

СЕЗОННЫЕ ВАРИАЦИИ НАКЛОНА ГРАФИКА ПОВТОРЯЕМОСТИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В НАВЕДЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ В ОБЛАСТИ КОЙНА–ВАРНА, ЗАПАДНАЯ ИНДИЯ

© 2022 г. В. Б. Смирнов^{1, 2, *}, М. Г. Потанина^{1, 2}, Т. И. Карцева^{1, 2}, А. В. Пономарев²,
А. В. Патонин³, В. О. Михайлов^{1, 2}, Д. С. Сергеев^{1, 2}

¹Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

²МГУ имени М.В. Ломоносова, физический факультет, г. Москва, Россия

³Геофизическая обсерватория “Борок” ИФЗ РАН, г. Борок, Россия

*E-mail: vs60@mail.ru

Поступила в редакцию 15.11.2021 г.

После доработки 25.11.2021 г.

Принята к публикации 25.11.2021 г.

На основе анализа данных локального каталога землетрясений выделены тонкие особенности режима сезонных компонент наведенной сейсмичности в области Койна–Варна в Западной Индии. Сезонные колебания сейсмической активности, связанные с годовыми вариациями уровня воды в водохранилищах Койна и Варна, демонстрируют локальные максимумы в пределах года, отвечающие известным механизмам немедленного и задержанного отклика резервуарной сейсмичности. На основе применения метода накопления эпох в совокупности со статистическим моделированием случайных каталогов землетрясений выявлены закономерные изменения наклона графика повторяемости землетрясений в пределах годового цикла колебаний сезонной сейсмичности. Минимальные значения наклона графика повторяемости приходятся на интервалы максимумов как мгновенного, так и задержанного сейсмического отклика. Максимумы наклона графика повторяемости приходятся на фазы нарастания и спада уровня воды в водохранилищах. Характер изменения сейсмической активности в совокупности с наклоном графика повторяемости на стадии активизации немедленного отклика инициированной сейсмичности согласуется с характерным для активизации переходных сейсмических режимов сценарием постепенного перераспределения процесса разрушения от младших к старшим масштабным уровням. В пилотном лабораторном эксперименте по циклической инициации поровым давлением процесса разрушения в образце гранита, извлеченном из скважины в области наведенной сейсмичности Койна–Варна, обнаружены закономерности изменения акустического режима, аналогичные сезонным особенностям сейсмичности в области Койна–Варна.

Ключевые слова: локальный каталог землетрясений, сезонные компоненты, механизм немедленного и задержанного отклика, стадия активизации немедленного отклика, циклическая инициация поровым давлением.

DOI: 10.31857/S0002333722030073

ВВЕДЕНИЕ

В работах [Смирнов и др., 2017; 2018a] на основе данных каталога землетрясений в области наведенной сейсмичности Койна–Варна в Западной Индии за всю историю сейсмологического наблюдения в этом районе проанализированы сезонные вариации сейсмической активности, связанные с годовыми колебаниями уровня воды в водохранилищах. Показано, что сезонная сейсмическая активность минимальна в мае–июне, когда минимален уровень воды в водохранилищах. В остальное время года выделяются три пика активности: осенью в сентябре, зимой в но-

ябре–декабре и весной в феврале–апреле. Первый из этих пиков приходится на фазу достижения уровнем воды максимального сезонного значения и может рассматриваться как немедленная реакция среды на приложенное воздействие. Два последующих максимума приходятся на фазу уменьшения уровня и могут рассматриваться как задержанная реакция.

Изменения сейсмической активности, связанные с различными локальными природными и техногенными геодинамическими процессами, сопровождаются, как правило, изменениями величины наклона графика повторяемости (см., например, обзор [El-Isa, Eaton, 2014]). Изменения

наклона графика повторяемости свидетельствуют о перераспределении процесса разрушения по его масштабам и могут нести информацию о природе и сценариях возбуждения или релаксации сейсмического процесса [Смирнов, Пономарев, 2020]. С этой точки зрения представляет интерес исследование изменений наклона графика повторяемости при сезонных колебаниях сейсмической активности в областях наведенной и триггерной сейсмичности, к которым относится область водохранилищ Койна–Варна.

Впервые анализ сейсмичности, связанной с искусственными водоемами, был проведен Д.С. Кардером [Carder, 1945] на примере озера Мид – водохранилища, появившегося в результате строительства плотины Гувера на реке Колорадо в США в 1931–1936 гг. Повышенный интерес к проблеме влияния заполнения водохранилищ на сейсмический режим возник в 60-х годах прошлого века, после нескольких сильных землетрясений, вызванных строительством плотин: Xinfengjiang, Китай, 1962, $M = 6.2$; Кариба, на границе Замбии и Зимбабве, 1963, $M = 6.2$; Кремаста, Греция, 1966, $M = 6.3$; Койна, Индия, 1967, $M = 6.7$ [Gupta, 1992; Wilson et al., 2017]. Общий обзор современного состояния вопроса можно найти, например, в работах [Gupta, 2002; Ellsworth, 2013]. Большинство работ посвящено анализу величины наведенной сейсмической активности, но известны публикации, в которых анализировались параметры самоподобия сейсмического режима. В частности, в работах [Смирнов и др., 2018б; Ruiz-Barajas et al., 2019] зафиксированы увеличения наклона графика повторяемости в период заполнения водохранилищ, созданных в сейсмоактивных регионах.

Изменения наклона графика повторяемости отмечались в сейсмических режимах, связанных с закачкой жидкостей в скважины [Cuenot et al., 2008; Смирнов и др., 2010; Bachmann et al., 2011; Smirnov et al., 2013; Vlcek et al., 2014; Martínez-Garzón et al., 2014; Huang, Beroza, 2015; Kwiatek et al., 2015; Mousavi et al., 2017; Alba et al., 2020]. В работах [Смирнов и др., 2010; Bachmann et al., 2011; Smirnov et al., 2013] показано, что развитие роеподобной микросейсмической активности, вызванной закачкой воды в глубокие скважины в геотермальных областях, сопровождается уменьшением наклона графика повторяемости с течением времени и при увеличении давления закачиваемой жидкости. В работах [Cuenot et al., 2008; Martínez-Garzón et al., 2014] отмечается изменение наклона графика повторяемости с увеличением скорости и объема закачки жидкости. В работе [Vlcek et al., 2014] сообщается об уменьшении наклона графика повторяемости по мере удаления от скважины, через которую закачивается жидкость. В работе [Huang, Beroza, 2015] отмечено понижение значений наклона графика повторяемости в период ос-

новной активности сейсмического роя Guy-Greenbrier в Арканзасе, вызванного закачкой жидкости в скважины. Авторы работы [Mousavi et al., 2017] связывают обнаруженные ими пространственно-временные изменения наклона графика повторяемости в области закачки жидких отходов в скважины с пространственными различиями создаваемого порового давления и его изменениями во времени. В работах [Huang, Beroza, 2015; Mousavi et al., 2017] отмечается также искривление, а в работе [Vorobiova et al., 2020] – излом графиков повторяемости при активизации индуцированной сейсмичности, что авторы этих публикаций связывают с неравномерным развитием трещиноватости и перераспределением напряжений, вызванными инжекцией жидкости. Это предположение согласуется с выводами работ [Смирнов и др., 2010; Smirnov et al., 2013] о постепенном формировании структуры дефектности среды в околоскважинном пространстве при закачке воды.

Известны также случаи изменения наклона графика повторяемости в наведенной сейсмичности, вызванной компакцией пород при откачке жидкости из подземных резервуаров [Bougne et al., 2014].

Уменьшение наклона графика повторяемости отражает интенсификацию процесса разрушения на более высоких масштабных уровнях. Согласно концепции ЛНТ, такой переход реализуется посредством укрупнения сейсмогенных разрывов путем слияния разрывов меньшего размера [Соболев, 2019]. В условиях промышленных геотехнических объектов, укрупнение размеров очагов, а значит и энергий индуцированных землетрясений, является опасным. При инжекции жидкостей в глубокие скважины в геотермальных областях достижение постепенно увеличивающимися магнитудами землетрясений определенного порогового значения является аргументом для модификации режима закачки в целях обеспечения безопасности работ [Kim et al., 2018; Kwiatek et al., 2019; Langenbruch et al., 2020]. Уменьшение наклона графика повторяемости также рассматривается как параметр для управления режимом закачки воды в скважины [Broccardo et al., 2019; Langenbruch et al., 2020].

Сезонные (годовые) вариации сейсмического режима бывают связаны не только с ежегодными изменениями уровня воды в искусственных водохранилищах [Simpson et al., 2018; Gupta, 2002; Ellsworth, 2013; Gahalaut, 2021], но и с сезонными изменениями поверхностной гидрологической нагрузки естественной природы, включая режимы атмосферных осадков, ледовой и снежной нагрузки [Panza et al., 2011; Panda et al., 2018; Ueda, Kato, 2019]. Величины последних оцениваются в единицы кПа [Christiansen et al., 2005; 2007; Betti-

nelli et al., 2008; D'Agostino et al., 2018; Xue et al., 2020], что на порядок меньше величин вариаций поверхностных нагрузок, создаваемых сезонными колебаниями уровня воды в водохранилищах, и сравнимо с напряжениями, создаваемыми земными приливами [Manga, Wang, 2015]. Эффекты их воздействий рассматриваются как триггерные. Степень модуляции сейсмичности сезонными воздействиями на поверхность земной коры связывают с особенностями тектонических процессов [Peresan et al., 2017; Panda et al., 2018; Смирнов и др., 2018а; Gao et al., 2000], а также с изменениями порового давления и степени обводненности пород при внедрении в верхние слои коры поверхностных вод [Panda et al., 2018; D'Agostino et al., 2018; Farquharson, Amelung, 2020]. Мы не нашли специальных исследований наклона графика повторяемости в сезонных вариациях, вызванных эксплуатацией водохранилищ или поверхностными метеорологическими нагрузками. В работе [Bollinger et al., 2007] лишь отмечается различие графиков повторяемости в летние и зимние месяцы, которое авторы связывают с различием сезонной модуляции землетрясений разных магнитуд. В работе [Mallika et al., 2013] исследовались изменения наклона графика повторяемости перед землетрясениями $M4+$ в области водохранилищ Койна–Варна. Авторы пришли к заключению, что уменьшения наклона графика повторяемости перед землетрясениями $M4+$ (отвечающие известному предвестниковому сценарию) наблюдаются на стадии увеличения нагрузки в регионе при сезонном наполнении водохранилища и не наблюдаются на стадии разгрузки. Вопрос о природе отмеченного эффекта не обсуждается.

