

УДК 551.2, 550.34, 551.21

## МАГНИТУДЫ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ, ИНДУЦИРОВАННЫХ ИНЖЕКЦИЯМИ ФЛЮИДОВ В ЗЕМНОЙ КОРЕ

© 2024 г. А. В. Кирюхин<sup>а</sup>\*, У. Fujii<sup>б</sup>, В. А. Alam<sup>с</sup>, Е. В. Черных<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,

бульвар Пийпа, 9, Петропавловск-Камчатский, 683006 Россия

<sup>б</sup>Инженерный факультет, Университет Хоккайдо, N13W8, Саппоро, 060-8628 Япония

<sup>с</sup>Горно-нефтяной отдел, Факультет гражданского инжиниринга,

Военный институт науки и технологий, Дакка, 1216 Бангладеш

\*e-mail: AVKiryukhin2@mail.ru

Поступила в редакцию 13.07.2023 г.

После доработки 31.08.2023 г.

Принята к публикации 06.12.2023 г.

На основе обобщения эмпирических данных и теоретических зависимостей получены уравнения, связывающие верхнюю границу максимальной магнитуды землетрясений и объем инъекций флюидов при закачке воды, суперкритического CO<sub>2</sub> и магматической деятельности, предшествующей извержениям вулканов.

Уравнения могут быть использованы для прогноза триггерной сейсмичности при добыче сланцевого газа и нефти, создании систем для извлечения геотермальной энергии, захоронении суперкритического CO<sub>2</sub>, а также для оценки объемов инъекции магмы, предшествующих извержениям вулканов.

**Ключевые слова:** инъекция, флюид, триггерная, сейсмичность, магнитуда, магма, вода, CO<sub>2</sub>

**DOI:** 10.31857/S0203030624020026, **EDN:** MQJOII

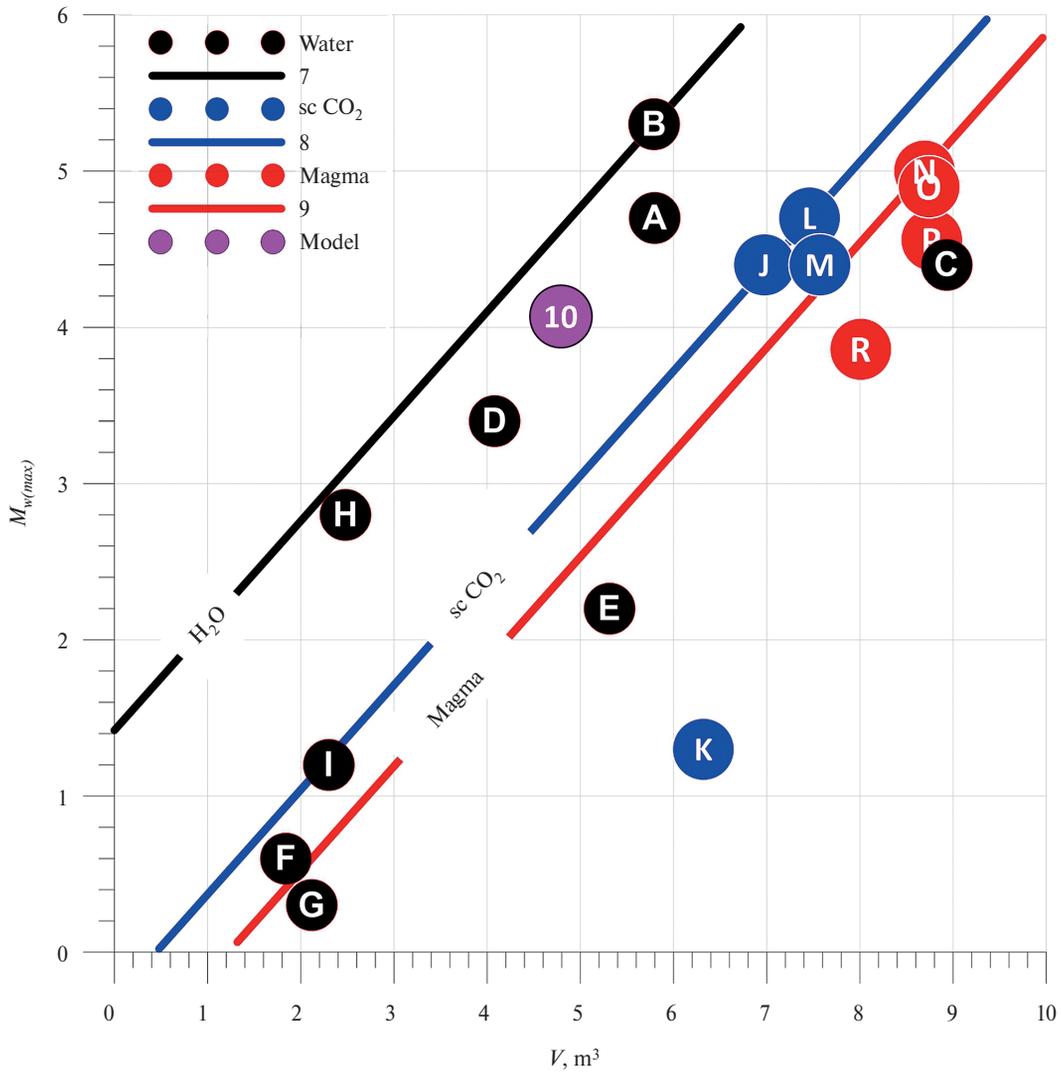
### ВВЕДЕНИЕ

Сейсмичность индуцируется не только при строительстве плотин [Rastogi et al., 1998; Lamontagne et al., 2006], подземной разработке месторождений [McGarr, 1992; Shen et al., 2008; Sato et al., 1988], но и при закачке воды для извлечения углеводородов из низкопроницаемых резервуаров, что более подробно изложено в последующих разделах, а также в искусственных геотермальных системах (Enhanced Geothermal Systems, EGS) [Ladner et al., 2009; Cladouhos et al., 2010; Nicolas et al., 2011; Convertito et al., 2012]. Последнее явление известно как триггерная сейсмичность или сейсмичность, вызванная инжекцией флюидов (Injected Induced Seismicity, IIS). IIS возникает, когда напряженное состояние разлома приближается к критерию разрушения из-за снижения эффективного

