

**4ФУНДАМЕНТАЛЬНІ ТА ПРИКЛАДНІ ПРОБЛЕМИ ЕКОЛОГІЇ  
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГИИ  
FUNDAMENTAL AND APPLIED PROBLEMS OF ECOLOGY**

---

УДК 504.062.2 : 504.062.4 : 504.7

© С. В. Беспалова, Н. С. Шестакин

**ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ ВНЕДРЕНИЯ НИЗКОУГЛЕРОДНЫХ ОТКРЫТЫХ  
ИННОВАЦИЙ В ИНДУСТРИАЛЬНЫХ РЕГИОНАХ УКРАИНЫ**

*Донецкий национальный университет; 83001, г. Донецк, ул. Университетская, 24  
e-mail: lcoir@ukr.net*

*Беспалова С. В., Шестакин Н. С. Оценка возможностей внедрения низкоуглеродных открытых инноваций в индустриальных регионах Украины. – Проведены исследования потенциала эмиссии и поглощения CO<sub>2</sub> в восточных областях Украины. Созданы географические информационные системы по основным источникам эмиссии CO<sub>2</sub>, по возможным участкам геологического хранения CO<sub>2</sub> и по перспективным направлениям транспортировки CO<sub>2</sub> от кластеров предприятий до хранилищ.*

*Ключевые слова:* CO<sub>2</sub>, эмиссия, геологическое хранение, транспортировка, ГИС, открытые инновации.

**Введение**

В настоящее время уже происходят реальные изменения климата, главной причиной которых являются антропогенные выбросы парниковых газов и в наибольшей степени выбросы диоксида углерода (CO<sub>2</sub>) из стационарных источников. Ещё в первых докладах Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) была обоснована причина изменения климата, а также намечены пути решения возникающих проблем [1]. Такие же тенденции и перспективы глобального развития подтверждаются и в настоящее время в последних докладах МГЭИК и в докладах других компетентных международных организаций [2]. После проведения тщательных экономических исследований проблем, возникающих в связи с изменением климата, были сделаны выводы о целесообразности интенсивного внедрения в энергетику всех стран мира новых технологий улавливания и хранения диоксида углерода (УХУ) как основного инструмента противодействия уже происходящим процессам глобального изменения климата [3, 4]. Технологии УХУ сейчас уже разрабатываются и внедряются в исследовательских, пилотных и промышленных масштабах, а также определены перспективы их развития до 2050 г., когда использование технологий УХУ позволит вместо увеличения эмиссии CO<sub>2</sub> к 2050 г. на 130% по сравнению с уровнем 2005 года достигнуть уменьшения эмиссии CO<sub>2</sub> до 50% [5-7].

Однако в Украине не проводится «секвестрация CO<sub>2</sub>, который выбрасывается в процессе сжигания углеродосодержащих видов топлива для целей долгосрочного хранения, например, в геологических формациях» [8, с. 90]. Принятая в 2006 г. Энергетическая стратегия Украины до 2030 г. [9] не планирует в ближайшее время исследовать, разрабатывать и внедрять технологии УХУ в энергетику Украины.

Поэтому сейчас необходимо выполнить оценки возможных сценариев внедрения технологий УХУ в энергетический сектор Украины и, прежде всего, на предприятиях восточных регионов, где сосредоточены основные энергетические и промышленные мощности Украины, которые выбрасывают значительные объемы парниковых газов, а также имеются глубокие геологические формации, очевидно пригодные для целей долговременного хранения сверхкритического CO<sub>2</sub>.

Выполнение таких исследований, а также последующих технологических разработок с их внедрением на энергетических предприятиях позволят Украине внести достойный вклад в решении проблем, вызванных глобальным изменением климата.

В начале 90-х годов Украина занимала второе место в Европе по объемам выбросов CO<sub>2</sub>, в 2009 г. – седьмое, а в 2011 г. уже занимает шестую позицию (рис. 1) и имеет тенденцию постепенного увеличения этих объемов, в то время как большинство стран мира поставили перед собой цели по уменьшению выбросов CO<sub>2</sub> в ближайшее десятилетие [10].

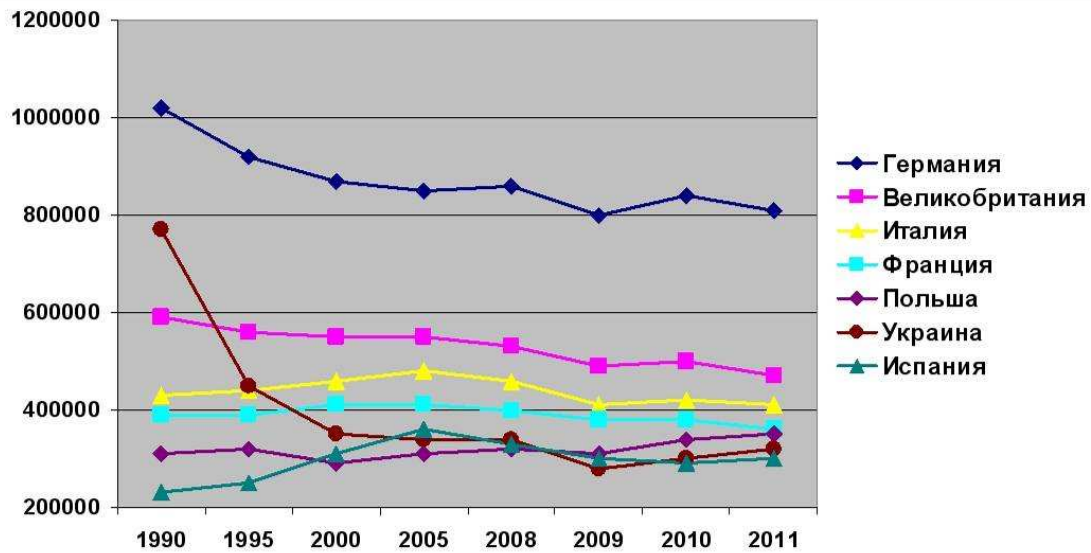


Рис. 1. Тренды объемов эмиссии CO<sub>2</sub> в странах Европы за 1990-2011 гг.

Основываясь на статистических данных Украины за 2010 г. [11], можно отметить, что более 83% объемов эмиссии CO<sub>2</sub> происходит от стационарных источников загрязнения (рис. 2), когда не принимаются во внимание выбросы CO<sub>2</sub> от частного жилого сектора, что отличается от статистических требований МГЭИК.

Такое расхождение в требованиях к статистическим данным относительно выбросов CO<sub>2</sub> из разных источников и различие в списках источников эмиссии CO<sub>2</sub> уже привели к лишению Украины статуса соответствия требованиям Киотского протокола. В 2012 г. был подготовлен новый вариант Национального кадастра антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов в Украине за 1990-2010 гг. [8] с учетом требований МГЭИК, и этот статус сейчас восстановлен.

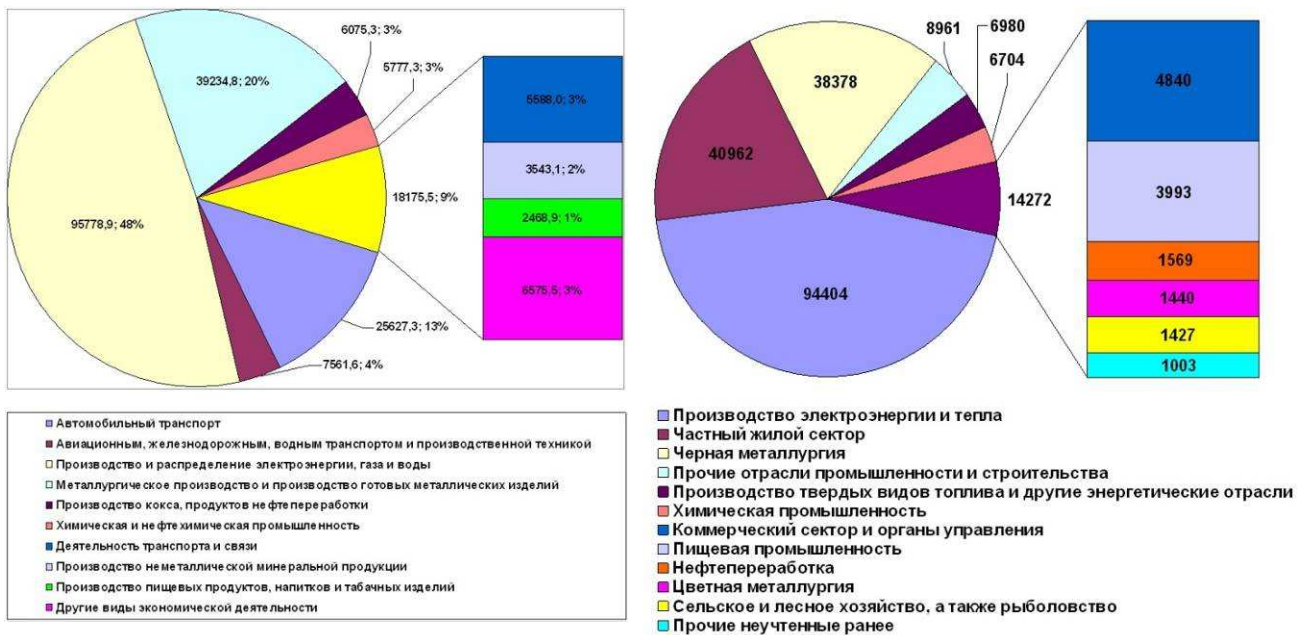


Рис. 2. Выбросы CO<sub>2</sub> в атмосферу стационарными и мобильными источниками загрязнения по видам экономической деятельности в 2010 году в тыс. т по статистическим данным [11] и по данным Национального кадастра антропогенных выбросов [8].

