

## Региональный прогноз перспектив реализации проектов CCUS на территории Российской Федерации

*Д. А. Новиков<sup>1,2\*</sup>, Ф. Ф. Дульцев<sup>1</sup>, И. И. Юрчик<sup>1,2</sup>, Я. В. Садыкова<sup>1</sup>,  
А. С. Деркачев<sup>1</sup>, А. В. Черных<sup>1</sup>, А. А. Максимова<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,  
г. Новосибирск, Российская Федерация

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Российская Федерация  
\* e-mail: NovikovDA@ipgg.sbras.ru

**Аннотация.** В работе предложена концепция региональной оценки перспектив реализации проектов CCUS (carbon capture, utilisation and storage) на территории Российской Федерации. Рассмотрены три группы критериев: общегидрогеологические, тектонические и природоохранные. Впервые выделены категории земель с высокими, средними, низкими перспективами и бесперспективные. Составлена карта перспектив реализации проектов CCUS на территории Российской Федерации по критериям регионального уровня масштаба 1: 2500 000 в виде проекта ArcGis, включая ее интерактивный аналог с доступом посредством сети Интернет. Выполненный анализ гидрогеологических особенностей территории Российской Федерации позволил на региональном этапе выделить 56 структур с высокими, 6 со средними и 29 с низкими перспективами. Наиболее перспективные области приурочены к трем гидрогеологическим регионам: Восточно-Европейской, Восточно-Сибирской платформ и Западно-Сибирской плиты.

**Ключевые слова:** проекты улавливания и захоронения CO<sub>2</sub>, региональные геологические критерии, категории земель, прогноз, гидрогеологические бассейны, интерактивная карта перспектив, Российская Федерация

## Regional forecast of the outlooks for implementation of CCUS projects at the territory of the Russian Federation

*D. A. Novikov<sup>1,2\*</sup>, F. F. Dultsev<sup>1</sup>, I. I. Yurchik<sup>1,2</sup>, Ya. V. Sadykova<sup>1</sup>,  
A. S. Derkachev<sup>1</sup>, A. V. Chernykh<sup>1</sup>, A. A. Maksimova<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk,  
Russian Federation

<sup>2</sup> Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation  
\* e-mail: NovikovDA@ipgg.sbras.ru

**Abstract.** The paper proposes the concept of a regional assessment of the outlooks for implementation of CCUS (carbon capture, utilization and storage) projects at the territory of the Russian Federation. Three groups of criteria are considered: general hydrogeological, tectonic and environmental. For the first time, the categories of lands with high, medium, low prospects and unpromising ones are singled out. A map of the outlooks for the implementation of CCUS projects at the territory of the Russian Federation was compiled according to the criteria of the regional level on a scale of 1: 2500,000 in the form of an ArcGis project, including its interactive analogue with access via the Internet. The performed analysis of the hydrogeological features of the territory of the Russian Federation made it possible to identify 56 structures with high, 6 with medium and 29 with low prospects at the regional stage. The most promising areas are confined to three hydrogeological regions: the East European, East Siberian platforms and the West Siberian Plate.

**Keywords:** carbon capture, utilisation and storage, regional geological criteria, land category, forecast, hydrogeological basins, prospect map, Russian Federation

### *Введение*

Увеличение содержания углекислого газа в атмосфере в результате антропогенного воздействия является наиболее острой глобальной проблемой на Земле в XXI веке. Изменение состава атмосферы, насыщение ее парниковыми газами (углекислый газ, метан, закись азота и т.п.) приводит к изменению климата, в том числе потеплению, таянию ледников, изменению уровня мирового океана. Мониторинг содержания углекислого газа в атмосфере начали проводить в конце XVIII века, но первые достоверные оценки были получены в конце XIX века и составили 290 ppm. В настоящее время это значение используется как наиболее надежная оценка содержания углекислого газа в атмосфере до начала активного антропогенного воздействия [1].

