

Природные аналоги и тестовые объекты для геологического хранения CO₂: опыт по Latera, Italy. Natural analogues and test sites for CO₂ geological sequestration: experience at Latera, Italy.

Salvatore Lombardi,¹ Aldo Annunziatellis,¹ Stan E. Beaubien,^{1*} Giancarlo Ciotoli,¹ и Monia Coltella¹

Полевыми и лабораторными испытаниями в сочетании с компьютерным моделированием – общепринятый способ изучения того, как созданные человеком геологические системы могут изменяться с течением времени. Однако с таким подходом невозможно точно представить и понять процессы, происходящие в геологическом масштабе времени и в сложных неоднородных геологических средах. Изучение природных комплексов, похожих на создаваемые человеком, может помочь получить некоторую дополнительную информацию.

Обычно относимые к природным аналогам, природные объекты или природные лаборатории впервые использовались и изучались в 1970х годах для лучшего понимания долгосрочной безопасности при захоронении радиоактивных отходов в глубоких геологических хранилищах. Одним из первых, кто применил естественный аналоговый принцип для CO₂ геологической секвестрации, был Pearce et al. (1996), затем последовали многочисленные исследования во всем мире (см. обзоры Baines and Worden, 2004; Holloway et al., 2007; Lewicki et al., 2007; Pearce, 2006). Большинство природных аналогов хранилищ CO₂ может быть разделено на две основные категории: те, которые хорошо герметизированы, и те, в которых есть утечка. Изучение моделей обоих типов может дать ценную информацию, необходимую для создания хорошо изолированных и реально безопасных геологических объектов для хранения CO₂.

И CO₂, и природные газовые резервуары представляют примеры геологических систем, которые способны быть подземными ловушками для газа в геологическом масштабе времени. Хотя многие исследователи считают, что все резервуары в некоторой степени могут давать утечки, скорость эмиссии экстремально низкая и рассеивание часто по времени контролируется. Несомненно, существование таких резервуаров дает нам и человечеству в целом уверенность в способности геологических резервуаров изолировать CO₂ в течение времени от тысяч до миллионов лет. Изучение этих объектов позволяет нам лучше понять, как долго CO₂ может удерживаться в естественных хранилищах, какие физические параметры являются важными для этой изоляции и как резервуар и химические свойства покрывающих пород эволюционировали в течение длительных периодов времени; эти данные могут быть использованы для повышения точности прогнозных моделей и помогут в проектировании потенциальных искусственных хранилищ.

Напротив, объекты с возможными утечками несомненно не рассматриваются как «модели» (варианты) резервуаров промышленного захоронения CO₂, однако их предпочтительно использовать для изучения случаев возможной неудачи (например, «старый» выработанный резервуар газа, сильно трещиноватый), где могут быть исследованы процессы газовой миграции. Например, объекты и в море, и на берегу могут помочь установить глубинные и приповерхностные пути миграции, время миграции и реактивно затухающие процессы, данные о которых являются крайне необходимыми, чтобы разработать методики по подбору местоположения и проектированию избранных ловушек для предотвращения рассеивания (протекания). К тому же, просачивание CO₂ в природную систему может быть изучено для оценки опасности и последствий возможных близповерхностных утечек, равно как и для испытания оборудования, принципов и методик мониторинга утечек.

Проект NASCENT, финансируемый Евросоюзом (Pearce, 2004), явился особенно обширным исследованием природных аналогов, который рассмотрел и охарактеризовал разнообразные объекты по всей Европе. Один из таких объектов, расположенных в Центральной Италии (Latera caldera), представлял особенный интерес, и поэтому стал официальным «объектом тестирования утечек» для CO₂GeoNet (EC-funded Network of Excellence on geological CO₂ storage - финансируемая Евросоюзом Главная сеть геологических хранилищ CO₂). За последние годы присоединившиеся к проекту CO₂GeoNet партнеры (см. Благодарности в конце статьи) выезжали на объект Latera для испытания обширного ряда методик исследования, в результате создана уникальная база методов мониторинга, база данных типов и эффектов от утечек CO₂. Настоящая статья приводит краткий обзор некоторых из этих работы.