стресса, вызванного увеличением порового давления [Hubbert et al., 1959; Zoback, 2010]. Сейсмичность при небольших землетрясениях не вызывает проблем, в то время как более сильные землетрясения могут вызвать значительные разрушения.

При добыче сланцевого газа в подземные массивы горных пород закачивается большое количество воды для гидроразрыва пласта и утилизации сточных вод, образующихся вместе с газом и нефтью. В данной работе предпринимается попытка обоснования уравнения для описания верхней границы максимальной магнитуды триггерной сейсмичности в зависимости от объема закачиваемой воды.

Сверхкритический CO<sub>2</sub> закачивается в подземный массив горных пород в рамках проектов



**Рис. 1.** Теоретические зависимости и экспериментальные данные, связывающие объем закачиваемого флюида  $V$  ( $m^3$ ) и максимальную магнитуду  $M_{w(max)}$  триггерного сейсмического события.

Легенда: А-І – экспериментальные данные по инъекции воды (см. табл. 1); 7 – теоретическая зависимость для воды, уравнение (7); J-K – экспериментальные данные по инъекции  $scCO_2$  (см. табл. 1); 8 – теоретическая зависимость для  $scCO_2$ , уравнение (8); N-R – данные по объемам извержений вулканов (см. табл. 1); 9 – теоретическая зависимость для магмы, уравнение (9); Model – результаты CFRAC-моделирования инъекции магмы в сдвиговую трещину в основании Мутновского вулкана [Kiryukhin et al., 2022, вариант #10, Table 3].

по захоронению  $CO_2$  (Carbon capture and storage, CCS). Используя полученные уравнения, оценивается ПИС, вызванный CCS.

Известно, что сейсмичность индуцируется магматической активностью в вулканических системах. В связи с этим рассмотрена взаимосвязь максимальных магнитуд сейсмических событий и объемов магматических инъекций и изверженных вулканических продуктов.

В статье учтены также последние экспериментальные данные по индуцированной

сейсмичности, опубликованные в работах [Foulger et al., 2018; Grigoli et al., 2018; Schultz et al., 2020; Kocharyan, 2021; Li et al., 2022].

### ВЗАИМОСВЯЗЬ МЕЖДУ ОБЪЕМОМ ЗАКАЧИВАЕМОЙ ВОДЫ И МАГНИТУДОЙ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Для обоснования уравнений представления верхней границы максимальной магнитуды триггерной сейсмичности рассмотрены фактические данные триггерной сейсмичности,

**Таблица 1.** Примеры триггерной сейсмичности, вызванные инъекцией воды (А-Ж), сверхкритического CO<sub>2</sub> (К-М) и магмы (N-R)

	Резервуар	Флюид	Глубина инъекции, м	Объем инъекции, млн м <sup>3</sup>	Устьевое давление, МПа	$M_{\max}$	Ссылки
A	Well 1& 5, North Central AK, USA (2010)	Сточные воды	1800	0.63	15.7	4.7	[Horton et al., 2012]
B	Denver, USA (1962–1967)	Загрязненные сточные воды	3700	0.62	11.4	5.3	[Healy et al., 1960; Zoback, 2010]
C	The Geysers, USA (1972–2006)	Вода для EGS	6500–8500	850.0	0.53	4.4	[Cladouhos, 2010]
D	Basel 1, Switzerland (2006)	Вода для EGS	5000	0.012	30	3.4	[Ladner, 2009]
E	GPK3, Soultz, France (1987–2007)	Вода для EGS	5000	0.205	7	2.2	[Nicolas, 2011]
F	Nojima fault, Japan (1997)	Вода, эксперимент	540	0.000069	4.6	0.6	[Nishigami et al., 2002]
G	Nojima fault, Japan (2000)	Вода, эксперимент	540	0.000131	4.6	0.3	[Nishigami et al., 2002]
H	Matsushiro, Japan (1970)	Вода, эксперимент	1800	0.000302	5	2.8	[Nishigami et al., 2002]
I	КТВ, Germany (1994)	Раствор калия	9030	0.000200	53	1.2	[Zoback, Harjes, 1997]
J	Paradox Valley, US (2013)	Рассол	4300–4800	9.5	81	4.4	[Block et al., 2014]
K	Decatur, IL, USA (2011–2014)	CO <sub>2</sub> для CCS	2100	2.1	–	1.3	[Kayen et al., 2015]
L	Sleipner, Norway (1996)	CO <sub>2</sub> для CCS	800–1100	28.8	–	4.7	<a href="http://www.secarbon.org/wp-content/uploads/2011/05/Hagen.pdf">http://www.secarbon.org/wp-content/uploads/2011/05/Hagen.pdf</a>
M	Cogdell, TX, USA (2004–2012)	CO <sub>2</sub> для CCS	<2100	37.2	–	4.4	[Gan, Frohlich, 2013]
N	Барбарунга, Исландия (2014)	магма	–	480.0–510.0	–	> 5	[Sigmundsson et al., 2015]
O	П. Толбачик (2012)	магма	–	550.0	–	4.9	[Belousov et al., 2015], КФ ФИЦ ЕГС РАН
P	Ключевской (2000–2021)	магма		587.0		4.6	[Coppola et al., 2021] КФ ФИЦ ЕГС РАН
R	Безымянный (2000–2021)	магма		102.0		3.9	[Coppola et al., 2021] КФ ФИЦ ЕГС РАН

представленные в табл. 1. Они были выбраны таким образом, чтобы учитывался объем закачанной воды и максимальная магнитуда землетрясений. Зависимость между логарифмом объема закачанной воды,  $V$  (в м<sup>3</sup>), и максимальной

магнитудой вызванного сейсмического события,  $M_{\max}$ , изображена графически, как показано на рис. 1.

