

С. Н. Понасенко^{1,2}✉, С. В. Яскевич^{1,2}, А. А. Дучков^{1,2}, Р. А. Бакеев³, Ю. П. Стефанов^{1,2,3}

Оценка сейсмичности инициации разлома при закачке CO₂ с помощью геомеханического моделирования

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация

²Новосибирский государственный университет,
г. Новосибирск, Российская Федерация

³Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
г. Томск, Российская Федерация
e-mail: PonasenkoSN@ipgg.sbras.ru

Аннотация. В работе исследуются механизмы инициации разломов, вызванные закачкой CO₂ в отработанные нефте- и газосодержащие пласты, с использованием геомеханического моделирования. Основное внимание уделено анализу изменений напряженно-деформированного состояния среды и генерации упругих волн при активации разломов. Для моделирования применялось решение системы уравнений динамики поро-упругопластической среды, а также анализ синтетических сейсмограмм с использованием метода инверсии тензора момента. Результаты показали, что инициация разломов сопровождается сейсмическими событиями, соответствующими механизму источника типа двойной пары сил. Установлено, что угол наклона разлома не влияет на диаграмму направленности излучения. Однако выделение времен вступления P- и S-волн остается сложной задачей даже для синтетических данных. Полученные данные важны для разработки методов мониторинга и прогнозирования сейсмической активности при захоронении CO₂.

Ключевые слова: микросейсмический мониторинг, инверсия тензора сейсмического момента, геомеханическое моделирование, захоронение CO₂

S. N. Ponasenko^{1,2}✉, S. V. Yaskevich^{1,2}, A. A. Duchkov^{1,2}, R. A. Bakeev³, Y. P. Stefanov^{1,2,3}

Assessment of seismicity associated with fault activation due to CO₂ injection using geomechanical modeling

¹Institute Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,
Novosibirsk, Russian Federation

²Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

³Institute of Strength Physics and Materials Science CO РАН,
Tomsk, Russian Federation
e-mail: PonasenkoSN@ipgg.sbras.ru

Abstract. The study investigates the mechanisms of fault initiation caused by CO₂ injection into depleted oil and gas reservoirs using geomechanical modeling. The focus is on analyzing changes in the stress-strain state of the medium and the generation of elastic waves during fault activation. The modeling involved solving a system of equations for the dynamics of a poro-elastoplastic medium and analyzing synthetic seismograms using moment tensor inversion. The results demonstrated that fault initiation is accompanied by seismic events corresponding to a double-couple source mechanism. It was found that the fault dip angle does not affect the radiation pattern. However, identifying

P- and S-wave arrival times remains challenging even for synthetic data. The findings are significant for developing monitoring and forecasting methods for seismic activity during CO₂ storage.

Keywords: microseismic monitoring, seismic moment tensor inversion, geomechanical modeling, CO₂ sequestration

Введение

При планировании мероприятий по захоронению CO₂ в отработанные нефте- и газосодержащие пласты, необходимо учитывать тектонические разломы. При закачке газа происходят изменения напряженно-деформированного состояния среды, которые могут привести к деформациям [1-6]. Основным методом мониторинга инициации смещений по разлому является микросейсмический мониторинг, однако далеко не все смещения сопровождаются сейсмичностью [7-9].

Данная работа посвящена изучению механизмов инициации разлома, вызванной закачкой CO₂ в пласт с использованием геомеханического моделирования включающего волновое поле, распространяющееся в модели.

Методы и материалы

Для анализа колебаний с целью построения конфигурации источника и сопоставления с теоретическими источниками излучения осуществлялась специальная запись данных в виде, аналогичном записи сейсмоприемников. Моделирование процесса деформации связанного с нагнетанием жидкости и излучения упругих волн, вызванных активацией разлома, осуществлялось с помощью решения сопряженной системы уравнений динамики поро-упругопластической среды [10].