Описание и геология объекта Latera.

Кальдера Latera, расположенная в 110 км к северо-западу от Рима, является овальной депрессией, вытянутой в северо-западном – юго-восточном направлении, состоящей из относительно плоской центральной сельскохозяйственной долины, окруженной покрытыми лесом холмами высотой около 100 м. Не считая нескольких холмов, образованных интрузивными телами, долина кальдеры покрыта толщей аллювия мощностью в несколько десятков метров.

Глубинное геотермальное бурение в 1970 г. показало, что термо-метаморфические процессы в карбонатном резервуаре являются источником CO₂ (98%) и незначительных примесей газа (N₂, H₂, H₂S, He, CH₄ и других лёгких углеводородов), которые просачиваются к поверхности. Изучение вторичных минералов, обнаруженных в погруженных центральных частях ее, показало, что район, возможно, испытал эпизод самоуплотнения, создавший покрывающий пласт над

¹ Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Roma 'La Sapienza', Piazzale Aldo Moro n.5, Roma 00185, Italy.

* Corresponding author: Stan Beaubien, E-mail: stanley.beaubien@uniroma1.it.
2008 EAGE www.firstbreak.org

CO₂ секвестрация

геотермальным резервуаром. Эта покрывка кое-где нарушена разломами и сетью трещин, относящихся к региональным тектоническим и локальным вулканическим структурам обрушения, и газ по этим структурам выходит на поверхность. Эта миграция газа не равномерна, а скорее направлена по каналам вдоль полос повышенной проницаемости (трубок) внутри разломных зон. Хотя CO₂ просачивается вдоль этих структур, можно отметить, что существует единый изолированный резервуар и часть образовавшегося CO₂ все еще «заперта» в резервуаре даже при таких неблагоприятных условиях.

На глубине CO₂ перемещается вдоль наполненных газом каналов или как прерывистая пузырчатая последовательность до пересечения с горизонтом грунтовых вод (на глубине 1-4 м), после чего миграция проявляется как адвекция газовой фазы или диффузия в вадозную зону. Если скорость перемещения достаточно высокая, газ выделяется из почвы в атмосферу на небольших участках, известных как газовые воронки (рис. 1), тогда как при низких скоростях существует возможность для ненасыщенной зоны скопления и малоактивной диффузной дегазации на более обширных участках. Несмотря на выделение газа на различных участках кальдера населена в течение сотен лет и интенсивно обрабатывается (культивируется) под пшеницу, кукурузу и корма для скота.

Геохимия приповерхностного и атмосферного газа.

Если CO₂ действительно достигает поверхности земли, единственный способ убедиться в этом и с точки зрения безопасности, и для отслеживания углеродного влияния заключается в физическом измерении его. Это может быть осуществлено именно поверхностном слое (почвенный газ), на поверхностном контакте почва-атмосфера (газовый поток), или в воздухе над землей (атмосферный мониторинг), хотя каждый метод должен быть способен различать глубинный газовый признак от естественных биогенных флуктуаций CO₂.

Замеры почвенного газа производились на глубине 60-80 см, где газ не так подвержен разжижению и могут быть отобраны образцы разных газов для фильтрации фоновых вариаций. Например, работа на Latera показала,



Рисунок 2 Две существующие инфракрасные лазерные системы (Boreal Laser, Canada), использованные для мониторинга концентрации атмосферного CO₂ над газовыми воронками; одна имеет переменную длину цепи (a), а другая с фиксированной длиной цепи (b). Фото (b) любезно предоставлено Dave Jones (BGS – Британская Геологическая Служба, Nottingham, UK).