Авторы не ставят задачу провести всеобъемлющий обзор ИИС. Ниже приводятся лишь

краткие пояснения к конкретным сценариям закачки. Максимальная магнитуда 4.7 была зарегистрирована в Арканзасе в результате закачки воды при добыче нефти и природного газа, когда сточные воды от гидроразрыва пласта закачивались для повышения нефтеотдачи (случай А [Horton et al., 2012]). Загрязненная вода с военного завода закачивалась в подземный резервуар в Денвере, штат Колорадо, с 1962 по 1967 гг., и в результате была зарегистрирована сейсмичность с максимальной магнитудой 5.3 (случай В [Healy, 1968; Zoback, 2010]). Триггерная сейсмичность зарегистрирована при закачке воды в EGS для извлечения геотермальной энергии (случаи С и D [Cladouhos, 2010; Ladner, 2009]). В качестве примера можно привести геотермальное месторождение Гейзерс в Калифорнии, где была зарегистрирована максимальная магнитуда 4.4 (случай С [Cladouhos, 2010]). В уникальном случае рассол из купола каменной соли был закачан в скважину, чтобы избежать загрязнения реки; сейсмическая активность магнитудой 4.4 была зарегистрирована в Парадокс Вэлли, Калифорния (случай J [Block et al., 2014]). Известны случаи, когда вода закачивалась на глубину до 9 км (случай I, немецкая Kontinentales Tiefbohrprogramm der Bundesrepublik Deutschland (КТВ) [Zoback et al., 1997]) или даже в разлом Нодзима после землетрясения в Кобе в 1995 г. (случай G [Nishigami et al., 2002]) в научных целях.

А. Nicol с соавторами [Nicol et al., 2011] рассмотрели сценарии закачки воды в горячую сухую породу и для добычи углеводородов и вывели следующее уравнение:

$$M_{\max} = 0.77 \cdot \lg(V) - 0.51. \quad (1)$$

G. Zöller и M. Holschneider [Zöller, Holschneider, 2014] и J.H. Dieterich с соавторами [Dieterich et al., 2015] оценили теоретическую максимальную величину магнитуды триггерной сейсмичности следующим образом:

$$M_{\max} = 0.67 \cdot \lg(V). \quad (2)$$

А. McGarr [2014] также теоретически вывел уравнения, но не для максимальной магнитуды, а для верхней границы сейсмического момента  $M_0$  триггерного землетрясения в виде:

$$M_0 = G \cdot V, \quad (3)$$

где  $G$  – модуль сдвига, и подтвердил, что уравнение (3) может представлять верхний предел для сейсмического момента сильнейшего триггерного землетрясения в 18-ти случаях ИИС с модулем сдвига 30 ГПа. Используя взаимосвязь между сейсмическим моментом  $M_0$  и величиной  $M$ :

$$\lg(M_0) = 9.05 + 1.5 \cdot M \quad (4)$$

и принимая модуль сдвига равным 30 ГПа, коэффициент трения  $\mu = 0.6$ , параметр в законе Гутенберга-Рихтера  $b = 1$ , уравнение (3) можно преобразовать к следующему виду:

$$M_{\max} = 0.67 \cdot \lg(V) + 0.95, \quad (5)$$

где  $M_{\max}$  – верхняя граница максимальной величины триггерной сейсмичности (см. рис. 1).

Уравнения (1) и (2) можно обобщить в виде уравнения:

$$M_{\max} = A \cdot \lg(V) + B, \quad (6)$$

где  $A$  и  $B$  – константы, определяющие верхнюю границу максимальной величины ИИС, будет предпочтительнее, чем использование уравнения, подобного уравнению (1) или (2), для представления максимальной величины ИИС.

В данной работе коэффициент  $B$  скорректирован, поскольку случаи В и Н немного превышают оценки по уравнению (5). Однако  $A$  был оставлен неизменным, поскольку все три теоретических исследования показали одно и то же значение;  $B$  принят равным 1.42 для удовлетворения условий В и Н (см. рис. 1). В итоге уравнение:

$$M_{\max} = 0.67 \cdot \lg(V) + 1.42 \quad (7)$$

предлагается использовать для оценки верхней границы  $M_{\max}$  по ИИС на основе случаев от А до J в табл. 1. Это уравнение соответствует относительно высокому модулю сдвига 151 ГПа, имеющему “эффективный” смысл при принятых выше значениях коэффициента трения, параметра  $b$  (в законе Гутенберга-Рихтера), геологических и других неопределенностях. Сейсмическая энергия максимальных сейсмических событий составляет приблизительно от 1/10 до 1/10000 энергии закачки, которая может быть рассчитана как произведение устьевого давления и объема закачиваемой воды. По фактическим данным (см. табл. 1) закачка воды

не приводила к высвобождению энергии, превышающей энергию закачки.

