

УДК 550.34.063, 550.34.06.013.24

Динамика параметров среднеглубинной сейсмичности перед крупными землетрясениями южно-азиатских сейсмофокальных зон

© 2023 г. А.В. Михеева^{1,2}

¹ИВМиМГ СО РАН, г. Новосибирск, Россия; ²ИНГГ СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Поступила в редакцию 10.10.2022 г.

Аннотация. Приводится результат исследования по выявлению пространственно-временной связи между сильными коровыми толчками и предвещающей их умеренной среднеглубинной сейсмичностью. С этой целью в окрестностях сильных событий Южно-Азиатского региона с $M_s \geq 7.5$ и $H < 50$ км за период 26.07.1999 г. – 31.08.2017 г. рассматривается поведение во времени крипекса землетрясений с $H \geq 50$ км и его парная корреляция с графиками магнитуды и глубины, а также пространственные аномалии крипекса за год и более до главного события. С помощью этого подхода в области подготовки крупных толчков выявлены следующие закономерности: в пространстве – наличие высокого градиента крипекса (в частности, граничный переход между положительной и отрицательной его аномалией), по времени – прямая корреляция графиков магнитуды и крипекса, свидетельствующая о создании в период подготовки очага условий строго детерминированного влияния размера очага на крипекс. Обе закономерности могут быть следствием существенного повышения разнородности среды в глубинной области будущего очага.

Ключевые слова: среднеглубинная сейсмичность, механизм очага, крипекс, корреляция графиков изменения параметров землетрясений.

Для цитирования: Михеева А.В. Динамика параметров среднеглубинной сейсмичности перед крупными землетрясениями южно-азиатских сейсмофокальных зон // Российский сейсмологический журнал. – 2023. – Т. 5, № 2. – С. 51–60. DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2023.2.04>. – EDN: CGGNOM

Введение

С помощью включённых автором в комплекс методов геодинимического анализа [Vazhenin *et al.*, 2017] алгоритмов расчёта крипекс-параметра [Mikheeva, Kalinnikov, 2021] можно исследовать наличие признаков подготовки сильных землетрясений в изменении этого параметра для среднеглубинной сейсмичности во времени и в пространстве.

В работах [Mikheeva, 2021; Mikheeva, Kalinnikov, 2022] на примере Южно-Азиатского региона было показано, что зоны субдукции, характеризующиеся «холодным хрупким разрушением», в целом имеют отрицательное усреднённое значение крипекса по сейсмичности на глубинах H от 50 до 160 км. Однако, учитывая, что в областях погружения слэба в мантию его термодинамическое состояние быстро изменяется (сопровождается твердотельными и микроструктурными преобразованиями, например, вследствие дегидрата-

ции), характеристики землетрясений в них могут также существенно меняться как с ростом глубины погружения [Никитина, Родкин, 2020], так и, очевидно, во времени для каждой отдельной пространственной аномалии.

В настоящей работе продолжено исследование по выявлению пространственно-временной связи между сильными коровыми толчками ($M_s \geq 7.5$) и предвещающей их среднеглубинной сейсмичностью [Mikheeva, 2021; Mikheeva, Kalinnikov, 2022]. Выявление такой связи позволило бы говорить о выраженных в крипекс-параметре C_r прогностических признаках крупных коровых землетрясений и подтвердило бы тезис о воздействии на такие события со стороны глубинных процессов, связанных с перемещением вещества в верхней мантии. Впервые этот тезис был выдвинут К. Моги [Mogi, 1973; 2004], который отмечал важные особенности взаимосвязи между глубокофокусными и мелкофокусными землетрясениями в зонах субдукции:

коровые землетрясения предваряются возрастанием глубинной сейсмической активности, а сильный толчок возникает после глубинной активизации.

С целью выявления такой взаимосвязи в окрестности всех событий Южно-Азиатского региона с $M_s \geq 7.5$ и $H < 50$ км рассматриваются поведение во времени рассчитанного для землетрясений с $H \geq 50$ км графика крипекса $Cr(t)$ (точнее, его корреляция с графиками магнитуды $M_s(t)$ и глубины землетрясения $H(t)$ [Mikheeva, 2021]), а также пространственные аномалии $Cr(s)$ за год и более до главного события.

Краткое описание методов исследования и данных

Исследование выполнялось в среде геоинформационной системы GIS-ENDDB [Vazhenin et al., 2017] с использованием двух методов расчёта крипекса: модифицированного Cr_{N_cat} [Mikheeva, Kalinnikov, 2021] и классического Cr_{0_cat} [Прозоров, Хадсон, 1974; Неверова, 2009], а также данных регионального каталога CSN [Каталог землетрясений ..., 2022], содержащего параметры 58931 землетрясения по всему миру за период с 26.07.1999 г. по 31.08.2017 г. с магнитудами: M_s и m_b для коровых землетрясений, а также m_b и M_b для глубинных событий ($H \geq 50$ км). Построенная средствами MS Excel полиномиальная линия тренда, усредняющая график распределения модифицированного крипекса Cr_N относительно магнитуды M_s событий данной выборки каталога CSN, имеет формулу:

$$Cr_N(M_s) = -0.0004 \cdot M_s^3 - 0.0132 \cdot M_s^2 + 0.3394 \cdot M_s - 1.298.$$

Эта формула используется здесь для приведения Cr_N каждого события к средним значениям этого параметра по выбранному каталогу, согласно методике, описанной в работах [Mikheeva, Kalinnikov, 2021; Михеева, Калинин, 2021]. В результате рассчитывается модифицированный параметр крипекса Cr_{N_cat} (или Cr_{N_CSN} при работе с каталогом CSN), используемый в данном исследовании.

Для выявления пространственных аномалий крипекс-параметра до и после сильнейших событий региона применяется реализованный в GIS-ENDDB метод построения временной последовательности зональных карт на основе пространственной интерполяции усреднённых по ячейке значений крипекса в узлах регулярной сетки [Mikheeva, 2021] (рис. 1).

