

УДК 550.34

## О РЕЖИМЕ ВЫЗВАННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ

© 2025 г. М. В. Родкин<sup>1, 2, \*</sup>

<sup>1</sup>Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН (ИТПЗ РАН), г. Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт проблем нефти и газа РАН (ИПНГ РАН), г. Москва, Россия

\*E-mail: rodkin@mitp.ru

Поступила в редакцию 15.10.2024 г.

После доработки 02.12.2024 г.

Принята к публикации 25.12.2024 г.

Проблема вызванной сейсмичности имеет важный как практический, так и теоретический аспект. Практический аспект связан с опасностью вызванной сейсмичности. В ряде случаев опасность сильной вызванной сейсмичности приводила к закрытию важных промышленных проектов. Теоретический аспект связан с известным парадоксом сейсмичности, о невозможности реализации обычных землетрясений на глубинах более нескольких десятков километров. Отсюда следует, что физика вызванных, как правило, приповерхностных землетрясений может отличаться от физики большинства более глубоких событий. Рассмотрены примеры ряда областей вызванной сейсмичности, представляющих собой как окрестности крупных водохранилищ, так и области интенсивной добычи углеводородного и рудного сырья. Во всех рассмотренных районах, более или менее определенно, выявляется ряд общих тенденций. После роста вызванной сейсмичности, даже и при продолжающемся сильном техногенном воздействии, наблюдается тенденция спада сейсмической активности. Также, методом анализа обобщенной окрестности сильного землетрясения (ООСЗ), для зон вызванной сейсмичности выявляется близость интенсивности фор- и афтершокового процесса, что контрастирует со случаем обычной сейсмичности, для которой активность афтершокового процесса обычно много сильнее. Можно предположить, что спад вызванной сейсмичности связан с разгрузкой исходных тектонических напряжений, а близость интенсивности фор- и афтершокового процесса указывает на отличие физического механизма вызванных приповерхностных землетрясений от обычных, более глубоких землетрясений.

*Ключевые слова:* вызванная сейсмичность, спад сейсмической активности со временем, отличие физики приповерхностных землетрясений.

DOI: 10.31857/S0002333725020127, EDN: DMUUQV

### ВВЕДЕНИЕ

С самого открытия явления вызванной сейсмичности [Carder, 1945; Гупта, Растиги, 1977; Gupta, 1983] физика этого явления остается не вполне понятной, дискуссии по этому вопросу продолжают до настоящего времени [Gupta, 2022]. Первые примеры зарегистрированной вызванной сейсмичности были связаны с закачками воды и с заполнением крупных водохранилищ. Затем эффекты вызванной сейсмичности наблюдались также при добыче углеводородов (как обычных, так и сланцевых) и при горных разработках как шахтным, так и открытым мето-

дом [Davis, Frohlich, 1993; Погожин, 1996; Llenos, Michael, 2013; Van Thienen-Visser, Breunese, 2015; Krupnick, Echarte, 2017; Van der Baan K., Calixto, 2017; Адушкин и др., 2000; Dempsey, Suckale, 2023; Беседина и др., 2024; и многие др.].

Было показано, что иницирующие техногенные воздействия, как правило, слишком малы, чтобы непосредственно порождать землетрясения. В связи с этим иногда различают вызванную и инициированную сейсмичность, где во втором случае техногенное воздействие играет роль триггера. Заметим, что в случае проведения детальных исследований палеосейсмичности

часто оказывалось, что землетрясения в данном районе происходили и ранее [Рогожин, 1996], а в ряде случаев рост сейсмичности может порождаться естественной изменчивостью сейсмического режима или быть кажущимся, связанным с улучшением системы регистрации [Годзиловская и др., 1998]. Считается, что техногенные воздействия, будь то изменение напряженного состояния или рост флюидного давления, обычно играют роль триггера, инициирующего реализацию землетрясения по уже имеющимся разломам, в соответствии с тектоническим полем напряжений. При этом неясным остается также вопрос, почему вызванная сейсмичность возникает в окрестности только малой доли случаев техногенного воздействия. Так, заполнение даже и глубоких водохранилищ, глубиной около 100 и более метров, далеко не всегда сопровождалось активизацией сейсмичности. При высоте столба воды около 100 м индуцированная сейсмичность наблюдалась примерно в 5% случаев, и даже при глубинах водохранилища от 150 до 250 м такая сейсмичность наблюдается только примерно в 25% случаев [Gupta, 2022]. Заметим, что убедительным аргументом в пользу существования эффекта вызванной сейсмичности является рост доли сейсмогенных водохранилищ с увеличением столба воды и практически отсутствие примеров всплесков сейсмичности вблизи многочисленных неглубоких (менее 50 м) водохранилищ.

Довольно часто вызванная сейсмичность возникала в областях, где ранее землетрясения не наблюдались, соответственно никаких антисейсмических мер при строительстве не предусматривалось. Число вызванных, пусть и не сильных, землетрясений иногда бывало весьма значительным. Так, например, сейсмичность в Оклахоме, районе интенсивной добычи сланцевой нефти, систематически оказывалась выше, чем в Калифорнии, известной своими сильными землетрясениями [Krupnick, Echarte, 2017; Van der Baan K., Calixto, 2017]. Если при этом в данном районе преобладали слабые или обводненные грунты, то даже несильные землетрясения могли вызывать существенный ущерб. В целом ряде случаев опасение развития сильной вызванной сейсмичности заставляло резко ограничивать антропогенную нагрузку или даже вовсе прекращать вполне успешные проекты. Так, например, рост вызванной сейсмичности

вблизи газового суперместорождения Гронинген привел сначала к резкому сокращению объема добычи, а затем к решению о полном прекращении эксплуатации этого месторождения, являвшегося основным поставщиком газа для стран Бенилюкса [Van Thienen-Visser, Breunese, 2015; Van Elk et al., 2017; Dempsey, Suckale, 2023]. Для контроля опасности вызванной сейсмичности широко используется правило алгоритма “Семафор”, согласно которому при локальном повторном, вблизи нагнетающей или добывающей скважины, заметном сейсмическом эффекте, эксплуатация данного объекта прекращается. Этот алгоритм, однако, не обеспечивает достаточного контроля опасности вызванной сейсмичности; достаточно часто землетрясения, полагаемые инициированными, возникают на значительном (до 2-х десятков километров) расстоянии от области техногенного воздействия и со значительным (годы) запаздыванием по времени [Родкин, Рукавишникова, 2018; Vorobieva et al., 2020].

Современный обзор данных о вызванной сейсмичности, в первую очередь, применительно к сейсмичности, вызванной заполнением водохранилищ, представлен в работах [Gillian et al., 2018; Gupta, 2022]. Отмечается, что вызванная сейсмичность отличается от обычной большими в среднем значениями *b-value*, относительно большей активностью форшокового процесса и относительно большей (чем по закону Бота) магнитудой сильнейшего афтершока. Заметим, что последние две особенности режима вызванной сейсмичности взаимосогласованы, а большие значения наклона графика повторяемости характерны также и для вулканических землетрясений, где флюидная фаза представлена расплавом. В целом вопрос остается дискуссионным. В работе [Telesca et al., 2022] отмечается аналогичность режима и характеристик вызванных и обычных землетрясений.