Изменения сейсмического режима в сейсмических роях, при флюидной, как предполагается, инициации сейсмической активности, обсуждаются в ряде работ [Gibowicz, 1973а; 1973b; Kundu et al., 2012; Laderach et al., 2012; Fischer et al., 2014; Jenatton et al., 2007; Horalek et al., 2015; Потанина и др., 2011; Passarelli et al., 2015]. В некоторых детальных исследованиях обнаружены изменения наклона графика повторяемости во времени [Chiba, Shimizu, 2018; Jenatton et al., 2007; Потанина и др., 2011; Passarelli et al., 2015]. В частности, в работах [Потанина и др., 2011; Passarelli et al., 2015] отмечается уменьшение наклона графика повторяемости на стадии активизации (роста) роевой активности и его увеличение на стадии релаксации.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Наведенная сейсмичность в области Койна–Варна является классическим объектом исследований. Обзоры состояния исследований и современных результатов можно найти в работах

[Yadav et al., 2016; Михайлов и др., 2017]. В этой области развернуты две сети сейсмологических наблюдений, охватывающих различные интервалы времени. Соответственно, существуют два сейсмических каталога: каталог за 1964–2015 гг., составленный в Институте инженерных исследований штата Махараштра (MERI), Индия [Maharashtra, 2015], и каталог Национального института геофизических исследований (NGRI) с 2005 г. [Shashidhar et al., 2019]. Локальные магнитудные шкалы этих каталогов различаются, что отражается, в частности, на количествах относительно сильных землетрясений, сообщаемых в различных публикациях (см. более подробно в работах [Смирнов и др., 2017; 2018а]).

Отсутствие плотной сейсмической сети в период заполнения водохранилища Койна не позволяет статистически проанализировать изменения параметров сейсмического режима, вызванного заполнением водохранилища, как это было сделано, например, для Нурекского водохранилища [Смирнов и др., 2018б]. Но имеющиеся сейсмические данные позволяют провести оценки наклона графика повторяемости для выявленных в работах [Смирнов и др., 2017; 2018а] сезонных компонент наведенной сейсмичности.

В настоящей работе, так же, как и в предыдущих работах [Смирнов и др., 2017; 2018а], в качестве исходных данных использовался каталог MERI [Maharashtra, 2015], охватывающий больший, чем каталог NGRI, интервал времени. Общий объем каталога MERI – 6996 землетрясений. Первичный анализ данных этого каталога выявил в нем три этапа, отвечающих модернизации сейсмической сети и характеризующихся ступенчатым уменьшением представительной магнитуды [Смирнов и др., 2017]. В период с 1962 до 1983 гг. представительная магнитуда равна 4.2; с 1983 до 1995 гг. – 3.0; с 1995 по 2015 гг. – 2.0. Для обеспечения однородности данных по представительной магнитуде мы выбрали интервал времени 1983–2015 гг., отселектировав каталог по магнитуде 3.0. Этот интервал перекрывает время заполнения водохранилища Варна в 1985–1993 гг. и время его эксплуатации. Объем рабочего каталога землетрясений $M3+$ за указанные 33 года составляет 596 событий, т.е. в среднем 18 событий в год или 1.5 события в месяц. На рис. 1 представлен график повторяемости, построенный по этим данным.

СЕЗОННЫЕ ВАРИАЦИИ НАКЛОНА ГРАФИКА ПОВТОРЯЕМОСТИ

При среднем потоке событий (18 событий в год) объем рабочего каталога $M3+$ не позволяет получить оценки изменений наклона графика повторяемости в пределах каждого годового цикла, поэтому нами был применен метод накопле-

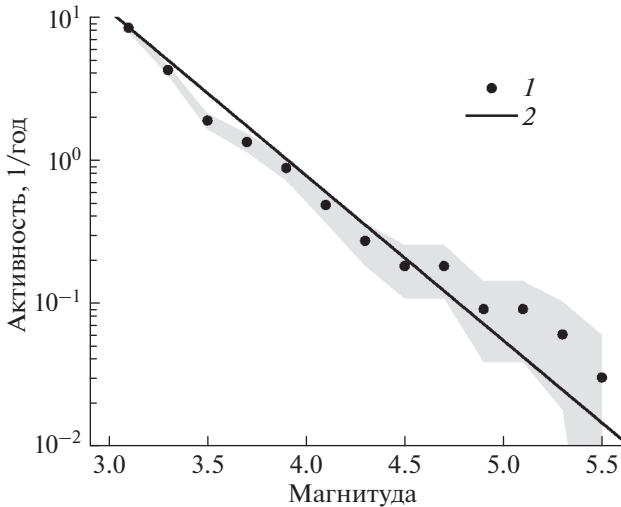


Рис. 1. График повторяемости землетрясений $M3+$ в области Койна–Варна по данным каталога MERI [Maharashtra, 2015]: 1 – гистограмма исходных данных, затенением показаны статистические погрешности гистограммы; 2 – аппроксимация согласно закону Гутенберга–Рихтера.

ния эпох, показавший свою эффективность при исследовании различных переходных режимов сейсмичности [Hainzl, 2004; Родкин, 2008; Смирнов, Завьялов, 2012]. Был сформирован сводный годовой каталог событий, в котором были собраны землетрясения за все 33 года, расположенные в пределах года (время события в сводном каталоге – время в году без учета номера самого года). Сводный каталог обеспечивает статистику 50 событий в месяц, что позволяет сделать оценки параметров сейсмического режима в скользящем окне и выявить их внутригодовые вариации.

В 1999, 2000 и 2005 гг. в регионе произошли относительно сильные землетрясения, сопровождавшиеся афтершоками, что при небольшой общей статистике существенно искажает оценки, поэтому указанные годы были полностью исключены из рассмотрения, что уменьшило общее количество событий до 512 (43 события в месяц).

На рис. 2 представлены результаты расчетов сейсмической активности (количество землетрясений в единицу времени) и наклона графика повторяемости по данным сводного каталога. Значения активности, полученные по сводному каталогу, пересчитаны к исходному уровню (без накопления эпох). Оценки наклона графика повторяемости сверху и снизу осуществлялись модифицированным методом максимального правдоподобия [Потанина и др., 2011], учитывающим смещение оценки при цензурировании выборки сверху. За начало отсчета сезонного времени принят момент начала увеличения уровня воды в водохранилищах. Годовой цикл

замыкался по кругу, так что январь следовал за декабрем. Для наглядности годовой цикл на рис. 2 повторен дважды, чтобы “разрезание” года не мешало видеть полную картину вариаций. Идентичные повторяющиеся годовые циклы разделены на рис. 2 вертикальной пунктирной линией.

На рис. 2 заливкой показаны “односигмовые” доверительные интервалы оценок активности и наклона графика повторяемости. Однако при небольших объемах использованных месячных выборок сводного каталога, состоящих из 40–50 событий, величины стандартных доверительных интервалов, опирающиеся на асимптотические оценки, могут оказаться не вполне корректными. В связи с этим было проведено статистическое моделирование на случайных синтетических каталогах.

Статистическое моделирование было проведено, во-первых, для получения прямой оценки изменчивости наклона графика повторяемости и активности при объеме выборки, соответствующем реальному каталогу землетрясений. Во-вторых, проверялось наличие или отсутствие чисто методической связи оценок наклона графика повторяемости с активностью: известное смещение оценки максимального правдоподобия (ОМП) может проявляться как изменение оценки наклона графика повторяемости при изменении объема выборки, а при совместном оценивании активности и наклона графика повторяемости ОМП могут коррелировать [Садовский, Писаренко, 1991].

Статистическое моделирование осуществлялось посредством формирования синтетического каталога с заданными распределениями событий во времени и по магнитуде. Генерируемые многократно синтетические каталоги подвергались такому же анализу, как и реальный сейсмический каталог, при этом вычислялись средние оценки и стандартные отклонения активности и наклона графика повторяемости [Смирнов, Пономарев, 2020].

Процедура формирования синтетического каталога заключалась в создании двух независимых массивов данных одинакового объема: массива времен и массива магнитуд.

Массив времен событий синтетического каталога формировался на основе генерации случайных значений интервалов времени между последовательными событиями τ_i , подчиняющихся экспоненциальному распределению (отвечающему пуассоновскому потоку событий):

$$P(\tau) = \alpha e^{-\alpha\tau}. \tag{1}$$

В отличие от работы [Смирнов, Пономарев, 2020], параметр распределения α не оставался постоянным, а медленно менялся во времени, ими-