как естественные индикаторы, подобные радону и гелию, могут охарактеризовать глубинные вклады, отношения CO₂ к N₂ и O₂ могут помочь распознать процессы биологического дыхания, а изотопный анализ $\delta^{13}\text{C}$ CO₂ может помочь отделить вклады по этим двум конечным элементам изоморфного ряда. Детальные горизонтальные профили через активные газовые воронки показали, как CO₂ может латерально растекаться от основной зоны восходящего потока благодаря его большей плотности по сравнению с другими разновидностями газа, тогда как реактивные газовые разновидности, такие как H₂S и CH₄, легко окисляются в почве, ограничивая таким образом свое пространственное распространение и перенос в атмосферу (Annunziatellis et al., в печати; Lombardi et al., 2006). Измерения газового потока, в большинстве обычно CO₂, имеют преимущество, так как они очень быстрые и измеряют действительное количество CO₂, покидающее землю. Региональные и детальные измерения, проведенные по всей кальдере, подчеркивают эффективность этого метода для характеристики размера и ориентации газовых воронок и нарушений, над которыми они расположены (Annunziatellis et al., в печати).



Рисунок 1 Фотография, показывающая газовую воронку, характеризующуюся отсутствием растительного покрова в центральной части потока с высоким содержанием CO₂, окруженной кольцом, где более низкий уровень потока оказывает более ограниченное воздействие на растительность.

CO₂ секвестрация

Приповерхностный атмосферный мониторинг способен покрыть обширные районы и дать заблаговременное предупреждение о рассеивании CO₂, несмотря на то что метод ограничен быстрым снижением концентрации. Существует один возможный способ с помощью лазеров инфракрасного излучения (OPIRL), настроенный на анализ CO₂ или отдельных индикаторных газов, которые могут быть добавлены в инжектированный CO₂. На Latera были испытаны две системы CO₂ OPIRL, одна проводит измерения через установленные пользователем расстояния между передающим лазером и отражателем, а другая имеет фиксированную длину цепи 1.5 м и закреплена на транспортном средстве для больших территорий съемки (рис. 2). Опыты с первым типом системы показали, что сигнал от газовой воронки может быстро ослабевать до фоновых значений при длине цепи, которая может быть слишком большой в условиях сильного и меняющегося ветра и при установке лазера слишком далеко от земли (Annunziatellis et al., 2007). Современные съемки, использующие второй тип системы, не полностью интерпретированы, однако предварительные результаты показывают, что существует приемлемая корреляция между аномалиями атмосферного CO₂ и местоположениями газовых воронок.

Дистанционное измерение.

Главная проблема, касающаяся мониторинга местоположений геологического хранения CO₂ промышленного масштаба, состоит в потенциально обширных областях, которые необходимо покрыть. Также предполагается, что если имеет место протекание (рассеивание), то CO₂ будет перемещаться в атмосферу из небольших областей, делая определение даже более затруднительным. По программе, разрабатывающей методы, которые могут быть отнесены к этой проблеме, CO₂GeoNet в настоящее время провела четыре полета над кальдерой Latera (рис. 3), используя различные методы аэро дистанционного измерения, которые могут определить местоположение CO₂-угнетенного растительного покрова, или даже повышенные концентрации CO₂. Измерительные приборы включали аэро тематическое картографическое устройство (ATM), компактный аэро спектрограф (CASK), детектор света и датчик дальности (LIDAR), высокоразрешающую цифровую камеру и высокоспектральный датчик (AISA Eagle IK). Первые два полета, проведенные в 2005 г., сфокусированы на интеграции различных характеристик прибора к световым эффектам, подчеркивающим аномалии растительного покрова, которые могут быть обусловлены утечкой CO₂, и сопровождаемы съемками почвенных газов и газовых потоков для обоснования правильности результатов (Bateson et al., in press). Суммарный успех, полученный от интеграции шести различных массивов данных, составил 39% (т.е. аномалии, которые действительно являются газовыми воронками), хотя один метод получил 47% успеха. Однако, некоторые известные газовые воронки не были отмечены как аномалии, и поэтому следующие работы будут сконцентрированы на повышении успешности обнаружения и уменьшении числа пропущенных воронок. В последнее время были проведены еще два полета, один для испытания

чувствительности прибора в течение разных вегетационных периодов, а второй, чтобы испытать новый прибор (коротковолновый инфракрасный высокоспектральный сканер), который способен непосредственно определять утечки CO₂. Эти данные в настоящее время обрабатываются.