Особый практический интерес представляет оценка опасности вызванной сейсмичности и тенденций ее изменения. Диапазон предлагаемых решений здесь весьма большой: от ожидания, что сейсмичность может оказаться выше, чем в известных районах сейсмической активности, а максимальные магнитуды землетрясений могут достигать значений  $M7+$ , до наблюдения, что в ряде случаев после роста сейсмичности наблюдался ее спад [Gupta, 2022]. Такие случаи

приведены также в работах [Пунанова, Родкин, 2021; Chelidze et al., 2022; Rodkin, Lyubushin, 2023].

По-прежнему актуален и вопрос о механизме развития вызванной сейсмичности. Как известно, согласно известному парадоксу сейсмичности, землетрясения глубиной более нескольких десятков километров не могут реализовываться по общепринятой модели хрупкого разрушения и отдачи Рида [Касахара, 1985]. Были предложены варианты, связывающие возникновение более глубоких землетрясений с развитием высокого порового давления и фазовыми переходами вещества погружающихся литосферных плит [Bridgman, 1945; Калинин и др., 1989; Houston, 2015; Green, 2017; Родкин, Рундквист, 2017; и др.]. Эти теоретические построения, однако, слабо подкреплялись сейсмологическими данными; характеристики разноглубинных землетрясений представлялись вполне аналогичными. Наличие теоретически ожидаемых различий характеристик разноглубинных землетрясений было показано в работах [Rodkin, 2022; Родкин, Липеровская, 2023]. Так, для среднеглубоких землетрясений с глубинами в интервале примерно от 30–50 до 100–150 км, возникновение которых связывалось с высоким флюидным давлением, была показана тенденция развития очага вверх, что и следовало ожидать в случае наличия в очаговой зоне легкого флюида и тенденции прорыва его по зонам трещиноватости вверх. Для более глубоких землетрясений, связываемых с фазовыми превращениями, наблюдается обратная тенденция — развитие очага вниз, в область больших температур. Такая же тенденция наблюдается и для верхнекоровых землетрясений. Но также можно ожидать различия характеристик землетрясений и для событий выше и ниже примерно 10 км. К этому интервалу глубин, согласно работам [Иванов, 1999; Иванов, Иванов, 2018], приурочен слой разделителя между областью преимущественно гидростатического давления флюида и литостатического. Отсюда можно ожидать, что инициированные, как правило, верхнекоровые, землетрясения будут отличаться от обычных, более глубоких землетрясений.

Таким образом, остаются неясными как тенденции изменения вызванной сейсмичности со временем, так и наличие, и характер отличия

вызванной сейсмичности от естественной. Ниже, по данным каталогов ряда областей развитой вызванной сейсмичности, рассматриваются тенденции изменения режима сейсмичности во времени как изменчивости потока событий, так и величин *b-value*. Также, методом анализа обобщенной окрестности сильного землетрясения, выявляется значительное отличие относительной интенсивности фор- и афтершокового процесса от типичного для обычных землетрясений резкого доминирования числа афтершоков. Рассмотрение проводится для ряда случаев наиболее обеспеченных сейсмическими данными районов крупных водохранилищ и областей интенсивной добычи углеводородного и рудного сырья.

## МЕТОД

Все приводимые ниже и удовлетворительно обеспеченные статистическими данными примеры развития вызванной сейсмичности рассматриваются единообразно. В скользящем временном или событийном окне рассчитываются значения интенсивности потока значимых событий и значения наклона графика повторяемости *b-value*. Нижняя граница значимых событий (в единицах магнитуды или энергетического класса) задается стандартным образом, по сохранению приемлемой линейности графика повторяемости землетрясений. Ширина окна в каждом отдельном случае выбирается как компромисс между приемлемыми детальностью по времени и точностью определения параметра. Под приемлемой точностью здесь понимается та, когда на графике достаточно четко проявляется тенденция изменения значений данного параметра со временем. К сожалению, не для всех каталогов вызванной сейсмичности такую тенденцию удастся выделить; для этого желательны каталоги примерно тысячи значимых событий, зачастую число таких событий много меньше.

Второй метод анализа базировался на построении обобщенной окрестности сильного землетрясения (ООСЗ), где понятие сильного события определяется применительно к данному каталогу. Этим методом [Родкин, 2008; 2020; Rodkin, Tikhonov, 2016; Родкин, Рундквист, 2017; и др.] проводится масштабированное на размер очага сильного события суммирование данных

по окрестностям возможно большего числа сильнейших событий данного каталога. Каждое отдельное событие из такой окрестности характеризуется временем запаздывания или опережения относительно своего главного события и расстоянием до главного события, нормированным на размер очага главного события. Метод позволяет достаточно точно (что обычно невозможно иными способами) описать типичные особенности сейсмического режима.

Опыт применения метода ООСЗ говорит, что на качественном уровне результат слабо зависит от выбора формулы для расчета размера очага. Далее для нормировки расстояния принималась зависимость размера очага от магнитуды землетрясения [Соболев, 1993]

$$R, \text{ км} = 10^{0.5M-1.9}. \quad (1)$$

Формула (1) применяется здесь как более осредненная и потому более адекватная имеющимся данным, чем ее варианты с учетом анизотропии очага [Wells, Coppersmith, 1994]. Построение обобщенной окрестности сильного события позволяет выявить, имеют ли место для данной совокупности событий степенные режимы фор- и афтершоковой активности, какова типичная длительность этих процессов, их относительная интенсивность, и позволяет сравнить полученные значения с ранее определенными характеристиками обычного сейсмического процесса [Rodkin, Tikhonov, 2016; Родкин, 2020]. Далее, учитывая выявленные параметры длительности и характерных размеров афтер-

шоковой области, представляется возможным проверить выполнимость для вызванных землетрясений закона Бота. Описанная методика была применена к описанным ниже примерам вызванной сейсмичности, список рассмотренных локальных каталогов и их основные характеристики приведены в таблице.

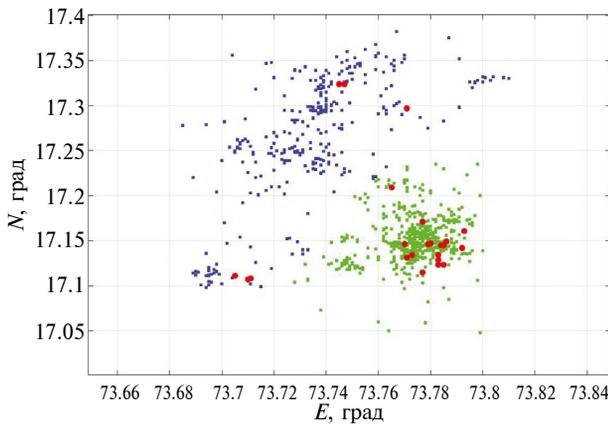
### РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ. ВЫЗВАННАЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ ОБЛАСТИ ВОДОХРАНИЛИЩ КОЙНА И ВАРНА

На рис. 1 представлена схема расположения значимых ( $M \geq 2.0$ ) землетрясений региона Койна–Варна; события  $M \geq 4.0$  показаны большими красными точками [Shashidhar et al., 2019]. Видно, что район сейсмичности Варна (зеленые точки) более активен и более локализован, далее будем в большей степени использовать эти данные. Результаты для района Койна качественно аналогичны.