Для оценки синхронного поведения во времени различных параметров выбранного роя зем-

летрясений в работе используется расчёт коэффициента парной корреляции (или корреляции Пирсона $K_{кор}$) на интервале времени с одним краем, фиксированным на нулевом значении времени (соответствующем моменту сильного корового события, к которому относится рой), и скользящим другим краем (левым или правым относительно нуля).

Более детальный алгоритм этой операции состоит в следующих шагах:

1. Правый край временного окна выборки двух сравниваемых параметров (например, крипексов C^n и магнитуд M^n) устанавливается на заведомо большом интервале t_n до главного события (например, за ~ 3 года до него), левый край – момент главного события $t_0 = 0$;

2. Рассчитывается параметр $K_{кор}$, характеризующий линейную зависимость между двумя полученными выборками $C^n = (C_n, \dots, C_1)$ и $M^n = (M_n, \dots, M_1)$ по формуле [Тюрин, Макаров, 2003]:

$$K_{кор} = \frac{\sum_{i=1}^n (C_i - \bar{C})(M_i - \bar{M})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (C_i - \bar{C})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2}}$$

где \bar{C} и \bar{M} – выборочные средние C^n и M^n ;

3. Правый край окна смещается к следующей точке каждой из двух выборок и п. 2 выполняется на выборках $C^{n-1} = (C_{n-1}, \dots, C_1)$ и $M^{n-1} = (M_{n-1}, \dots, M_1)$;

4. П. 3 повторяется $n-1$ раз, в результате чего получаем множество K^n из n значений коэффициента корреляции $K_{кор}$;

5. П. 1–4 повторяются для выборок с фиксированным правым краем временного окна: $t_0 = 0$ и скользящим правым краем до заведомо большого интервала t_m после главного события, в результате множество значений коэффициента корреляции K^n дополняется ещё m значениями;

6. Анализируем выборку K^{n+m-1} . По скачку значения модуля $|K_{кор}|$ до достаточно высокого значения (более 0.6), достигаемому с некоторого момента времени перед крупным событием, определяется длительность интервала подготовки этого события и интервала релаксации.

Отметим, что сопоставление поведения во времени параметров Cr_{N_cat} и более простого в расчёте Cr_{0_cat} (являющегося результатом приведения $Cr_0 = M_s - m_b$ каждого события к средним по исследуемому каталогу значениям крипекса, получаемым по полигональному тренду распределения всех событий каталога $Cr_0(M_s)$ [Неверова, 2009]) показало, что для среднеглубинных землетрясений разница в величинах коэффициента корреляции графиков $Cr_{N_cat}(t)$ и $Cr_{0_cat}(t)$

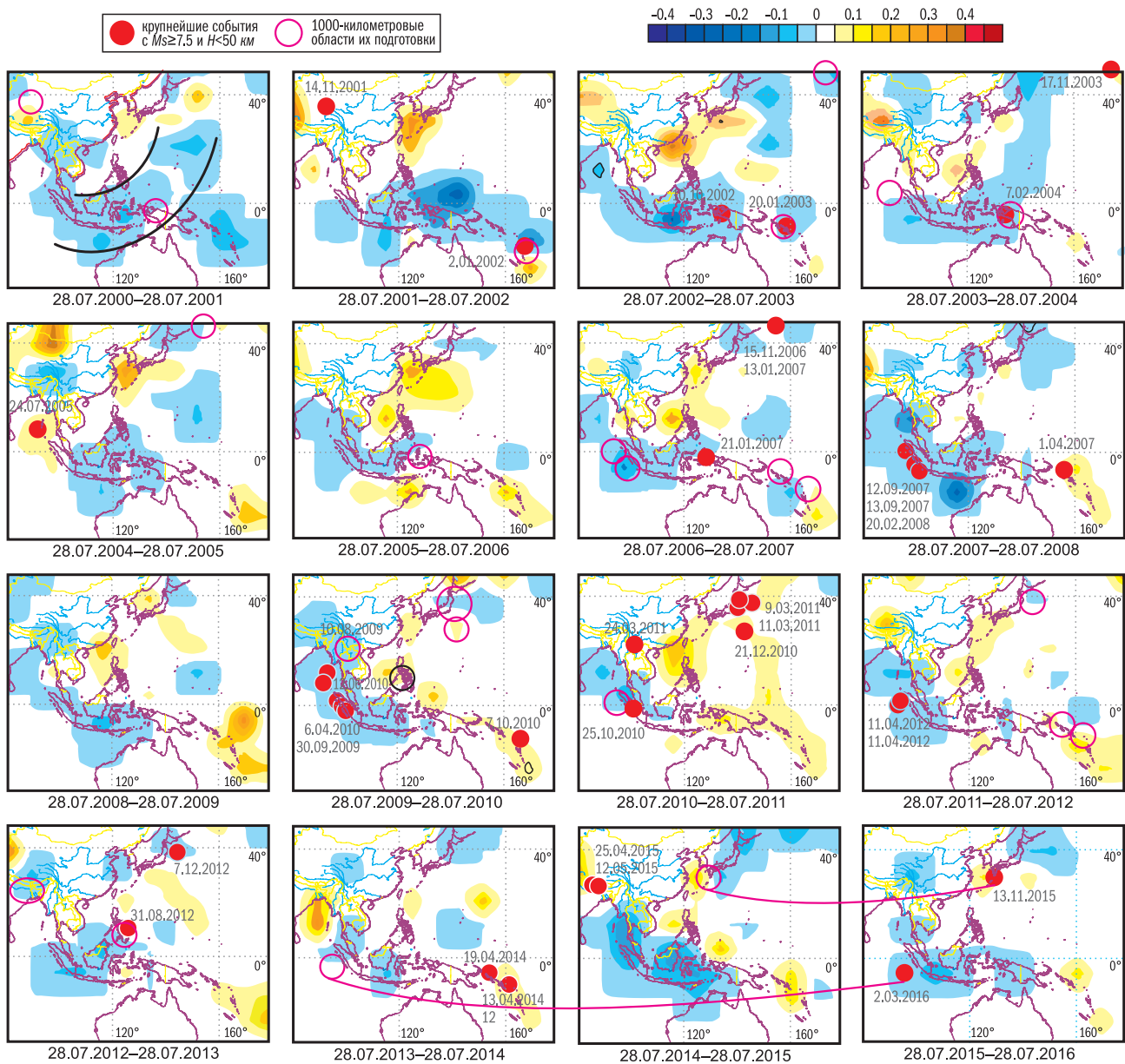


Рис. 1. Динамика аномалий распределения усреднённого крипекса $Cr_{N,CSN}$ по годовым интервалам за 2000–2016 гг. в Южно-Азиатском регионе, $50 \leq H < 160$ км, ячейка $9 \times 9^\circ$.

