

*А. В. Михеева*¹✉

Динамика корреляционного параметра в области подготовки землетрясений по данным глобального каталога ВJI

¹Институт вычислительной математики и математической геофизики
Сибирского отделения РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: anna@omzg.sscc.ru

Аннотация. По данным мирового китайского каталога землетрясений ВJI с помощью алгоритма нахождения аномалий K_{COR}^0 (коэффициента парной корреляции классического крипекса Cr_0 и магнитуды M_S), предваряющих сильнейшие ($M_S \geq 8$) и умеренные ($M_S \geq 4.6$) землетрясения, исследована динамика состояния среды накануне этих событий. Установлена закономерность длительных аномалий накануне сильнейших событий в границах дальней зоны влияния подготовки очага R_d , радиус которой рассчитывается с учетом распределении напряжений в упругопластической среде. В окрестностях R_d алгоритмом сканирования всего каталога выявлена закономерность (в 100% случаев) значительно более протяженных во времени (от полутора месяцев до 26 лет) положительных аномалий K_{COR}^0 перед сильнейшими землетрясениями каталогов в случае использования классического крипекса $Cr_0 = M_S - m_b$ в сравнении с методом, использующим нормированный крипекс (от 25 дней до 3 лет). Это может свидетельствовать об установлении длительного упругопластического состояния среды в R_d -области подготовки очагов крупных землетрясений.

Ключевые слова: каталоги и базы данных землетрясений, параметры сейсмогеодинамического процесса, тектонические обстановки

*A. V. Mikheeva*¹✉

Dynamics of the correlation parameter in the earthquake preparation area according to the BJI global catalog

¹Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: anna@omzg.sscc.ru

Abstract. According to the BJI global earthquake catalog, the dynamics of the environment on the eve of the strongest ($M_S \geq 8$) and moderate ($M_S \geq 4$) earthquakes has been studied using the K_{COR}^0 (the coefficient of paired correlation of the classical creepex Cr_0 and magnitude M_S) anomaly detection algorithm. A pattern of long-term anomalies preliminary the strongest earthquakes has been established within the boundaries of the far-reaching zone of influence of the preparation of the focus, the radius R_F of which is calculated taking into account the stress distribution in elastoplastic media. In the R_F -vicinity, the scanning algorithm of the entire catalog revealed a pattern (in 100% of cases) of significantly longer positive K_{COR}^0 anomalies (from one and a half months to 26 years) before the strongest earthquakes in the case of using the classic creepex $Cr_0 = M_S - m_b$ in comparison with the method using a normalized creepex (from 25 days to 3 years). This may indicate the establishment of a special elastic-plastic state of the environment in the R_F area, which is the preparation area for large earthquakes.

Keywords: catalogs and databases of earthquakes, parameters of seismic geodynamic process

Введение

Известно, что классический параметр крипекс $Cr_0 = M_s - m_b$ [1], рассчитываемый по соотношению поверхностной M_s и объемной m_b магнитуд, содержит информацию о состоянии геофизической среды, и, возможно, не только в очаге землетрясения, но и в зоне удаленного влияния (до расстояния R_d) на подготовку очага. С другой стороны, известно, что независимо от выбранного каталога, статистическое распределение всех землетрясений в координатах Cr_0 и M_s показывает линейный тренд, т.е. взаимную зависимость этих параметров. Это заставляло многих исследователей использовать различные виды нормирования параметра крипекс [2–4] с целью устранения его зависимости от магнитуды. В настоящей работе сделана попытка выяснить по данным глобального китайского каталога ВЛ, не является ли эта статистически выраженная зависимость свойством отдельных подмножеств каталога землетрясений (аналогично результатам, полученным по данным австрийского каталога IDC), и не связаны ли эти последовательности с физически обоснованной перестройкой среды.