Одной из наиболее перспективных технологий по снижению выбросов парниковых газов в атмосферу является реализация проектов улавливания и захоронения CO<sub>2</sub> (carbon capture, utilisation and storage – CCUS). Действующие проекты в России в настоящее время отсутствуют, однако существуют благоприятные предпосылки для захоронения больших объемов углекислого газа. Наиболее перспективными для этих целей общепризнаны в мировой практике существующие подземные хранилища газа (ПХГ) и в значительной мере выработанные месторождения углеводородов. Для подземного захоронения углекислого газа также могут быть выбраны глубокозалегающие водоносные горизонты, не используемые для питьевого и хозяйственного водоснабжения, и искусственно-созданные объекты в соляных, глинистых, угольных, базальтовых и других слабопроницаемых отложениях [2-4]. Высокая степень изученности и экономической рентабельности делает привлекательными объектами для захоронения углекислого газа выработанные углеводородные залежи и угольные пласты. В первом случае CO<sub>2</sub> может быть использован для поддержания пластового давления и интенсификации добычи остаточных запасов углеводородов.

### *Методы и материалы*

При региональном прогнозе перспектив территории для закачки углекислого газа наиболее значимыми являются три группы критериев. В первую входят общегидрогеологические. Под которыми понимаются: 1) Типы гидрогеологических структур. Наличие крупных гидрогеологических (артезианских) бассейнов, приуроченных к платформенным областям, в редких случаях краевым прогибам, межгорным и предгорным впадинам. 2) Степень гидрогеологической закрытости недр. Наличие в пределах оцениваемых областей зон затрудненного и застойного водообмена, наиболее благоприятными из которых являются последние. 3) Потенциальные объекты для целей захоронения CO<sub>2</sub>. Наличие регионально выдержанных водоносных и водоупорных горизонтов, не содержащих в себе подземные воды, используемые для народно-хозяйственного и промышленного обеспечения. В группе тектонических критериев выполняется анализ: 1) Структурно-

тектонического районирования. Наличие крупных отрицательных тектонических элементов в пределах платформенных областей и достаточная удаленность от щитов, горно-складчатых областей. 2) Неотектонических движений. Отсутствие активных тектонических зон и крупных региональных дизъюнктивных нарушений, по которым осуществляется разгрузка водоносных горизонтов. 3) Сейсмических событий. Отсутствие природных и наведённых (вызванных) землетрясений. В заключительную третью группу объединяются природоохранные критерии, к которым относятся особо охраняемые территории и районы с ограниченной хозяйственной деятельностью. Необходимо, чтобы потенциальные объекты утилизации были расположены вне населенных пунктов, национальных парков и заповедников, санитарно-курортных зон, мест досуга и отдыха населения.

### ***Результаты***

Учитывая общепринятые в мире требования к проектам по геологическому хранению CO<sub>2</sub> [5], а, так же, накопленный опыт по созданию ПХГ и захоронению промышленных сточных вод в глубокие водоносные горизонты, для регионального этапа картирования гидрогеологических бассейнов Российской Федерации для проектов CCUS, в качестве первого и базового критерия была выделена группа общегидрогеологических критериев [6].

Гидрогеологические бассейны второго порядка рассмотрены в соответствии с картой гидрогеологического районирования Российской Федерации масштаба 1:2 500 000 под редакцией Г.С. Вартапяна и М.В. Кочеткова составленной в 2001 году. Основным принципом, положенным в основу гидрогеологического районирования континентальной части территории РФ, является структурно-гидрогеологический. В соответствии с ним выделение гидрогеологических структур высшего порядка - регионов выполнено по трем главным факторам: историко-геологическому, структурно-формационному и гидрогеодинамическому, которые предполагают единство гидрогеологического строения, гидродинамического режима и истории развития структур. При региональном прогнозе за минимальную единицу были взяты 5 типов гидрогеологических структур II порядка: I - артезианские бассейны платформ (АБ); II - предгорные артезианские бассейны (ПАБ); III - межгорные артезианские бассейны (МАБ); IV - гидрогеологические складчатые области (ГСО); V - гидрогеологические массивы (ГМ).