При этом 74% выбросов CO<sub>2</sub> производят предприятия энергетического, металлургического и химического секторов экономики. В дальнейших исследованиях как раз и будут учитываться такие предприятия.

Категории источников эмиссии CO<sub>2</sub>, которые приняты в статистической отчетности Украины, существенно отличаются от категорий МГЭИК. Поэтому в Национальном кадастре антропогенных выбросов [8] представлены несколько другие данные, в частности: по категории 1.А.1.а – Производство электроэнергии и тепла: выбросы CO<sub>2</sub> при сжигании всех видов топлива составляют 94404 тыс. т; по категории 1.А.4.б – Частный жилой сектор: 40962 тыс. т; по категории 1.А.2.а – Черная металлургия: 38378 тыс. т.; по остальным категориям – менее 10000 тыс. т. Чтобы в дальнейшем избежать этих разногласий в данных, необходимо ввести в статистические формы отчетности предприятий категории МГЭИК.

Если рассмотреть распределение объемов эмиссии CO<sub>2</sub> по регионам Украины [12], то можно выделить пять областей Украины, в которых выбросы CO<sub>2</sub> превышают 10 млн. т в год. В этих областях (Донецкой, Днепропетровской, Запорожской, Луганской и Харьковской) как раз и сосредоточены крупнейшие тепловые электростанции (ТЭС), которые учитываются в Национальном кадастре антропогенных выбросов [8]: Запорожская, Змеевская, Зуевская, Криворожская, Кураховская, Луганская, Приднепровская, Славянская, Старобешевская и Углегорская.

### **Потенциал источников эмиссии CO<sub>2</sub>**

На основе информации из четырёх открытых баз данных: МЭА [13], BELLONA [14], SARMA [15] и ДТЭК [16], а также с учётом новых дополнительных данных непосредственно от тепловых электростанций, металлургических, коксохимических, цементных, химических и нефтеперерабатывающих заводов создана географическая информационная система (ГИС) источников CO<sub>2</sub>, которая охватывает пять восточных областей Украины (указанных ранее). Эта ГИС в тестовом режиме находится в свободном доступе на веб-сайте проекта LCOIR-UA [17], и предприятия могут ознакомиться с данными о своих выбросах CO<sub>2</sub>, которые приводятся в сетевых источниках, и откорректировать эти данные в соответствии с реальными объемами выбросов своего предприятия.

Используя эту ГИС, можно оценить количество выбросов CO<sub>2</sub> от конкретного предприятия, а также получить данные о его географическом положении и другую полезную информацию о нем (5 вариантов величины значка предприятия соответствуют следующей градации предприятий по объемам выбросов CO<sub>2</sub>: 1 Мт/год и менее; 1-4 Мт/год; 4-7 Мт/год; 7-10 Мт/год; 10 Мт/год и более). ГИС дает возможность одновременно анализировать все предприятия указанных отраслей экономики Украины (рис. 3) или рассматривать только компании в избранной отрасли:

- угольных электростанций (по состоянию на 2011 г. [18] доля угля в топливе ТЭС составляет более чем 97,5% против 52,3%, как показано в [15]) в настоящий момент представлено в ГИС – 12;

- газовых электростанций – 1;

- металлургических заводов – 13;

- коксохимических заводов – 14;

- цементных заводов – 8;

- различных химических заводов (в том числе нефтеперерабатывающих) – 3.

Планируется дополнить эту базу данных информацией о выбросах CO<sub>2</sub> от предприятий жилищно-коммунальных хозяйств крупных городов (тепловых котельных и очистных сооружений), конгломератов жилых домов частного сектора, а также от автомобильного, железнодорожного, авиационного и водного транспорта.

Так как эта ГИС основана на неофициальных источниках информации, то реальные значения объемов эмиссии CO<sub>2</sub> конкретного предприятия могут существенно отличаться от значений представленных в ГИС.

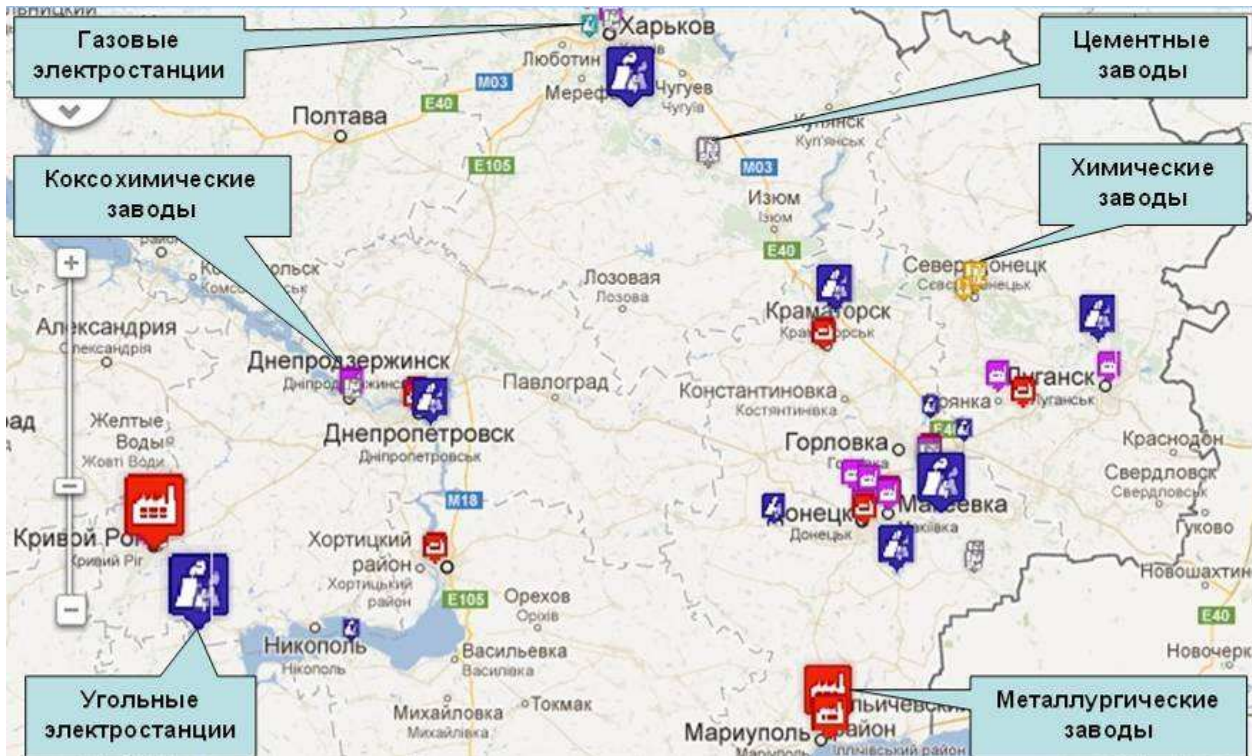


Рис. 3. ГИС стационарных источников эмиссии CO<sub>2</sub> в восточных областях Украины.

В таких случаях предприятие может обратиться к веб-сайту проекта LCOIR-UA [17] с предложением обновить информацию об объемах эмиссии CO<sub>2</sub>, чтобы она была в соответствии с официальной статистической отчетностью предприятия. Такое регулярное обновление информации об объемах эмиссии CO<sub>2</sub> будет свидетельствовать о стремлении предприятия к ответственному отношению к проблемам глобального изменения климата и об осознании роли своего «углеродного следа» в возникновении этих проблем.

### Потенциал резервуаров хранения CO<sub>2</sub>

Закачивание CO<sub>2</sub> в геологические формации насчитывает более чем тридцатилетний опыт работ по повышению нефте- и газоотдачи пластов. Кроме этого, в последнее время в различных странах проводятся многочисленные исследования по геологическому хранению CO<sub>2</sub>. В качестве долгосрочных хранилищ CO<sub>2</sub> рассматривают главным образом поровые или трещиноватые осадочные породы (коллекторы), ограниченные от окружающей горной среды и земной поверхности слабопроницаемыми или практически непроницаемыми породами (флюидоупорами или покрышками) [5].

Следует отметить, что природные хранилища газов (в том числе и горючих) естественного генезиса являются надежными на протяжении сотен тысяч и миллионов лет, утечки газов из них пренебрежимо малы.

Выделяются три основных типа формаций, в которых возможно геологическое хранение CO<sub>2</sub>: истощенные или находящиеся на стадии истощения нефтегазоносные бассейны, глубоко залегающие соленосные формации и не имеющие промышленного значения угольные пласты. Среди других возможных вариантов геологических формаций также рассматриваются базальты и горючие сланцы, однако их потенциал еще пока недостаточно изучен.

Успешность геологического метода хранения CO<sub>2</sub> подтверждается результатами экспериментов, проводимых в разное время компаниями MRCSP, MGSC, SECARB, SWP, WESTCARB, Big Sky, PCOR (США), а также в рамках проектов Weyburn, Fenn Big Valley (Канада), Sleipner (Норвегия), Yubari (Япония), Qinshui Basin (Китай) и др. [19-21].