Методы и материалы

Мы предполагаем, что радиус «ближней зоны» очага (по терминологии свода правил СП-2016 [5]):

$$R_B = 10^{M_s \cdot 0.33 - 0.61} \quad (1)$$

соответствует области влияния полей напряжения в поликристаллическом упругом материале и может быть принят за границу жесткого включения очага. За пределами этой границы, по-видимому, более активен процесс передачи гидростатического давления в вязкоупругой среде (распорное действие пластичного вещества, заполняющего уже существующие разломы кристаллической среды), при котором изменение локального кристаллического давления может распространяться на сотни-тысячи километров.

Таким образом, оценку предельного размера R_d «дальней зоны» влияния очага можно получить на основе решения задачи о распределении напряжений в окрестности жесткого включения (будущего очага) в среде, находящейся в упругопластическом состоянии [6]. Сравнение скорости стремления напряжений к начальным значениям по мере удаления от включения в упругой и в упругопластической средах, согласно [6], дает оценки, пропорциональные $1/R^2$ и $1/R^D$, соответственно. При этом, оценки показателя D соответствует максимальной величине $D=1^{2/5}$ [6] (перекрывающей оценки для всех возможных внешних обстановок рассматриваемого жесткого включения очага). Таким образом, минимальная величина R_d соотносится с R_B как:

$$R_d = R_B^{2/D} = R_B^{2/1.4} \quad (2)$$

В радиусе R_d в настоящей работе исследуется поведение параметра $K_{кор}^0$ (коэффициента парной корреляции классического крипекса и магнитуды) по

сейсмичности, предвещающей все сильнейшие и умеренные землетрясения. Отметим, что ранее [7] по данным каталога IDC [8] (International Data Centre, Vienna International Centre, Austria) было установлено, что увеличение радиусов R_d в 1.8 раз уменьшает длительность аномалий $K_{\text{КОР}}^0$ в 2 и более раз, что говорит об оптимальности выбранного метода расчета R_d (2).

Используемый при расчете коэффициента корреляции параметр крипекс применялся нами ранее в ряде сейсмо-геодинамических исследований [9–10] в различных модификациях. Например, в результате применения нормированного крипекса Cr_0^{cat} [9] (представляющего собой величину отклонения классического крипекса $Cr_0 = M_s - m_b$ от тренда зависимости $Cr_0(M_s)$ по выбранному каталогу) было установлено, что в преддверие отдельных сильнейших землетрясений по сопровождающей их умеренной среднеглубинной сейсмичности в некоторой локальной области характерно установление высокой временной корреляции $K_{\text{КОР}}(t)$ (т.е. синхронная или, наоборот, противофазная динамика параметров Cr_0^{cat} и M_s). Начинается эта корреляция (величиной $|K_{\text{КОР}}| \geq 0.7$) за десятки дней до главного события и продолжается десятки и сотни дней после него. Однако, не все крупные землетрясения предвещаются такой аномалией. Например, по данным глобального каталога IDC [8] лишь 7 из 11 сильнейших ($M_s \geq 8$) землетрясений предвещаются в их R_d областях аномалиями $|K_{\text{КОР}}| \geq 0.7$ по сейсмичности с $H \geq 50$ км. А по данным глобального каталога ВЛ [11] (Института Геофизики Китайской Академии Наук) лишь половина (11 из 22) сильнейших землетрясений сопровождаются такими аномалиями.

В качестве более надежного и универсального показателя перестройки среды накануне сильнейших землетрясений предлагается рассмотреть параметр $K_{\text{КОР}}^0$, использующий ненормированный классический крипекс Cr_0 , который был предложен изначально [1] как параметр, отражающий физику поглощения геофизической средой очагового излучения, «соотношение между медленным и быстрым движением в очаге» [1] и т.д. При этом, его рост, синхронный с ростом магнитуды землетрясений определяется растущей с размерами очага [1] реологической неоднородности среды в очаге. В данной работе применяются различные условия расчета аномалий $K_{\text{КОР}}^0$: только для сильнейших землетрясений каталога или для всей умеренной сейсмичности; по всем событиям каталога до текущего события или только в его R_d области; по среднеглубинной предвещающей сейсмичности ($H \geq 50$ км) или по сейсмичности всего диапазона глубин.