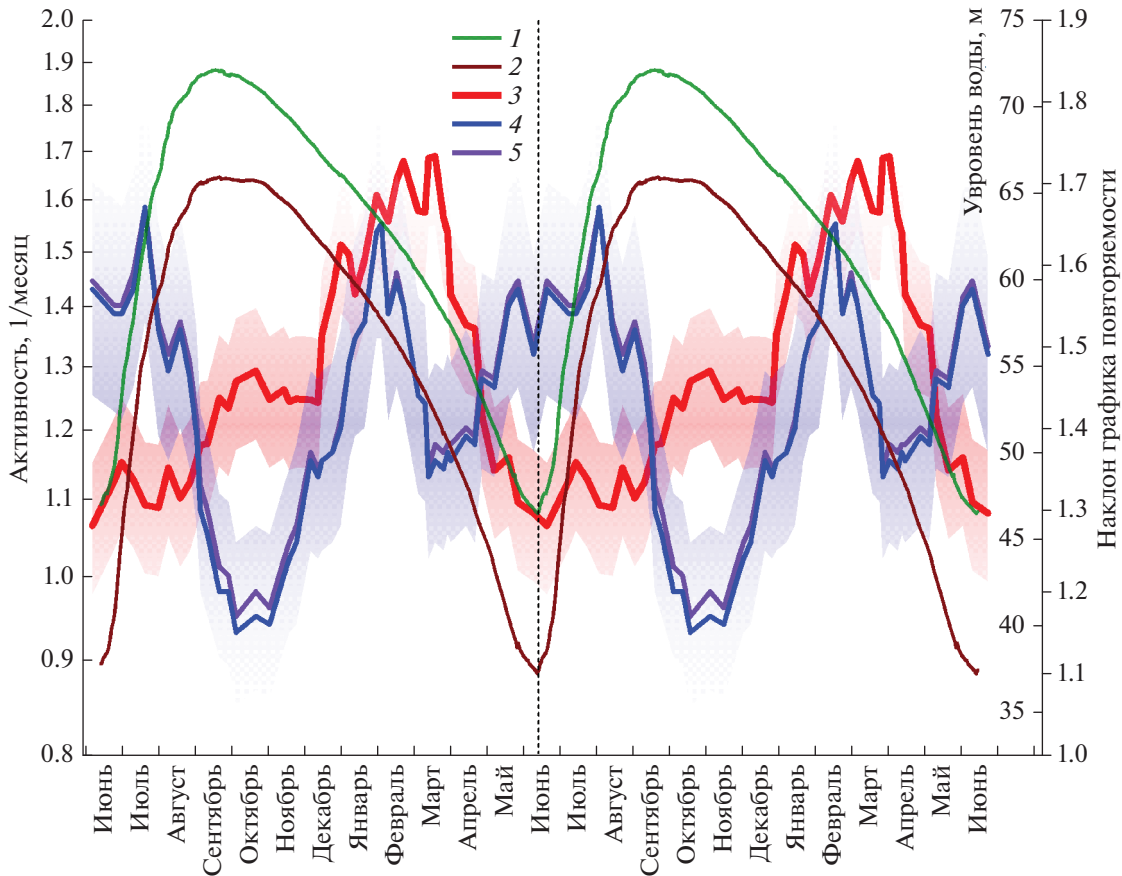


Рис. 2. Сезонные вариации сейсмической активности и наклона графика повторяемости в области наведенной сейсмичности Койна–Варна: 1, 2 – годовая компонента уровня воды в водохранилищах Койна и Варна соответственно (глубины водохранилищ у плотин); 3 – сейсмическая активность, заливкой показан доверительный интервал оценок; 4, 5 – оценки снизу и сверху наклона графика повторяемости (по методике из работы [Потанина и др., 2011]) и их доверительные интервалы (показаны заливкой). Годовой цикл представлен дважды, вертикальная пунктирная линия – граница повторения цикла.

тируя сезонные изменения сейсмической активности. Для α было принято выражение:

$$\alpha(t) = \alpha_0 \left(1 + \beta \cos\left(\frac{2\pi}{T}t + \phi\right) \right). \quad (2)$$

Период T задавался равным 1 году, параметры α_0 и β определялись по данным реального каталога: α_0 – средняя активность (отношение полного количества событий к полному интервалу времени); $\beta = \frac{A_{\max} - A_{\min}}{2}$ – половина полного размаха активности. Отметим, что задача “подогнать” кривую активности синтетического каталога к кривой реального каталога не ставилась. Переменная активность была введена для проверки наличия или отсутствия артефактной связи оценок наклона графика повторяемости с активностью при имеющемся объеме данных каталога. Фаза ϕ не учитывалась и была положена в (2) для простоты равной нулю.

Массив магнитуд формировался случайными числами, имеющими экспоненциальное распределение:

$$P(M) = \lambda e^{-\lambda M} \quad (3)$$

с $\lambda = b \ln 10$, что соответствует закону Гутенберга–Рихтера с параметром b . Значение b задавалось равным 1.4 – величине наклона графика повторяемости, рассчитанному по всему сейсмическому каталогу. Случайные величины магнитуд, генерируемые согласно распределению (3), прибавлялись к представительной магнитуде реального каталога $M_0 = 3$.

Синтетический каталог формировался с тем же объемом, что и реальный – 512 событий. Каждому событию синтетического каталога приписывалось время из массива времен и магнитуда из массива магнитуд. Затем из синтетического каталога формировался сводный годовой каталог (как это делалось для реального каталога), и выполнялись оценки параметров активности и наклона

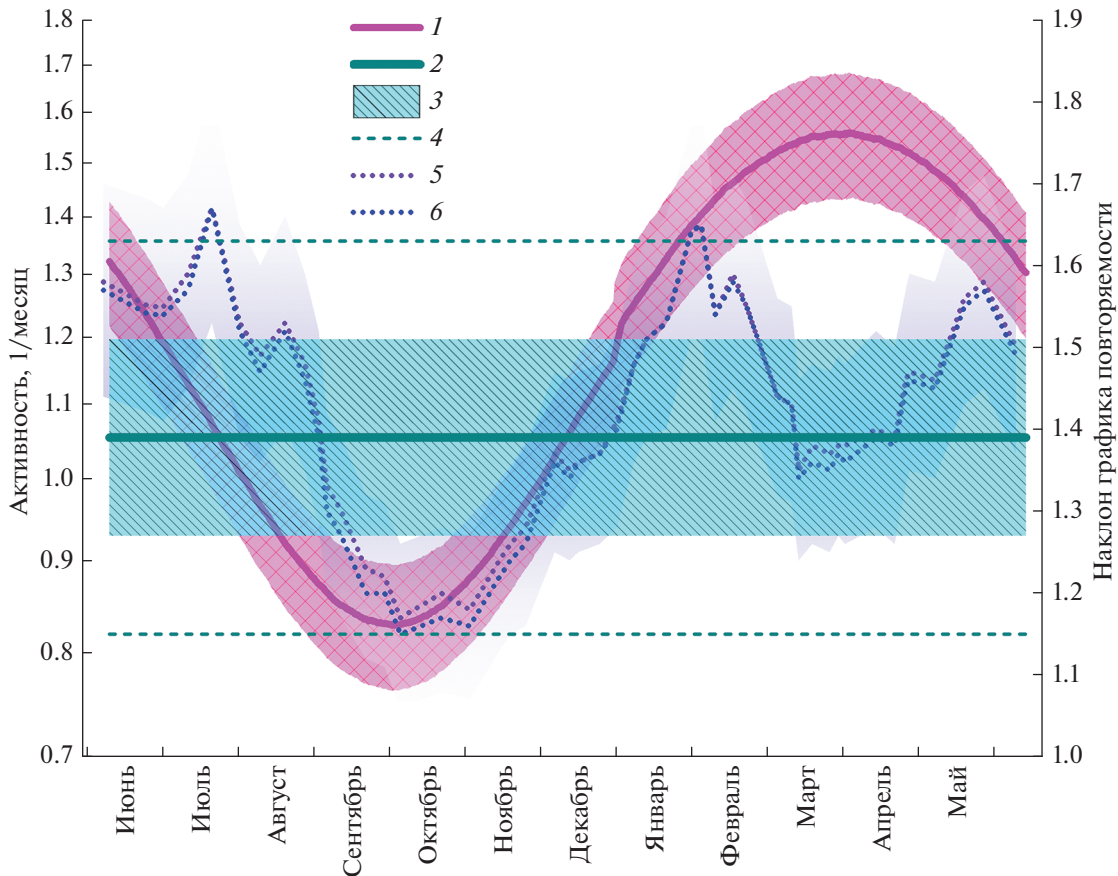


Рис. 3. Активность и наклон графика повторяемости по данным статистического моделирования: 1 – активность по случайному каталогу согласно формуле (2), заливкой показан интервал в одно стандартное отклонение; 2 – наклон графика повторяемости по случайному каталогу при постоянном во времени значении параметра λ в формуле (3); показаны интервалы в одно – заливка 3 и в два – линии 4 стандартных отклонения; 5 и 6 – оценки наклона графика повторяемости реального каталога (совпадают с кривыми 4 и 5 на рис. 2).

графика повторяемости в скользящих окнах по тем же программам, что и для реального каталога. Такая процедура повторялась многократно, вычислялись средние значения и стандартные отклонения оцениваемых параметров (на основании специальных тестов мы остановились на варианте 10000 повторов).

Результаты статистического моделирования на случайных каталогах представлены на рис. 3. На этот же рисунок нанесены оценки наклона графика повторяемости по реальному каталогу (см. рис. 2).

На рис. 3 видно, что оценки заданной в модели постоянной величины наклона графика повторяемости не меняются при изменении активности случайного каталога. Это означает, что для актуальных объемов выборок нет артефактной связи оценок параметров наклона графика повторяемости и сейсмической активности.

Оценки относительной погрешности (отношения стандартного отклонения к среднему значению) по данным статистического моделирова-

ния дают (в среднем по всему интервалу времени) для наклона графика повторяемости 0.086, для активности 0.080. Относительные погрешности для реальных данных (представленных на рис. 2), оцененные как отношение погрешности ОМП к самой оцениваемой величине дают для наклона графика повторяемости 0.083, а для активности 0.082. Последние практически совпадают с “прямыми” оценками соответствующих величин по методу статистического моделирования, что свидетельствует о корректности асимптотических оценок погрешностей ОМП на статистике выборок имеющих объемы в 40–50 событий. Следовательно, для анализа и интерпретации можно пользоваться доверительными интервалами, представленными на рис. 2.

Рисунок 3 свидетельствует, что сезонные вариации наклона графика повторяемости по данным реального каталога выходят за интервал “одна сигма” (66% уровень значимости), но не выходят за интервал “два сигма” (96% уровень значимости)

случайного каталога с постоянным значением параметров распределения (3).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 2 видно, что сейсмическая активность достигает абсолютных максимальных значений в декабре—марте, в период уменьшения уровня воды в водохранилищах Койна и Варна. Небольшое относительное увеличение активности видно также в сентябре—октябре, когда уровень воды в водохранилищах близок к своему годовому максимуму. Эти сезонные максимумы сейсмической активности в области Койна—Варна ранее уже выделялись другими способами как по каталогу MERI [Смирнов и др., 2017; 2018a], так и по каталогу NGRI [Aroga et al., 2017]. Повышение активности в сентябре—октябре интерпретируется как немедленный отклик на увеличение уровня воды в водохранилищах вследствие немедленного увеличения порового давления из-за дополнительного сжатия каркаса горных пород под весом воды в водохранилище. Максимум в феврале—марте рассматривается как задержанный отклик. На рис. 2 (на сводном годовом интервале) этот максимум сливается с дополнительной зимней активизацией в декабре—январе, появившейся после 2005 г. [Смирнов и др., 2018a]. Задержка отклика относительно максимума уровня воды в водохранилищах считается обусловленной увеличением порового давления вследствие постепенной диффузии воды в земную кору через дно водохранилища [Durá-Gómez, Talwani, 2010; Simpson et al., 2018]. Другой интерпретацией максимума активности в декабре—марте, приходящегося на интервал уменьшения уровня воды, является высказанное Х. Гуптой предположение о влиянии на сейсмический режим эффекта разгрузки региона при уменьшении уровня воды в водохранилищах [Gupta, 2001].