Для примера дугами отмечен однолетний период подготовки события 13.11.2015 г. и двухлетний – события 02.03.2016 г.

с графиком $M_s(t)$ в подавляющем большинстве случаев составляет около 1% и в целом не превышает 10%. Таким образом, ранее выявленные [Михеева, Калинин, 2022] и подтверждаемые в данной работе закономерности корреляции в полной мере относятся и к классическому крипекс-параметру $Cr_{0,cat}$. Отметим, что в качестве аппроксимации распределения Cr_0 для указанной выборки каталога CSN выбрана прямая линия: $Cr_0(M_s) = 0.429 \cdot M_s - 2.1041$, поскольку полиномиальная (степени 3) линия тренда имеет близкую к ней достоверность аппроксимации ($R^2 = 0.5205$

для полиномиальной, против $R^2 = 0.5198$ – для линейной аппроксимации).

Результат исследования распределений крипекса среднеглубинной сейсмичности Южно-Азиатского региона

Рассмотрим карты усреднённого крипекса среднеглубинных землетрясений в области Южно-Азиатского региона и взаимосвязь аномалий его распределения с крупнейшими событиями региона за 2000–2016 гг. (рис. 1).

Хотя здесь и присутствуют кратковременные (от года до нескольких лет) и более устойчивые (например, в районе Филиппинского моря) положительные аномалии усреднённого крипекса, характеризующие влияние на хрупкую субдукцию повышающих крипекс процессов, однако в целом среднеглубинная сейсмичность региона характеризуется отрицательным усреднённым крипексом. Наиболее масштабная пространственная аномалия отрицательного значения крипекса широкой полудугой (см. первую карту на рис. 1) охватывает область субдукции, и именно в пределах этой обобщённой аномалии происходят почти все крупнейшие события с $M_s \geq 7.5$ и $H < 50$ км (обозначенные красными кружками на следующих картах рис. 1). Таких событий, некоторые из которых являются, в свою очередь, парными или множественными, за 2000–2016 гг. насчитывается 25, из них только одно событие (13.11.2015 г.) произошло в области устойчивой положительной аномалии в северной части Филиппинского моря, пять — на границе устойчивой после 2003 г. положительной аномалии крипекса близ о. Вануату и три — на континенте (Тибет, Индокитай (Мьянма)).

Как показывает динамика крипекс-аномалий (рис. 1), накануне каждого крупнейшего события (за год или два года до него) в 1000-километровой области его подготовки присутствует область повышенного градиента крипекса: внешняя граница отрицательной аномалии (иногда повышенной интенсивности) или пограничная область между положительной и отрицательной аномалиями. Эти области обведены красной окружностью диаметром 1000 км на картах, предшествующих каждому из рассмотренных крупных событий (рис. 1). В случаях землетрясений, происходящих в области устойчивой положительной аномалии, накануне наблюдается её исчезновение. Отметим, что хотя не все области повышенного градиента крипекса предваряют крупное событие, однако их присутствие в рассматриваемых случаях позволяет судить о необходимых (хотя и не достаточных) геодинамических условиях, характеризующихся этими аномалиями, поскольку все рассмотренные крупные землетрясения характеризуются указанной закономерностью в период подготовки.

Например, за три года до двойного события 07.10.2009 г. на месте устойчивой положительной аномалии 2007–2012 гг. в течение четырёх лет присутствует граница между положительной и отрицательной аномалиями, а за год до серии событий 12.04.–19.04.2014 г. на том же месте возникает нейтральная область. За год до

события 13.11.2015 г. на месте устойчивой положительной аномалии, проявляющейся в течение 15 лет, возникает нейтральная область. За два года до события 31.08.2012 г. на месте семилетней (2001–2008 гг.) пограничной области между «+» и «-» аномалиями возникает нейтральная область (рис. 1). Интересно, что через год после интенсивной отрицательной аномалии 28.07.2014 г. — 28.07.2015 г., охватывающей Зондскую и, частично, Марианскую зоны субдукции, наступает затишье сильных коровых событий по всей Зондско-Марианской кольцевой зоне, продолжающееся по настоящее время (лишь во внутренней части этого кольца происходит одно событие 28.09.2018 г. с $M_s = 7.5$).