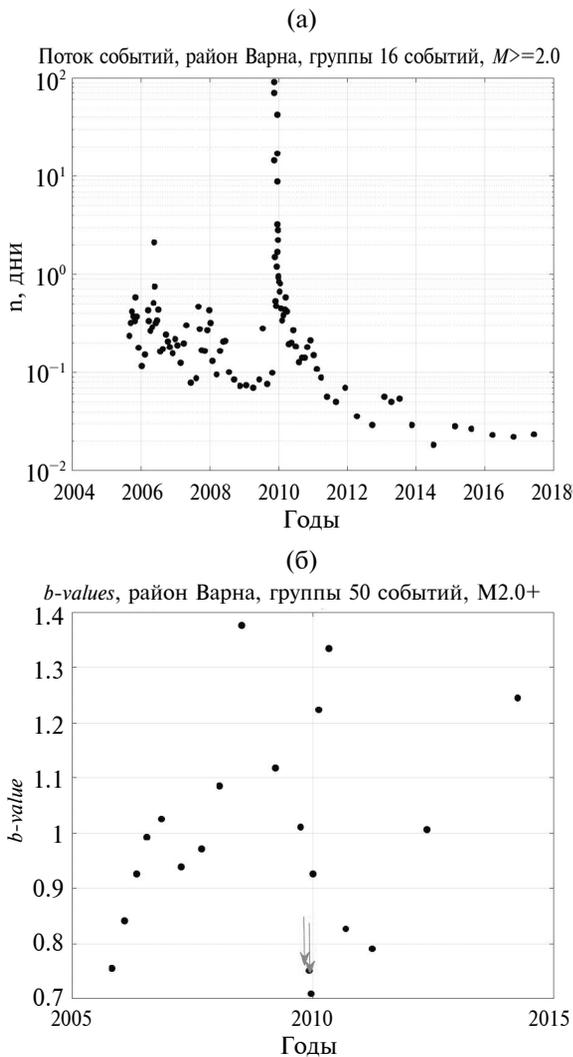
На рис. 2а представлен режим значимых событий района Варна, проведено осреднение скоростей потока событий для последующих групп из 16 событий. На рис. 2б дана зависимость текущих значений  $b$ -value для последующих групп из 50 событий с перекрытием 25 событий. Размеры групп выбраны из соображений получения достоверных тенденций изменения исследуемого параметра от времени. Точность оценки средних значений выборочно контролировалась бутстреп-методом, было показано, что временные тенденции в большинстве случаев выделяются вполне определенно.

Список рассмотренных локальных каталогов и характеристики каталогов

Каталог	Число значимых событий	Диапазон магнитуд/классов $M_c - M_{\max}$	Диапазон глубин, км	Отношение интенсивности потоков фор/афтершоков	Время активизации, дни
Койна	321	2–5	1–15	~ 0.3	50–100
Варна	538	2–5.1	1–13		
Гронинген	1238	0.9–3.6	1–3.5	~ 1	~ 100
Оклахома	6368	2.7–5.8	0–29	~ 0.6	~ 100
Жезказган	2576	3.0–7.6	мелкие	~ 2	~ 100
Северо-Уральский рудник	1536	3.5–8.6	до ~ 4.5	~ 1	~ 10
Сев. Кизеловский 1983–1998	5391	$Lg(E, \text{ Дж})$ 4.5–7.7	до ~ 4	~ 1	



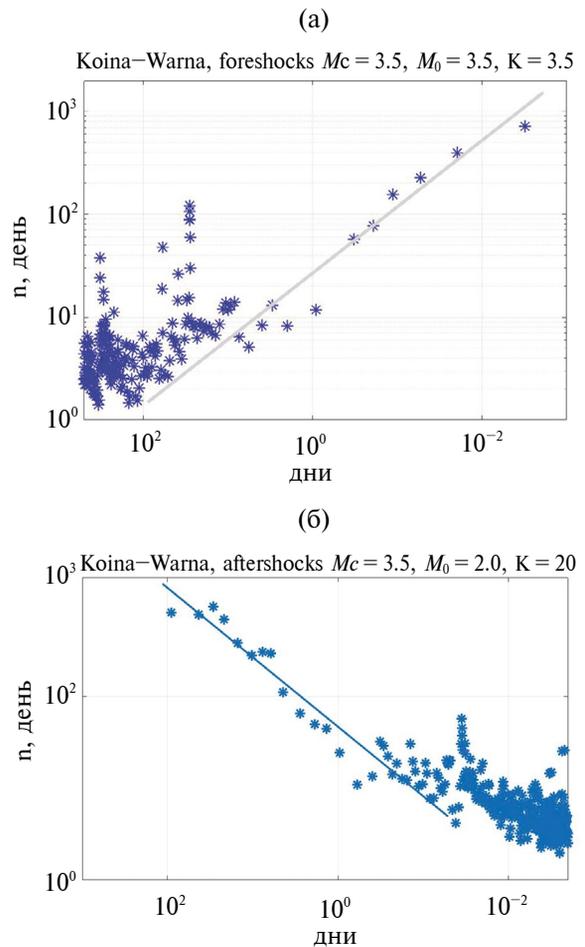
**Рис. 1.** Расположение событий в области водохранилищ Койна (синие точки) и Варна (зеленые). Показаны значимые события ( $M \geq 2.0$ ) и более сильные ( $M \geq 4.0$ ), красные точки.



**Рис. 2.** Поток событий (а) и тенденция изменения  $b$ -value (б). Красными стрелками даны моменты двух сильнейших событий ( $M \geq 5.0$ ).

Видны тенденции убывания интенсивности потока событий со временем, несмотря на примерно постоянный темп заполнения и спуска водохранилища и роста величин  $b$ -value, прерываемая моментом реализации двух сильнейших землетрясений, значения  $b$ -value рассчитывались методом максимального правдоподобия по формуле из работы [Аки, 1965].

На рис. 3 представлены данные расчета обобщенной окрестности сильного землетрясения (ООСЗ) для потока форшоков и афтершоков всего региона Койна–Варна. В качестве сильных событий использовались землетрясения  $M \geq 3.5$ . Рассматривались последовательные по времени группы из 20 событий и области, равные троекратно размеру очага главного события по формуле (1). Интенсивность потока афтершоков выше потока форшоков примерно в полтора-три раза (при разных методах сравнения), тогда как для типичных землетрясений это отношение близко к 10.



**Рис. 3.** Интенсивность потоков фор- и афтершоков для области Койна–Варна; интенсивность потока форшоков заметно меньше, но сравнима с интенсивностью потока афтершоков.

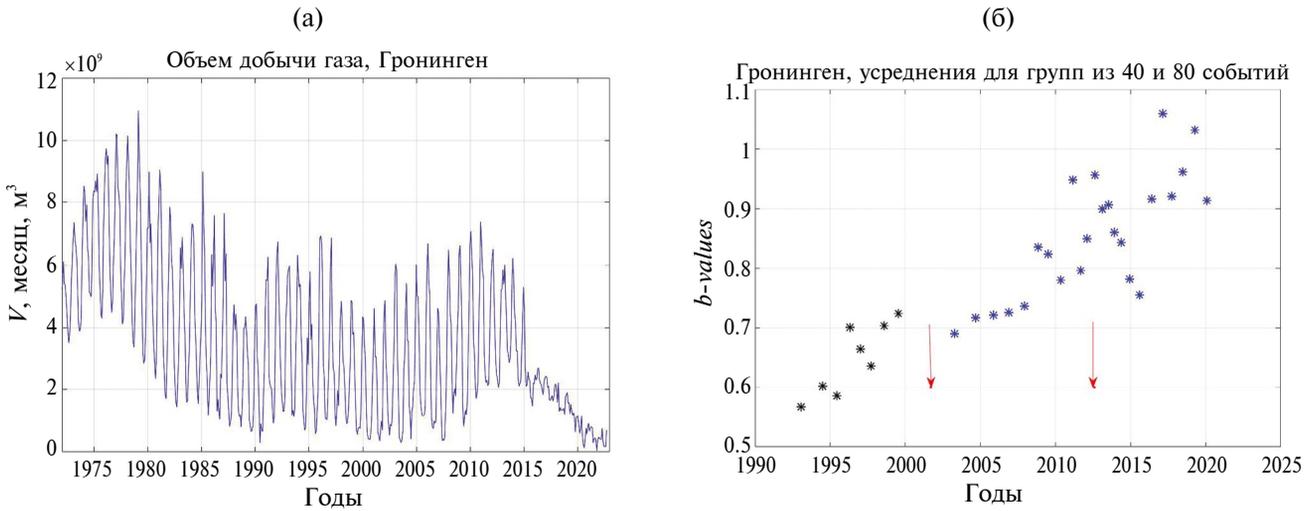
**ВЫЗВАННАЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ ПРИ ДОБЫЧЕ УВ. РАЙОН ГАЗОВОГО СУПЕРМЕСТОРОЖДЕНИЯ ГРОНИНГЕН (НИДЕРЛАНДЫ)**