В предшествующих публикациях мы отмечали, что соотношение максимумов сезонной сейсмической активности немедленного и задержанного откликов меняется со временем [Смирнов и др., 2018a; Смирнов, Пономарев, 2020]. После заполнения водохранилища Варна величина немедленного отклика была гораздо меньше, чем после заполнения водохранилища Койна, тогда как величина задержанного отклика, наоборот, увеличилась. Преобладание величины задержанного отклика над немедленным хорошо видно на рис. 2. Напомним, что результаты, представленные на рис. 2, получены по данным за 1983—2015 гг. — в основном, во время и после заполнения водохранилища Варна в 1985—1993 гг. В работе [Смирнов и др., 2018a] мы высказали предположение, что отличия сезонного отклика сейсмичности при заполнении водохранилища Варна от заполнения водохранилища Койна мо-

гут быть связаны с разными условиями флюидной инициации: заполнение Варны, в отличие от Койны, осуществлялось вблизи области активизированной сейсмичности, тогда как Койна заполнялась в асейсмичной области.

На графике сезонных вариаций наклона графика повторяемости на рис. 2 видно, что в течение года есть два максимума и два минимума. Минимумы в октябре и марте приходятся примерно на месяцы максимумов сезонной сейсмической активности: немедленного (сентябрь—октябрь) и задержанного (февраль—март).

Максимумы наклона графика повторяемости (пики в январе и сентябре—августе) нельзя однозначно отнести к той или иной фазе сезонной сейсмической активности: осенний максимум приходится на минимум активности, а январский захватывает максимум в декабре—январе. При этом оба максимума не попадают на минимум или максимум уровня воды в водохранилищах, а приходятся на интервалы роста или спада уровня воды. Таким образом, не ясно, следует ли соотносить времена максимумов наклона графика повторяемости с характером изменения сейсмической активности или с циклом колебаний уровня воды. В качестве попытки прояснить этот вопрос был проведен анализ данных лабораторного эксперимента по циклической флюидной инициации процесса разрушения в образце гранита.

ЛАБОРАТОРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Эксперимент проводился в Геофизической обсерватории “Борок” ИФЗ РАН. Описание лабораторного оборудования представлено в работах [Патонин и др., 2013; 2018]. Испытуемый образец гранита КВН-5-548-1 был отобран с глубины 548 м из скважины Phansavale (КВН05) [Khanna et al., 2020] в рамках программы глубинного бурения в области наведенной сейсмичности Койна—Варна в Западной Индии [Gupta, 2017]. Сезонные изменения порового давления, вызванные вариациями уровня воды в водохранилище, в лаборатории моделировались заданными циклическими увеличениями и уменьшениями порового давления воды в испытываемом образце.

Эксперимент проводился при постоянном давлении всестороннего сжатия 10 МПа. Осевое нагружение велось в режиме управления по деформации (*strain-control*). До начала обводнения образца он был нагружен до 100 МПа (около 90% от предела прочности), затем нагрузка была уменьшена до 90 МПа, и началось обводнение. Вода нагнеталась под давлением в поровое пространство образца через одну торцевую грань, другая торцевая грань оставалась непроницаемой для воды (рис. 4).

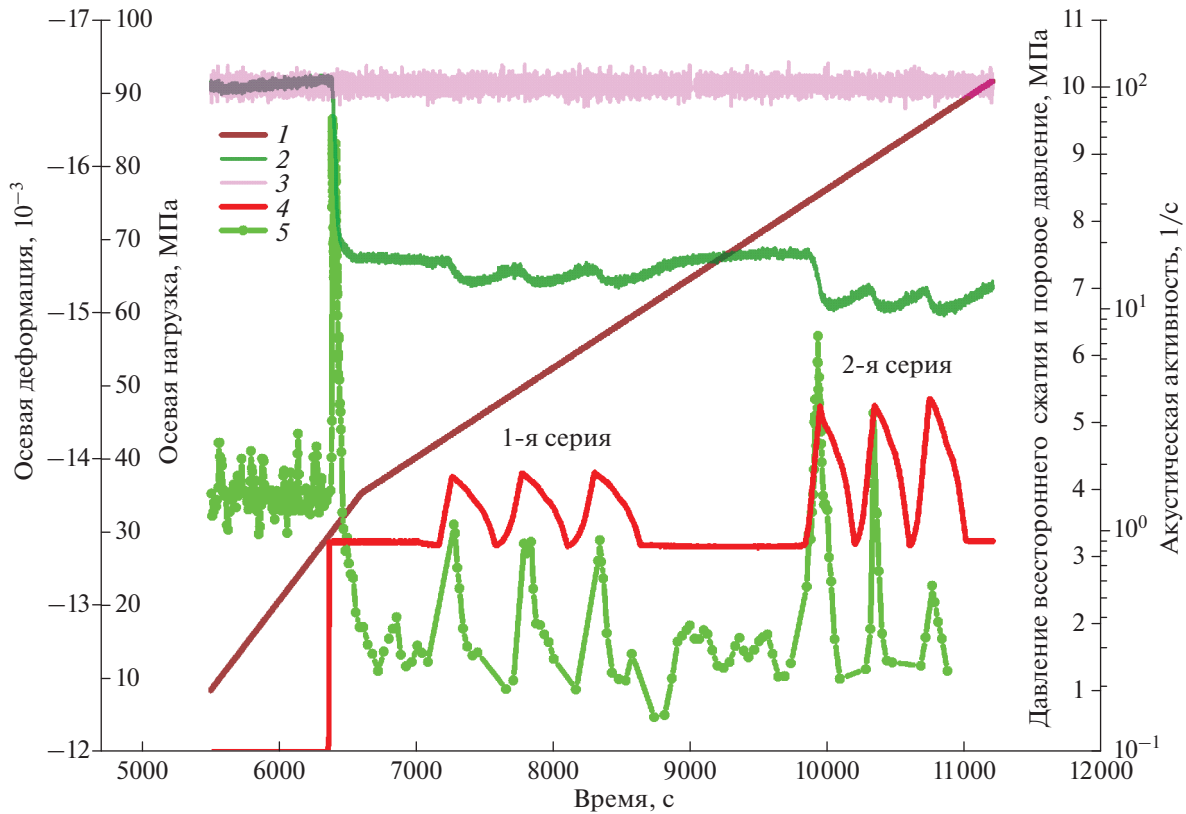


Рис. 4. История нагружения образца гранита КВН-5-548-1: 1 – осевая деформация, задаваемая смещением пуансона пресса; 2 – осевая нагрузка; 3 – давление всестороннего сжатия; 4 – поровое давление; 5 – активность АЭ.

Инъекция воды в сухой образец вызвала образование макроразрыва через весь образец, сопровождавшееся интенсивной акустической эмиссией (АЭ) и падением осевых напряжений вследствие уменьшения несущей способности образца (см. более детальное описание и обсуждение этой стадии эксперимента в работе [Смирнов и др., 2020]). Образование макроразрыва в образце можно соотнести с формированием в природных условиях разрывной зоны Доначивада вдоль простираения очага землетрясения М6.3 10.12.1967 г., произошедшего вблизи плотины Койна после обводнения части земной коры вследствие заполнения водохранилища [Смирнов и др., 2018а; Goswami et al., 2020].

На стадии циклических увеличений и уменьшений порового давления скорость осевой деформации удерживалась постоянной, а заметные на рис. 4 вариации напряжений отражали изменения эффективных механических свойств образца.

Система акустических датчиков, расположенных на цилиндрической поверхности образца, позволяла формировать каталог акустических событий, аналогичный каталогу землетрясений.

Однако его объем оказался недостаточным для проведения статистического анализа.

Специальный датчик, встроенный в пуансон пресса и прижимаемый им к торцевой поверхности образца, обеспечивает существенно большую чувствительность, что позволяет получить на порядок большие объемы выборок импульсов, отвечающих акустическим событиям. Набор времен и амплитуд этих импульсов аналогичен сейсмическому бюллетеню отдельной сейсмической станции. Эти данные не позволяют судить о положении источников сигналов АЭ в пространстве, но дают возможность провести интегральный для всего образца анализ изменения активности и наклона графика повторяемости во времени. В качестве энергетического класса акустических событий использовалась величина $K = 2 \lg A$, где A – амплитуда импульса АЭ в относительных единицах. Абсолютная калибровка датчика не проводилась, что не позволяет связать величину A с абсолютным смещением в акустической волне. Более подробное описание системы регистрации сигналов АЭ и принципов их анализа по аналогии с сейсмическими данными можно найти в работе [Смирнов, Пономарев, 2020].

Аналізу были подвергнуты данные двух серий контролируемого изменения порового давления (рис. 4). Каждая серия состояла из трех циклов плавных увеличений и уменьшений давления. Такая форма была выбрана в соответствии с формой изменения уровня воды в водохранилищах (см. рис. 2).

Так же, как и в случае анализа сезонных колебаний сейсмичности в области Койна–Варна, в лабораторном эксперименте был применен метод накопления эпох. Для каждой серии из трех циклов увеличения–уменьшения порового давления формировался сводный бюллетень событий АЭ, по данным которого строились оценки изменений акустической активности и наклона графика повторяемости по тем же методикам, что применялись для анализа колебаний сейсмичности. На рис. 5 показаны, для примера, графики повторяемости для каждого из трех циклов увеличения–уменьшения порового давления первой серии и график повторяемости для сводного бюллетеня. Видно, что графики повторяемости для отдельных циклов имеют сходный вид, наклоны их близки, что подтверждает корректность применения метода накопления эпох и возможность использования сводного каталога как каталога, характеризующего всю серию.

На рис. 6 представлены изменения активности и наклона графика повторяемости для двух серий циклических колебаний порового давления, показанных на рис. 4. За нулевое время принят момент достижения поровым давлением максимума в каждом цикле увеличения–уменьшения давления. Как и в случае анализа натуральных данных, оценки проводились в скользящем окне с заданным количеством событий, сдвигаемом на заданную величину.