Поиск и выбор геологических структур и горизонтов, способных служить долгосрочными хранилищами CO<sub>2</sub> в нефтегазоносных бассейнах, основывается, как правило, на результатах предыдущих поисковых и геологоразведочных работ, а определение перспективных участков хранения CO<sub>2</sub> требует дополнительных исследований.

### Анализ и обоснование проблемы

На территории Украины расположены крупные нефтегазоносные провинции с большим объемом продуктивных горизонтов. Один из самых крупных нефтегазоносных районов – Днепровско-Донецкий бассейн расположен в границах двух больших структур – Днепровско-Донецкой впадины (ДДВ) и Донецкого каменноугольного бассейна (Донбасса). Газоносность Днепровско-Донецкого бассейна тесно связана с терригенными осадочными породами среднего-верхнего карбона и нижней перми. Метановая газоносность Донбасса также связана с угленосной толщей карбона.

Результаты предыдущих геологоразведочных работ показали, что в геологических условиях ДДВ и Донбасса одними из перспективных в отношении газоносности районами являются участки с сохранными гидрохимическими отложениями нижнепермского возраста. Важная роль гидрохимических отложений заключается в их хороших изоляционных свойствах (чередование непроницаемых для нефти и газа слоев каменной соли, плотных ангидритов и гипсов) [22]. Также важно расположение гидрохимических отложений в верхней части крупного седиментационного цикла, в литолого-фациальном составе которого преобладают породы, обладающие хорошими коллекторскими свойствами.

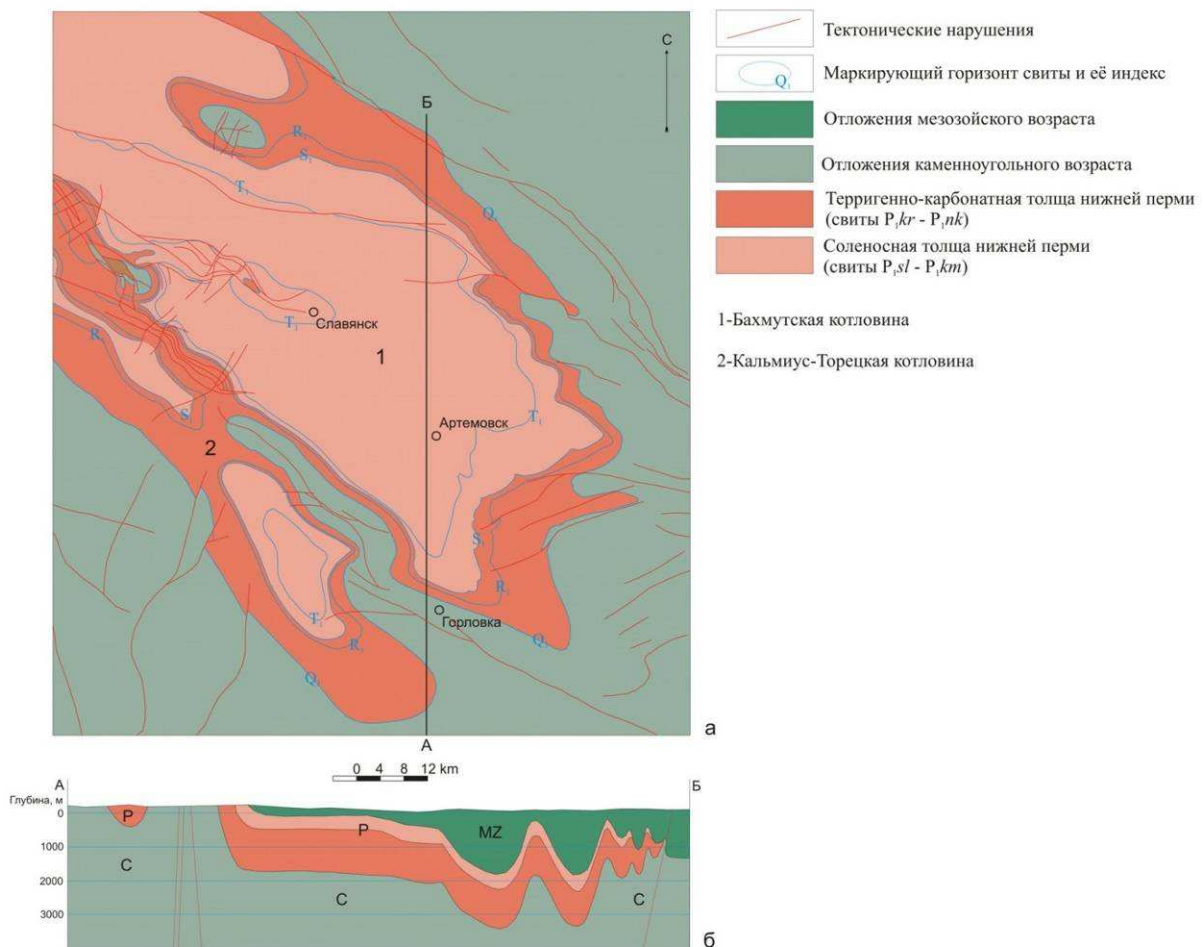


Рис. 4. Геологическая схема домезозойских отложений северо-западной части Донецкого бассейна (а) и геологический разрез к ней (б).

Эти факторы в совокупности с большой мощностью газопроницаемых осадочных пород создали благоприятные условия для свободной миграции углеводородов и их концентрации под непроницаемым покровом гидрохимических отложений. В Донбассе нижнепермские гидрохимические образования развиты в его северо-западной части в границах Бахмутской и Кальмиус-Торецкой котловин (рис. 4).

В структурном строении Бахмутской и Кальмиус-Торецкой котловин принимают участие три этажа: палеозойский, мезозойский и кайнозойский. Мезозойский и кайнозойский структурные этажи являются неперспективными в отношении геологического хранения CO<sub>2</sub>.

Это обусловлено их небольшими мощностями (обычно не более 500 м) и залеганием в верхней части осадочного чехла без газонепроницаемой покрывки. Палеозойский структурный этаж, залегающий под покровом мезозойских и кайнозойских отложений, является перспективным в отношении изучения возможностей геологического хранения CO<sub>2</sub>.

Это подтверждается его высокой потенциальной газоносностью, установленной в результате многочисленных исследований и разнонаправленных геологоразведочных работ. Так, например, анализ геологического строения и газоносности северного борта Бахмутской котловины, выполненный в УкрНИИГаз, показал, что из трех структурных этажей (палеозойского, мезозойского и кайнозойского) потенциально газоносным является палеозойский [23].

Палеозойский этаж Донбасса состоит из отложений пермской, каменноугольной и девонской систем. Пермская система представлена нижним отделом в составе ассельского и сакмарского ярусов. Каменноугольная система представлена в полном объеме и представляет собой непрерывный разрез в основном угленосной толщ. Отложения девонской системы залегают на больших глубинах (обычно более 5 км) и выходят на поверхность в виде узкой полосы на юго-западной окраине Донбасса [24].

Полученные результаты анализа возможных участков геологического хранения CO<sub>2</sub> были объединены в одну ГИС хранилищ CO<sub>2</sub> (рис. 5), которая размещена на веб-сайте проекта и где показаны: Девонские соляные штоки; Пермские соленосные отложения; Каменноугольные угленосные отложения; Граница девонских соленых водоносных горизонтов; Южная граница распространения палеозойских осадочных отложений; Днепровско-Донецкий газо- и нефтеносный бассейн и Донецкий каменноугольный бассейн.

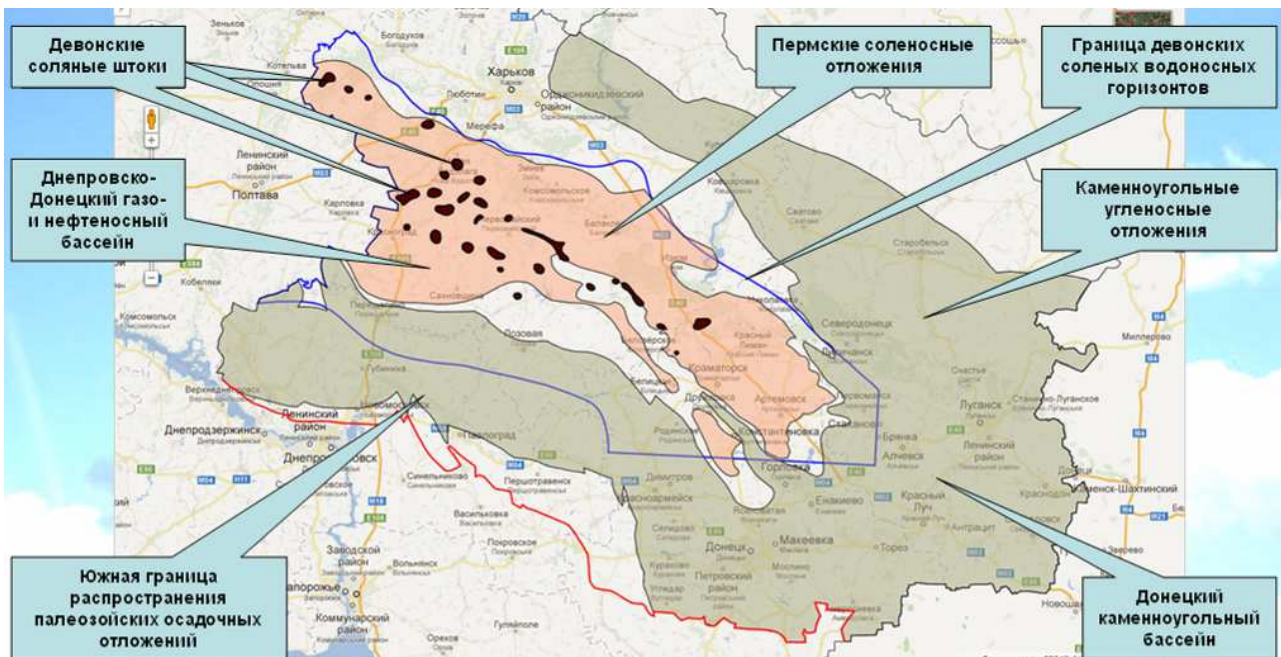


Рис. 5. ГИС возможных участков геологического хранения CO<sub>2</sub> на востоке Украины.