Заметная сейсмичность в районе газового суперместорождения Гронинген (Нидерланды) началась с 1990 г., уже после достаточно длительной эксплуатации месторождения. Тенденция роста величин *b-value* наблюдается все последующее время, а уменьшение потока значимых событий ( $M \geq 0.9$ ) началось несколько раньше начала резкого сокращения добычи в 2015 г. В 2024 г., ввиду опасений роста вызванной сейсмичности и несмотря на коммерческую

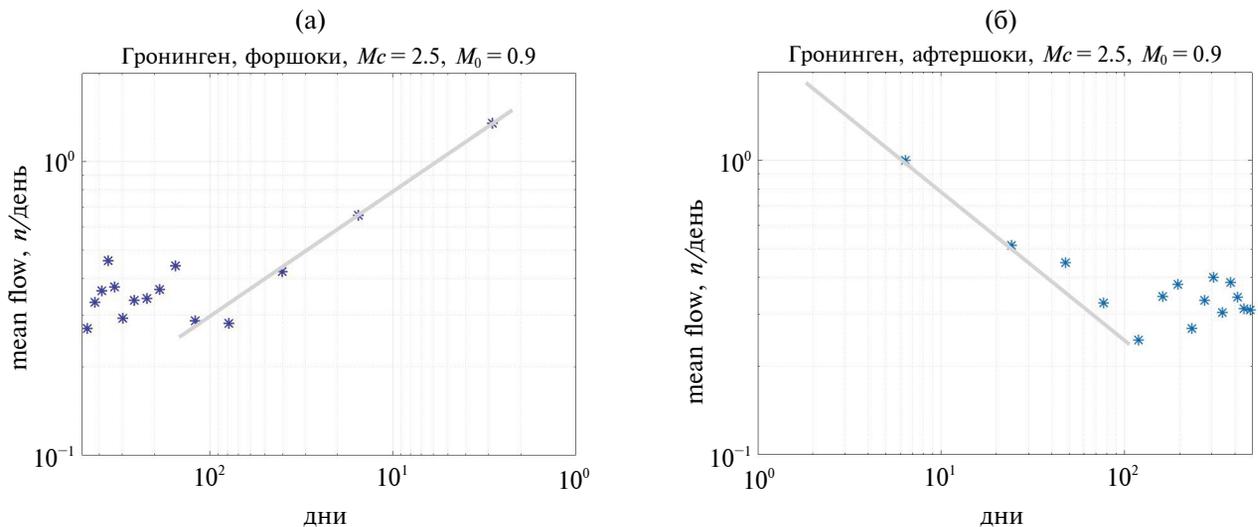
эффективность проекта, было принято решение о полном прекращении добычи газа не позже 2030 г. Как будет видно из дальнейшего, возможно, это решение не было вполне оправданным.

На рис. 5 представлены графики фор- и афтершокового ООСЗ степенных каскадов землетрясений для области месторождения Гронинген. За сильные события приняты землетрясения  $M \geq 2.5$ , пороговая магнитуда  $M_0 = 0.9$ .

Для вызванной сейсмичности области месторождения Гронинген наблюдается устойчивый рост *b-value* и практически одинаковая активность форшокового и афтершокового каскадов по данным анализа ООСЗ. Спад интенсивности



**Рис. 4.** Добыча газа на месторождении Гронинген (а), изменение интенсивности потока значимых событий и тенденция роста *b-value* (б). Стрелками на рис. 3б даны сильнейшие события  $M = 3.6$ ,  $M = 3.5$ . Цвет точек отражает осреднение по группам из разного числа событий; для начального периода времени, с меньшим потоком событий, размер группы меньше.



**Рис. 5.** Форшоковый (а) и афтершоковый (б) ООСЗ каскады для области месторождения Гронинген.

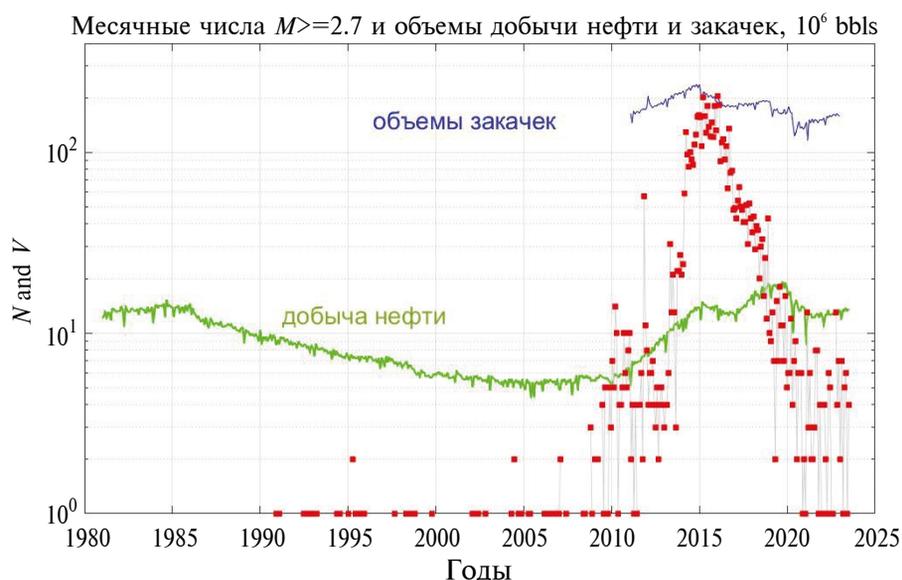
потока числа событий для этой области, однако, можно объяснить резким сокращением добычи газа после 2015 г. Такая интерпретация не проходит для области интенсивной добычи сланцевых УВ в Оклахоме (США).