Расчеты проводились для системы наблюдений изображенной на рис. 1. К синтетическим сейсмограммам применялся классический граф обработки микросейсмических данных. Определение механизмов события было реализовано с помощью инверсии тензора момента **M**, представляющего собой симметричную матрицу 2 на 2 в двумерном случае. Его можно представить в виде вектора из трех независимых элементов $\mathbf{m} = (M_{11}, M_{22}, M_{33})$. Тензор момента описывает точечный источник, генерирующий следующее волновое поле:

$$u_i = M_{kl} G_{ik,l}, \quad G_{ik,l} = \frac{g_i g_k n_l}{4\pi\rho v^3 r}, \quad (1)$$

где u_i – компоненты вектора смещения, соответствующие зарегистрированному волновому полю, n_l – компоненты единичного вектора **n**, направленного от источника к приемнику, $G_{ik,l}$ – компоненты тензора Грина, g_i – вектор поляризации, v – сейсмическая скорость, r – расстояние между источником и приемником.

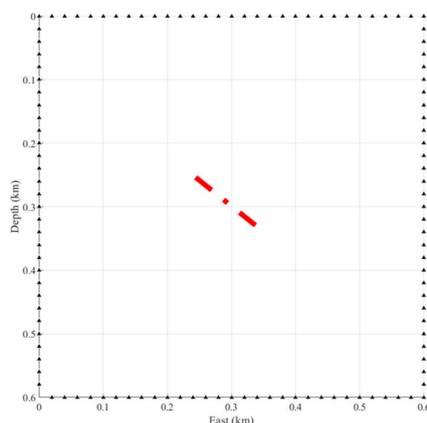


Рис. 1. Система наблюдения для анализа 2D расчетов. Треугольные маркеры показывают положение 2-х компонентных сейсмоприемников, которые окружают область разлома, схематично показанную пунктирной линией

Уравнение (2) определяет линейную связь между амплитудами наблюдаемых волн и описанием источника тензора момента:

$$\mathbf{u} = \mathbf{A}\mathbf{m}, \quad (2)$$

где \mathbf{u} – вектор амплитуд соответствующего типа волны, матрица \mathbf{A} зависит от свойств среды и диаграммы направленности, неизвестный вектор \mathbf{m} описывает источник тензора момента.

Таким образом, тензор сейсмического момента в источнике можно найти как регуляризованное решение системы (2). В данной работе для нахождения решения используется метод наименьших квадратов.

Результаты

Численное моделирование было проведено на 4 моделях, отличающихся друг от друга углом наклона разлома (от 20 до 40 градусов), размером расчетной области и скоростью закачки. На рис. 2 изображен пример синтетической сейсмограммы. Средняя длина волны 100 м.

Видно, что форма поляризации близка к механизму источника типа двойной пары сил (рис. 3). Данный механизм источника наблюдался во всех случаях в независимости от угла наклона разлома.

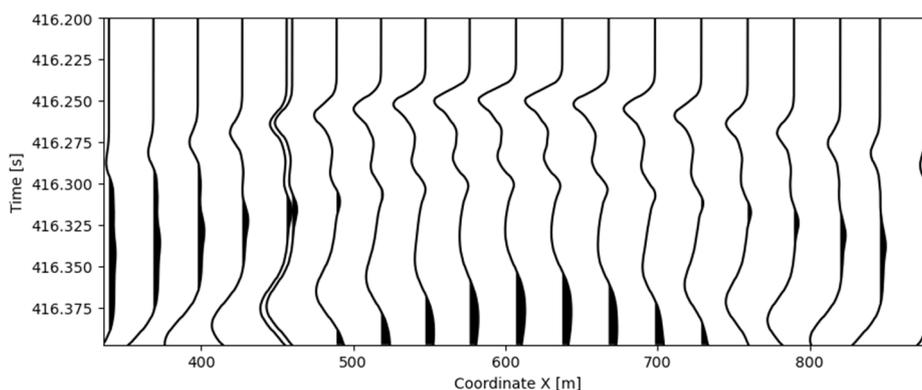


Рис. 2. Синтетическая сейсмограмма.