### Критерии процесса хранения CO<sub>2</sub>

Важным моментом в оценке возможностей геологического хранения CO<sub>2</sub> в любом бассейне является определение количественных значений критериев процесса хранения. Такими критериями являются:

- 1.1. Коллекторские и газоемкостные параметры пород.
- 1.2. Проницаемость газоизоляционной кровли.
- 1.3. Максимальная и минимальная глубина хранения CO<sub>2</sub>.

Рассмотрим эти критерии более подробно.

1.1. Основными параметрами коллекторских и газоемкостных свойств песчаников являются: открытая пористость, степень заполнения пор газом, влажность, проницаемость. Открытая пористость характеризует емкость песчаника, доступную флюидам, и не отражает характера флюида. Можно сказать, что открытую пористость в отдельности можно использовать лишь в теоретических идеальных случаях, когда поровое пространство породы не заполнено водой и газом. В реальности на коллекторские свойства песчаников влияют и другие многочисленные факторы. Так, например, метановая газоносность песчаников находится в сильной зависимости от их влажности (обводненности) [25]. Средние значения открытой пористости песчаников Донбасса в разных районах варьируются в пределах 2-10% и зависят от размеров породообразующих зерен, степени их окатанности, стадии катагенеза, степени уплотнения.

Результаты исследований по некоторым шахтам Донбасса показывают, что степенью заполнения пор газом выше 50% (промышленная метановая газоносность) обладают песчаники с влажностью менее 2% и открытой пористостью в пределах 7-11% [25].

Открытая пористость песчаников верхнего карбона в бортовых частях Бахмутской и Кальмиус-Торецкой котловин составляет от 10-13 до 20-22% [24].

Необходимо отметить, что коллекторские свойства песчаников и других терригенных пород Донбасса в отношении углекислого газа пока остаются неизученными. Неизвестно, как будут зависеть CO<sub>2</sub>-емкостные свойства песчаников от вышеперечисленных параметров. Для оценки CO<sub>2</sub>-емкостных потенциалов песчаников Донбасса необходимо провести комплекс экспериментальных исследований.

Одним из их ключевых газоемкостных параметров пород является пористость, которая определяется как отношение объема пор ко всему объему породы. В связи с отсутствием возможности специального взятия образцов из потенциальных участков, пригодных для хранения CO<sub>2</sub>, были использованы образцы, которые ранее брались для других целей из осадочных отложений Донбасса, но имеющие близкое местонахождение к потенциальным участкам хранения CO<sub>2</sub> и относящиеся к соответствующим горизонтам. Поэтому для исследований пористости были использованы образцы песчаника (табл. 1), взятые из скважин, пробуренных в пределах Беляевского купола вблизи с. Беляевка, Первомайского района, Харьковской области.

Таблица 1

**Параметры образцов песчаника для определения пористости**

| Номер образца       | 1   | 2   | 3   | 4   |
|---------------------|-----|-----|-----|-----|
| Номер скважины      | 8   | 5   | 31  | 10  |
| Глубина скважины, м | 210 | 323 | 349 | 343 |

Для исследований были выбраны образцы пород в форме цилиндров высотой 20 мм и диаметром 8 мм. Предварительные оценки пористости были получены методом рентгеновской компьютерной томографии. Эти исследования проводились в Европейском Центре Синхротронного Излучения, Grenoble (France). Затем полученные данные обрабатывались функциями программного обеспечения Avizo Fire для 4-х образцов при двукратном и десятикратном увеличении.

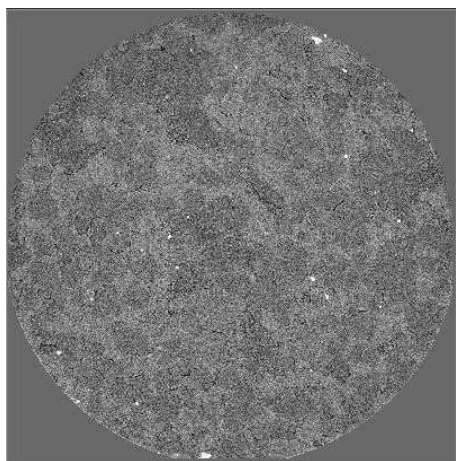


Для вычисления объема пористости выполнялись следующие действия: убирался «шум»; удалялся матричный материал (порода) и оставлялись только поры; выполнялось трехмерное восстановление пор и подсчет объема пор.

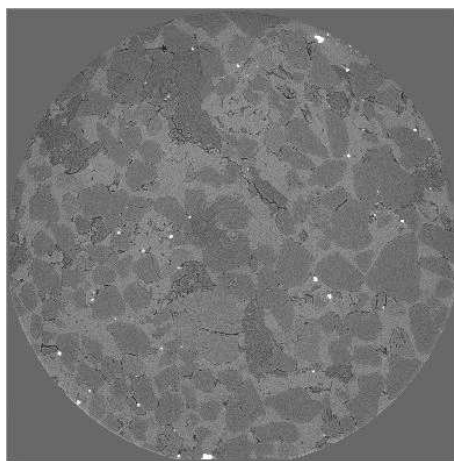
Для устранения «шума» необходимо было отфильтровать изображение (рис. 6). В данной программе существует различные варианты фильтров. В данном случае, выбор осуществлялся между двумя фильтрами: Edge-preserving и Median.

На первый взгляд, может показаться, что данные, обработанные фильтром Edge-preserving, более сглаженные, однако, при ближайшем рассмотрении, видно, что границы пор размыты (что приводит к потере некоторых данных), а также появляются дополнительные вкрапления. Поэтому предпочтение было отдано фильтру Median. На рис. 6 представлены для сравнения оригинальные данные (а) и данные, отфильтрованные с помощью фильтра Median (б).

Далее необходимо удалить матричный материал (породу), оставляя только поры. Для этого используется функция Thresholding (пороговая классификация). На рис. 7 показаны поры, выделенные из общего массива данных, для образцов 1 и 2 соответственно (при десятикратном увеличении).

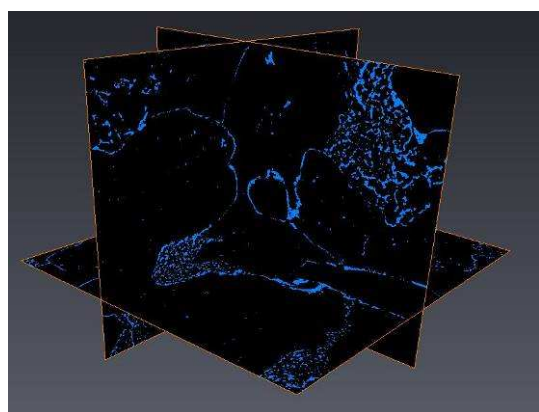


а) Оригинальные данные

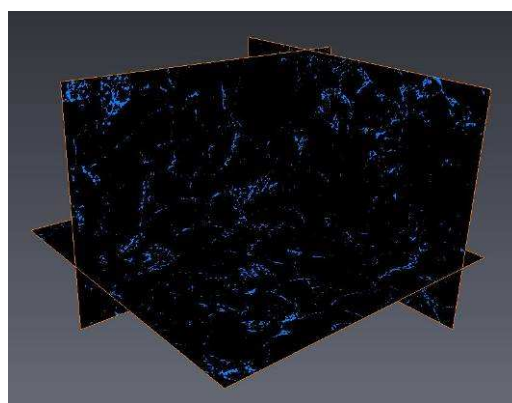


б) Данные, обработанные фильтром Median

Рис. 6. Пример фильтрации данных.



а) Образец 1.

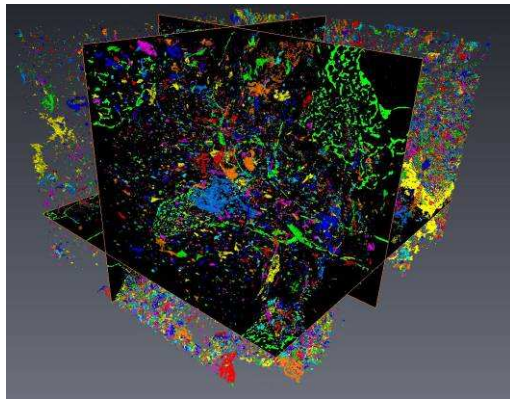


б) Образец 2.