На рис. 6 видно, что максимум акустической активности приходится примерно на максимум порового давления. Вопрос о закономерностях и возможной природе задержек активизации разрушения при флюидной активизации подробно рассмотрен в работе [Смирнов и др., 2020], в том числе для рассматриваемого образца гранита, и мы не будем его здесь касаться.

На рис. 6 видно также, что минимум наклона графика повторяемости приходится примерно на максимум активности, как это было отмечено для сезонной сейсмичности в области Койна–Варна (см. рис. 2). В эксперименте, также как и в натуральных условиях, на один цикл увеличения–уменьшения порового давления приходится два максимума наклона графика повторяемости. Первый максимум приходится на фазу увеличения давления, но проявляется в двух исследованных сериях на разных частях спада. Во второй серии заметен также дополнительный максимум на

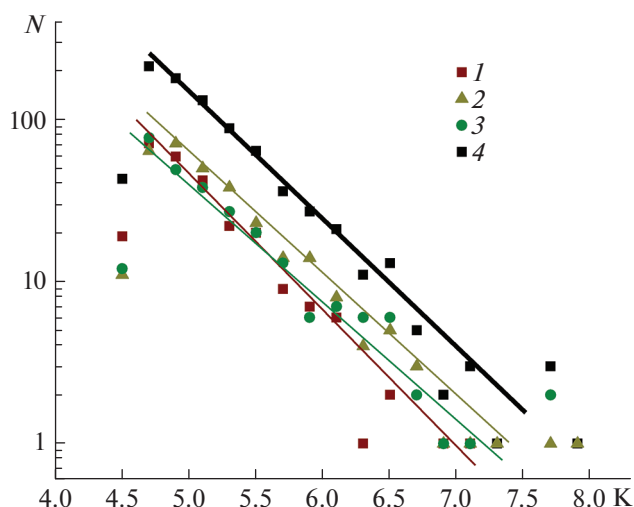


Рис. 5. Графики повторяемости для отдельных циклов (1, 2, 3) и сводного бюллетеня (4) событий АЭ первой серии.

стадии спада давления, но его величина и статистическая значимость меньше, чем двух основных максимумов. Мы не можем пока утверждать является ли различие особенностей кривых наклона графика повторяемости для первой и второй серий закономерным или случайным. Но можем уверенно заключить, что в рассмотренном эксперименте для одного цикла увеличения–уменьшения порового давления наблюдается два максимума и один минимум наклона графика повторяемости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В случае сезонных изменений сейсмичности в области Койна–Варна мы видим в пределах года два цикла увеличения–уменьшения сейсмической активности и два цикла изменения наклона графика повторяемости. Наличие такого удвоения мы связываем с наличием двух механизмов инициации наведенной сейсмичности, известных как немедленный и задержанный отклик. Эти механизмы были первоначально выявлены при заполнении водохранилищ [Simpson, 1988], но они же обнаруживаются и в процессе эксплуатации водохранилищ при изменении уровня воды в резервуаре [Durá-Gómez, Talwani, 2010; Simpson et al., 2018; Смирнов и др., 2018a]. Согласно этим механизмам, каждый из двух максимумов инициированной сейсмичности приходится на максимум порового давления (это – упрощенный вариант, который не учитывает возможной задержки отклика относительно порового давления вследствие конечной скорости собственно кинетики развития разрушения [Смирнов и др., 2010; Смирнов, Пономарев, 2020] или вклада скорости измене-

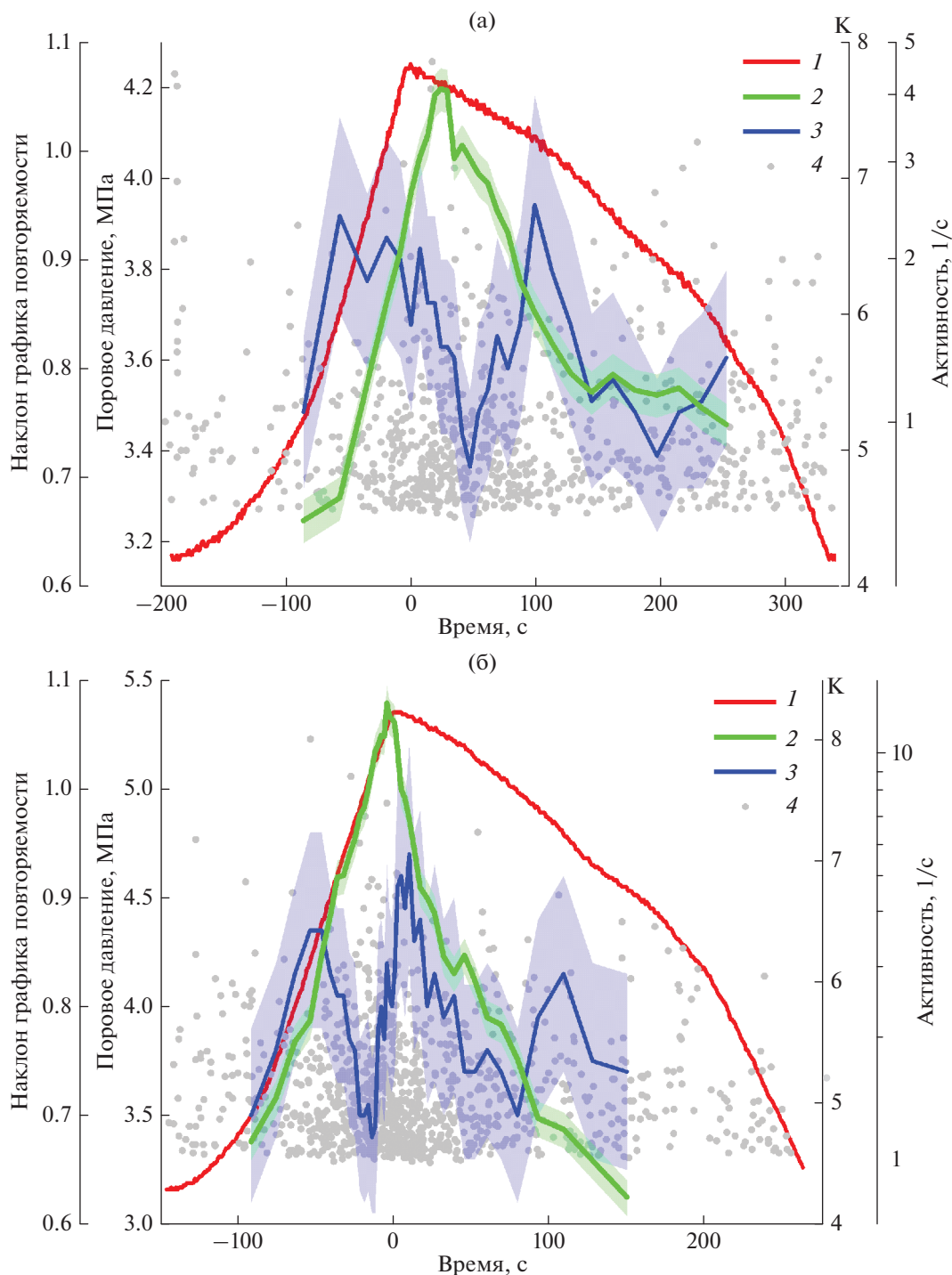


Рис. 6. Изменение активности и наклона графика повторяемости, оцененные по сводным бюллетеням акустической эмиссии в “событийных” окнах по 120 событий, сдвигаемых на 20 событий: (а) – 1-я серия (изменение порового давления на 1 МПа); (б) – 2-я серия (изменение порового давления на 2 МПа); 1 – поровое давление, 2 – активность АЭ, 3 – наклон графика повторяемости, 4 – энергетический класс К событий АЭ.

ния уровня воды и порового давления в активизацию сейсмичности [Мирзоев и др., 1987; Капустян, Юдахин, 2007; Durá-Gómez, Talwani, 2010]). Первый раз максимум порового давления достигается в момент максимального уровня воды

вследствие мгновенного (в масштабе годового периода колебаний уровня воды) сжатия порового пространства матрицы горной породы давлением столба воды на дно водохранилища. Второй максимум порового давления, вызывающий второй

максимум инициации сейсмичности, связывают со временем достижения области генерации землетрясений диффузионной волной давления в системе разломов.

Изученные нами колебания величины наклона графика повторяемости в пределах годового цикла показали, что минимальные значения наклона графика повторяемости приходится на интервалы описанных выше максимумов инициированной сейсмической активности. Такой же эффект наблюдался в невулканических сейсмических роях, предположительно флюидной природы [Потанина и др., 2011], и его связь с флюидной инициацией разрушения была подтверждена в лабораторном эксперименте [Потанина и др., 2015]. Обобщение данных по динамике различных переходных режимов сейсмичности позволило заключить, что этот эффект характерен для переходных режимов в целом [Смирнов, Пономарев, 2020].

В пилотном лабораторном эксперименте, результаты которого представлены в настоящей статье, минимум наклона графика повторяемости также приходится на интервал максимума акустической активности, инициированной поровым давлением флюида.

Максимумы наклона графика повторяемости в годовом цикле природной сейсмичности, на первый взгляд, не удается однозначно ассоциировать с особенностями изменения сейсмической активности. Но оба максимума кажутся связанными с изменением уровня воды в водохранилищах: один приходится на стадию увеличения уровня воды, другой – на стадию уменьшения. Результаты лабораторного эксперимента продемонстрировали приуроченность максимумов наклона графика повторяемости к нарастанию и спаду порового давления.

При более подробном сопоставлении лабораторных и натуральных результатов нужно иметь в виду, что режим лабораторного эксперимента не вполне соответствовал предполагаемому режиму природных колебаний порового давления. Модуляция осевой нагрузки на образец, которая могла бы моделировать сезонные колебания нагрузки на дно водохранилища, в эксперименте не проводилась, а заметные на рис. 4 изменения напряжений в циклах увеличения–уменьшения порового давления являются следствием, а не причиной разрушения. В эксперименте просто задавалось изменение порового давления вне связи его с двумя указанными выше механизмами повышения порового давления в природных условиях. В эксперименте мы не учитывали возможного различия эффектов инициации разрушения вследствие повышения порового давления при сжатии каркаса породы во всем объеме (уменьшения порового пространства, заполненного жидкостью)

или же повышения порового давления вследствие движения его фронта внутрь среды от поверхности с конечной скоростью диффузии. Тем самым мы неявно предположили, что задаваемый в эксперименте цикл увеличения–уменьшения порового давления и связанный с ним цикл увеличения–уменьшения акустической активности моделирует как мгновенный, так и задержанный отклик в натурной сейсмичности. Это предположение пока не доказано, что не позволяет аргументированно выдвигать соображения о механизмах отмеченной выше связи наклона графика повторяемости инициированной сейсмичности с флюидным режимом.