### РАЙОН ИНТЕНСИВНОЙ ДОБЫЧИ СЛАНЦЕВЫХ УГЛЕВОДОРОДОВ, ОКЛАХОМА (США)

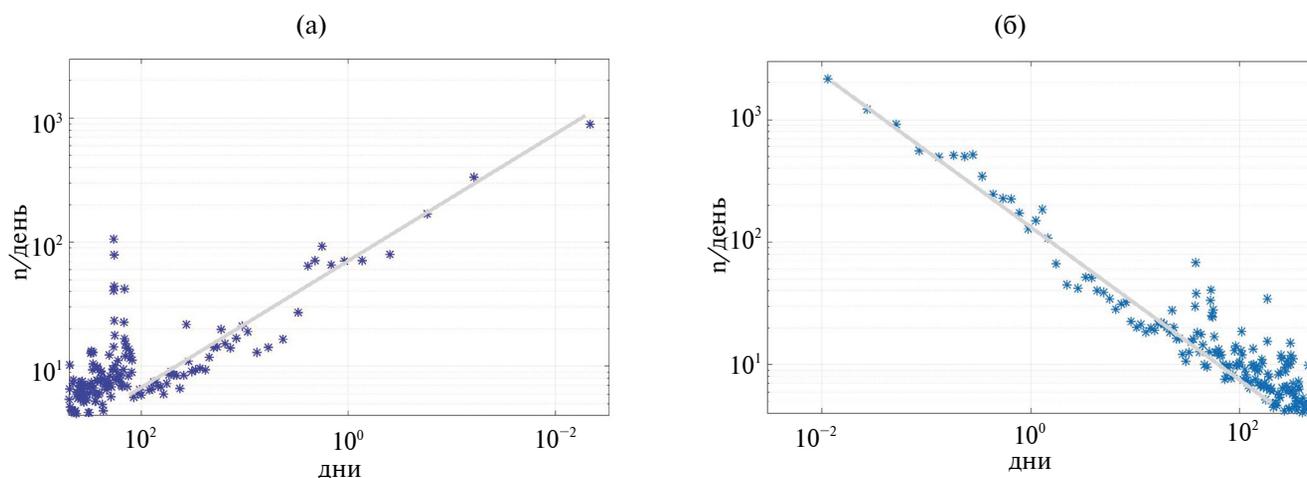
На рис. 6 представлены данные об интенсивности потока событий  $M \geq 2.7$  и объемам закачек вод и добычи нефти в Оклахоме (США). Используемые ниже данные по сейсмическому режиму взяты с сайта <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/>

<http://www.ocseweb.com/og/ogdatafiles2.htm/>; по положению скважин и по режиму закачек — с сайта Oklahoma Corporation Commission, <http://www.ocseweb.com/og/ogdatafiles2.htm/>. Видно, что резкий спад потока событий имеет место на фоне слабо меняющихся объемов закачек и добычи УВ.

На рис. 7 представлены данные по интенсивности фор- и афтершоковых каскадов в ООСЗ. Как основные события использовались 78 сильнейших событий с магнитудой  $M \geq 4.0$ . Видно, что максимальная интенсивность потока афтершоков выше, чем форшоков, примерно вдвое (при характерном отношении для обычных землетрясений примерно в 10 раз).



**Рис. 6.** Число значимых событий ( $M \geq 2.7$ , красные точки) в месяц и суммарные объемы добычи нефти и закачек в Оклахоме.



**Рис. 7.** Форшоковый (а) и афтершоковый (б) ООСЗ режимы, Оклахома.

### ВЫЗВАННАЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ ПРИ РУДНЫХ РАЗРАБОТКАХ

Для рассмотренных вызванной сейсмичности областей горнорудных комплексов (Жезказган полиметаллический рудный комплекс (свинец, медь, иные компоненты), Сев-Уральский бокситовый бассейн и Сев-Кизеловский угольный бассейн) информация в целом менее полная, в частности, имеются только отрывочные данные по объемам добычи. В некоторых случаях наблюдаются также непонятные вариации числа событий по времени суток. Энергия сейсмических событий оценивается не в магнитудах, а в энергетических классах или дается оценка

энергии события в Дж. Поэтому приведем лишь несколько примеров, подкрепляющих, однако, общие закономерности. На рис. 8 приведены данные по тенденции изменения  $b$ -value по Жезказгану. Четко видна тенденция роста со временем величин  $b$ -value (в терминах энергетических классов). Эта общая тенденция осложнена тремя эпизодами уменьшения величин  $b$ -value, сопряженными с моментами возникновения трех сильнейших событий с  $K = 7.6, 7.0$  и  $6.8$ . В качестве достоверно регистрируемых событий были приняты горные удары с  $K \geq 3.0$ .

При построении обобщенной окрестности суммировались данные по окрестностям силь-

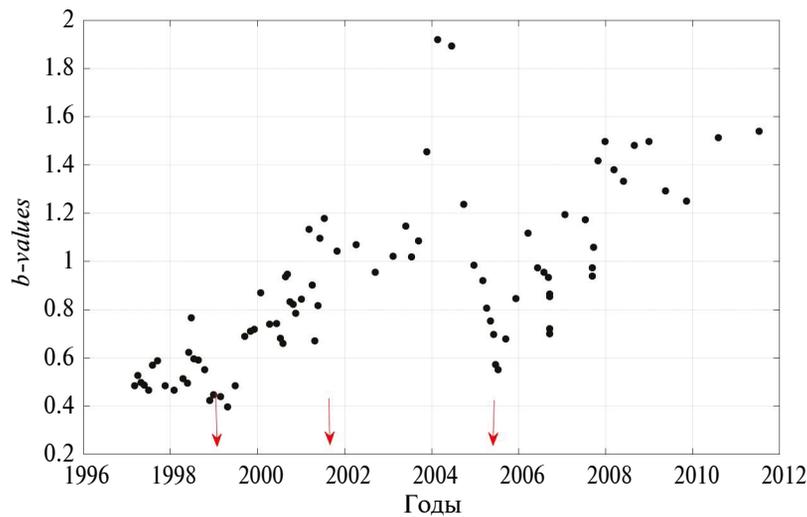


Рис. 8. Жезказган  $b$ -value. Стрелками указаны моменты трех сильнейших событий ( $K = 7.6, 7.0$  и  $6.8$ ).

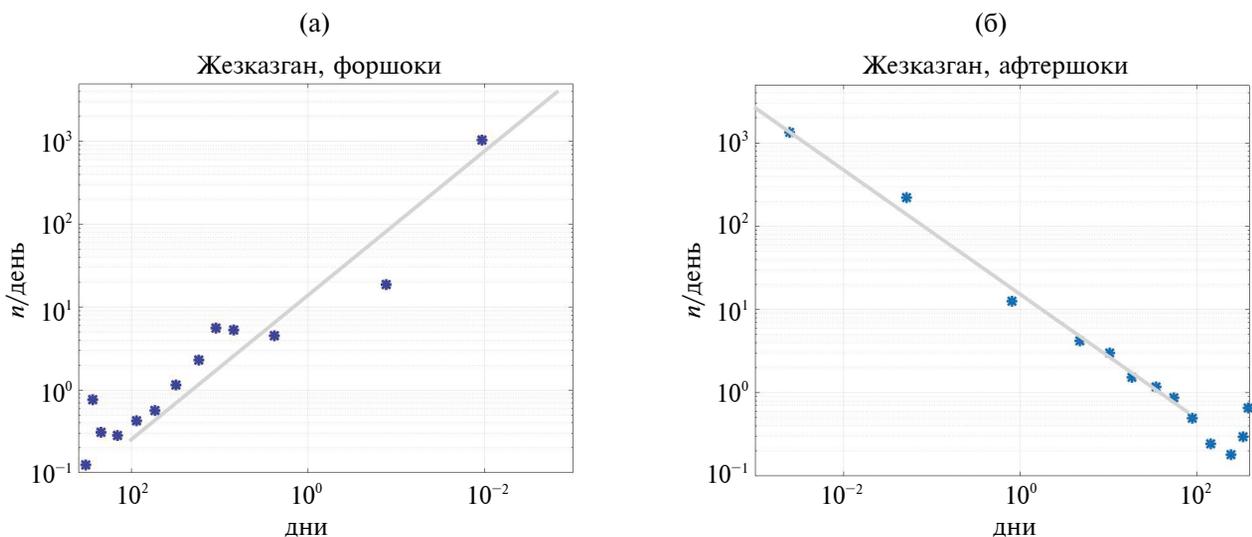


Рис. 9. Жезказган, форшоковый (а) и афтершоковый (б) ООСЗ каскады.