Экосистема.

Несмотря на то, что хорошо подобранные и спроектированные объекты геологического хранения не предполагают утечки значительного количества CO₂ в близповерхностную среду, необходимо изучить все возможные неопределенности этой технологии, убедить заинтересованных лиц, да и все общество, что выполнено тщательное и всестороннее исследование этой технологии. С этой целью был выполнен поперечный разрез длиной 50 м через одну газовую воронку, чтобы рассмотреть, в какой степени луговая экосистема может быть подвержена влиянию изменяющихся концентраций и потоков глубинного CO₂ (Beaubien et al., в печати). Чтобы определить область, подверженную влиянию, работа включала измерения почвенного газа и потоков CO₂, сопровождаемые детальной съемкой растительности и отбором почвенных образцов с глубин от 0-20 см до 50-70 см для микробиологического, физического, химического и минералогического анализов. Наиболее подверженным влиянию оказался участок шириной 6 метров, без растительности в центре, где скорости потока CO₂ превышают 2,000-3,000 гм² в день, pH низкий (минимум 3.5), где



Рисунок 3 Цветной аэрофотоснимок, показывающий часть района в пределах кальдеры Latera, покрытого съемкой с дистанционными методами измерения. Фото любезно предоставлено Michela Velico (OGS – Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale, Trieste, Italy).



Рисунок 4 EM31 съемка, проведенная поперек газовой воронки. Фото любезно предоставлено Rogier Westerhoff (TNO - Netherlands Organisation of Applied Scientific Research, Delft, Holland).

CO₂ секвестрация

присутствуют разреженные газы подобно H₂S и CH₄, наблюдаются небольшие изменения в минералогии и химии и ограничена микробная активность и заселенность условиями близкими к кислородному голоданию. Вокруг средней части выделяется переходная зона шириной 15-20 м, где не наблюдаются разреженные газы, а содержание почвенного CO₂ газа и поток постепенно уменьшаются на некотором расстоянии от границы воронки. Особенно интересной в этом интервале была наблюдаемая сопротивляемость травы к высокой концентрации CO₂ (до 50% на 10 см глубины), по сравнению с намного более низким порогом чувствительности, допустимым для клевера. Эта работа показала, что потока газа и состав газа вместе с газовой/осадочной проницаемостью и мощностью вадозной зоны оказывают влияние на масштабы и степень последствий утечек для окружающей среды. Для конкретных условий изученной воронки влияние пространственно ограничено, и местная флора и фауна адаптируются к установленным условиям.

Геофизика.

Если предполагается, что CO₂ утекает из геологического резервуара, то должны быть первичные каналы вдоль подвергнутых опасности скважин или нарушений. Несмотря на то, что первое хорошо определяется в пространстве и таким образом существует возможность для предотвращения или вмешательства, миграция газа вдоль нарушений очень беспорядочная и сложная. Необходимы методы, которые могли бы охарактеризовать эти структуры и в отношении первичного выбора объекта и для изображения возможных каналов просачивания. Исследователи из CO₂GeoNet провели испытания возможности большого количества геофизических методов через нарушения с утечкой CO₂ в кальдере Latera, каждый из которых имеет весьма различные глубины проницаемости и характеристики чувствительности. Эти съемки включали: сейсморазведка с вибрационным источником, падающим грузом и пневмоударником; 2D и 3D электрическое удельное сопротивление (модифицированная установка Шломберже диполь-диполь); георадар; микрогравитация; электропроводность грунтов (т.е. EM-31, EM-34) (рис. 4). Цель этой работы заключалась в определении структуры в целом, а также чувствительности методов к CO₂ или породам и грунтовым водам, подвергнутым воздействию CO₂. Как и предполагалось, по сейсмическим съемкам, выполненным на участках вулканогенных пород, был получен сложный набор данных. Последовательно наблюдались изменения отклика в связи со структурой, которые могли быть обусловлены совместным влиянием структурных нарушений и изменения прохождения сигнала в водо- и газонасыщенных породах. Результаты методов электрического сопротивления и удельной электропроводности хорошо согласовались друг с другом, интенсивные аномалии проводимости соответствовали областям эманации газа. Считается, что эти аномалии обусловлены водно-газово-породным взаимодействием, которое продуцировано более концентрированными ионными растворами вдоль и над нарушением. Георадарная съемка показала четкие аномалии, которые были связаны с влиянием повышенной концентрации почвенных газов. В частности, сигнал GPR был сильно ослабленным в центре воронки, в то время как в окружающей переходной зоне глубина проникновения повышалась; предполагается, что влияние миграции CO₂ на состав воды, химию поровой воды и