### СЕЙСМИЧНОСТЬ, ВЫЗВАННАЯ ДОБЫЧЕЙ СЛАНЦЕВОГО ГАЗА

Общемировое количество воды, добываемой при традиционной добыче нефти и газа, составляет приблизительно 300 миллионов баррелей/год (веб-сайт JOGMEC, по данным от 15 октября 2015 г. в Японии). Общемировое производство природного газа составляет 2870 Гм<sup>3</sup>/год (2006 г.) или 19 млрд баррелей/год нефтяного эквивалента. Мировая добыча сырой нефти составляет приблизительно 30 млрд баррелей/год. Общая добыча составляет 49 млрд баррелей/год, а количество добываемого рассола составляет примерно 0.6% от добычи нефти и газа. Рассол обрабатывается и закачивается в подземные резервуары.

Для добычи сланцевого газа требуется от 8000 до 25000 м<sup>3</sup> воды для гидроразрыва пласта на скважину (по данным Массачусетского технологического института, 2011 г., <http://mitei.mit.edu/publications/reports-studies/future-natural-gas>). Например, количество используемой воды составляет 7.1 млн м<sup>3</sup>/год в Барнетте (Техас), 5.1 млн м<sup>3</sup>/год в Файетвилле (Арканзас), 2.7 млн м<sup>3</sup>/год в Хейнесвилле (Лос-Анджелес), и до 13.5 млн м<sup>3</sup>/год в Марселлусе. Из воды, полученной при гидроразрыве пласта, 15–25% уходит обратно в течение 30 дней. Эта вода обрабатывается и закачивается в подземные резервуары. В 2009 г. объем добычи сланцевого газа составил около 85 млн м<sup>3</sup> (нефтяной эквивалент). Объем закачиваемой воды составляет примерно 33% от объема добычи газа только при гидроразрыве пласта на пяти основных месторождениях сланцевого газа или, по крайней мере, в 50 раз больше, чем объем закачиваемого рассола при добыче обычных нефти и газа. Следовательно, при добыче сланцевого газа ожидается гораздо более сильная сейсмичность.

Землетрясения  $M$  2.7 и  $M$  1.5 произошли 1 апреля 2011 г. и 27 мая 2011 г. соответственно в 300 м от зоны гидроразрыва пласта Preese Hall Well PH1 компании Cuadrilla Resources в Великобритании (веб-сайт Британской геологической службы [http://earthquakes.bgs.ac.uk/research/earthquake\\_hazard\\_shale\\_gas.html](http://earthquakes.bgs.ac.uk/research/earthquake_hazard_shale_gas.html) по данным от 20 октября 2015 г.). В Оклахоме триггерная

сейсмичность с максимальной магнитудой 2.8 возникла в пределах 4 км от зоны гидроразрыва пласта на скважине 4-18 блока В Пикет 17–18 ноября 2011 г. [Holland, 2013]. A.L. Leons и A.J. Michael [Leons, Michael, 2012] показали, что количество землетрясений с магнитудой более 3 в Оклахоме и Арканзасе внезапно увеличилось в 2009 г. Зарегистрировано внезапное увеличение частоты сейсмических событий вокруг сланцевого месторождения Файетвилл в Арканзасе. Это увеличение и событие  $M$  5.7 в штате Оклахома в ноябре 2011 года [Keranen et al., 2012] считаются искусственно вызванными явлениями. Случайная нулевая гипотеза, принятая для последовательности возникновения землетрясений, была отвергнута с  $p$ -значением менее 0.1%. [Ellsworth et al., 2012] получили аналогичные результаты. Далее, [Shirezaei et al., 2016] показали наблюдаемый подъем поверхности земли в результате закачки сточных вод в восточном Техасе, их модель позволила сделать вывод, что увеличение порового давления более чем на 1 МПа может вызвать землетрясения, включая самое сильное землетрясение  $M$  4.8 в восточном Техасе 17 мая 2012 г.

Эти наблюдения и анализ показывают, что триггерная сейсмичность может возникать при закачке воды, связанной с добычей сланцевого газа. Приведенное выше уравнение (7) может быть использовано для количественного анализа ИИС в контексте оценки возможного объема воды при заданном предельном значении  $M_{\max}$ .

Подставляя количество воды для основных месторождений сланцевого газа в уравнение (7), ожидается максимальное значение  $M$  5.7–6.2 при добыче в течение 1 года на каждом участке. Максимальная величина составит  $M$  6.7–7.2 при 30-летней добыче. Учитывая, что рост  $M_{\max}$  в зависимости от времени довольно неравномерен, а поровое давление уменьшается со временем за счет диффузии, как указано в работе [McGarr, 2014], оценка для 30-летней добычи может быть завышенной. Однако, учитывая, что в 2011 г. уже произошло землетрясение  $M$  5.7 вблизи Праги, Оклахома [Keranen et al., 2012], а затем (3 сентября 2016 г.) произошло землетрясение  $M$  5.8 в 15 км к северо-западу от Пауни, Оклахома (веб-сайт Геологической службы США в поиске архивов землетрясений <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>

8 октября 2016 г.), вышеуказанная верхняя граница близка к реальности.

### ТРИГГЕРНАЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ ПРИ CCS (CARBON CAPTURE AND STORAGE)

При эксплуатации пилотных установок CCS для захоронения суперкритического CO<sub>2</sub> сообщалось о случаях триггерной сейсмичности, включая случай в Декатуре, штат Иллинойс, с  $M_{\max} = 1.3$  [Kaven et al., 2016]. Также сообщалось о случае после закачки CO<sub>2</sub> для повышения нефтеотдачи в Когделле, штат Техас, с  $M_{\max} = 4.4$  [Gan, Frohlich, 2013]. Сейсмические события в пределах 200 км от нагнетательной скважины до и после закачки CO<sub>2</sub> в известном проекте CCS в Слейпнере, Норвегия, были исследованы с помощью поиска архивов землетрясений на сайте USGS (веб-сайт Геологической службы США, [http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/nc72282711#general\\_summary](http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/nc72282711#general_summary) 20 октября 2015 г.) и проанализированы в зависимости от расхода закачки CO<sub>2</sub> (веб-сайт Statoil <http://www.secarbon.org/wp-content/uploads/2011/05/Hagen.pdf> 20 октября 2015 г.). Количество сейсмических событий уменьшилось с началом закачки. Однако после 2000 г. сейсмичность активизировалась, и было отмечено несколько более значительных сейсмических событий, одно из которых достигло величины  $M 4.7$ . Сейсмичность прекратилась через несколько лет после окончания закачки. Одним из механизмов снижения сейсмичности может быть восстановление порового давления после добычи нефти и газа.

Хотя в работе [Nishimoto et al., 2007] показано, что влияние порового сверхкритического CO<sub>2</sub> на механические свойства породы при трехосном сжатии почти такое же, как влияние поровой воды, данные из рассмотренных выше случаев К-М позиционируются ниже уравнения (7) (см. рис. 1). Поэтому мы уменьшили константу В для землетрясений, вызванных CCS, чтобы оценить верхнюю границу максимальной магнитуды (см. рис. 1):

$$M_{\max} = 0.67 \cdot \lg(V) - 0.30. \quad (8)$$

Сравнивая уравнение (8) с уравнением (7), верхняя граница  $M_{\max}$  при том же объеме закачки CO<sub>2</sub> меньше на 1.72, чем при закачке воды. Опыта достаточного количества случаев CCS нет, поэтому землетрясения, превышающие

предельное уравнение (8), могут произойти в будущем. На данном этапе изученности можно предположить, что разница в сжимаемости между водой и сверхкритическим CO<sub>2</sub> может вызвать эти отклонения.

Выбросы CO<sub>2</sub> в Японии составляют приблизительно 1.2 Гт/год. Это количество можно преобразовать в объем сверхкритического CO<sub>2</sub> в 2.56 Гм<sup>3</sup>/год, исходя из плотности 469 кг/м<sup>3</sup>. Глубина закачки должна составлять не менее 740 м, исходя из сверхкритических условий (давление > 7.4 МПа и температура > 304 К), и для упрощения расчетов была принята равной 800 м.

Если предположить, что площадка CCS будет эксплуатироваться в течение 30 лет, то объем закачки должен составлять менее 62000 м<sup>3</sup>/год для площадки CCS при прогнозном значении  $M 6.5$  (формула 8). Этот объем составляет всего 1/41000 выбросов CO<sub>2</sub> в Японии. Целевое значение сокращения выбросов CO<sub>2</sub> с помощью CCS, предложенное Японской межправительственной группой экспертов по изменению климата (IPCC), составляет 17% в 2050 г. Следовательно, для закачки 17% CO<sub>2</sub> потребуется 7000 объектов CCS при этом прогнозное значение  $M_{\max}$  составит  $M 6.5$ , землетрясения такой магнитуды происходят в Японии приблизительно раз в три года и наносят существенный ущерб.

Как полагают некоторые исследователи [Cappa, Rutqvist, 2011, 2012; Zoback, 2013; Zoback, Gorelik, 2012], триггерная сейсмичность может уменьшиться в результате утечек CO<sub>2</sub>.

### ТРИГГЕРНАЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ ПРИ МАГМАТИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ, ПРЕДШЕСТВУЮЩЕЙ ИЗВЕРЖЕНИЯМ ВУЛКАНОВ

Триггерная сейсмичность с максимальной магнитудой более 5 при извержении вулкана Бардарбунга в Исландии в 2014 г. была вызвана инъекцией магмы, при этом объем инъекции магмы оценивается по деформациям поверхности от 0.48 до 0.51 км<sup>3</sup>, объем изверженного материала на поверхности составил 1.4 км<sup>3</sup> (случай N, [Sigmundsson et al., 2015]).

Максимальная магнитуда при извержении вулкана Толбачик в 2012 г. составила 4.9 по данным КФ ФИЦ ЕГС РАН, при объеме

изверженного материала  $0.55 \text{ км}^3$  [Belousov et al., 2015] (случай O).

Извержения вулканов Ключевской и Безымянный фиксируются тепловой дистанционной спутниковой съемкой, которая позволяет оценивать объемы извержений (без учета explosивных продуктов) по корреляции между тепловой мощностью и приращениями объемов построек соответствующих вулканов ([https://www.mirovaweb.it/?country\\_id=4](https://www.mirovaweb.it/?country_id=4)) [Copolla et al., 2021]. Информация по триггерной сейсмичности, предшествующей извержениям вулканов, доступна из каталогов ГС РАН. Исходя из этого, табл. 1 дополнена данными, включающими объемы извержений вулкана Ключевской (2003–2021 гг.) и вулкана Безымянный (2000–2020 гг.). С учетом вышесказанного, рис. 1 дополнен четырьмя точками N, O, P и R.

Объемы инъекций магмы, предшествующих извержениям вулканов, включают проточный объем изверженных на поверхность вулканических продуктов и аккумулярованный (в фундаменте и постройке вулкана) объем магмы. При отображении точек O, P и R на рис. 1 использованы данные по объемам извержений (проточный объем). Теоретически максимальная магнитуда землетрясений должна быть связана с аккумулярованным объемом, поэтому точки O, P и R надо рассматривать как доказательные только по магнитудам триггерной сейсмичности.