Гидрогеологические структуры II порядка были оценены с точки зрения перспективности для геологического хранения CO<sub>2</sub> и разделены на четыре категории земель с высокими, средними, низкими перспективами и бесперспективные.

Гидрогеологические массивы отнесены к бесперспективным, а гидрогеологические складчатые области – к низкоперспективным структурам [7].

Межгорные и предгорные артезианские бассейны как правило сложены осадочными отложениями, отличающимися пестротой литологического состава и невыдержанностью отдельных прослоев по мощности. Они были отнесены к низкоперспективным, а межгорные артезианские бассейны, являющиеся гид-

рогеологическими структурами II порядка в пределах межгорных впадин, достигающих крупных размеров, к среднеперспективным.

К высокоперспективным областям отнесены артезианские бассейны в пределах платформ и плит, характеризующиеся поровым и микротрещинным типами водопроницаемости. Эти артезианские бассейны, как правило, имеют выдержанные и довольно мощные флюидоупоры. Их нижний этаж представлен зонами застойного и замедленного водообмена, что так же является благоприятным фактором при выборе структур для геологического хранения CO<sub>2</sub>. Таким образом, выполненный анализ гидрогеологических особенностей территории Российской Федерации позволил на региональном этапе выделить 56 структур с высокими, 6 со средними и 29 с низкими перспективами. Наиболее перспективные области приурочены к трем гидрогеологическим регионам: Восточно-Европейской, Восточно-Сибирской платформ и Западно-Сибирской плиты.

Вторым критерием является группа тектонических критериев. На региональном этапе картирования гидрогеологических бассейнов РФ для проектов CCUS в качестве основы была использована «Схема глобальных тектонических единиц России» тектонического районирования России, составленная под редакцией А.Ф. Морозова и др. в 2000 году, утвержденная Министерством природных ресурсов РФ.

Выходы фундамента платформ на поверхность (щиты) представляют собой устойчивые тектонические зоны, сложенные кристаллическими и/или сильно метаморфизованными породами. В результате чего щиты характеризуются блоковым строением, а породы не обладают достаточными коллекторскими свойствами и не имеют флюидоупорных толщ. Выделяемые на территории России Балтийский, Анабарский и Алданские щиты оцениваются как бесперспективные зоны для реализации проектов CCUS.

Складчатые области – это активные в разные эпохи тектогенеза зоны земной коры, характеризующиеся протеканием процессов складко-и разломообразования, наличием регионального метаморфизма и магматической активности. В зависимости от времени формирования и дальнейшей эрозии, на их территории могли формироваться осадочные бассейны различного размера, которые не могут обладать большими перспективами. На территории России выделяются Урало-Монгольский (складчатые сооружения Таймыра, Новой земли, Урала и Южно-Сибирские горы) и Средиземноморский (Кавказ) складчатые пояса, которые относятся к малоперспективным.

Наиболее перспективными с тектонической точки зрения являются осадочные бассейны на территории платформ. Для них характерно наличие вмещающих толщ с необходимыми характеристиками фильтрационно-емкостных свойств для геологического хранения CO<sub>2</sub> и надежных региональных флюидоупоров для их консервации. Наиболее крупные осадочные бассейны в России развиты на территории Восточно-Европейской и Восточно-Сибирской платформ, Западно-Сибирской плиты.

Затем была выделена группа неотектонических критериев. Технологии захоронения CO<sub>2</sub> (CCUS) требует закачки значительных объемов CO<sub>2</sub> в недра.

С физической точки зрения основные проблемы, препятствующие разворачиванию проектов в промышленных масштабах, возникают из-за избыточного давления, которое возникает при закачке  $\text{CO}_2$  в резервуар и может приводить к гидроразрыву. Оно является ключевым фактором геомеханических и гидрогеологических опасностей: индуцированной сейсмичности, возникновения и реактивации разломов и трещин в покрывающих породах и утечек [4]. Анализ материалов по активным разломам Евразии, которые постоянно актуализируются сотрудниками лаборатории неотектоники и современной геодинамики Геологического института РАН [8], позволил закартировать области (большая часть расположена в пределах Монголо-Охотской складчатой зоны) с активной неотектонической деятельностью и исключить эти структуры из перечня перспективных объектов.

