] – URL: <https://watt-logic.com/2018/07/21/ccs/> (дата обращения: 04.09.2023).
19. *Chadwick R.A., Zweigel P., Gregersen U., Kirby G.A., Holloway S., Johannessen P.N.* Geological reservoir characterization of a CO₂ storage site: The Utsira Sand, Sleipner, northern North Sea // *Energy*. – 2004. – Vol. 29. – № 9–10. – P. 1371–1381.
20. *Gal F., Proust E., Leynet A.* CO₂ injection in a coal seam – Insights from the European CARBOLAB project with focus on water geochemical monitoring // *Energy Procedia*. – 2014. – Vol. 63. – P. 5836–5848.
21. *Abdulla A., Hanna R., Schell K.R., Babacan O., Victor D.G.* Explaining successful and failed investments in U.S. carbon capture and storage using empirical and expert assessments // *Environmental Research Letters*. – 2020. – Vol. 16. – № 1. – P. 014036.
22. *Thorbjörnsson A., Wachtmeister H., Wang J., Höök M.* Carbon capture and coal consumption: Implications of energy penalties and large scale deployment // *Energy Strategy Reviews*. – 2015. – Vol. 7. – P. 18–28.
23. *Rubin E.S., Mantripragada H., Marks A., Versteeg P., Kitchin J.* The outlook for improved carbon capture technology // *Progress in Energy and Combustion Science*. – 2012. – Vol. 38. – № 5. – P. 630–671.
24. *Metz B., Davidson O., de Coninck H.C., Loos M., Meyer L.A.* (eds.) IPCC special report on CO₂ Capture and Storage. – Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2005. – 431 p.
25. BBC Briefing – Energy [Электронный ресурс] – URL: <https://news.files.bbc.co.uk/include/newsspec/pdfs/bbc-briefing-energy-newsspec-25305-v1.pdf> (дата обращения: 04.09.2023).
26. *Едовина Т.* Углеродный налог и ныне тут // Газета «Коммерсантъ». – 2023. – № 125. – С. 2.
27. *Судаков С.С., Лазарян С.С., Вотинов А.И.* Трансграничное углеродное регулирование ЕС: оценка будущих платежей для стран-экспортеров // *Финансовый журнал*. – 2022. – Т. 14. – № 5. – С. 71–88.
28. *Lazaryan S., Sudakov S.* Impact of EU's CBAM on EAEU Countries: The Case of Russia // *Devezas T.C., Leitão J.C.C., Yegorov Y., Chistilin D.* (eds) *Global Challenges of Climate Change, Vol.2. World-Systems Evolution and Global Futures*. – Cham: Springer, 2023. – P. 157–172. https://doi.org/10.1007/978-3-031-16477-4_9.

UNDERGROUND CARBON SEQUESTRATION AS A COMPONENT OF DECARBONIZATION IN ANTHROPOGENIC ACTIVITY

D.S. Goldobin¹, A.A. Baryakh²

¹ *Institute of Continuous Media Mechanics of UB RAS*

² *Mining Institute of UB RAS*

For citation:

Goldobin D.S., Baryakh A.A. Underground carbon sequestration as a component of decarbonization in anthropogenic activity // *Perm Federal Research Center Journal*. – 2023. – № 4. – P. 6–13. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2023.4.1>

The article discusses why it is appropriate to talk about carbon utilization even in cases where the goal is to reduce carbon dioxide emissions into the environment. An explanation is given as to why underground carbon dioxide burial (geosequestration) is the main feasible solution for the decarbonization of anthropogenic activity at the planetary scale. A brief review of existing or promising practices of carbon dioxide geosequestration is provided. The economic and technological aspects of the implementation of geosequestration projects, affecting their feasibility, are viewed, as well as the relevant statistics of such projects over the first two decades of the XXI century. In particular, the extremely low percentage of implementation of planned projects is noted in the majority of industrial sectors consuming fossil hydrocarbon fuels. The regional aspect of the problem is considered in relation to the work of industrial companies of the Perm Region and their foreign economic activity

under the conditions of the enacted and planned legislation. The available potential of the regions's subsoil for geosequestration of carbon dioxide is stated - oil collectors, coal seams of the sealed mines of the Kizelovsky basin, salt deposits of the Verkhnekamsky deposit.

Keywords: decarbonisation, underground sequestration of carbon, carbon dioxide, CCS.

Сведения об авторах

Голдобин Денис Сергеевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией подземной утилизации углерода, Институт механики сплошных сред УрО РАН – филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН (ИМСС УрО РАН), 614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, 1; e-mail: denis.goldobin@gmail.com

Барях Александр Абрамович, доктор технических наук, профессор, академик РАН, руководитель научного направления «Горные науки», Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН (ПФИЦ УрО РАН), 614900, г. Пермь, ул. Ленина, 13А, Горный институт УрО РАН – филиала Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН («ГИ УрО РАН»), 614907, г. Пермь, ул. Сибирская, 78а; e-mail: bar@mi-perm.ru

Материал поступил в редакцию 14.03.2023 г.