Как показывает рис. 1, уравнение для верхней границы магнитуды триггерной сейсмичности для вулканов может быть представлено в следующем виде:

$$M_{\max} = 0.67 \cdot \lg(V) - 0.82. \quad (9)$$

Моделирование инъекции магмы в сдвиговых геомеханических условиях в фундаменте Мутновского вулкана [Kiryukhin et al., 2022] показывает, что зависимость  $M_{\max}$  от объема инъекции приближается к теоретической зависимости для воды (см. рис. 1).

## ОБСУЖДЕНИЕ

Опытные данные по инъекции различных флюидов в земной коре показывают, что верхняя граница магнитуды триггерной сейсмичности наибольшая при закачке воды, эта

граница понижается для суперкритического  $\text{CO}_2$  и становится наименьшей при магматической деятельности, предшествующей извержениям вулканов.

Самая низкая сжимаемость из рассматриваемых флюидов у воды  $4.9 \cdot 10^{-10} \text{ Па}^{-1}$ , более высокая сжимаемость у суперкритического  $\text{CO}_2$  (плотность  $\text{CO}_2$  при 350 К и 8 МПа составляет  $164 \text{ кг/м}^3$ , а при 305 К и 30 МПа –  $941 \text{ кг/м}^3$  [Pruess, 2005]) – это может завышать объемы, использованные для отображения экспериментальных точек суперкритического  $\text{CO}_2$  на рис. 1.

Утечки флюидов при инъекции в целевые резервуары также могут приводить к значительному завышению объемов, использованных при отображении экспериментальных данных на рис. 1. Соответственно, геологические условия и распределение фильтрационно-емкостных свойств в целевом резервуаре, благоприятные для утечек флюидов, могут смещать позиции экспериментальных точек вправо на рис. 1.

Важным следствием из анализа распределения опытных данных, показанных на рис. 1, является то, что значения максимальных магнитуд триггерной сейсмичности не превысили теоретически обоснованного предела для воды (уравнение 7) и экспериментально установили предел для суперкритического  $\text{CO}_2$  (уравнение 8) и магмы (уравнение 9).

Заметим также, что модель McGarr (предельная магнитуда землетрясения, которое может быть инициировано закачкой флюида, пропорциональна объему закачанного флюида) нуждается в постоянном обновлении по мере накопления экспериментальных данных. Например, землетрясение 2017 г.  $M_w 5.5$  в Pohang (Корея), которое произошло вблизи участка при проведении гидроразрыва с закачкой  $\sim 10^4 \text{ м}^3$  воды [Grigoli et al., 2018], в то время как согласно модели McGarr для инициирования землетрясения такой магнитуды требуется объем закачки на три порядка больше. Приводятся также свидетельства о влиянии на сейсмичность чрезвычайно слабых вариаций гидростатического давления (порядка миллибар) [Faugler et al., 2018].

Предлагаемое нами уравнение (7) оценивает магнитуду землетрясения в Pohang (Корея)

величиной 4.1. Наша оценка меньше, чем наблюдаемое 5.5. Однако она гораздо лучше, чем у McGarr. По мере накопления экспериментальных данных возможно возникнут достаточные основания чтобы скорректировать коэффициент “В” в нашем уравнении. Заметим также, что принятый объем закачки 10000 м<sup>3</sup> — это всего лишь предположение в работе [Grigoli et al., 2018].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе обобщения эмпирических данных и теоретических зависимостей получены уравнения, связывающие верхнюю границу максимальной магнитуды  $M_{\max}$  землетрясений и объем инъекций флюидов при закачке воды, суперкритического CO<sub>2</sub> и при магматической деятельности, предшествующей извержениям вулканов.

Уравнения могут быть использованы для прогноза триггерной сейсмичности при захоронении промышленных вод, добыче сланцевого газа и нефти, создании EGS для извлечения геотермальной энергии, захоронении суперкритического CO<sub>2</sub>, а также для оценки минимальных объемов магматических инъекций, предшествующих извержениям вулканов.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят аспиранта Кея Такахашу за помощь в расчетах объемов инъекции по литературным данным, А.В. Соломатина и А.В. Сергееву за полезные замечания на стадии подготовки рукописи. Авторы признательны рецензентам за конструктивные замечания, которые позволили усовершенствовать статью.

Работа выполнена с использованием данных, полученных на уникальной научной установке “Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира” (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>).