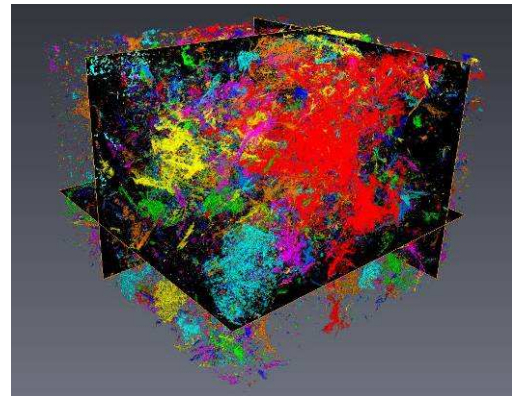
Рис. 7. Результат использования функции Thresholding.

С помощью функции I\_analyze производятся расчеты количества и объема пор. После чего в объемном изображении мы можем видеть прорисовку всех пор, где каждым отдельным цветом (оттенком серого) показаны цельные поры – кластеры взаимосвязанных пор, в которых может храниться CO<sub>2</sub> в сверхкритическом состоянии (рис. 8-9).





а) Образец 1.



б) Образец 2.

Рис. 8. Процесс расчета объемного восстановления пор.

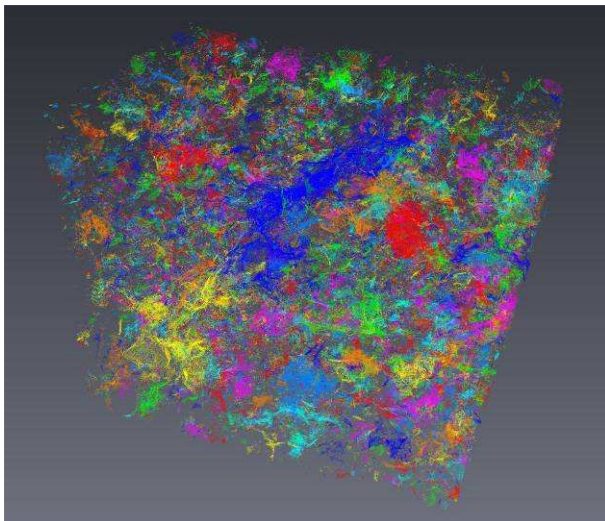
Суммируя объемы всех пор и учитывая значение объема образца, можно определить относительный объем пор (табл. 2), то есть пористость.

Таблица 2

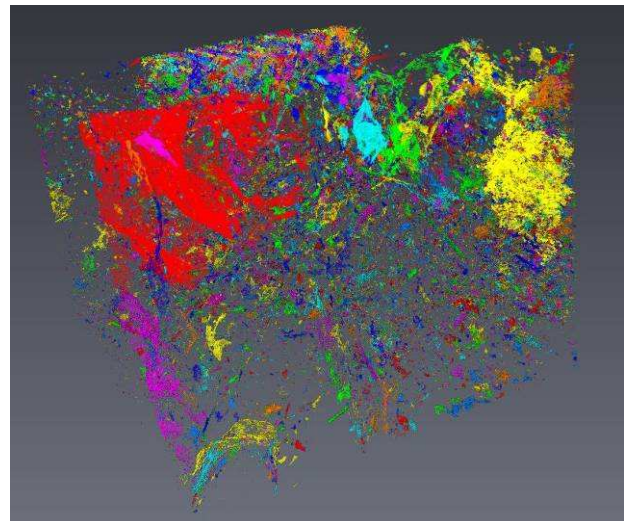
**Статистика определения пористости**

| Номер образца | Увеличение | Минимальный объем пор, м <sup>3</sup> | Максимальный объем пор, м <sup>3</sup> | Среднее значение, м <sup>3</sup> | Медианное значение, м <sup>3</sup> | Среднеквадратичное отклонение | Относительный объем пор, % |
|---------------|------------|---------------------------------------|--|----------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|----------------------------|
| 1             | 2          | 2,18861E-17                           | 4,59834E-11                            | 1,42973E-15                      | 8,75446E-17                        | 8,46907E-14                   | 0,01381                    |
| 1             | 10         | 1,75089E-19                           | 7,13294E-12                            | 1,06747E-16                      | 2,10106E-18                        | 2,32723E-14                   | 0,03206                    |
| 2             | 2          | 2,18861E-17                           | 1,50799E-11                            | 1,62297E-15                      | 1,53203E-16                        | 4,24641E-14                   | 0,01389                    |
| 2             | 10         | 1,75089E-19                           | 9,21765E-13                            | 6,33780E-17                      | 5,42775E-18                        | 3,04981E-15                   | 0,02661                    |
| 3             | 10         | 1,75616E-19                           | 2,28021E-12                            | 7,96444E-17                      | 2,10739E-18                        | 7,75357E-15                   | 0,02503                    |
| 4             | 2          | 2,18861E-17                           | 1,00121E-11                            | 3,68775E-16                      | 4,37721E-17                        | 1,38530E-14                   | 0,01350                    |
| 4             | 10         | 1,75089E-19                           | 2,10844E-12                            | 4,05574E-17                      | 5,25266E-19                        | 5,11583E-15                   | 0,01751                    |

На рис. 9 представлены результаты объемного восстановления пор для четырех образцов при различных увеличениях.

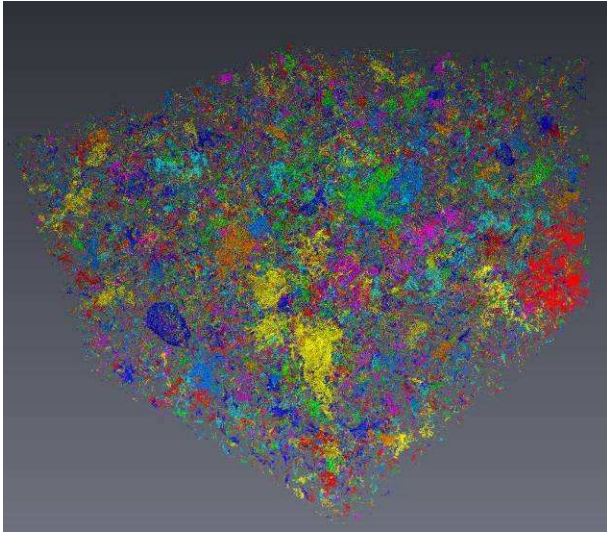


а) Образец 1 (двукратное увеличение).

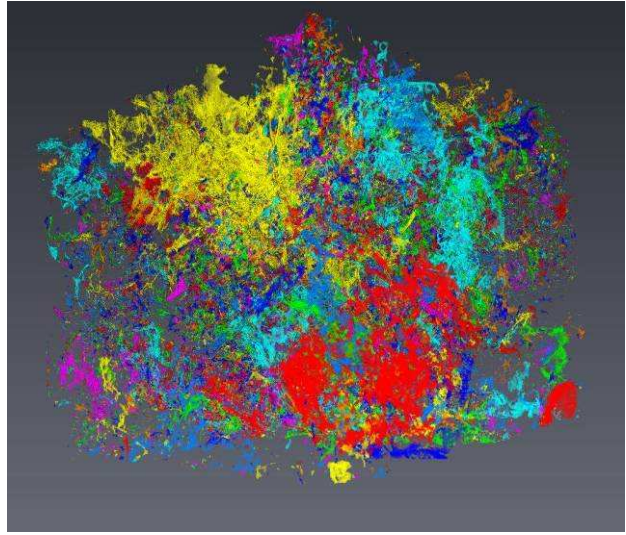


б) Образец 1 (десятикратное увеличение).

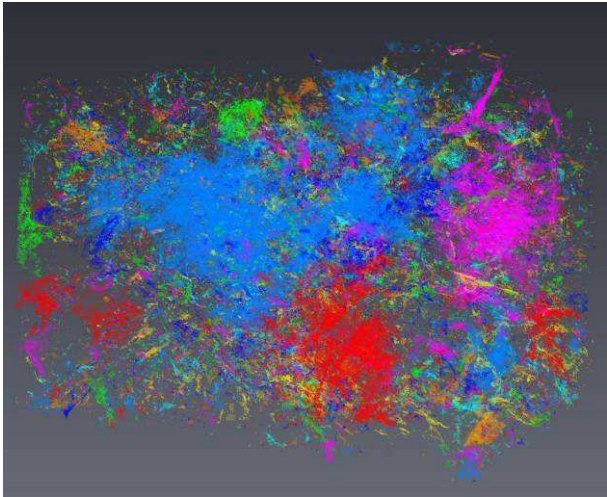




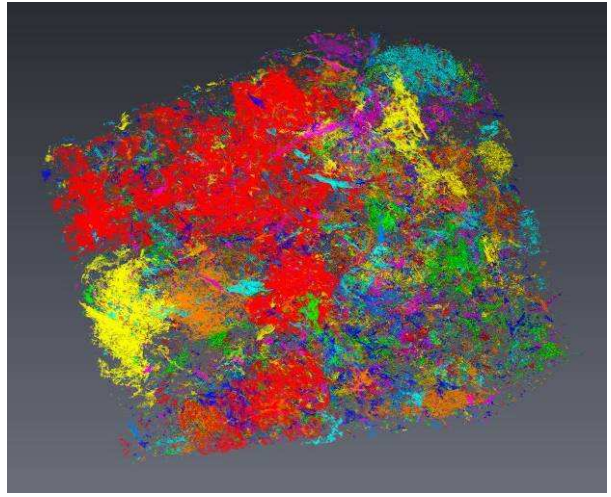
в) Образец 2 (двукратное увеличение).