Исследованные ранее графики $Cr_{N_CSN}(t)$ и $M_s(t)$ по глубинной сейсмичности для восьми зон подготовки крупнейших событий за 1999–2008 гг. [Михеева, Калинин, 2022] показали их синхронность по фазе, продолжающуюся от нескольких месяцев до полугода перед каждым событием. Например, на рис. 2 оранжевой линией отмечен временной отрезок, характеризующийся прямой синхронной корреляцией трёх графиков: $M_s(t)$, $H(t)$ и $Cr_{N_CSN}(t)$ за 102 дня до главного события и в течение 80 дней после него. Коэффициент парной корреляции графиков $M_s(t)$ и $Cr_{N_CSN}(t)$: $K = 0.8956$ (без отмеченной овалом точки исключения — заниженного значения крипекса в связи с относительно небольшой глубиной события: $H = 50$ км), тогда как для всего роя: $K = 0.1791$. При этом коэффициент корреляции графиков $H(t)$ и $Cr_{N_CSN}(t)$ составляет $K = 0.8065$, тогда как для всего роя: $K = 0.062$. Однако значительно чаще график изменения глубины $H(t)$ не синхронен с двумя предыдущими графиками, не считая отдельных его фрагментов, где, очевидно, присутствует дифференциация по глубине некоторого параметра, влияющего на значение крипекса (например, температуры). Отсутствие в целом корреляции с глубиной можно объяснить меньшей дифференцированностью по глубине реологических свойств среды в верхней мантии по сравнению с коровыми слоями. Далее, после крупного корового толчка синхронность $Cr_{N_CSN}(t)$ и $M_s(t)$ либо полностью нарушается, либо сменяется на обратную корреляцию (т.е. синхронность в противофазе), либо не изменяется (последнее часто происходит для вертикальных подвижек: взбросов, сбросов и взрезов) или изменяется не сразу после толчка, а постепенно. Это говорит о том, что не только состояние среды влияет на подготовку крупного землетрясения, но и сам толчок изменяет это состояние, что и отражается во взаимозависимостях параметров очага.

Дальнейшие исследования зон подготовки крупнейших событий 2008–2017 гг. также показали, что графики $Cr_{0_CSN}(t)$ и $M_S(t)$ по глубинной сейсмичности демонстрируют синхронную корреляцию от нескольких месяцев до полутора лет до события. Например, на рис. 3 временной отрезок, подчеркнутый оранжевой линией, характеризуется прямой синхронной корреляцией графиков $M_S(t)$ и $Cr_{N_CSN}(t)$ (коэффициент парной корреляции $K=0.63$, тогда как для всего роя $K=0.21$), начинающейся за 281 день до главного события и растущей по мере приближения момента главного толчка (за 205 дней до события коэффициент корреляции достигает уже значения $K=0.77$). В то же время корреляция графиков $H(t)$ и $Cr_{N_CSN}(t)$ хоть и достигает на некото-

рых интервалах высоких значений (например, $K=0.82$ за 149 дней до главного толчка, тогда как для всей последовательности $K=0.03$), но носит неустойчивый характер по t .

Парная корреляция параметров Cr и M_S , свидетельствующая о строго детерминированном влиянии магнитуды (возможно, пропорциональной размеру очага [Жалковский, Мучная, 1986]) на крипекс в период подготовки сильнейшего толчка, в сочетании с наличием в этот же период и градиента пространственных аномалий усреднённого крипекса может быть связана с повышенной разнородностью среды в области подготовки толчка. Возможность пропорциональной зависимости значения крипекса от геометрии очага, связанной со структурой среды в фокальной

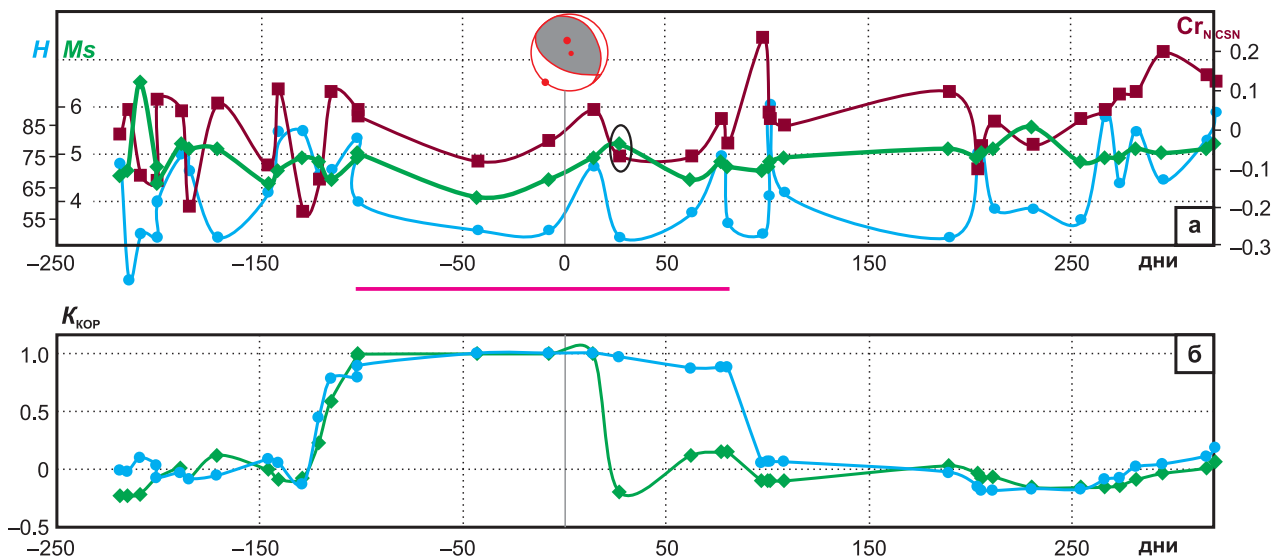


Рис. 2. Распределение параметров среднеглубинной сейсмичности ($s \geq 50$ км) в окрестности двойного корового землетрясения 01.04.2007 г. с $M_S=7.7-7.9$, $H=10$ км (Папуа), соответствующего нулевой точке времени: а – $M_S(t)$ (зелёный график), $H(t)$ (синий) и $Cr_{N_CSN}(t)$ (коричневый); б – $K_{кор}(t)$ по скользящему интервалу (описанному в тексте) для парной корреляции $M_S(t)$ и $Cr_{N_CSN}(t)$ (зелёный график) и парной корреляции $H(t)$ и $Cr_{N_CSN}(t)$ (синий)