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Научным и технологическим исследовательским советом Японии в рамках научного проекта РФФИ № 21–55–50003 ЯФ\_а “Магматический фразинг и флюидные потоки в вулканических структурах”.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Belousov A., Belousova M., Edwards B. et al.* Overview of the precursors and dynamics of the 2012–2013 basaltic fissure eruption of Tolbachik Volcano, Kamchatka, Russia // *J. of Volcanol. and Geotherm. Res.* 2015. № 307. P. 22–37.
- Block L., Wood C., Yeck W., King V.* The 24 January 2013  $M_L$  4.4 Earthquake near Paradox, Colorado and Its Relation to Deep Well Injection // *Seism. Res. Lett.* 2014. V. 85. № 3. P. 609–624. DOI: 10.1785/0220130188
- British Geological Survey web site, [http://earthquakes.bgs.ac.uk/research/earthquake\\_hazard\\_shale\\_gas.html](http://earthquakes.bgs.ac.uk/research/earthquake_hazard_shale_gas.html) (browsed on October 20, 2015).
- Cappa F., Rutqvist J.* Impact of CO<sub>2</sub> Geological Sequestration on the Nucleation of Earthquakes // *Geophys. Res. Lett.* 2011. V. 38. DOI: 10/1029/2011GL048487
- Cappa F., Rutqvist J.* Seismic Rupture and Ground Accelerations Induced by CO<sub>2</sub> Injection in the Shallow Crust // *Geophys. J. Int.* 2012. V. 190. № 3. P. 1784–1789.
- Convertito V., Maercklin L., Sharma N., Zollo A.* From Induced Seismicity to Direct Time-Dependent Seismic Hazard // *Bull. Seism. Soc. Am.* 2012. V. 102. № 6. P. 2563–2573. DOI: 10.1785/0120120036
- Cladouhos T., Petty S., Foulger G., Julian B., Fehler M.* Injection Induced Seismicity and Geothermal Energy // *GRC Transactions.* 2010. V. 34. P. 1213–1220.
- Coppola D., Laiolo M., Massimetti F., Hainzl S., Shevchenko A.V., Mania R., Shapiro N., Walter T.R.* Thermal remote sensing reveals communication between volcanoes of the Klyuchevskoy Volcanic Group // *Scientific Reports.* 2021. V. 11(1). P. 1–16.
- Dieterich J.H., Richards-Dinger K.B., Kroll K.A.* Modelling Injection-Induced Seismicity with the Physics-based Earthquake Simulator RSQSim // *Seism. Res. Lett.* 2015. V. 86. № 4. P. 1102–1109. DOI: 10.1785/0220150057
- Elsworth W.* Are Seismicity Rate Changes in the Midcontinent Natural or Manmade? San Diego: Proc. SSA Meeting, 2012.
- Foulger G.R., Wilsona M.P., Gluyasa J.G., Juliana B.J., Daviesb R.J.* Global review of human-induced earthquakes // *Earth-Science Rev.* 2018. V. 178. P. 438–514.

- Gan E., Frohlich C.* Gas injection may have triggered earthquakes in the Cogdell oil field, Texas // PNAS. 2013. V. 110. № 47. P. 18786–18791.
- Grigoli F., Cesca S., Rinaldi A.P., Manconi A., López-Comino J.A., Clinton J.F., Westaway R., Cauzzi C., Dahm T., Wiemer S.* The November 2017  $M_w$  5.5 Pohang earthquake: A possible case of induced seismicity in South Korea // Science. 2018. V. 360. № 6392. P. 1003–1006.
- Healy J.H., Rubey W.W., Griggs D.T., Raleigh C.B.* The Denver Earthquakes // Science. New Series. 1968. V. 161. № 3848. P. 1301–1310.
- Holland A.* Earthquakes Triggered by Hydraulic Fracturing in South-Central Oklahoma // Bull. Seism. Soc. Am. 2013. V. 103. № 3. P. 1784–1792. DOI: 10.1785/0120120109
- Horton S.* Disposal of Hydrofracking Waste Fluid by Injection into Subsurface Aquifers Triggers Earthquake Swarm in Central Arkansas with Potential for Damaging Earthquake // Seism. Res. Lett. 2012. V. 83. № 2. P. 251–260.
- Hubbert M.K., Rubey W.W.* Role of Fluid Pressure in Mechanics of Overthrust Faulting // Bull. Geol. Soc. Am. 1959. V. 70. P. 115–186.
- JOGMEC Web Site, [http://www.jogmec.go.jp/library/recommend\\_library\\_10\\_000037.html](http://www.jogmec.go.jp/library/recommend_library_10_000037.html) (browsed on Oct. 15, 2015 in Japanese)
- Kaven J.O., Hickman S.H., McGarr A.F., Ellsworth W.L.* Surface Monitoring of Microseismicity at the Decatur, Illinois, CO<sub>2</sub> Sequestration Demonstration Site // Seism. Res. Lett. 2015. V. 86. № 4. P. 1096–1101. DOI: 10.1785/0220150062
- Keranen K.M., Savage H., Atekwana E., Cochran E., Sumy D., Rubinstein J., Kaven J.* Foreshock and Aftershock Sequences of the 2011  $M_{5.6}$  Oklahoma, Earthquake, 2012 // Proc. SSA Meeting. San Diego, 2012.
- Kiryukhin A.V., Polyakov A.Y., Voronin P.O., Zhuravlev N.B., Usacheva O.O., Solomatina A.V., Kiryukhin P.A.* Magma Fracking and Production Reservoirs Beneath and Adjacent to Mutnovsky Volcano Based on Seismic Data and Hydrothermal Activity // Geothermics. 2022. V. 105. 102474.
- Kocharyan G.G.* Nucleation and Evolution of Sliding in Continental Fault Zones under the Action of Natural and Man-Made Factors: A State-of-the-Art Review July 2021 // Izvestiya Physics of the Solid Earth. 2021. V. 57(4). P. 439–473.
- Ladner F., Häring M.O.* Hydraulic Characteristics of the Basel 1 Enhanced Geothermal System // Geothermal Resources Council Transactions. 2009. V. 33. P. 199–203.
- Lamontagne M., Hammamji Y., Tournier J.P., Woodgold C.* Reservoir-induced Earthquakes at Sainte-Marguerite-3, Quebec, Canada, Canadian // Journal of Earth Sciences. 2006. V. 43. № 2. P. 135–146. DOI: 10.1139/E05-108
- Li Z., Eaton D., Davidsen J.* Short-term forecasting of  $M_{max}$  during hydraulic fracturing // Scientific Reports. 2022. V. 12. 12509. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-15365-6>
- Lleons A.L., Michael A.J.* Statistical Modeling of Seismicity Rate Changes in Oklahoma, 2012 // Proc. SSA Meeting. San Diego, 2012.
- McGarr A.* Moment Tensor of Ten Witwatersrand Mine Tremors // PAGEOPH. 1992. V. 139. № 3/4. P. 781–800.
- McGarr A.* Maximum Magnitude Earthquakes Induced by Fluid Injection // J. Geophys. Res.: Solid Earth. 2014. V. 119. P. 1008–1019.
- MIT Energy Initiative, The Future of Natural Gas – An Interdisciplinary MIT Study, 2011, <http://mitei.mit.edu/publications/reports-studies/future-natural-gas30>
- Nicol A., Carne R., Gerstenberger M., Christophersen A.* Induced seismicity and its implications for CO<sub>2</sub> storage risk // Energy Procedia. 2011. V. 4. P. 3699–3706.
- Nicolas C., Michel F., Catherine D., Marco C.* Induced Microseismic Activity During Recent Circulation Tests at the EGS Site of Soultz-Sous-Forest (France), 2011, Proc. Thirty-Sixth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford, California, 31 January–2 February 2011. Stanford: Stanford University, 2011. SGP-TR-191.
- Nishigami K., Tadokoro K., Nagai S., Mizuno T., Kanoh Y., Hiramatsu Y.* Induced Seismicity by Injecting Water // Journal of Geology in Japanese. 2002. V. 111. N. 2. P. 268–276.
- Nishimoto S., Kiyama T., Zhang Y., Kumakura S., Ishijima Y.* Change in Mechanical Properties and Elastic Wave Velocity of Mudstone in Otashiro seam, Kazusa Group in Japan due to Supercritical CO<sub>2</sub> Injection, 2007 in Japanese // Proc. Annual Spring Meeting of Hokkaido Branch, MMIJ, A-10. 2007. P. 19–20.
- Pruess K.* ECO2N: A TOUGH2 Fluid Property Module for Mixtures of Water, NaCl, and CO<sub>2</sub> LBNL-57952. 2005. 66 p.
- Rastogi B.K., Mandal P., Kumar N.* Seismicity around Dhamni Dam, Maharashtra, India // PAGEOPH. 1997. V. 150. N. 3–4. P. 493–509.
- Sato K., Fujii Y.* Induced Seismicity Associated with Longwall Coal Mining // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 1988. V. 25. N. 5. P. 253–262.
- Shen B., King A., Guo H.* Displacement, Stress, and Seismicity on Roadways Roofs during Mining-induced Failure // Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 2008. V. 45. P. 672–688.
- Shirezaei M., Ellsworth W.L., Tiampo K.F., González P.J., Manga M.* Surface Uplift and Time-dependent Seismic Hazard due to Fluid Injection in Eastern Texas // Science. 2016. V. 353. P. 1416–1419.
- Sigmundsson F., Hooper A., Hreinsdóttir S. et al.* Segmented Lateral Dyke Growth in a Rifting Event at Bárðarbunga Volcanic System, Iceland // Nature. 2015. V. 517. P. 191–194.