Рисунок 5 Уступ каолинового карьера, показывающий хорошо развитое нарушение (центральная часть с желто-коричневой окраской), которое ограничено разломными зонами с каждой стороны.

минералогию почв может объяснить эти результаты (Pettinelli et al., в печати). Вопреки тому факту, что сопоставление результатов по различным геофизическим методам часто может быть сложным, все опробованные методы показали значительные аномалии, связанные с нарушениями. Исследования продолжаются, чтобы распространить знание, приобретенное здесь, на другие геологические ситуации и литологии.

Геология, структурная геология и вторичный минералогический состав.

При детальном исследовании условий природного объекта, характеризующегося утечками газа, существует большая возможность лучше понять основные геологические условия и контролирующие факторы, которые могут привести к миграции газа из глубинного резервуара к поверхности. Работа на Latera включала объединение глубинной скважинной информации с региональными структурными съемками с последующими очень детальными структурными, минералогическими съемками и измерениями потока CO₂ вдоль газо-проницаемых нарушений (рис. 5), вскрытых в карьере (Annunziatellis et al., в печати). Эти результаты подчеркивают сложную природу серии нарушений в карьере с двумя главными установленными направлениями. Оказалось, что миграция газа происходит не по всей длине разлома, а в большей степени на пересечении двух структур. Дополнительное осложнение для некоторых участков представляется за счет эволюции нарушения, так как вскрытая в карьере структура является высоко газопроницаемой по ее краям, деформации представляют собой взаимосвязанные непрочные сопряженные трещины, в то время как центральная часть нарушения более непроницаемая из-за катакластических и флюидоиндуцированных видоизменений и минерализации.

Благодарности

Авторы с признательностью благодарят участников сложной работы и экспертов CO₂GeoNet, которые работали с ними на разных стадиях изучения Latera, результаты которого приведены в данной статье, среди них: – Jonathan Pearce, Dave Jones, Julie West, Luke Bateson, Richard Shaw, Cathy Scheib, Helen Taylor, Mick Strutt, Pat Combs, Clair Fleming, Gary Kirby

CO₂ секвестрация

Julian Trick и Ian Webster из BGS (Nottingham, UK); Michela Vellico, Michela Giustiniani, Luca Baradello, Giuliana Rossi, Daniel Nieto и Guiliano Brancolini из OGS (Trieste, Italy); Hans-Martin Schulz, Martin Kruger и Cornelia Haveland из BGR (Ганновер, Германия); Bart Goes, Vincent Vandeweyer, Rogier Westerhoff, Sterre Dortlans, Rob Arts и Frank van Ber-gen из TNO (Delft, Голландия); Karine Le Pierres, Gilles Braibant, Valerie Laperche и Marie-Christine Dictor из BRGM (Орлеан, Франция); и Elena Pettinelli, Annal-isa Zaja, Nicola Praticelli, Flavio Cecchini, Siro Margotti-ni, Michele Di Filippo, Antonio Menghini, Monia Coltella, Anna Vaccani и Sabina Bigi из Университета 'La Sapienza' (Рим, Италия) и их партнеров.