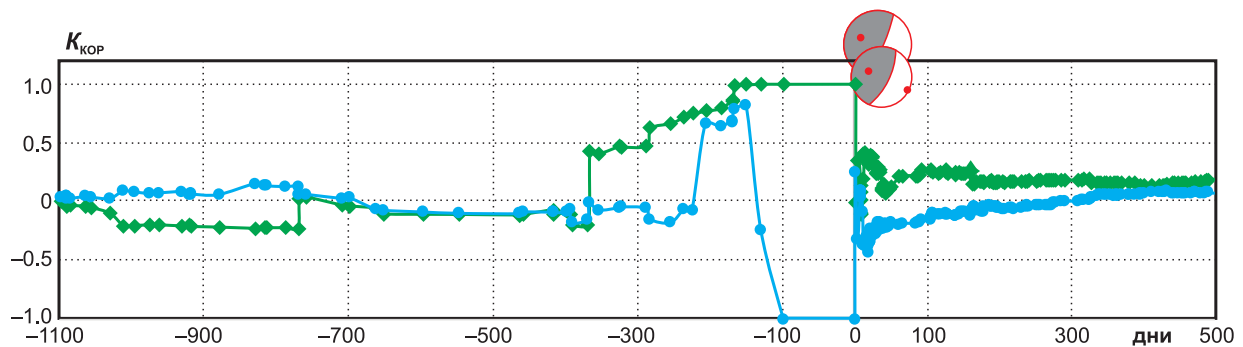


Рис. 3. $K_{кор}(t)$ по скользящему интервалу для парной корреляции $M_S(t)$ и $Cr_{N_CSN}(t)$ (зелёный график) и парной корреляции $H(t)$ и $Cr_{N_CSN}(t)$ (синий) среднеглубинной сейсмичности ($s \geq 50$ км) в окрестности множественного корового землетрясения 9–11 марта 2011 г. с магнитудами 7.6, 8.6, 7.7 и 7.7, $H=10-20$ км (близ острова Хонсю), отмеченного нулевым значением времен [Каверина, Прозоров, 1994].

области, отмечалось ещё в работе [Каверина, Прозоров, 1994]. Можно предположить, что в очагах крупных землетрясений южно-азиатских зон субдукции хрупкое разрушение блоков подвигающейся коры соседствует с процессами поступления глубинного мантийного материала [Михеева, Калинин, 2022], что обеспечивает создание дополнительных плотностных неоднородностей в очаге и влияет на аномальное напряжённое состояние среды перед землетрясением. Подобные процессы могут отражаться на картах усреднённого крипекса в глубинной зоне подготовки крупного землетрясения в виде присутствия градиентной области перехода к отрицательной аномалии.

Точные значения интервалов высокого значения корреляции графиков крипекса и магнитуды, а также сами величины корреляции даны в таблице. Отметим, что в таблицу добавлено также одно не коровое событие (30.09.2009 г., $H=81$ км). Немногие события характеризуются отрицательным коэффициентом корреляции (т.е. обратной корреляцией) – либо это повторные толчки в изменённой предыдущими крупнейшими толчками среде очага, либо толчки, характеризующиеся прямой корреляцией Cr и H (значение которой дано в скобках) на тех же или чуть меньших интервалах.

Таблица. Результаты корреляции графиков $M_S(t)$ и $Cr_{N_CSN}(t)$ глубинной сейсмичности ($c H \geq 50$ км) в окрестности коровых землетрясений 1999–2017 гг.

Дата, дд.мм.гггг	M_S	H , км	Область	Длительность в днях	Механизм	$K_{кор}$
14.11.2001	7.6	11	Тибет	135	сдвиг	0.72
02.01.2002	7.5	27	Папуа	230	взрез	0.58
10.10.2002,	7.5,	22,	Индонезия	572,	сдвиг	0.64
07.02.2004	7.5	11		89		0.89
20.01.2003	7.6	21	Папуа	173	взброс	0.63
24.07.2005	7.6	19	Суматра	34	сдвиг	0.54
21.01.2007	7.5	22	Индонезия	441	взброс	0.60
15.11.2006,	8.0	9	Пролив Фриза	335	взрез (2)	0.62 (2)
13.01.2007	8.1	10				
01.04.2007	7.9, 7.7	10	Папуа	102	взброс	0.90
12.09.2007 (2),	8.6, 8.2,	25, 15,	Суматра	139	взрез	0.77 (3), 0.63
13.09.2007,	7.7,	10,				
20.02.2008	7.7	30				
10.08.2009	7.7	25	Андаманские острова	403	сброс	0.51
07.10.2009 (2)	7.8, 7.9	38 35	Соломоновы острова	121	взброс (2)	0.74 (2)
30.09.2009,	7.6,	81	Суматра	247	взброс, взрез (2), сдвиг (2)	0.74
06.04.2010,	7.9,	34,		73		0.72
25.10.2010,	7.7,	21,		146		-0.72
11.04.2012 (2)	8.6, 8.2	21, 18		15		-0.72
12.06.2010	7.6	31	Суматра	297	взбросо-сдвиг	-0.90 (0.79)
21.12.2010	7.6	14	Марианские острова	397	сброс	-0.74 (0.55)
09.03.2011,	7.6,	10	Хонсю	205(4)	взрез (2),	0.77 (4)
11.03.2011 (3)	8.6, 7.7 (2),	20 (3)				
07.12.2012	7.6	32				
24.03.2011	7.6	20	Индокитай	1126	сдвиг	0.78
31.08.2012	7.5	31	Филиппины	495	взброс	0.72
12.04.2014,	7.9,	30 (3)	Соломоновы острова	138	взброс (3)	0.60 (3)
13.04.2014,	7.5,					
19.04.2014	7.6					
25.04.2015,	8.2,	20	Тибет	393	взрез (2)	0.77
12.05.2015	7.7	10				
13.11.2015	7.5	10				
02.03.2016	7.9	20	Суматра	667	сдвиг	0.78

Примечание – Числа (2) или (3) указывают количество крупнейших событий одной даты (двойные и тройные толчки), охватываемые одним интервалом подготовки.