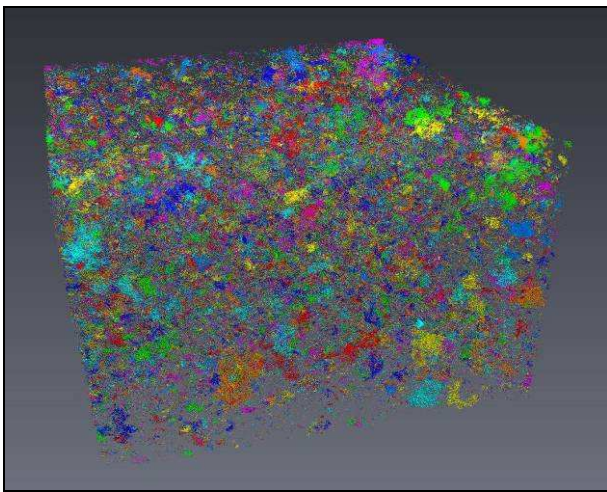
г) Образец 2 (десятикратное увеличение).



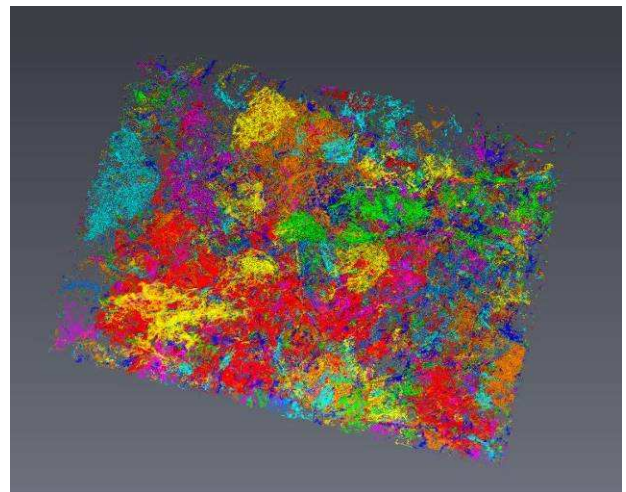
д) Образец 3 (двукратное увеличение).



е) Образец 3 (десятикратное увеличение).



ё) Образец 4 (двукратное увеличение).



ж) Образец 4 (десятикратное увеличение).

Рис. 9. Результаты объемного восстановления пор.

Полученные значения пористости образцов (около 3%), взятых из скважин, пробуренных в пределах Беляевского купола вблизи с. Беляевка, Первомайского района, Харьковской области, и обработанные с использованием программного обеспечения Avizo Fire, при двукратном и десятикратном увеличении, позволяют сделать вывод о перспективности использования осадочных отложений Донбасса для долговременного хранения CO<sub>2</sub>.

1.2. Проницаемость крыши определяется не только физическими свойствами слагающих пород, но также и её целостностью. В случае нарушения пластов геологическими разломами их газоизоляционные свойства значительно снижаются.

1.3. Минимальная глубина хранения CO<sub>2</sub> определяется давлением и температурой, при которых CO<sub>2</sub> переходит в жидкую фазу, и составляет примерно 800 м. Плотность CO<sub>2</sub> при этих условиях будет находиться в пределах 50-80% от плотности воды, что сопоставимо с плотностью некоторых видов сырой нефти [5]. Это ограничение задает минимальную глубину залегания горизонтов коллекторов и совместно с другими критериями должно использоваться при определении перспективных участков для хранения CO<sub>2</sub>.

Однако следует учитывать, что это значение было получено в бассейнах с иными горно-геологическими условиями, и в Донецком бассейне глубина с сопоставимыми термобарическими параметрами может быть другая. Максимальная глубина залегания коллектора определяется экономической рентабельностью и технологическими возможностями.

### **Варианты процессов нагнетания и хранения CO<sub>2</sub>**

Среди возможных вариантов реализации процесса нагнетания и последующего хранения CO<sub>2</sub> в Донбассе предлагаются:

2.1. Нагнетание CO<sub>2</sub> в негазоносные горизонты, обладающие свойствами коллекторов.

2.2. Нагнетание CO<sub>2</sub> в неразрабатываемые угольные пласты и вмещающие угленосные породы для повышенного извлечения угольного метана (ПИМ).

2.3. Нагнетание CO<sub>2</sub> в отработанные нефтегазоносные коллекторы.

Рассмотрим каждый из этих вариантов более подробно.

2.1. В осадочной толще верхнего палеозоя Донбасса известны горизонты, обладающие хорошими коллекторскими свойствами, но не обладающие газоносностью. Эти горизонты теоретически могут быть использованы в качестве коллекторов CO<sub>2</sub>.

2.2. На данный момент принимается, что промышленной газоносностью обладают породы со степенью заполнения пор газом более 50%. Добывать газ из коллекторов с более низкими показателями газоносности экономически не выгодно, однако эта оценка может измениться в будущем при появлении новых технологий.

Одной из таких технологий является повышение извлечения метана (ПИМ) путем его вытеснения из углей и вмещающих горных пород нагнетаемым через скважины сжатым CO<sub>2</sub> [5]. При этом решаются две важные задачи: повышение дебита природного газа-метана и утилизация CO<sub>2</sub>. В случае экономической рентабельности процесса непромышленные газовые проявления (со степенью заполнения пор газом менее 50%) могут котироваться как месторождения.

Нижний предел газоносности для таких месторождений будет определяться рентабельностью их разработки с применением ПИМ. В условиях Донбасса потенциальным регионом для изучения возможности ПИМ являются Западный и Южный Донбасс, а также Красноармейский угленосный район в их границах, где отсутствуют горные выработки.

При разработке газовых месторождений угольных бассейнов со временем также неизбежно их истощение и прекращение добычи. При этом доля газа, оставшегося в коллекторе, может быть достаточно велика. Повышение дебита метана истощенных горизонтов с применением ПИМ может продлить срок их эксплуатации и повысить извлечение газа.

2.3. Полностью отработанные горизонты часто используются в качестве временных хранилищ природного газа. Такие хранилища могут использоваться для долговременного

хранения CO<sub>2</sub>. Учитывая то, что разработка метана из угольных месторождений Донбасса находится на начальной стадии, реализация этого варианта возможна в будущем при высоком уровне развития метанодобывающей отрасли в регионе.

Варианты 2.1 и 2.2 являются актуальными на данный момент, особенно учитывая то, что в Донбассе известны горизонты песчаников со значительными запасами газа, не являющимися промышленными, а также песчаников и алевролитов, не обладающих высокой метановой газоносностью.

Согласно новейшим данным общий газоносный потенциал только одной Бахмутской котловины может достигать до 200 млрд. м<sup>3</sup> природного газа [23], в связи с чем ПИМ является одним из самых перспективных направлений геологического хранения CO<sub>2</sub> в окраинных частях Донбасса.

### **Рекомендации по выделению участков хранения CO<sub>2</sub>**

Предлагается следующая последовательность действий при выделении перспективных участков размещения геологических участков долговременного хранения CO<sub>2</sub> на территории востока Украины:

3.1. Выделение площадей, в разрезе которых присутствуют породы – коллекторы (песчаники и алевролиты), залегающие на глубинах 800 м и более, перекрытые изолирующей толщей пород.

3.2. Построение литологических колонок с выделением перспективных горизонтов – коллекторов.

3.3. Построение карт поверхности выделенных горизонтов; оконтуривание площадей горизонтов, залегающих ниже глубины 800 м.

3.4. Нанесение на карту контуров шахтных полей, площадей месторождений, подземных горных выработок, геологоразведочных и эксплуатационных скважин и всех имеющихся структурных элементов (тектонических нарушений, соляных штоков, интрузивных тел и др.).

3.5. Анализ полученных данных, оконтуривание перспективных участков.

Далее следует этап, включающий аналитические исследования коллекторских свойств каждого горизонта на разных глубинах, минералого-петрографические анализы пород, слагающих горизонт, изучение гидродинамических, гидрогеологических и структурно-тектонических особенностей всей толщи до глубины предполагаемого хранения. На основании этих данных можно проводить подсчет емкости коллекторов.

Только после того, как будет выполнен полный комплекс исследований, сделаны выводы о пригодности выделенных горизонтов для долговременного хранения CO<sub>2</sub>, а главное – заключения экологических служб о безопасности процесса закачивания и хранения CO<sub>2</sub> для окружающей среды и людей, можно будет переходить к этапу подготовки экспериментальных исследований.

Исходя из результатов зарубежных работ по геологическому хранению CO<sub>2</sub> и особенностей геологического строения Донецкого бассейна, предлагаются районы (Новомосковский, Петриковский, Лозовской, Старобельский и Северо-западные окраины Донбасса) для дальнейшего изучения их потенциала геологического хранения CO<sub>2</sub>.

В Донецком бассейне, в том числе в Бахмутской и Кальмиус-Торецкой котловинах, есть участки, осложненные многочисленными тектоническими нарушениями, которые нарушают целостность горного массива и газонепроницаемой покрывки, создают возможность миграции жидких и газообразных веществ к поверхности земли.