- Schultz R., Skoumal R.J., Brudzinski M.R., Eaton D., Bapchie B., Ellsworth W.* Hydraulic fracturing-induced seismicity // *Rev. of Geophys.* 2020. 58. e2019RG000695.
- Statoil Web Site, <http://www.secacarbon.org/wp-content/uploads/2011/05/Hagen.pdf> (browsed on Oct. 20, 2015)
- United States Geological Survey Web Site, Search Earthquake Archives, <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/> (browsed on Sept. 8, 2016)
- United States Geological Survey Web Site, [http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/nc72282711#general\\_summary](http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/nc72282711#general_summary) (browsed on Oct. 20, 2015)
- Zoback M.D.* Earthquake Risk Associated with Shale Gas Development and Carbon Sequestration, 2013 // *Proc. the 6th Int. Symp. In-Situ Rock Stress (RS2013 Sendai)*, 20–22 August 2013. Sendai, Japan, 2013.
- Zoback M.D., Harjes H.-P.* Injection Induced Earthquakes and Crustal Stress at 9 km depth at the KTB Deep Drilling Site, Germany // *J. Geophys. Res.* 1997. V. 102. № B8. P. 18477–18491.
- Zoback M.D., Gorelick S.M.* Earthquake triggering and large-scale geologic storage of carbon dioxide // *PNAS.* 2012. V. 109. № 26. P. 10164–10168.
- Zoback M.D.* *Reservoir Geomechanics.* Cambridge: University Press, 2010. 461 p.
- Zoller G., Holshneider M.* Induced Seismicity: What is the Size of the Largest Expected Earthquake? // *Bull. Seism. Soc. Ame.* 2014. V. 104. № 6. P. 3153–3158.

## Magnitudes of seismic events induced by fluid injections in the Earth's crust

A. V. Kiryukhin<sup>1</sup>, \*, Y. Fujii<sup>2</sup>, B. A. Alam<sup>3</sup>, E. V. Chernykh<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS,  
bulvar Piipa, 9, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006 Russia*

<sup>2</sup>*Faculty of Engineering, Hokkaido University, N13W8, Sapporo, 060-8628 Japan*

<sup>3</sup>*Department of Petroleum & Mining, Faculty of Civil Engineering, Military Institute of Science and Technology,  
Dhaka, 1216 Bangladesh*

\*e-mail: AVKiryukhin2@mail.ru

Based on a generalization of empirical data and theoretical dependencies, equations linking the upper limit of maximum earthquake magnitude and the volume of fluid injection during water injection, supercritical CO<sub>2</sub>, and magmatic activity preceding volcanic eruptions were obtained.

The equations can be used to predict trigger seismicity in shale gas and oil production, Enhanced Geothermal Systems (EGS) creation for geothermal energy use, supercritical CO<sub>2</sub> burial, and to estimate the volume of magma injections preceding volcanic eruptions.

*Keywords:* injection, fluid, triggering, seismicity, magnitude, magma, water, CO<sub>2</sub>