Отметим, что для событий после 2009 г. исследовалось два параметра — Cr_N и Cr_0 . Поскольку по фазе и амплитуде они практически абсолютно коррелируют между собой для всех рассмотренных землетрясений (например, рис. 4), то в таблице для событий после 2009 г. приводится коэффициент $K_{кор}$ для более простого в расчёте параметра Cr_0 .

Заключение

В настоящей работе продолжено исследование признаков подготовки сильных землетрясений по изменению параметра крипекс в среднеглубинной части очага этих землетрясений по времени и в пространстве. В частности, с этой целью для соответствующего роя землетрясений (в очаге будущего крупного корового события) исследована парная корреляция динамики параметров среднеглубинной сейсмичности: крипекса, магнитуды и глубины.

В области подготовки сильного корового землетрясения (за один-два года до него) выявлены две закономерности: в пространстве — наличие высокого градиента крипекса (в частности, граничный переход между положительной и отрицательной его аномалией), по времени — прямая корреляция графиков $M_s(t)$ и $Cr(t)$, вероятно, свидетельствующая о создании в период подготовки очага условий строго детерминированного влияния размера очага на крипекс, выражающегося в прямо пропорциональном соотношении крипекса и магнитуды. Последняя зависимость может являться следствием установления организованного состояния среды в очаге, благоприятного для завершения подготовки крупного корового землетрясения процессами в глубинных слоях верхней мантии. Т.е. свидетельствовать, согласно общепринятым представлениям о причинах взаимосвязи крипекса с размером

очага и температурой материала [Каверина, Прозоров, 1994; Kaverina et al., 1996], о повышенной плотностной и температурной гетерогенности среды в области подготовки толчка. В зонах субдукции повышение гетерогенности среды накануне крупного толчка может объясняться активизацией процессов поступления глубинного мантийного материала, соседствующих здесь с процессами хрупкого разрушения в блоках пододвигающейся коры. Наличие градиентной зоны перехода от положительного к отрицательному усреднённому крипексу косвенно подтверждает этот сценарий, свидетельствуя также об одновременном влиянии в этой зоне двух противоположных глубинных процессов (хрупкого разрушения и вязкой текучести материала).

Таким образом, описанный в работе подход помогает оценить особенности геодинамической ситуации в области подготовки будущих крупных событий и подтвердить тезис о возможном воздействии на крупные коровые события со стороны глубинных процессов. В совокупности с комплексом других методов выявления неоднородного строения земной коры, в частности, приуроченности землетрясений к иерархической системе разломов, рассмотренный подход позволит развивать «модели подготовки землетрясений применительно к неоднородным средам» [Садовский и др., 1986].

Работа выполнена в рамках государственного задания ИВМиМГ СО РАН № 0251-2021-0004 и ИНГГ СО РАН № FWZZ-2022-0019.

Литература

Жалковский Н.Д., Мучная В.И. О точности определения наклона графика повторяемости землетрясений // Геология и геофизика. — 1987. — № 10. — С. 121–129.
Каверина А.Н., Прозоров А.Г. Вариации крипекса в зависимости от типа тектонических

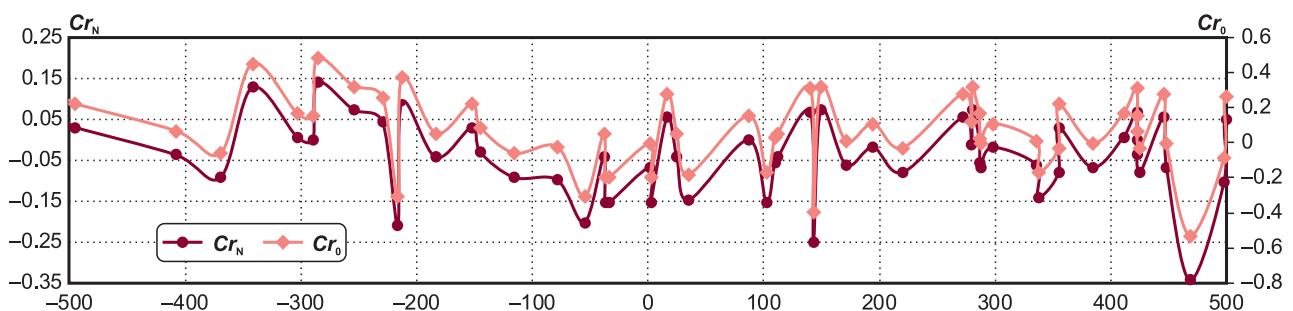


Рис. 4. Пример весьма высокой парной корреляции графиков $Cr_{N_CSN}(t)$ и $Cr_{0_CSN}(t)$ для фрагмента роя глубинных событий в окрестности землетрясения 31.08.2012 г.

На полном интервале роя (2000 дней) $K_{кор} = 0.99831$

и механизма очага: статистический анализ // Геодинамика и прогноз землетрясений. (Вычислительная сейсмология. Вып. 26). – М.: Наука, 1994. – С. 85–93.

Каталог землетрясений сети станций Китая // Национальный центр данных о землетрясениях [сайт]. – URL: <https://data.earthquake.cn/gcywfl/index.html> (дата обращения 17.03.2022).

Михеева А.В., Калинин И.И. Крипекс-анализ процессов в очаговых зонах крупных землетрясений средствами GIS-ENDDB // Российский сейсмологический журнал. – 2021. – Т. 3, № 4. – С. 7–17. DOI: 10.35540/2686-7907.2021.4.01. – EDN: HCYJIL

Михеева А.В., Калинин И.И. О влиянии глубинной сейсмичности на подготовку крупных землетрясений Южно-Азиатского региона // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2022. – Т. 4. – С. 124–131. DOI: 10.33764/2618-981X-2022-4-124-131. – EDN: KVLLBK

Михеева А.В. Примеры геоинформационного исследования сейсмичности Южно-Азиатского региона // Проблемы комплексного геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов [Электронный ресурс]: Труды Восьмой Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. Петропавловск-Камчатский. 26 сентября – 2 октября 2021 г. / Отв. ред. Д.В. Чебров. – Петропавловск-Камчатский: КФ ФИЦ ЕГС РАН, 2021. – С. 187–191. – DOI: 10.35540/903258-451.2021.8.34. – EDN: HMVECD