нейших событий ( $K \geq 5.0$ ). Как видно из рис. 9, степенные каскады для фор- и афтершоков вполне симметричны. При построении ООСЗ рассматривались последовательные группы по  $n = 40$  событий. Значимые события  $K = 3$ . Размеры области пересчитывались аналогично формуле (1) для случая классов горных ударов.

Результаты анализа по двум другим рассмотренным горнодобывающим областям дают качественно аналогичные результаты. Так же как и для Жезказгана, наблюдается тенденция роста величин наклона графика повторяемости и близость интенсивности форшокового и афтершокового процесса.

### ОБСУЖДЕНИЕ

Из вышесказанного видно, что наблюдаемые для разных районов сильного техногенного воздействия основные особенности режима инициированной сейсмичности довольно единообразны. Признаков сильного загрязнения сейсмических событий взрывами (специфических зависимостей числа событий от времени суток и от дней недели) не выявлено. Рассмотрим выявленные характерные особенности режима сейсмических событий по отдельности.

Во всех рассмотренных случаях наблюдается более или менее определенная тенденция увеличения наклона графика повторяемости сейсмических событий со временем. Эта тенденция указывает на уменьшение вероятности реализации более сильного события и может отвечать процессу релаксации тектонических напряжений при сильном длительном техногенном воздействии. Заметим, что увеличение наклона графика повторяемости полагается отвечающим уменьшению эффективных напряжений (росту различия между действующими напряжениями и критическими их значениями).

Общая тенденция увеличения *b-value* прерывается эпизодами подготовки и реализации редких сильных (для данного каталога) событий. При этом такие более сильные события часто имеют тенденцию располагаться на пространственно-временном удалении от областей максимальных техногенных воздействий. Можно предположить, что такие эпизоды связаны с подходом фронта возмущения, например, повышенного флюидного давления к очередной разломной зоне, нагруженной тектоническими

напряжениями. Перечисленные тенденции, как представляется, действуют на всем временном интервале развития вызванной сейсмичности как на фазе роста сейсмической активности, так и на фазе ее уменьшения.

Динамика интенсивности потока инициированных землетрясений обычно включает фазу сильного роста числа событий (иногда со значительным запаздыванием относительно начала техногенного воздействия) и фазу спада числа событий, эпизодически прерываемую всплесками сейсмической активности. Природа фазы уменьшения потока значимых сейсмических событий часто неоднозначна. Уменьшение числа событий будет иметь место при уменьшении техногенного воздействия, иногда по экономическим причинам, иногда в связи с опасностью вызванной сейсмичности. Заметим, что данные о величинах техногенного воздействия также известны далеко не всегда. Важно, что фаза спада числа сейсмических событий наблюдается и в тех случаях, когда уменьшение техногенного воздействия отсутствует. Примеры такого спада сейсмической активности наблюдались уже при самых ранних проявлениях вызванной сейсмичности, например, при заполнении водохранилища озера Мед (США). В этом случае тенденция спада сейсмической активности явно проявилась уже в середине 1940-х годов (см. обзоры [Гупта, Растоги, 1977; Gupta, 2022; и др.]). Но, пожалуй, до самого недавнего времени [Rodkin, Lyubushin, 2023] вопрос о систематичности такой особенности режима вызванной сейсмичности не поднимался, хотя на отдельные примеры спада сейсмичности со временем обращалось внимание [Gupta, 2022; Chelidze et al., 2023]. Во всяком случае, при решении практически важного вопроса о полном прекращении добычи газа на суперместорождении Гронинген (Нидерланды) тенденция естественного уменьшения вызванной сейсмичности специально не рассматривалась, хотя указания на тенденцию уменьшения ожидаемых величин  $M_{max}$  и обсуждались [Vlek, 2023].

Заметим, что в плане трактовки вызванных землетрясений как триггерных фаза спада сейсмической активности естественным образом интерпретируется как следствие релаксации тектонических напряжений, для нового накопления которых в медленно деформируемых внутриконтинентальных областях требуется

значительное время. Заметим, что развитие фазы спада вызванной сейсмической активности свидетельствует в пользу того, что даже и слабые вызванные землетрясения по сути являются инициированными, так как они исчезают при релаксации исходных тектонических напряжений. Практическая важность вопроса о типичности развития фазы спада вызванной сейсмичности со временем не вызывает сомнений.

Перейдем к обсуждению результатов применения метода построения обобщенной окрестности сильного землетрясения (ООСЗ). Результаты такого построения ожидаемо выявили существование для разных типов вызванных землетрясений степенных фор- и афтершоковых каскадов. Говорить о наличии или отсутствии наблюдаемого для обычных землетрясений дефицита числа поздних форшоков и ранних афтершоков в связи с недостаточным числом событий не представляется возможным. Достаточно уверенно выявляется, однако, относительно большая, чем для типичных землетрясений, активность форшокового процесса. Для обычных землетрясений, для разных каталогов длительность развития фор- и афтершокового каскадов (до их выхода на фоновый уровень) составляет примерно 100 дней. При этом скорость нарастания форшокового каскада к моменту обобщенного главного события меньше скорости спада афтершокового, а максимальная интенсивность форшокового каскада вблизи момента главного события примерно на порядок меньше максимальной интенсивности афтершокового каскада [Родкин, 2008; 2020; Rodkin, Tikhonov, 2016; Родкин, Рундквист, 2017; и др.].

По результатам построения ООСЗ по данным для вызванной сейсмичности результаты иные. При этом (таблица) намечается зависимость от глубины событий. Землетрясения в окрестности водохранилищ Варна–Койна и в Оклахоме встречаются до глубин 15–25 км. Соотношение интенсивности потоков афтершоков и форшоков для них составляет в полтора-три раза. В других случаях все землетрясения существенно мельче 10 км. Для всех этих случаев отношение максимального числа афтершоков и форшоков примерно одинаково (для Жезказгана форшоков даже больше). Такое различие отвечает практике работ по снижению опасности горных ударов на некоторых объектах. Если где-то намечается

рост числа слабых горных ударов, то в этой зоне разработки временно прекращаются и возобновляются после прекращения активности или более сильного и опасного горного удара. Можно предположить, что если бы интенсивность форшокового и афтершокового процесса были бы близки и для обычных землетрясений, то проблема прогноза землетрясений не стояла бы так остро.

Заметим, что при анализе методом ООСЗ данных по АЭ также выявилась близость интенсивности фор- и афтершокового каскадов [Mikhail Rodkin et al., 2021]. Предварительно можно предположить, что все приведенные случаи близкой интенсивности прямого и обратного каскадов отвечают условиям верхней коры и нормальным  $PT$ -условиям с преимущественно гидростатическими давлениями флюида. Таким образом, предварительно подтверждается еще один, ранее теоретически предсказанный [Иванов, 1990; Иванов, Иванов, 2018], уровень различия свойств земной коры, а соответственно, и физических механизмов развития сейсмической неустойчивости.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Единообразным образом рассмотрен сейсмический режим ряда удовлетворительно обеспеченных статистическим материалом областей развития вызванной сейсмичности. Области представляют районы крупных водохранилищ, районы интенсивной добычи традиционных и сланцевых УВ и районы горнорудных предприятий. Во всех рассмотренных районах более или менее определенно выявляется ряд общих тенденций.