В природных условиях связь динамики задержанного отклика сейсмичности с изменением уровня воды в водохранилищах представляется более сложной, чем динамика немедленного отклика. Задержанный отклик связывают с достижением диффузионным фронтом флюида сейсмогенной зоны, понижающим в ней эффективную прочность среды и инициирующим, тем самым, усиление процесса разрушения, что фиксируется как задержанный отклик сейсмичности. Учитывая, что давление флюида передается, в основном, по неоднородной системе разломов, обладающих, вероятно, различной проницаемостью, и учитывая очевидную неоднородность сейсмогенной зоны, нельзя ожидать, что динамика задержанного отклика будет просто повторять кривую вариаций уровня воды на дне водохранилища, сдвинутую по времени на некое среднее время диффузии флюида. Это обстоятельство подтверждается для области Койна–Варна теоретическими расчетами [Durá-Gómez, Talwani, 2010; Gahalaut, 2021]. Даже для сильно упрощенного строения региона характер связи кривой порового давления на глубине в несколько километров с изменением уровня воды в водохранилищах существенно зависит от предполагаемой геометрии разломных структур региона и величин их проницаемости, а также ряда других плохо контролируемых параметров [Talwani, 2007; Gahalaut, Gupta, 2008; Gahalaut, 2021]. Фактически, мы не знаем деталей пространственно-временного распределения порового давления, инициирующего задержанный отклик сейсмичности в районе водохранилищ, и, следовательно, результаты нашего упрощенного эксперимента нельзя напрямую сопоставлять с более сложной динамикой задержанного отклика в натуральных условиях.

Механизм немедленного отклика сейсмичности определяет более простую связь увеличения нагрузки на поверхность среды (увеличения уровня воды в водохранилище) с инициируемой им сейсмической активностью [Gahalaut, 2021]. Он не предполагает задержки изменения порового давления относительно изменения нагрузки на дно водохранилища. Полагая, что на стадии не-

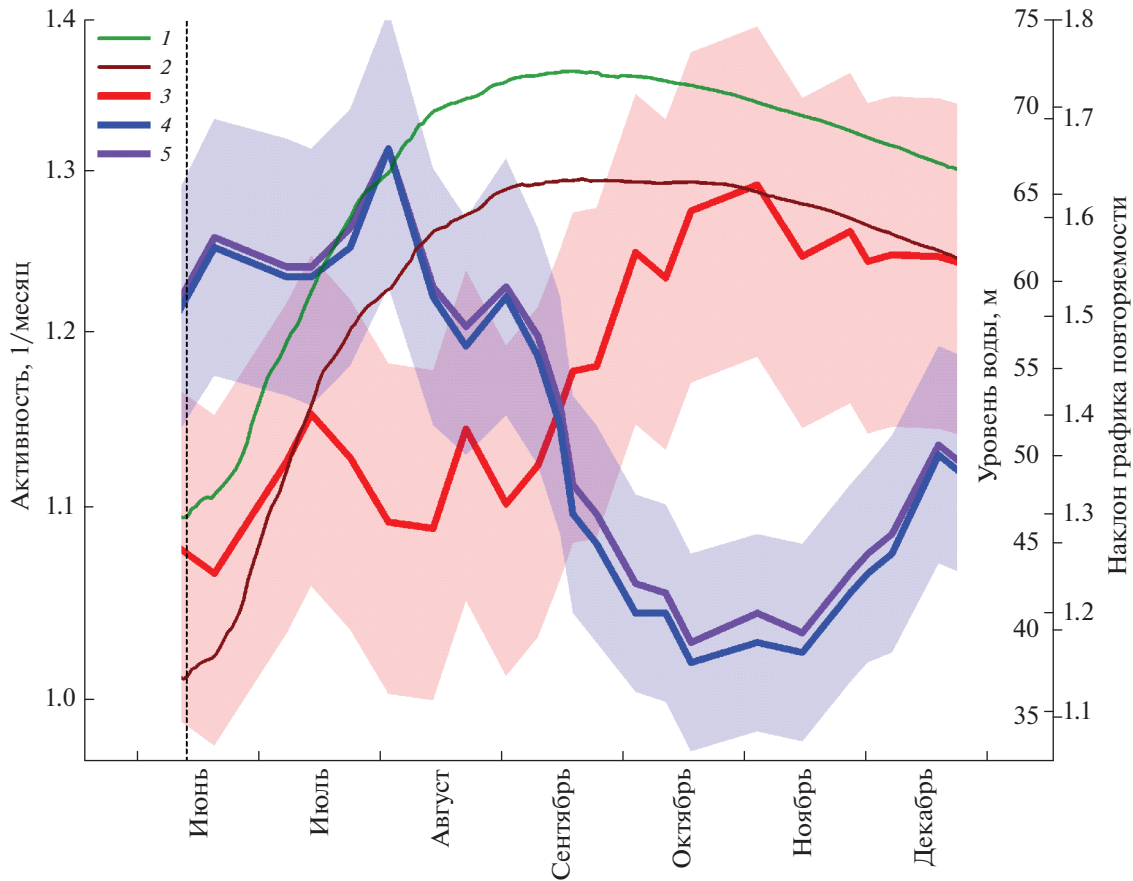


Рис. 7. Сейсмическая активность и наклон графика повторяемости на интервале времени, отвечающем немедленному отклику сезонной сейсмичности. Обозначения – как на рис. 2: 1, 2 – годовая компонента уровня воды в водохранилищах Койна и Варна, соответственно; 3 – сейсмическая активность; 4, 5 – оценки снизу и сверху наклона графика повторяемости, заливкой показаны доверительные интервалы.

медленного отклика в природных условиях кривая порового давления повторяет кривую изменения уровня воды в водохранилище, можно в этом случае более уверенно соотносить лабораторные результаты с натурными.

На рис. 7 мы вырезали из представленных на рис. 2 кривых интервал времени, отвечающий немедленному отклику. Начало интервала выбрано в начале сезонного роста уровня воды. Конец интервала выбрать с определенностью затруднительно, поскольку, задержанный отклик может начинаться, когда немедленный еще не закончился. Мы не можем разделить эти два отклика на интервале их перекрытия, поэтому ограничимся лишь тем интервалом, где виден локальный максимум инициированной сейсмической активности.

На стадии нарастания уровня воды (и, следовательно, порового давления – в рамках модели немедленного отклика) на рис. 7 видны вариации наклона графика повторяемости, схожие с полученными в эксперименте (рис. 6): небольшое увеличение наклона графика повторяемости с по-

следующим более существенным спадом, совпадающим по времени с нарастанием сейсмической активности. Такие изменения, отвечающие сценарию слияния и роста трещин (известному в сейсмологии как сценарий ЛНТ), характерны для стадии активизации многих переходных режимов сейсмичности [Смирнов, Пономарев, 2020].

Некоторое запаздывание максимума сейсмического отклика относительно максимума уровня воды в водохранилище, заметное на рис. 7, может быть связано как с неучтенной в модели мгновенного отклика задержкой повышения порового давления в среде, так и обуславливаться кинетикой собственно процесса разрушения [Смирнов, Пономарев, 2020].

ВЫВОДЫ

1. Техника накопления эпох в совокупности со статистическим моделированием случайных каталогов землетрясений позволила выделить тонкие особенности режима сезонных компонент наведенной сейсмичности в области Койна–Варна.

2. Сезонные колебания сейсмической активности в области Койна–Варна, связанные с годовыми вариациями уровня воды в водохранилищах, демонстрируют два локальных максимума в пределах года, отвечающих известным механизмам немедленного и задержанного отклика резервуарной сейсмичности.

3. Наклон графика повторяемости землетрясений закономерно изменяется в пределах годового цикла сезонной сейсмичности. Минимальные значения наклона графика повторяемости приходятся на интервалы максимумов как мгновенного, так и задержанного сейсмического отклика. Максимумы наклона графика повторяемости приходятся на фазы нарастания и спада уровня воды в водохранилищах.

4. В пилотном лабораторном эксперименте с циклическим увеличением–уменьшением порового давления в образце гранита (извлеченного из скважины в области наведенной сейсмичности Койна–Варна) на максимум порового давления приходится максимум акустической активности и минимум наклона графика повторяемости. Максимумы наклона графика повторяемости приходятся как на стадию увеличения, так и на стадию уменьшения порового давления.

5. Характер изменения сейсмической активности и наклона графика повторяемости на стадии активизации немедленного отклика инициированной сейсмичности согласуется с характерным для активизации переходных сейсмических режимов сценарием постепенного перераспределения процесса разрушения от младших к старшим масштабным уровням. Аналогичные изменения параметров акустического режима обнаружены в лабораторном эксперименте на стадии активизации процесса разрушения, инициированным повышением порового давления.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в соответствии с государственными заданиями Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН и физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Лабораторные исследования проводились в Центре коллективного пользования “Петрофизика, геомеханика и палеомагнетизм” ИФЗ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Капустян Н.К., Юдахин Ф.Н. Сейсмические исследования техногенных воздействий на земную кору и их последствия. Екатеринбург: УрО РАН. 2007. 416 с.

Мирзоев К.М., Негматуллаев С.Х., Симпсон Д., Соболева О.В. Возрожденная сейсмичность в районе водохранилища Нурекской ГЭС. Душанбе: Дониш. 1987. 402 с.

Михайлов В.О., Арора К., Пономарев А.В., Шринагеш Д., Смирнов В.Б., Чадда Р. Наведенная сейсмичность в районе водохранилищ Койна и Варна, Индия: обзор современных данных и гипотез // Физика Земли. 2017. № 4. С. 28–39.

Патонин А.В., Пономарев А.В., Смирнов В.Б. Аппаратно-программный лабораторный комплекс для решения задач физики разрушения горных пород // Сейсмические приборы. 2013. Т. 49. № 1. С. 19–34.