Неверова Н.П. Крипекс – характеристика очага землетрясения // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Четвертой Международной сейсмологической школы. – Обнинск: ГС РАН, 2009. – С. 127–129. – EDN: SWDUVP

Никитина М.А., Родкин М.В. Среднеглубинные землетрясения и связь сейсмичности зоны субдукции с метаморфизмом и глубинным флюидным режимом для Северного острова Новой Зеландии // Геосистемы переходных зон. – 2020. – Т. 4, № 1. – С. 103–115. DOI: 10.30730/2541-8912.2020.4.1.103-115. – EDN: GPBEZH

Прозоров А.Г., Хадсон Д. Зависимость между MLH и MPV от региональных условий и локальных вза-

имосвязей // Магнитуда и энергетическая классификация землетрясений: в 2-х томах. Т. 2. – М.: ИФЗ АН СССР, 1974. – С. 208–216.

Садовский М.А., Соболев Г.А., Андреев В.О., Бабичев О.В., Ирисова Е.Л., Кольцов А.В., Лыков В.И., Пономарев А.В., Понятовская В.И., Потужак В., Салов Б.Г., Терентьев В.А., Хромов А.А., Шамина О.Г. Исследование предвестников разрушения на модели неоднородной среды // Доклады Академии наук СССР. – 1986. – Т. 287, № 6. – С. 1354–1357.

Тюрин Ю.Н., Макаров А.А. Анализ данных на компьютере / Ред. В.Э. Фигурнов. – М.: Инфра-М, 2003. – 544 с.

Kaverina A.N., Lander A.V., Prozorov A.G. Global creepex distribution and its relation to earthquake-source geometry and tectonic origin // Geophysical Journal International. – 1996. – V. 125, Is. 1. – P. 249–265. DOI: 10.1111/j.1365-246X.1996.tb06549.x

Mikheeva A.V. The dynamics of parameters of individual earthquake swarm sequences in different geotectonic settings // Bulletin of the Novosibirsk Computing Center. Series: Mathematical Modeling in Geophysics. – 2021. – V. 23. – P. 43–56. – EDN: ZUMPPM

Mikheeva A.V., Kalinnikov I.I. Creepex as a parameter of seismo-geodynamic studies based on geo-information systems // Spatial data processing for monitoring of natural and anthropogenic processes: Proceedings of the All-Russian conference with International participation (SDM-2021) / Yu.I. Shokin, et al. (Eds.). – Novosibirsk, Russia, 2021. – P. 194–202. – URL: http://ceur-ws.org/Vol-3006/23_short_paper.pdf

Mogi K. Relationship between shadow and deep seismicity in the western Pacific region // Tectonophysics. – 1973. – N 17. – P. 1–22.

Mogi K. Deep seismic activities preceding the three large ‘shallow’ earthquakes off south-east Hokkaido, Japan – the 2003 Tokachi-oki earthquake, the 1993 Kushiro-oki earthquake and the 1952 Tokachi-oki earthquake // Earth Planets Space. – 2004. – N 56. – P. 353–357.

Vazhenin A.P., Mikheeva A.V., Dyadkov P.G., Marchuk An.G. The software using digital databases and GIS interface for detecting geodynamic structures // New trends in intelligent software methodologies, tools and techniques / H. Fujita, E. Herrera-Viedma (Eds.). – Amsterdam, Netherlands: IOS Press, 2017. – P. 576–592.

Сведения об авторе

Михеева Анна Владленовна, канд. физ.-мат. наук, науч. сотр. Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук (ИВМиМГ СО РАН); ст. науч. сотр. Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук (ИНГГ СО РАН), г. Новосибирск, Россия. E-mail: anna@omzg.sccc.ru

Dynamics of medium–deep seismicity parameters before large earthquakes in South Asian seismic focal zones

© 2023 A.V. Mikheeva^{1,2}

¹ICM&MG SB RAS, Novosibirsk, Russia; ²IPGG SB RAS, Novosibirsk, Russia

Received October 10, 2022

Abstract The study was continued to reveal the spatio-temporal relationship between strong crustal shocks and the moderate, medium-deep seismicity that precedes them. In the area of preparation of these shocks, the following regularities were revealed: in space – the presence of a high creepex gradient (in particular, the boundary transition between its positive and negative anomalies), in time – a direct correlation of the graphs MS(t) and Cr(t), indicating the creation in the period of preparation of the source under the conditions of a strictly determined influence of the source-size on creepex. Since the proportional dependence of the creepex on the geometric size of the source is usually associated with an increased heterogeneity of the medium in the source, it can be assumed that the processes of brittle fracture of blocks of the undercutting crust coexist here with the processes of inflow of deep mantle material, which ensures the heterogeneity of the properties of the medium in the area of preparation of large earthquakes in the South Asian subduction zones. This conclusion is confirmed on the average creepex anomaly maps by the presence of their increased gradient in the deep region of the preparation of these events.

Keywords Mid-depth seismicity, focal mechanism, creepex, correlation of graph changes in earthquake parameters.