Следующей группой критериев стали сейсмические критерии. Естественная сейсмическая активность или наведенная (индуцированная) техногенная сейсмичность при разработке полезных ископаемых или реализации проектов CCUS, может представлять потенциальную опасность для герметичности геологического резервуара с  $\text{CO}_2$ , для наземного и скважинного оборудования CCUS, а также инфраструктуры. При картировании территории Российской Федерации были учтены сведения о землетрясениях за период с 1921 года по настоящее время, имеющиеся в базе данных Геологической службы США, созданной в рамках Национальной программы снижения опасности землетрясений [9]. Наиболее высокая активность землетрясений проявляется вдоль Курильской островной дуги. В этой связи, области с высокой сейсмичностью отнесены к бесперспективным для реализации проектов CCUS.

Заключительной стала группа природоохранных критериев. В соответствии с Федеральным законом «Об особо охраняемых природных территориях» от 14.03.1995 N 33-ФЗ, захоронение любых промышленных отходов запрещено в пределах особо охраняемых природных территорий (ООПТ). Поэтому территории, на которых расположены ООПТ, должны быть исключены из потенциальных областей для реализации проектов по геологическому хранению  $\text{CO}_2$ . При картировании территории Российской Федерации были использованы данные по ООПТ, собранные в рамках ГИС-атласа во ВСЕГЕИ [10].

С учетом рассмотренного выше комплекса критериев была составлена карта перспектив реализации проектов CCUS на территории Российской Федерации по критериям регионального уровня масштаба 1: 2500 000 в виде проекта ArcGis. В пределах Восточно-Европейского гидрогеологического региона артезианскими бассейнами с наибольшими перспективами являются: Московский, Северо-Двинский, Ветлужский, Приволжско-Хоперский, Волго-Сурский, Камско-Вятский (рис. 1) [7, 11].

Печорский артезианский бассейн, расположенный в пределах Печора-Баренцевоморской платформенной плиты, также относится к высокоперспективным. В Западно-Сибирском регионе – Тазовско-Пурский и Иртыш-Обской артезианские бассейны.



В арктическом секторе Восточно-Сибирского гидрогеологического региона наибольшие перспективы следует связывать с Пясино-Енисейским и Балахнинским артезианскими бассейнами. Южнее выделяются наиболее перспективные Пудоранский, Нижне-Тунгусский, Катангский и Приангарский артезианские бассейны. Из-за тектонического положения, гидрогеологических особенностей и природоохранных ограничений в Восточно-Европейском регионе меньшими перспективами обладают: Ленинградский, Прибалтийский, Северо-Каспийский и Сыртовский артезианские бассейны. На востоке России – Восточно-Енисейский, Камо-Вельминский, Мурский, Канский, Иркутский, Средне- и Верхне-Оленекский, Верхнетюнгский, Верхне-Виллюйский, Лено-Виллюйский, Лено-Алданский и другие артезианские бассейны. Земли со средними перспективами закартированы в пределах Сахалинского артезианского бассейна, Печоро-Предуральского, Юрзано-Сылвинского, Бельского, Нижне-Янского и Омолойского предгорных артезианских бассейнов, Момского, Алазейского, Индигиро-Колымского и Восточно-Новосибирского межгорных артезианских бассейнов, Северо-Уральской и Западно-Новосибирской гидрогеологической складчатой области. Остальная территория, характеризующаяся активной тектоникой, сейсмическими событиями отнесены к землям с низкими перспективами для реализации проектов CCUS и бесперспективным (см. рис. 1).