Используемый в данной работе каталог ВЛ [11] содержит 65445 записей с парными определениями M_s и m_b за 01.06.1990–31.05.2025, из них – 35415 умеренных землетрясений (с $M_s \geq 4.6$) и 22 катастрофических (с $M_s \geq 8$).

Исследование проводится с помощью геоинформационной системы GIS-ENDDB [12] на основе следующих алгоритмов: 1) расчет R_d текущего события по формулам (1) и (2) и выбор предвещающей сейсмичности в соответствующей круговой области; 2) расчет для полученной выборки временных графиков параметра $K_{\text{КОР}}^0$ согласно алгоритму «с фиксированным в точке рассматриваемого события краем окна» [10]; 3) модифицированный метод Прозорова [12, 13] для

удаления роев из выборки землетрясений; 4) расчет и визуализация сферических диаграмм механизмов по данным гарвардского каталога GCMT [14].

Результаты

Сканирование глобального каталога ВЛ в R_d -окрестностях его катастрофических землетрясений с $M_S \geq 8$ выявляет предваряющие их положительные аномалии $K_{\text{КОР}}^0$ (величиной $|K_{\text{КОР}}^0| \geq 0.7$) абсолютно для всех 22 событий. Их длительность значительно более протяженные во времени (от полутора месяцев до 26 лет) по сравнению с $K_{\text{КОР}}$, рассчитанному по нормированному крипексу (от 25 дней до 3 лет). При этом, для среднеглубинной сейсмичности ($H \geq 50$ км) 5 из 22 крупнейших событий не сопровождаются предваряющими аномалиями $K_{\text{КОР}}^0$ (отмечены белыми окружностями на рис. 1), являясь либо сдвигами, либо достаточно удаленными от межплитных границ событиями (рис. 1). В табл. 1 эти события отмечены синим фоном.