Патонин А.В., Шихова Н.М., Пономарев А.В., Смирнов В.Б. Модульная система непрерывной регистрации акустической эмиссии для лабораторных исследований разрушения горных пород // Сейсмические приборы. 2018. Т. 54. № 3. С. 35–55.

Потанина М.Г., Смирнов В.Б., Бернар П. Развитие роевой активности в Коринфском рифте в 2000–2005 гг. // Физика Земли. 2011. № 7. С. 54–66.

Потанина М.Г., Смирнов В.Б., Пономарев А., Бернар П., Любушин А., Шозиёев Ш. Особенности акустической эмиссии при флюидной инициации разрушения по данным лабораторного моделирования // Физика Земли. 2015. № 2. С. 126–138.

Родкин М.В. О режиме сейсмической активизации в обобщенной окрестности сильного землетрясения // Физическая мезомеханика. 2008. Т. 11. № 1. С. 74–79.

Садовский М.А., Писаренко В.Ф. Сейсмический процесс в блоковой среде. М.: Наука. 1991. 96 с.

Смирнов В.Б., Завьялов А.Д. К вопросу о сейсмическом отклике на электромагнитное зондирование литосферы Земли // Физика Земли. 2012. № 7–8. С. 63–88.

Смирнов В.Б., Михайлов В.О., Пономарев А.В., Арора К., Chadha R.K., Srinagesh D., Потанина М.Г. О динамике сезонных компонент наведенной сейсмичности в области Койна-Варна, западная Индия // Физика Земли. 2018а. № 4. С. 100–109.

Смирнов В.Б., Пономарев А.В. Физика переходных режимов сейсмичности. М.: РАН – 2020. 412 с.

Смирнов В.Б., Пономарев А.В., Бернар П., Патонин А.В. Закономерности переходных режимов сейсмического процесса по данным лабораторного и природного моделирования // Физика Земли. 2010. № 2. С. 17–49.

Смирнов В.Б., Пономарев А.В., Исаева А.В., Бондаренко Н.Б., Патонин А.В., Казначеев П.А., Строганова С.М., Потанина М.Г., Chadha R.K., Arora K. Флюидная инициация разрушения в сухих и водонасыщенных горных породах // Физика Земли. 2020. № 6. С. 86–105.

Смирнов В.Б., Пономарев А.В., Карцева Т.И., Михайлов В.О., Chadha R.K., Айдаров Ф. Динамика наведенной сейсмичности при заполнении Нурекского водохранилища // Физика Земли. 2018б. № 4. С. 110–120.

Смирнов В.Б., Шринагеш Д., Пономарев А.В., Чадда Р., Михайлов В.О., Потанина М.Г., Карташов И.М., Строганова С.М. Режим сезонных вариаций наведенной сейсмичности в области водохранилищ Койна-Варна, Западная Индия // Физика Земли. 2017. № 4. С. 40–49.

Соболев Г.А. Модель лавинно-неустойчивого трещинообразования – ЛНТ // Физика Земли. 2019. № 1. С. 166–179.

Alba S.G., Vargas C.A., Zang A. Evidencing the relationship between injected volume of water and maximum expected magnitude during the Puerto Gaitan (Colombia) earth-

- quake sequence from 2013 to 2015 // *Geophys. J. Int.* 2020. V. 220. P. 335–344.
<https://doi.org/10.1093/gji/ggz433>
- Arora K., Chadha R.K., Srinu Y., Selles A., Srinagesh D., Smirnov V., Ponomarev A., Mikhailov V.O. Lineament fabric from airborne LiDAR and its influence on triggered earthquakes in the Koyna-Warna region, Western India // *J. Geol. Soc. India.* 2017. V. 90. P. 670–677.
- Bachmann C.E., Wiemer S., Woessner J., Hainzl S. Statistical analysis of the induced Basel 2006 earthquake sequence introducing a probability-based monitoring approach for enhanced geothermal systems // *Geophys. J. Int.* 2011. V. 186(2). P. 793–807.
- Bettinelli P., Avouac J.-P., Flouzat M., Bollinger L., Ramillien G., Rajaure S., Sapkota S. Seasonal variations of seismicity and geodetic strain in the Himalaya induced by surface hydrology // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2008. V. 266. P. 332–344.
<https://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.11.021>
- Bollinger L., Perrier F., Avouac J.P., Sapkota S., Gautam U., Tiwari D.R. Seasonal modulation of seismicity in the Himalaya of Nepal // *Geophys. Res. Lett.* 2007. V. 34. L08304.
<https://doi.org/10.1029/2006GL029192>
- Bourne S.J., Oates S.J., van Elk J., Doornhof D. A seismological model for earthquakes induced by fluid extraction from a subsurface reservoir // *J. Geophys. Res. Solid Earth.* 2014. V. 119. P. 8991–9015.
<https://doi.org/10.1002/2014JB011663>
- Broccardo M., Mignan A., Grigoli F., Karvounis D., Rinaldi R.P., Danciu L., Hofmann H., Milkereit C., Dahm T., Zimmermann G., Hjörleifsdóttir V., Wiemer S. Induced seismicity risk analysis of the hydraulic stimulation of a geothermal well on Geldinganes, Iceland. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, (early online release). 2019.
<https://doi.org/10.5194/nhess-2019-331>
- 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.
- Chiba K., Shimizu H. Spatial and temporal distributions of b-value in and around Shinmoe-dake, Kirishima volcano, Japan // *Planets and Space.* 2018. V. 70. P. 122.
<https://doi.org/10.1186/s40623-018-0892-7>
- Christiansen L.B., Hurwitz S., Inge-britsen S. Annual modulation of seismicity along the San Andreas Fault near Parkfield, CA // *Geophys. Res. Lett.* 2007. V. 34. L04306.
<https://doi.org/10.1029/2006GL028634>
- Christiansen L.B., Hurwitz S., Saar M.O., Ingebritsen S.E., Hsieh P.A. Seasonal seismicity at western United States volcanic centers // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2005. V. 240. P. 307–321.
- Cuenot N., Dorbath C., Dorbath L. Analysis of the microseismicity induced by fluid injections at the EGS site of Soultz-sous-Forêts (Alsace, France): implications for the characterization of the geothermal reservoir properties // *Pure Appl. Geophys.* 2008. V. 165(5). P. 797–828.
- D'Agostino N., Silverii E., Amoroso O., Convertito V., Fiorillo F., Ventafridda G., Zollo A. Crustal deformation and seismicity modulated by groundwater recharge of karst aquifers // *Geoph. Res. Lett.* 2018. V. 22. P. 12,253–12,262.
<https://doi.org/10.1029/2018GL079794>
- Durá-Gómez I., Talwani P. Hydromechanics of the Koyna-Warna region, India // *Pure and Applied Geophysics.* 2010. V. 167. № 1. P. 183–213.
- El-Isa Z.H., Eaton D.W. Spatiotemporal variations in the b-value of earthquake magnitude–frequency distributions: Classification and causes // *Tectonophysics.* 2014. V. 615–616. P. 1–11.
<https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.12.001>
- Ellsworth W. Injection-induced earthquakes // *Science.* 2013. V. 341. № 6142.
<https://doi.org/10.1126/science.1225942>
- Farquharson J.I., Amelung F. Extreme rainfall triggered the 2018 rift eruption at Kilauea Volcano // *Nature.* 2020. V. 580. P. 491–495.
<https://doi.org/10.1038/s41586-020-2172-5>
- Fischer T., Horálek J., Hrubcová P., Vavryčuk V., Bräuer K., Kämpf H. Intra-continental earthquake swarms in West-Bohemia and Vogtland: A review // *Tectonophysics.* 2014. V. 611. P. 1–27.
- Gahalaut K., Gupta P.K. An integral equation algorithm for 3-D simulation of pore pressure in a porous elastic medium with heterogeneities // *Geophys. J. Int.* 2008. V. 175. P. 1245–1253
<https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2008.03940.x>
- Gahalaut K. On the Common Features of Reservoir Water-Level Variations and Their Influence on Earthquake Triggering: An Inherency of Physical Mechanism of Reservoir-Triggered Seismicity // *Bull. Seismol. Soc. Am.* 2021. V. 111. P. 2720–2732.
<https://doi.org/10.1785/0120200336>
- Gao S.S., Silver P.G., Linde A.T., Sacks I.S. Annual modulation of triggered seismicity following the 1992 Landers earthquake in California // *Nature.* 2000. V. 406. P. 500–504.
<https://doi.org/10.1038/35020045>
- Gibowicz S.J. Patterns of earthquake swarm activity // *Annals of geophysics (Annali di geofisica).* 1973a. V. 26(4). P. 637–658.
- Gibowicz S.J. Variation of frequency–magnitude relationship during Taupo earthquake swarm of 1964–65 // *New Zealand Journal of Geology and Geophysics.* 1973b. V. 16:1. P. 18–51.
<https://doi.org/10.1080/00288306.1973.10425384>
- Goswami D., Hazarika P., Roy S. In Situ Stress Orientation From 3 km Borehole Image Logs in the Koyna Seismogenic Zone, Western India: Implications for Transitional Faulting Environment // *Tectonics.* 2020. V. 39. e2019TC005647.
<https://doi.org/10.1029/2019TC005647>
- Gupta H.K. A review of recent studies of triggered earthquakes by artificial water reservoirs with special emphasis on earthquakes in Koyna, India // *Earth-Science Reviews.* 2002. V. 58(3–4). P. 279–310.
- Gupta H.K. *Reservoir-Induced Earthquakes.* Amsterdam: Elsevier. 1992. 364 p.
- Gupta H.K. Short-term earthquake forecasting may be feasible at Koyna, India // *Tectonophysics.* 2001. V. 338. P. 353–357.
- Gupta H.K. Koyna, India, an ideal site for near field earthquake observations // *J. Geol. Soc. India.* 2017. V. 90. P. 645–652.