For citation Mikheeva, A.V. (2023). [Dynamics of medium-deep seismicity parameters before large earthquakes in South Asian seismic focal zones]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 5(2), 51-60. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2023.2.04>. EDN: CGGHOM

References

- China Seismological Network. (2022). [CSN Catalog of the Earthquakes]. Retrieved from <https://data.earthquake.cn/gcywfl/index.html>. (In China).
- Kaverina, A.N., & Prozorov, A.G. (1994). [Variations of creepex depending on the type of tectonic structures and the focal mechanism: statistical analysis]. In *Geodinamiika i prognoz zemletryaseniy (Vychislitel'naia seismologiya. Vyp. 26)* [Geodynamics and forecast of earthquakes (Computational seismology. Issue 26)] (pp. 85-93). Moscow, Russia: Nauka Publ. (In Russ.).
- Kaverina, A.N., Lander, A.V., & Prozorov, A.G. (1996). Global creepex distribution and its relation to earthquake-source geometry and tectonic origin. *Geophysical Journal International*, 125(1), 249-265. DOI: [10.1111/j.1365-246X.1996.tb06549.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1996.tb06549.x)
- Mikheeva, A.V. (2021). [Examples of seismicity geoinformation research in the South Asian region]. In *Problemy kompleksnogo geofizicheskogo monitoringa seismoaktivnykh regionov: Trudy Vos'moi Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem. Petropavlovsk-Kamchatskii. 26 sentiabria - 2 oktiabria 2021 g. Otv. red. D.V. Chebrov* [Problems of complex geophysical monitoring of seismically active regions: Proceedings of the Eighth All-Russian scientific and technical conference with International participation. Petropavlovsk-Kamchatsky. September 26 - October 2, 2021. Ed. D.V. Chebrov] (pp. 187-191). Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia: KB GS RAS Publ. (In Russ.). DOI: [10.35540/903258-451.2021.8.34](https://doi.org/10.35540/903258-451.2021.8.34). EDN: HMVECD
- Mikheeva, A.V. (2021). The dynamics of parameters of individual earthquake swarm sequences in different geotectonic settings. *Bulletin of the Novosibirsk Computing Center. Series: Mathematical Modeling in Geophysics*, 23, 43-56. EDN: ZUMPPM
- Mikheeva, A.V., & Kalinnikov, I.I. (2021). [Creepex-analysis of processes in focal zones of large earthquakes by means of GIS-ENDDB]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 3(4), 7-17. (In Russ.). DOI: [10.35540/2686-7907.2021.4.01](https://doi.org/10.35540/2686-7907.2021.4.01). EDN: HCYJIL
- Mikheeva, A.V., & Kalinnikov, I.I. (2021). Creepex as a parameter of seismo-geodynamic studies based on geo-information systems. In *Spatial data processing for monitoring of natural and anthropogenic processes: Proceedings of the All-Russian conference with International participation (SDM-2021)* (pp. 194-202). Novosibirsk, Russia. Available at: http://ceur-ws.org/Vol-3006/23_short_paper.pdf

- Mikheeva, A.V., & Kalinnikov, I.I. (2022). [On the influence of deep seismicity on the preparation of large earthquakes in the South Asian region]. *InterEkspo Geo-Sibir'* [Interexpo Geo-Siberia], 4, 124-131. (In Russ.). DOI: 10.33764/2618-981X-2022-4-124-131. EDN: KVLLBK
- Mogi, K. (1973). Relationship between shadow and deep seismicity in the western Pacific region. *Tectonophysics*, 17, 1-22.
- Mogi, K. (2004). Deep seismic activities preceding the three large 'shallow' earthquakes off south-east Hokkaido, Japan - the 2003 Tokachi-oki earthquake, the 1993 Kushiro-oki earthquake and the 1952 Tokachi-oki earthquake. *Earth Planets Space*, 56, 353-357.
- Neverova, N.P. (2009). [Creepex – characteristics of an earthquake source]. In *Materialy Chetvertoi Mezhdunarodnoy seismologicheskoy shkoly "Sovremennyye metody obrabotki i interpretatsii seismologicheskikh dannykh"* [Proceedings of the Fourth International Seismological Workshop "Modern Methods of Processing and Interpretation of Seismological Data"] (pp. 127-129). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.). EDN: SWDUVP
- Nikitina, M.A., & Rodkin, M.V. (2020). [Mid-deep earthquakes and the relationship of seismicity of the subduction zone with metamorphism and deep fluid regime for the North Island of New Zealand]. *Geosistemy perekhodnykh zon* [Geosystems of Transitional Zones], 4(1), 103-115. (In Russ.). DOI: 10.30730/2541-8912.2020.4.1.103-115. EDN: GPBEZH
- Prozorov, A.G., & Hudson, D. (1974). [Dependence between MLH and MPV on regional conditions and local interconnections]. In *Magnituda i energeticheskaya klassifikatsiya zemletryaseniy. T. 2* [Magnitude and energy classification of earthquakes. Is. 2] (pp. 208-216). Moscow, Russia: IPE AS USSR Publ. (In Russ.).
- Sadovsky, M.A., Sobolev, G.A., Andreev, V.O., Babichev, O.V., Irisova, E.L., Koltsov, A.V., Lykov, V.I., Ponomarev, A.V., Poniatsovskaya, V.I., Potuzhak, V., Salov, B.G., Terentyev, V.A., Khromov, A.A., & Shamina, O.G. (1986). [Investigation of harbingers destruction on the model of an inhomogeneous medium]. *Doklady Akademii nauk SSSR* [Transactions (Doklady) of the USSR Academy of Sciences], 287(6), 1354-1357. (In Russ.).
- Tyurin, Yu.N., & Makarov, A.A. (2003). *Analiz dannykh na komp'yutere. Red. V.E. Figurnov* [Data analysis on a computer. Ed. V.E. Figurnov]. Moscow, Russia: Infra-M Publ., 544 p. (In Russ.).
- Vazhenin, A.P., Mikheeva, A.V., Dyadkov, P.G., & Marchuk, A.G. (2017). The Software using digital databases and GIS interface for detecting geodynamic structures. In *New trends in intelligent software methodologies, tools and techniques* (pp. 576-592). Amsterdam, Netherlands: IOS Press.
- Zhalkovsky, N.D., & Muchnaya, V.I. (1987). [On the accuracy of determining the slope of the earthquake recurrence graph]. *Geologiya i geofizika* [Geology and Geophysics], 10, 121-129. (In Russ.).

Information about authors

Mikheeva Anna Vladlenovna, PhD, Researcher of the Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (ICM&MG SB RAS); Senior Researcher of the Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics (IPGG SB RAS), Novosibirsk, Russia. E-mail: anna@omzg.sccc.ru