Кроме тектонических нарушений в северо-западной части Бахмутской котловины развиты соляно-купольные структуры девонского возраста, которые прорывают вышележащие отложения палеозоя и мезозоя и в комплексе с тектоническими нарушениями также служат зонами миграции жидких и газообразных веществ к поверхности земли.



В связи с этим дальнейшие количественные оценки возможностей геологического хранения  $\text{CO}_2$  в Донбассе следует проводить с учетом тщательного анализа их структурно-тектонического строения.

Суммируя результаты всех этих предварительных исследований [26-41], которые основаны на информации из открытых источников, была построена географическая схема расположения кластеров источников эмиссии  $\text{CO}_2$ , участков возможного геологического хранения сверхкритического  $\text{CO}_2$  и ориентировочные направления транспортировки  $\text{CO}_2$  от источников эмиссии к резервуарам хранения (рис. 10), где штрихованными овалами отмечены условные кластеры источников  $\text{CO}_2$ , от которых стрелками указаны ориентировочные направления транспортировки  $\text{CO}_2$  к предполагаемым участкам хранения – штрихпунктирным овалам.

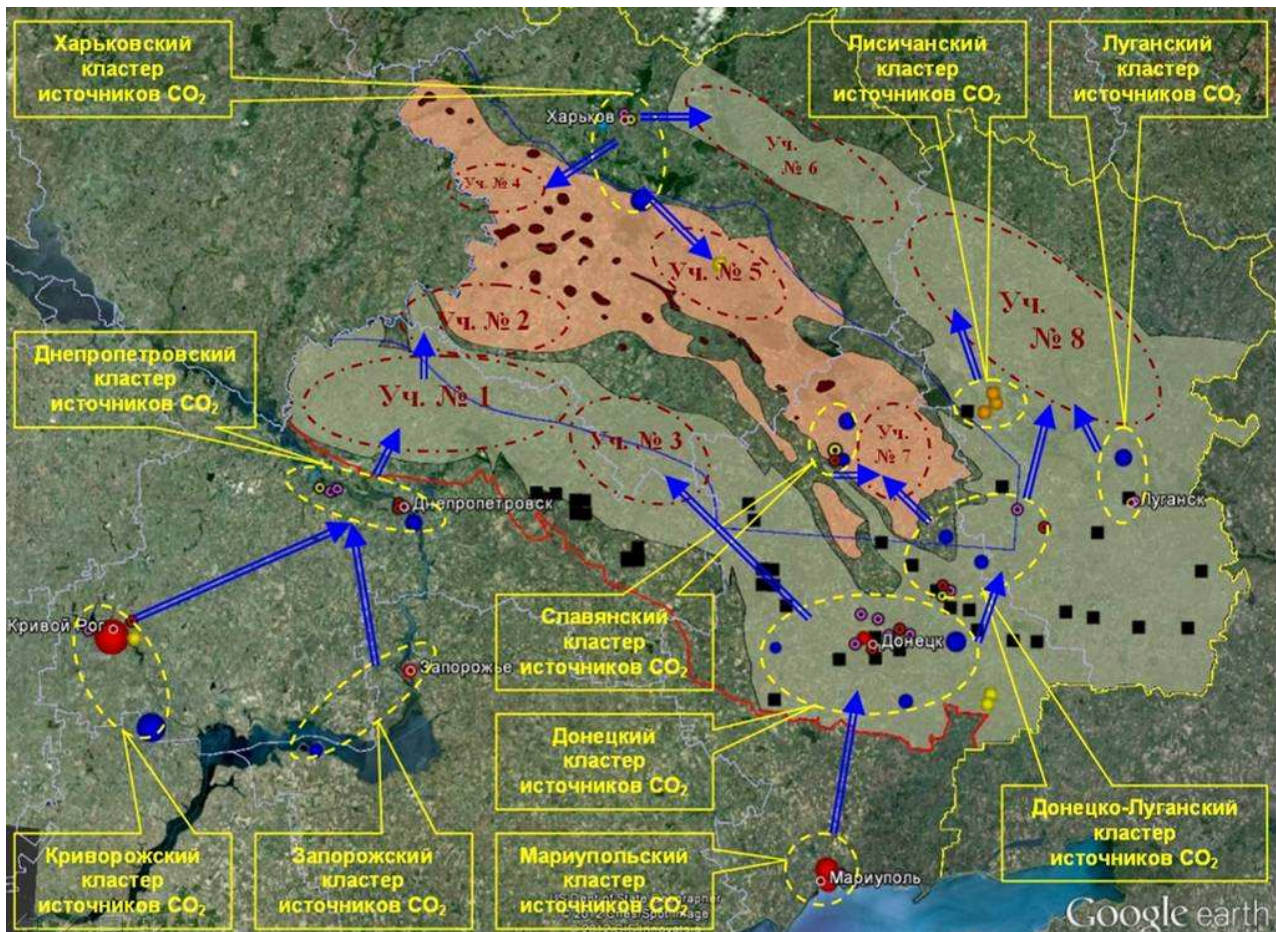


Рис. 10. Географическая схема расположения кластеров источников эмиссии  $\text{CO}_2$ , участков возможного геологического хранения сверхкритического  $\text{CO}_2$  и ориентировочные направления транспортировки  $\text{CO}_2$  от источников эмиссии к резервуарам геологического хранения.

Также черными квадратами показаны места расположения действующих угольных шахт [16], вблизи которых принципиально нельзя размещать резервуары хранения  $\text{CO}_2$ . В связи с этим необходимо также провести прогноз всех возможностей миграции  $\text{CO}_2$  и предотвращения его проникания в горные выработки. Первичным методом мониторинга утечек  $\text{CO}_2$  обычно выбирается реакция растений на повышение концентрации  $\text{CO}_2$  в почве и приземном слое атмосфере [31]. Более конкретные границы участков хранения и пути транспортировки  $\text{CO}_2$  определяются после тщательного изучения геологических, экологических и социальных условий Донбасса.

### Выводы

На основании вышеизложенного материала был составлен следующий перечень первостепенных задач, которые необходимо решить для количественной оценки возможностей геологического хранения CO<sub>2</sub> в Донбассе:

1. Определение количественных значений критериев процесса геологического хранения CO<sub>2</sub> с учетом горно-геологических и гидрогеологических условий геологических районов Донбасса и его окраин.

2. Выделение наиболее перспективных участков – потенциальных полигонов для пилотного проекта по геологическому хранению CO<sub>2</sub>.

3. Выполнение геохимического, структурно-тектонического и гидрогеологического анализов перспективных участков с целью определения количественных величин фильтрационно-емкостных параметров осадочных пород и выделения газовых ловушек – потенциальных резервуаров CO<sub>2</sub>.

4. Анализ и обобщение полученных результатов, выделение эффективных горизонтов-коллекторов в границах перспективных участков и подсчет их емкостного CO<sub>2</sub>-потенциала путем определения пористости пород, выбранных для хранения, методом рентгеновской томографии на синхротроне.

### Благодарности

Европейскую Комиссию за финансовую поддержку этого исследования по грантовому контракту № DCI/ENV 2010/243-865 от 29.12.2010 г., а также проф. Д. К. Дисте (Университет г. Осло, Норвегия) и его сотрудников за помощь в подготовке и исследовании образцов.

### Список литературы

1. Climate Change: The IPCC Response Strategies. – World Meteorological Organization / United Nations Environment Program: Intergovernmental Panel on Climate Change, 1990. – 332 p.
2. Доклад о мировом развитии – 2010: Развитие и изменение климата. – Международный банк реконструкции и развития / Всемирный банк, 2010. – 40 с.
3. *Stern N.* The Economics of Climate Change: The Stern Review / Nicholas Stern. – Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007. – 662 p.
4. Impact of the financial crisis on carbon economics: Version 2.1 of the Global Greenhouse Gas Abatement Cost Curve. – McKinsey & Company, 2010. – 14 p.
5. Специальный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата – Улавливание и хранение двуокиси углерода: Резюме для лиц, определяющих политику и Техническое резюме. – МГЭИК, 2005. – 58 с.
6. Обзор технологий улавливания и хранения углерода: возможности, препятствия, экономические аспекты и роль, рекомендуемая для ЕЭК ООН. – Организация объединенных наций / Европейская экономическая комиссия / Комитет по устойчивой энергетике (ECE/ENERGY/2006/5), 2006. – 27 с.
7. Technology Roadmap – Carbon capture and storage. – International Energy Agency, 2010. – 52 p.
8. Национальный кадастр антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов в Украине за 1990-2010 гг. – К.: Государственное агентство экологических инвестиций Украины, 2012. – 729 с.
9. Енергетична стратегія України на період до 2030 року / Схвалена розпорядженням Кабінету Міністрів України від 15 березня 2006 р. № 145-р. – 129 с.
10. Trends in global CO<sub>2</sub> emission: 2012 Report. – Netherlands Environmental Assessment Agency, 2012. – 40 p.
11. Статистичний щорічник України за 2010 рік [За ред. О. Г. Осауленка]. – К.: Державна служба статистики України, 2011. – 560 с.
12. Довкілля України: Статистичний збірник – 2010 [За ред. Н. С. Власенко] – К.: Державна служба статистики України, 2011. – 205 с.
13. IEA – International Energy Agency. – [Electronic resource]. Mode of access:

<http://www.iea.org>.