Литература

- Annunziatellis, A., Beaubien, S.E., Bigi, S., Ciotoli, G., Coltella, M., and Lombardi, S. [in press] Gas migration along fault systems in the Latera caldera (central Italy): implications for CO₂ geological storage. *International Journal of Greenhouse Gas Control*.
- Annunziatellis, A., Beaubien, S.E., Ciotoli, G., Coltella, M., and Lombardi, S. [2007] The testing of an open-path infrared laser system above naturally-occurring CO₂ gas vents (Latera, Italy): potential for atmospheric monitoring above a CO₂ geological storage site. *Proceedings of European Geosciences Union 2007*, Geophysical Research Abstracts, 9, 04553, 2007; SRef-ID: 1607-7962/gra/ EGU2007-A-04553, April 15-21, 2007, Vienna, Austria.
- Baines, S.J., and Worden, R.H. [2004] The long-term fate of CO₂ in the subsurface: natural analogues for CO₂ storage. In: S.J. Baines and R.H. Worden (Eds.), *Geological Storage of Carbon Dioxide*, Special Publication, 233, Geological Society of London, London, 59-86.
- Bateson, L., Vellico, M., Beaubien, S.E., Pearce, J.M., Annunziatellis, A., Ciotoli, G., Coren, F., Lombardi, S., and Marsh, S. [in press]
- The application of remote sensing techniques to monitor CO₂ storage sites for surface leakage: method development and testing at Latera (Italy) where naturally-produced CO₂ is leaking to the atmosphere. *International Journal of Greenhouse Gas Control*.
- Beaubien, S.E., Ciotoli, G., Coombs, P., Dictor, M.C., Kruger, M., Lombardi, S., Pearce, J.M., and West, J.M. [in press] The impact of a naturally-occurring CO₂ gas vent on the shallow ecosystem and soil chemistry of a Mediterranean pasture (Latera, Italy). *International Journal of Greenhouse Gas Control*.
- Holloway, S., Pearce, J.M., Hards, V.L., Ohsumi, T., and Gale, J. [2007] Natural emissions of CO₂ from the geosphere and their bearing on the geological storage of carbon dioxide. *Energy*, 32, 1194-1201.
- Lewicki, J.L., Birkholzer, J., and Tsang, C.F. [2007] Natural and industrial analogues for leakage of CO₂ from storage reservoirs: Identification of features, events, and processes and lessons learned. *Environmental Geology*, 52 (3), 457-467.
- Lombardi, S., Annunziatellis, A., Ciotoli, G., and Beaubien, S.E. [2006] Near surface gas geochemistry techniques to assess and monitor CO₂ geological sequestration sites. In: S. Lombardi, L.K. Altunina and S.E. Beaubien (Eds.), *Advances in the Geological Storage of Carbon Dioxide*, NATO Science Series, IV Earth and Environmental Sciences, 65, Springer, 141-156.
- Pearce, J.M. [2004] Natural analogues for the geological storage of CO₂. Final report of the Nascent project. *British Geological Survey Technical Report*, 122.
- Pearce, J.M. [2006] What can we learn from natural analogues? In: S. Lombardi, L.K. Altunina and S.E. Beaubien (Eds.), *Advances in the Geological Storage of Carbon Dioxide*, NATO Science Series, IV. Earth and Environmental Sciences, 65, Springer, 129-140.
- Pearce, J.M., Holloway, S., Wacker, H., Nelis, M.K., Rochelle, C., and Bateman, K. [1996] Natural occurrences as analogues for the geological disposal of carbon dioxide. *Energy Conversion and Management*, 37 (6-8), 1123-1128.
- Pettinelli, E., Beaubien, S.E., Lombardi, S., and Annan, A.P. [in press] GPR, TDR and geochemistry measurements above an active gas vent to study near surface gas migration pathways. *Geophysics*, 73 (1), doi:10.1190/1.2815991.