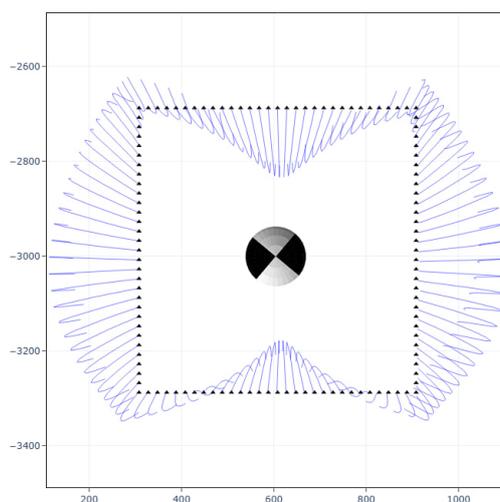


Рис. 3. Поляризации продольной волны.

Треугольники обозначают положения приемников, кривые синего цвета иллюстрируют направление и форму колебаний в точках приемников в окне вступления продольной волны. В центре изображен механизм события

Заключение

На результатах геомеханического моделирования были зафиксированные сейсмические события. Таким образом, предварительно можно считать инициацию разлома при захоронении CO₂ сейсмичным процессом. Однако выделение времен вступлений P- и S-волн даже на синтетических данных остается сложным.

В результате численного моделирования были получены механизмы событий соответствующие двойной паре сил. Изменение угла наклона разлома никак не повлияло на диаграмму направленности.

Благодарности

Авторы исследования выражают благодарность за финансовую поддержку Министерству науки и высшего образования Российской Федерации по гранту 075-15-2003-588.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Zoback M., Gorelick S. Earthquake triggering and large-scale geologic storage of carbon dioxide // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. – 2012. – Vol. 109. – № 26. – P. 10164-10168.
2. Zoback M., Gorelick S. To prevent earthquake triggering, pressure changes due to CO₂ injection need to be limited // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. – 2015. – Vol. 112. – № 33. – P. E4510-E4510.
3. Verdon J. P., Kendall J.-M., Stork A. L., Chadwick R. A., White D. J., Bissell, R. C. Comparison of geomechanical deformation induced by megaton-scale CO₂ storage at Sleipner, Weyburn, and in Salah // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. – 2013. – Vol. 110. – № 30. – P. E2762-E2771.
4. Vilarrasa V., Carrera J. Geologic carbon storage is unlikely to trigger large earthquakes and reactivate faults through which CO₂ could leak // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. – 2015. – Vol. 112. – № 19. – P. 5938-5943.
5. Vilarrasa V., Carrera J., Olivella S., Rutqvist J., Laloui L. Induced seismicity in geologic carbon storage // *Solid Earth*. – 2019. – Vol. 10. – № 3. – P. 871-892.
6. Adams B. M., Vogler D., Kuehn T. H., Bielicki J. M., Garapati N., Saar M. O. Heat depletion in sedimentary basins and its effect on the design and electric power output of CO₂ plume geothermal (CPG) systems // *Renewable Energy*. – 2021. – Vol. 172. – P. 1393-1403.
7. Wilson M. P., Foulger G. R., Gluyas J. G., Davies R. J., Julian B. R. HiQuake: The human-induced earthquake database // *Seismological Research Letters*. – 2017. – Vol. 88. – № 6. – P. 1560-1565.
8. Amann F., Gischig V., Evans K., Doetsch J., Jalali R., Valley B., et al. The seismo-hydro-mechanical behaviour during deep geothermal reservoir stimulations: open questions tackled in a decameter-scale in-situ stimulation experiment // *Solid Earth*. – 2018. – Vol. 9. – № 1. – P. 115-137.
9. Gischig V. S., Giardini D., Amann F., Hertrich M., Krietsch H., Loew S., et al. Hydraulic stimulation and fluid circulation experiments in underground laboratories: Stepping up the scale towards engineered geothermal systems // *Geomechanics for Energy and the Environment*. – 2020. – Vol. 24. – P. 100175.
10. Eremin M. O., Bakeev R. A., Stefanov Y. P., Chirkov A. O., Pazhin A. Finite-difference analysis of plane-parallel and plane-radial flows in the elastic mode of liquid and gas filtration // *PNRPU Mechanics Bulletin*. – 2024. – №. 3. – P. 97-107.

© С. Н. Понасенко, С. В. Яскевич, А. А. Дучков, Р. А. Бакеев, Ю. П. Стефанов, 2025