14. BELLONA – The Bellona Foundation. – [Electronic resource]. Mode of access: <http://bellona.org>.

15. CARMA – Carbon Monitoring for Action. – [Electronic resource]. Mode of access: <http://carma.org>.

16. DTEK Holdings В. V. (ООО «ДТЭК» – «Донбасская топливно-энергетическая компания»). – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.dtek.com>.

17. Project «Low-Carbon Opportunities for Industrial Regions of Ukraine (LCOIR-UA)». – [Electronic resource]. Mode of access: <http://www.lcoir-ua.eu>.

18. National Joint Stock Company «Energy Company of Ukraine» (НАК «Енергетична компанія України»). – [Electronic resource]. Mode of access: – <http://www.ecu.gov.ua>.

19. Gunter W. D. CO<sub>2</sub> Storage and enhanced methane production: field testing at Fenn-Big Valley / W. D. Gunter, M. J. Mavor, J. R. Robinson // University of Regina, Alberta, Canada. – [Electronic resource]. Mode of access: <http://uregina.ca>.

20. CO<sub>2</sub>GeoNet – The European Network of Excellence on the Geological Storage of CO<sub>2</sub>. – [Electronic resource]. Mode of access: <http://www.co2geonet.eu>.

21. EA Weyburn CO<sub>2</sub> Monitoring and Storage Project Weyburn, Saskatchewan, Canada. – [Electronic resource]. Mode of access: <http://www.netl.doe.gov>.

22. Горяйов С. Оценка перспектив газоносности новых литологических ловушек на северном борту Бахмутской котловины / С. Горяйов, М. Лакоба, С. Павлов // Геолог Украины. – 2011. – № 2 (34) . – С. 99–102.

23. Жикаляк М. Неосвоенные газовые ресурсы песчаников Донбасса с низкой проницаемостью / М. Жикаляк // Геолог Украины. – 2011. – № 2 (34) . – С. 103–107.

24. Шкуро Л. Л. Оценка газоносности песчаников в горных выработках, с учетом показателей пористости и влажности / Л. Л. Шкуро, Г. Н. Горбачева // Геотехническая механика. – 2010. – № 88. – С. 118–123.

25. Баранов В. А. Влияние структуры на пористость песчаников Донбасса / В. А. Баранов // Геотехническая механика. – 2010. – № 88. – С. 70–76.

26. Shestavin M. S. New Ukraine-French Project «Low-Carbon Opportunities for Industrial Regions of Ukraine» (LCOIR-UA) / M. S. Shestavin, A. P. Leynet // The Proceedings of the International Conference on Carbon Reduction Technologies – CaReTECH2011, Poland, Polish Jurassic Highland, September 19–22, 2011. – Poland, Gliwice: Silesian University of Technology, 2011. – P. 167–168.

27. Шеставин Н. С. Проект «Низко-углеродные возможности для промышленных регионов Украины (LCOIR-UA)» / Н. С. Шеставин // Проблемы адаптации к изменению климата: постер для междунар. науч. конф. (Москва, 7–9 ноября 2011 г.). – 1 с.

28. Беспалова С. В. Низько-вуглецеві можливості для індустріальних регіонів України: адаптація європейського досвіду / С. В. Беспалова, М. С. Шеставін // Охорона навколишнього середовища промислових регіонів як умова сталого розвитку України: зб. статей VII Всеукр. наук.-практ. конф. (Запоріжжя, 15 грудня 2011 р.). – Запоріжжя: Вид-во ЗДІА, 2011. – С. 28–32.

29. Жикаляк Н. В. Геологические перспективы хранения CO<sub>2</sub> в палеозойских осадочных отложениях Донбасса / Н. В. Жикаляк, В. В. Осетров // Екологія промислового регіону: зб. доп. нац. екол. форуму. – Донецьк: ДП «Донецький екологічний інститут», 2012. – Т. 1. – С. 50–53.

30. Бескровная М. В. Перспективы улавливания и геологического хранения CO<sub>2</sub> в Донбассе / М. В. Бескровная, В. В. Осетров, Н. С. Шеставин // Екологія промислового регіону: зб. доп. нац. екол. форуму. – Донецьк: ДП «Донецький екологічний інститут», 2012. – Т. 1. – С. 105–106.

31. Сафонов А. И. Использование растительных организмов для диагностики концентрации углекислого газа в природных средах / А. И. Сафонов // Екологія промислового регіону: зб. доп. нац. екол. форуму. – Донецьк: ДП «Донецький екологічний

інститут», 2012. – Т. 2. – С. 173–174.

32. *Bezkravna M.* Project «Low-Carbon Opportunities for Industrial Regions of Ukraine (LCOIR-UA)» / *M. Bezkravna* // Poster for 7<sup>th</sup> CO<sub>2</sub>GeoNet Open Forum «EU research programmes and international research cooperation», Italy, Venice, April 17–19, 2012. – 1 p.

33. *Шеставин Н. С.* Архитектурно-экологический проект «Воздушный террикон» / *Н. С. Шеставин* // Экология промышленного региона: постер для выставки на нац. экол. форуме (Донецк, 23-24 мая 2012 г.). – 1 с.

34. *Бескровная М. В.* Применение геоинформационных систем для инвентаризации источников загрязнения и участков хранения диоксида углерода / *М. В. Бескровная, В. В. Осетров, Н. С. Шеставин* // Вісник Запорізького нац. ун-ту. Біол. науки: зб. наук. праць. – Запоріжжя: Вид-во ЗНУ, 2012. – № 2. – С. 104–108.

35. *Беспалова С. В.* Улавливание и геологическое хранение диоксида углерода как перспектива для энергетики Украины / *С. В. Беспалова, Н. В. Жикаляк, В. В. Осетров, Н. С. Шеставин* // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии: сб. науч. статей. – К.: «НПВК Триакон», 2012. – Вып. 3 (11). – С. 107–113.

36. *Беспалова С. В.* Оценка возможностей улавливания и хранения CO<sub>2</sub> в палеозойских осадочных отложениях Донбасса / *С. В. Беспалова, Н. В. Жикаляк, В. В. Осетров, Н. С. Шеставин* // Современные проблемы литологии осадочных бассейнов Украины и сопредельных территорий: сб. матер. междунар. науч. конф. (Киев, 8–13 октября 2012 г.). – К.: Ин-т геол. наук НАН Украины, 2012. – С. 18.

37. *Shestavin M. S.* Capabilities Sequestration Anthropogenic Emissions from Low Fugitive Sources / *M. S. Shestavin* / Materials digest of the XXXII International Scientific and Practical Conference «Models and methods of solving formal and applied scientific issues in physico-mathematical, technical and chemical research» (United Kingdom, London, September 20–25, 2012). – London: International Academy of Science and Higher Education, 2012. – P. 65–67.

38. *Savkevych O.* Critical Comparison of «Green Growth» and «Carbon Footprint» Theories: Analysis of Low-Carbon Innovations Implementation Practice as a Tool for Climate Stabilization / *O. Savkevych, M. Shestavin, S. Bepalova* // Program Brochure of the Euroacademia Global Forum of Critical Studies: Asking Big Questions Again (Czech Republic, Prague, December 13-15, 2012). – Paris: Euroacademia, 2012. – P. 18.

39. *Shestavin M. S.* Preliminary Assessment of the Potential CO<sub>2</sub> Sources and Sinks of the Eastern Ukraine / *M. S. Shestavin, M. V. Bezkravna, V. V. Osetrov, V. V. Yurchenko* // Proceedings of the Virtual International Conference on Advanced Research in Scientific Fields 2012: Slovakia, Bratislava, December 3-7, 2012 (in print).

40. *Жикаляк Н. В.* Оценка потенциала хранения CO<sub>2</sub> в палеозойских осадочных отложениях Донбасса / *Н. В. Жикаляк, В. В. Осетров, Н. С. Шеставин* // Зб. наук. праць Ін-ту геол. наук НАН України. – 2012. – Вип. 5 (у друку).

41. *Осетров В. В.* Оценка возможностей геологического хранения CO<sub>2</sub> в осадочных отложениях Донбасса / *В. В. Осетров, Н. С. Шеставин, В. В. Юрченко* // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Сер. «Естественные и технические науки». – 2012. – Вып. 6 (в печати).

***Беспалова С. В., Шеставин М. С.* Оцінка можливостей впровадження низьковуглецевих відкритих інновацій в промислових регіонах України.** – Проведені дослідження потенціалу емісії і поглинання CO<sub>2</sub> у східних областях України. Створені географічні інформаційні системи для основних джерел емісії CO<sub>2</sub>, для можливих ділянок геологічного зберігання CO<sub>2</sub> і для перспективних напрямків транспортування CO<sub>2</sub> від кластерів підприємств до сховищ.

*Ключові слова:* CO<sub>2</sub>, емісія, геологічне зберігання, транспортування, ГІС, відкриті інновації.

***Bespalova S. V., Shestavin M. S.* Assessing of introduction opportunities of low carbon open innovations in industrial regions of Ukraine.** – Researched emission and absorption of CO<sub>2</sub> potential in the eastern regions of Ukraine. Geographic information systems created on the major sources of CO<sub>2</sub> emission, possible sites of CO<sub>2</sub> geological storage and the prospective directions of CO<sub>2</sub> transport from cluster enterprises to storages.

*Key words:* CO<sub>2</sub>, emission, geological storage, transportation, GIS, open innovation.