- Hainzl S. Seismicity patterns of earthquake swarms due to fluid intrusion and stress triggering // *Geophys. J. Int.* 2004. V. 159. P. 1090–1096.
- Horálek J., Fischer T., Einarsson P., Jakobsdóttir S.S. Earthquake Swarms. Encyclopedia of Earthquake Engineering / Beer M. et al. (eds.), Berlin Heidelberg: Springer-Verlag. 2015. P. 871–885.
- Huang Y., Beroza G.C. Temporal variation in the magnitude-frequency distribution during the Guy-Greenbrier earthquake sequence // *Geophys. Res. Lett.* 2015. V. 42(16). P. 6639–6646.
<https://doi.org/10.1002/2015GL065170>
- Jenatton L., Guiguet R., Thouvenot F., Daix N. The 16000-event 2003–2004 earthquake swarm in Ubaye (French Alps) // *J. Geophysical Research.* 2007. V. 112. B. 11304.
<https://doi.org/10.1029/2006JB004878>
- Khanna T.C., Arora K., Raza H., Chadha R. K., Gupta H.K. Bore-hole well-cores provide evidence for crustal heterogeneity beneath the Koyna-Warna reservoir site, Deccan Volcanic Province, India // *J. Geological Society of India.* 2020. V. 96. P. 36–42.
- Kim K.-I., Min K.-B., Kim K.-Y., Choi J.W., Yoon K.-S., Yoon W.S. et al. Protocol for induced microseismicity in the first enhanced geothermal systems project in Pohang, Korea // *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 2018. V. 91. P. 1182–1191.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.062>
- Kundu B., Legrand D., Gahalaut K., Gahalaut V.K., Mahesh P., Kamesh Raju K.A., Catherine J.K., Ambikapathy A., Chadha R.K. The 2005 volcano-tectonic earthquake swarm in the Andaman Sea: Triggered by the 2004 great Sumatra-Andaman earthquake // *Tectonics.* 2012. V. 31. TC5009.
<https://doi.org/10.1029/2012TC003138>
- Kwiatak G., Martínez-Garzón P., Dresen G., Bohnhoff M., Sone H., Hartline C. Effects of long-term fluid injection on induced seismicity parameters and maximum magnitude in northwestern part of The Geysers geothermal field // *J. Geophys. Res. Solid Earth.* 2015. V. 120. P. 7085–7101.
<https://doi.org/10.1002/2015JB012362>
- Kwiatak G., Saarno T., Ader T., Bluemle F., Bohnhoff M., Chendorain M., Dresen G., Heikkinen P., Kukkonen I., Leary P., Leonhardt M., Malin P., Martínez-Garzón P., Passmore K., Passmore P., Valenzuela S., Wollin C. Controlling fluid-induced seismicity during a 6.1-km-deep geothermal stimulation in Finland // *Science Advances.* 2019. V. 5(5). P. eaav7224.
<https://doi.org/10.1126/sciadv.aav7224>
- Laderach C., Korger E.I.M., Schlindwein V., Muller C., Eckstaller A. Characteristics of tectonomagmatic earthquake swarms at the Southwest Indian Ridge between 16° E and 25° E // *Geophys. J. Int.* 2012. V. 190. P. 429–441.
- Langenbruch C., Ellsworth W.L., Woo J.-U., Wald D. J. Value at induced risk: injection-induced seismic risk from low-probability, high-impact events // *Geophysical Research Letters.* 2020. V. 47. № 2.
<https://doi.org/10.1029/2019GL085878>
- Mallika K., Gupta H., Shashidhar D., Purnachandra Rao N., Yadav A., Rohilla S., Satyanarayana H.V.S., Srinagesh D. Temporal variation of b value associated with $M \sim 4$ earthquakes in the reservoir-triggered seismic environment of the Koyna–Warna region, Western India // *J. Seismol.* 2013. V. 17. P. 189–195.
<https://doi.org/10.1007/s10950-012-9318-3>
- Manga M., Wang C.-Y. Earthquake Hydrology / Treatise on Geophysics. 2-n edition. V. 4. Earthquake Seismology. Elsevier. 2015. P. 305–328.
- Martínez-Garzón P., Kwiatak G., Sone H., Bohnhoff M., Dresen G., Hartline C. Spatiotemporal changes, faulting regimes, and source parameters of induced seismicity: A case study from The Geysers geothermal field // *J. Geophys. Res. Solid Earth.* 2014. V. 119. P. 8378–8396.
<https://doi.org/10.1002/2014JB011385>
- Mousavi S.M., Ogwari P.O., Horton S.P., Langston C.A. Spatio-temporal evolution of frequency-magnitude distribution and seismogenic index during initiation of induced seismicity at Guy-Greenbrier, Arkansas // *Physics of the Earth and Planetary Interiors.* 2017. V. 267. P. 53–66.
<https://doi.org/10.1016/j.pepi.2017.04.005>
- Panda D., Kundu B., Gahalaut V.K., Bürgmann R., Jha B., Asaithambi R., Yadav R.K., Vissa N.K., Bansal A.K. Seasonal modulation of deep slow-slip and earthquakes on the Main Himalayan Thrust // *Nature Communications.* 2018. V. 9. P. 4140.
<https://doi.org/10.1038/s41467-018-06371-2>
- Panza G.F., Peresan A., Zuccolo E. Climate modulation of seismicity on the Alpine-Himalayan mountain ranges // *Terra Nova.* 2011. V. 23. P. 19–25.
- Passarelli L., Hainzl S., Cesca S., Maccaferri F., Mucciarelli M., Roessler D., Corbi F., Dahm T., Rivalta E. Aseismic transient driving the swarm-like seismic sequence in the Pollino range, Southern Italy // *Geophys. J. Int.* 2015. V. 201. P. 1553–1567.
- Peresan A., Cocetta F., Panza G.F. Seasonal modulation of seismicity: the competing/collaborative effect of the snow and ice load on the lithosphere. 2017.
<https://arxiv.org/abs/1702.06292>
- Ruiz-Barajas S., Santoyo M.A., Benito Oterino M.B., Alvarado G.E., Climent A. Stress transfer patterns and local seismicity related to reservoir water-level variations. A case study in central Costa Rica // *Nature.* 2019. V. 9. P. 5600.
<https://doi.org/10.1038/s41598-019-41890-y>
- Shashidhar D., Mallika K., Mahato C. et al. A Catalogue of Earthquakes in the Koyna-Warna Region, Western India (2005–2017) // *J. Geological Society of India.* 2019. V. 93. P. 7–24.
- Simpson D.W., Leith W.S., Scholz, C.H. Two types of reservoir-induced seismicity // *Bull. Seismol. Soc. Am.* 1988. V. 78. № 6. P. 2025–2040.
- Simpson D.W., Stachnik J.C., NegmatoullaeV S.K. Rate of Change in Lake Level and Its Impact on Reservoir Triggered Seismicity // *Bulletin of the Seismological Society of America.* 2018. V. 108(5B). P. 2943–2954.
<https://doi.org/10.1785/0120180026>
- Smirnov V., Ponomarev A., Bernard P., Bourouis S. Field Experiment in Soultz-sous-Forêts, 1993: Changes of the Pattern of Induced Seismicity // *Acta Geophysica.* 2013. V. 61. P. 1598–1625.
<https://doi.org/10.2478/s11600-013-0150-0>
- Talwani, P., Chen L., Gahalaut K. Seismogenic permeability, k_s // *J. Geophys. Res.* 2007. № B07309. P. 112.
<https://doi.org/10.1029/2006JB004665>

Ueda T., Kato A. Seasonal variations in crustal seismicity in San-in District, Southwest Japan // *Geoph. Res. Lett.* 2019. V. 6. P. 3172–3179.

<https://doi.org/10.1029/2018GL081789>

Vlcek J., Fischer T., Dorbath C. b-value mapping of injection-induced earthquakes and earthquake swarms // *Geophysical Research Abstracts*. 2014. V. 16. EGU2014-12375-1

Vorobieva I., Shebalin P., Narteau C. Condition of Occurrence of Large Man-Made Earthquakes in the Zone of Oil Production, Oklahoma // *Izv., Phys. Solid Earth*. 2020. V. 56. P. 911–919.

<https://doi.org/10.1134/S1069351320060130>

Wilson M.P., Foulger G.R., Gluyas R.J., Davies R.J., Julian B.R. Hiquake: the human-induced earthquake database // *Seismol. Res. Lett.* 2017. V. 88. № 6. P. 1560–1565.

Xue L., Johnson C.W., Fu Y., Bürgmann R. Seasonal seismicity in the western branch of the East African Rift System // *Geoph. Res. Lett.* 2020. V. 47. № 6.

<https://doi.org/10.1029/2019GL085882>

Yadav A., Bansal B.K., Pandey A.P. Five decades of triggered earthquakes in Koyna-Warna Region, Western India – A review // *Earth-Science Reviews*. 2016. V. 162. P. 433–450.

Seasonal Variations in the b -value of the Reservoir-Triggered Seismicity in the Koyna–Warna Region, Western India

V. B. Smirnov^{a, b, *}, M. G. Potanina^{a, b}, T. I. Kartseva^{a, b}, A. V. Ponomarev^b,
A. V. Patonin^c, V. O. Mikhailov^{a, b}, and D. S. Sergeev^{a, b}

^a*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^b*Faculty of Physics, Moscow State University, Moscow, Russia*

^c*Geophysical Observatory “Borok,” Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Borok, Yaroslavl oblast, Russia*

*w-mail: vs60@mail.ru

Based on the analysis of local earthquake catalog data, fine features in the behavior of seasonal components of induced seismicity in the Koyna–Warna region, western India, are revealed. The seasonal variations in seismicity associated with annual water level fluctuations in the Koyna and Warna reservoirs have local maxima within a year, which correspond to the known mechanisms of immediate and delayed response of the reservoir-triggered seismicity. The superposed epoch analysis method in combination with statistical modeling of random earthquake catalogs revealed regular changes in the b -value of the frequency–magnitude relationship of the earthquakes within the annual cycle of seasonal seismicity fluctuations. The minimum b -values fall in the intervals of the maxima in both the immediate and delayed seismic responses. The maximum b -values are observed at the rise and fall phases of the water level in the reservoirs. The pattern of the changes in seismicity together with the b -value behavior at the activation phase of the immediate response of the reservoir-triggered seismicity is consistent with the scenario of a gradual redistribution of the failure process from lower to higher scale levels, characteristic of the activation of transient seismicity. In a pilot laboratory experiment on cyclic initiation of fracture process by pore pressure in a granite sample extracted from a well in the Koyna–Warna region of reservoir-triggered seismicity, the patterns of the changes in the acoustic regime, similar to the seasonal features of the Koyna–Warna region seismicity, are found.

Keywords: local earthquake catalog, seasonal components, mechanism of immediate and delayed response, immediate response activation stage, cyclic initiation by pore pressure