### *Заключение*

Таким образом, в рамках настоящих исследований были проанализированы требования, нормативные документы, комплекс геолого-геофизической и гидрогеологической информации по реализуемым в настоящее время в Мире проектам CCUS. Разработана система региональных критериев для оценки осадочных бассейнов Российской Федерации для перспектив реализации проектов CCUS. На основе комплекса геологических, гидрогеологических, тектонических и природоохранных критериев было проведено ранжирование территории Российской Федерации с точки зрения выбора наиболее подходящих гидрогеологических структур для захоронения углекислого газа на региональном уровне. В результате была составлена карта перспектив реализации проектов CCUS на территории Российской Федерации масштаба 1: 2500 000 в виде проекта ArcGis, где впервые выделены категории земель с высокими, средними, низкими перспективами и бесперспективные. Полученные результаты позволили перейти к следующему этапу исследований – разработке системы зональных критериев для оценки гидрогеологических структур Российской Федерации для реализации проектов CCUS и составлению на их основе карт перспектив реализации проектов CCS. Кроме того, планируется широкое привлечение методов численного моделирования гидрогеохимических процессов, сопровождающих захоронение CO<sub>2</sub>. Совмещение этих результатов с геопространственными данными по гидрогеологическим структурам заложит основы для цифровой трансформации зональных гидрогеологических моделей.

### *Благодарности*

Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта Министерства науки и высшего образования РФ № FWZZ-2022-0014 и Новосибирского государственного университета по программе Приоритет-2030.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Валлен К.Х., Бас Ч., Бьеркстрем А. и др. Углекислый газ в атмосфере. – М.: Наука, 1987. – 534 с.
2. Tang Y, Yang R, Bian X. A review of CO<sub>2</sub> sequestration projects and application in China // *The Scientific World Journal*, - 2014. - 014:381854. – DOI: 10.1155/2014/381854.
3. Aminu M.D., Nabavi S.A., Rochelle C.A., Manovic V. A review of developments in carbon dioxide storage // *Applied Energy*. - 2017. - V. 208. – Pp 1389-1419. – DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.09.015.
4. Shukla R, Ranjith P, Haque A, Choi X. A review of studies on CO<sub>2</sub> sequestration and caprock integrity // *Fuel*. – 2010. – V. 89. – Iss. 10. – Pp. 2651–64. – DOI: 10.1016/j.fuel.2010.05.012.
5. ISO 27916, Carbon dioxide capture, transportation and geological storage — Carbon dioxide storage using enhanced oil recovery (CO<sub>2</sub>-EOR). – Switzerland, 2019. – 64 p.
6. Боровская А.В., Гаврилов И.Т., Гольдберг В.М., Кривошеев В.П., Тарасова Н.В., Тотов Н.А. Гидрогеологические исследования для захоронения промышленных сточных вод в глубокие водоносные горизонты: метод, указания / Под ред. К.И. Антоненко, Е.Г. Чаповского. – М.: Недра, 1976. – 312 с.
7. Новиков Д.А., Дульцев Ф.Ф., Юрчик И.И., Садыкова Я.В., Деркачев А.С., Черных А.В., Максимова А.А., Головин С.В., Главнов Н.Г., Жуковская Е.А. Региональный прогноз перспектив захоронения углекислого газа на территории Российской Федерации // *Нефтяное хозяйство*. – 2022. – № 3 – С. 36-42.
8. The Active Faults of Eurasia Database (AFEAD) – [http://neotec.ginras.ru/index/mapbox/database\\_map.html](http://neotec.ginras.ru/index/mapbox/database_map.html).
9. USGS (Earthquake Hazards) – <https://www.usgs.gov/programs/earthquake-hazards/earthquakes>.
10. ВСЕГЕИ, ГИС-Атлас ООПТ территории Российской Федерации – [http://agssrv1.vsegei.ru/arcgis/rest/services/GisAtlas/oopt\\_poly/MapServer](http://agssrv1.vsegei.ru/arcgis/rest/services/GisAtlas/oopt_poly/MapServer).
11. <https://cogis-gpn-noc.nsu.ru/portal/gpn>.

© Д. А. Новиков, Ф. Ф. Дульцев, И. И. Юрчик, Я. В. Садыкова,  
А. С. Деркачев, А. В. Черных, А. А. Максимова, 2022