После роста вызванной сейсмичности, даже и при продолжающемся сильном техногенном воздействии, в рассмотренных случаях наблюдается тенденция спада сейсмической активности. Для всего интервала времени роста и спада сейсмической активности характерна тенденция роста величин наклона графика повторяемости землетрясений, эпизодически нарушаемая всплесками сейсмичности с реализацией более сильных событий и временным уменьшением величин  $b$ -value. Тенденция роста величин наклона графика повторяемости отвечает уменьшению вероятности реализации сильных опасных событий.

Следующий за ростом сейсмической активности спад числа значимых событий наблюдался и при уменьшении техногенной нагрузки, и при продолжающемся сильном техногенном стрессе. Можно предположить, что спад вызванной сейсмичности может быть связан как с уменьшением техногенной нагрузки (по коммерческим соображениям или из-за опасности вызванной сейсмичности), так и с релаксацией естественных тектонических напряжений. Восстановление последних в условиях стабильных чрезвычайно медленно деформируемых внутриконтинентальных областей, видимо, должно происходить достаточно медленно. Отметим также (см., например, рис. 1), что реализация относительно более сильных землетрясений имеет тенденцию происходить на большем расстоянии и с большей задержкой по времени [Родкин, Рукавишникова, 2018], чем основная масса вызванных землетрясений. По-видимому, это связано с распространением техногенно инициированных фронтов возмущения состояния геосреды до близлежащих разломных зон, нагруженных тектоническими напряжениями. Отсюда, с одной стороны, опасность вызванной сейсмичности выше, чем это предполагается в рамках широко используемой методики уменьшения риска вызванной сейсмичности “Семафор”, ориентированной на снижение опасности от землетрясений, реализующихся в непосредственной близости от зон техногенного воздействия. С другой стороны, с течением времени, видимо, следует ожидать развития описанного выше общего спада вызванной сейсмичности.

Построение обобщенной окрестности сильного события (ООСЗ) и для рассмотренных районов вызванной сейсмичности, и для ранее рассмотренных результатов экспериментальных наблюдений АЭ показало развитие степенных фор- и афтершоковых каскадов, во многом аналогичных получаемым при анализе данных по разным каталогам землетрясений. Однако для событий, реализующихся при нормальных условиях, и для сейсмичности верхнего горизонта земной коры (глубиной примерно до 10 км) наблюдается иное среднее соотношение числа фор- и афтершоков. Для обычных землетрясений максимальная интенсивность форшокового каскада в ООСЗ примерно на порядок меньше максимальной интенсивности афтершокового

каскада. По данным для акустической эмиссии [Rodkin et al., 2021] и для событий верхнего горизонта земной коры (представленные выше примеры) максимальные интенсивности фор- и афтершокового каскадов оказываются близкими. Такое различие может отвечать разным условиям сейсмического разрушения в верхнем горизонте земной коры (в условиях субгидростатических давлений флюида) и для случаев сублитостатического флюидного давления в более глубоких горизонтах земной коры.

Полученные результаты требуют дополнительного подтверждения. На данный момент они представляются имеющими определенный практический интерес, указывая на вероятно имеющее место систематическое уменьшение вызванной сейсмичности при длительном сильном техногенном воздействии и на различие условий реализации сейсмических событий в верхней части земной коры (выше примерно 10–15 км) и в более глубоких ее горизонтах.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственных заданий ИТПЗ РАН и ИПНГ РАН.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Автор глубоко признателен А. Кийко (ЮАР) и В. И. Герману и Р. А. Дягилеву (Россия) за предоставление каталогов локальной сейсмичности областей месторождений Гронинген, Жезказгана, Североуральского бокситового и Северо-Кизеловского угольного бассейна).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Адушкин В.В., Родионов В.Н., Турунтаев С.Б., Юдин А.Е. Сейсмичность месторождений углеводородов // Нефтегазовое обозрение. 2000. № 1. С. 4–15.
- Беседина А.Н., Гридин Г.А., Кочарян Г.Г., Морозова К.Г., Павлов Д.В. Активизация сейсмоакустических событий после массовых взрывов на железнорудном месторождении Курской магнитной аномалии // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2024. № 1. С. 3–14.
- Годзиковская А.А., Стром А.Л., Бесстрашнов В.М. Водохранилища и землетрясения // Геоэкология. 1998. № 1. С. 105–112.
- Гунта Ч., Растоги Б. Плотины и землетрясения. М.: Наука. 1977. 237 с.

- Иванов С.Н.* Непроницаемая зона на границе верхней и средней части земной коры // Физика Земли. 1999. № 9. С. 96–102.
- Иванов С.Н., Иванов К.С.* Реологическая модель строения земной коры (модель 3-го поколения) // Литосфера. 2018. № 4. С. 3–18.
- Калинин В.А., Родкин М.В., Томашевская И.С.* Геодинамические эффекты физико-химических превращений в твердой среде. М.: Наука. 1989. 158 с.
- Касахара К.* Механика землетрясений. М.: Мир. 1985. 264 с.
- Пуланова С.А., Родкин М.В.* Вызванная сейсмичность и загрязнение окружающей среды токсичными элементами при разработке сланцевых толщ. Проблемы региональной геологии запада Восточно-Европейской платформы и смежных территорий: материалы III Междунар. науч. конф. Республика Беларусь, Минск, 15 декабря 2021 г. / О.В. Лукашев (гл. ред.). Минск: БГУ. 2021. С. 82–88.
- Рогожин Е.А.* Тектоника очаговой зоны Нефтегорского землетрясения 27(28) мая 1995 г. на Сахалине // Геотектоника. 1996. № 2. С. 45–53.
- Родкин М.В.* Сейсмический режим в обобщенной окрестности сильного землетрясения // Вулканология и сейсмология. 2008. № 6. С. 66–77.
- Родкин М.В., Рукавишников Т.А.* Вызванная сейсмичность: серьезная угроза добыче сланцевой нефти? // Актуальные проблемы нефти и газа. 2018. Т. 3. № 22. 11 с. <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2018-22.art.39>
- Родкин М.В.* Типовая фор- и афтершоковая аномалия — эмпирика, интерпретация // Вулканология и сейсмология. 2020. № 1. С. 64–76.
- Родкин М.В., Рундквист Д.В.* Геофлюидодинамика. Приложение к сейсмологии, тектонике, процессам руды и нефтегенеза. Долгопрудный: изд-во “Интеллект”. 2017. 288 с.
- Родкин М.В., Липеровская Е.В.* О различии физических механизмов разноглубинных землетрясений и характера их ионосферного отклика // Физика Земли. 2023. № 3. С. 48–62.
- Соболев Г.А.* Основы прогноза землетрясений. М.: Наука. 1993. 314 с.
- Bridgman P.W.* Polymorphic Transitions and Geological Phenomena // American Journal of Science A. 1945. V. 243. № 1. P. 90–96.
- Carder D.S.* Seismic investigations in the Boulder Dam area, 1940–1944, and the influence of reservoir loading on earthquake activity // Bull Seismol. Soc. Am. 1945. V. 35. P. 175–192.
- Chelidze T., Matcharashvil T., Mepharidze E., Dovgal N.* Complexity in Geophysical Time Series of Strain/Fracture at Laboratory and Large Dam Scales: Review // Entropy. 2023. V. 25. № 3. P. 467. <https://doi.org/10.3390/e25030467>
- Davis S., Frohlich C.* Did (Or Will) Fluid Injection Cause Earthquakes? — Criteria for a Rational Assessment // J Seismological Research Letters. 1993. V. 64. P. 207–224.
- Dempsey D.E., Suckale J.* Physics-Based Forecasting of Induced Seismicity at Groningen Gas Field, The Netherlands: Post Hoc Evaluation and Forecast Update // Seismological Research Letters 2023. <https://doi.org/10.1785/0220220317>
- Green H.W.* Phase-transformation-induced lubrication of earthquake sliding // Philos. Trans. A Math. Phys. Eng. Sci. 2017. Sep 28. V. 375. № 2103. P. 20160008. <https://doi.org/10.1098/rsta.2016.0008>. PMID: 28827426; PMCID: PMC5580448.
- Gupta H.K.* Induced seismicity hazard mitigation through water level manipulation at Koyna, India: a suggestion // Bull. Seismol. Soc. Am. 1983. № 73. P. 679–682.
- Gupta H.K.* Artificial Water Reservoir-Triggered Seismicity (RTS): Most Prominent Anthropogenic Seismicity // Surveys in Geophysics. 2022. № 43. P. 619–659. <https://doi.org/10.1007/s10712-021-09675-z>
- Gillian T.R., Foulgera, Miles P. Wilsona, Jon G. Gluyasa, Bruce R. Juliana, Richard J. Daviesba* Global review of human-induced earthquakes // Earth-Science Reviews. 2018. № 178. P. 438–514.
- Houston H.* Deep earthquakes // Treatise on Geophysics. 2nd edition. 2015. V. 4. P. 329–354.
- Krupnick A., Echarte I.* Induced Seismicity Impacts of Unconventional Oil and Gas Development. RFF. Report. 2017. Goebel. T.H.W. 30 p.
- Llenos A.L., Michael A.J.* Modeling Earthquake Rate Changes in Oklahoma and Arkansas: Possible Signatures of Induced Seismicity // Bulletin of the Seismological Society of America. 2013. V. 103. № 5. P. 2850–2861. <https://doi.org/10.1785/0120130017>.
- Mikhail Rodkin, Andrey Patonin, Natalia Shikhova, Alexander Ponomarev, Vladimir Smirnov* Comparison of fore- and aftershock activity in the generalized vicinity of large earthquakes, rock bursts and acoustic emission events: 37th General Assembly (GA) of the European Seismological Commission, 19–24 September 2021. Session 21: Physics of earthquake preparation process: from laboratory experiments to earthquake forecast. 2021. № 493.
- Rodkin M.V., Tikhonov I.N.* The typical seismic behavior in the vicinity of a large earthquake // Physics and Chemistry of the Earth. 2016 V. 95. P. 73–84.
- Rodkin M.V.* The Variability of Earthquake Parameters with the Depth: Evidences of Difference of Mechanisms of Generation of the Shallow, Intermediate-Depth, and the Deep Earthquakes // Pure Appl. Geophys. 2022. <https://doi.org/10.1007/s00024-021-02927-4>
- Rodkin M.V., Lyubushin A.A.* Can Induced Seismicity Decrease Under a Long Strong Anthropogenic Excitation? // Nov. Res. Sci. 2023. V. 14. № 3. P. NRS.000840. <https://doi.org/10.31031/NRS.2023.14.000840>
- Shashidhar D., Mallika K., Mahato C. et al.*, A Catalogue of Earthquakes in the Koyna–Warna Region, Western India (2005–2017) // Journal of the Geological Society of India. 2019. V. 93. № 1. P. 7–24. <https://doi.org/10.1007/s12594-019-1115-y>

- Telesca L., Thai A.T., Lovallo M., Cao D.T.* Visibility Graph Analysis of Reservoir-Triggered Seismicity: The Case of Song Tranh 2 Hydropower, Vietnam // *Entropy*. 2022. V. 24. P. 1620.  
<https://doi.org/10.3390/e24111620>
- Van der Baan K., Calixto F.J.* Human-induced seismicity and large-scale hydrocarbon production in the USA and Canada // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2017. V. 18. № 7. P. 2467–2485.
- Van Thienen-Visser K., Breunese J.N.* Induced seismicity of the Groningen gas field: History and recent developments // *The Leading Edge*. 2015. V. 34. № 6. P. 664–671.  
<https://doi.org/10.1190/tle34060664.1>
- Van Elk J., Doornhof D., Bommer J., Bourne S., Oates S., Pinho R., Crowley H.* Hazard and risk assessments for induced seismicity in Groningen // *Netherlands Journal of Geosciences*. 2017. V. 96. № 5. P. 259–269.  
<https://doi.org/10.1017/njg.2017.37>
- Vlek C.* Reflections and Some Questions about Assessing the Maximum Possible Earthquake in the Long-Exploited Groningen Gas Field // *Seismol. Res. Lett.* 2023. V. XX. P. 1–10.  
<https://doi.org/10.1785/0220230084>
- Vorobieva I., Shebalin P., Narteau C.* Condition of Occurrence of Large Man-Made Earthquakes in the Zone of Oil Production, Oklahoma // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2020. V. 56. № 6. P. 911–919.  
<https://doi.org/10.1134/S10693513200601309>
- Wells D.L., Coppersmith K.J.* New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement // *BSSA*. 1994. V. 84. № 4. P. 974–1002.

## On the Regime of the Induced Seismicity

M. V. Rodkin<sup>a, b, \*</sup>

<sup>a</sup>*Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics of Russian Academy of Sciences (IEPT RAS), Moscow, Russia*

<sup>b</sup>*Oil and Gas Research Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

\**e-mail: rodkin@mitp.ru*

Received October 15, 2024; revised December 2, 2024; accepted December 25, 2024

**Abstract** — The problem of induced seismicity has both an important practical and theoretical aspects. The practical aspect is related to the danger of induced seismicity. In a number of cases, the danger of strong induced seismicity led to the closure of important industrial projects. The theoretical aspect is related to the well-known paradox of seismicity, which is the impossibility of the occurrence of conventional earthquakes at depths greater than several tens of kilometers. It follows that the physics of induced, usually near-surface earthquakes may differ from the physics of the deeper events. Examples of a number of areas of induced seismicity are considered, representing both the vicinity of large reservoirs and areas of intensive extraction of hydrocarbon and ore raw materials. In the considered areas a few common trends were more or less clearly identified. After the growth of induced seismicity, even with continuing strong technogenic impact, a tendency for seismic activity to decline is observed. Also, by analyzing the generalized vicinity of a large event (GVLE), the proximity of the fore- and aftershock process intensity is revealed for induced seismicity zones; which contrasts with the case of ordinary seismicity, for which the aftershock process activity is usually much stronger. It can be assumed that the decline in the induced seismicity is associated with the release of initial tectonic stresses, and the proximity of the fore- and aftershock process intensity indicates a difference in the physical mechanism of induced near-surface earthquakes from ordinary, deeper earthquakes.

**Keywords:** induced seismicity, decline in seismic activity over time, difference in the physics of near-surface earthquakes