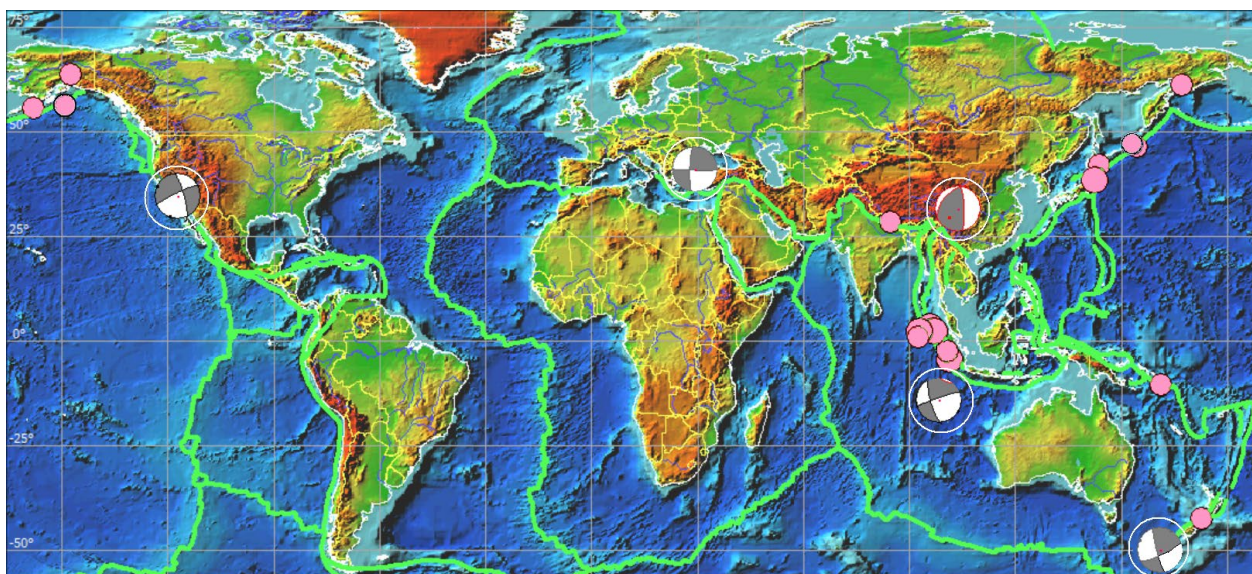


Рис. 1. Распределение сильнейших событий ($M_S \geq 8$) каталога ВЛ. Пять землетрясений, не имеющих предваряющих аномалий $K_{\text{КОР}}^0$ по среднеглубинной сейсмичности показаны в виде стереограмм механизмов (по данным каталога GCMT [14]).

Интересно, что глубинные аномалии для 5 событий начинаются раньше, чем аномалии $K_{\text{КОР}}^0$ по всему диапазону глубин (табл. 1). Для Суматринских 26.12.2004 и 28.03.2005 – на 12 и 14 лет раньше, Симуширских 15.11.2006 и 13.01.2007 – на 2 года и 5 лет раньше, для Тохоку 11.03.2011 – на 6 месяцев, для аляскинского 29.07.2021 – на 7 лет раньше. Это может свидетельствовать о большем влиянии на эти события глубинных процессов подготовки, например, связанных с активным привносом глубинного вещества.

Как отмечалось выше, аномалии $K_{\text{КОР}}$, рассчитанные по нормированному крипексу и сейсмичности $H \geq 50$ км, предваряют лишь 11 из 22 землетрясений

(события без аномалий $K_{\text{кор}}^0$ отмечены в табл. 1 голубой заливкой первой ячейки), а по событиям всего диапазона глубин – лишь 10 сильнейших землетрясений (красный цвет на рис. 2, одна аномалия отрицательна). События без аномалий отмечены сиреневым квадратом в табл.1.

Таблица 1. Основные параметры сильнейших землетрясений каталога ВЛ и длительность аномалий $K_{\text{кор}}^0$ в днях (для всего диапазона глубин и для глубин $H \geq 50$ км).

	Year	Mo	Da	Hr	Mn	Sec	Latitude	Longitude	Dep	creep	Ms	Kcor ⁰	Kcor ⁰ _{dep}
■	1992	6	28	11	57	38,1	34,144	-116,609	10	2,0	8,0	624	
■	1999	8	17	0	1	40,6	40,797	29,995	16	1,9	8,0	3387	
■	2000	6	18	14	44	15,1	-13,917	97,501	14	1,4	8,0	2992	
■	2002	11	3	22	12	42,8	63,516	-147,573	11	1,4	8,1	4609	4547
	2003	9	25	19	50	8,0	41,918	143,920	26	1,5	8,2	163	503
	2004	12	23	14	59	2,1	-49,784	161,392	4	1,9	8,0	4780	
	2004	12	26	0	58	53,0	3,315	95,983	26	2,1	8,9	798	5394
■	2005	3	28	16	9	36,7	2,100	97,096	27	2,4	8,6	47	5489
	2006	4	20	23	25	2,4	60,880	167,046	23	2,0	8,3	5909	5337
■	2006	11	15	11	14	14,4	46,574	153,354	16	1,7	8,0	808	1501
■	2007	1	13	4	23	22,6	46,128	154,420	16	1,2	8,1	50	1845
■	2007	9	12	11	10	26,7	-4,443	101,468	24	2,5	8,6	6403	6403
■	2007	9	12	23	49	4,2	-2,623	100,773	39	1,8	8,2	6404	6320
■	2008	5	12	6	28	0,5	30,993	103,391	10	1,8	8,2	6597	
■	2011	3	11	5	46	23,2	38,296	142,498	19	1,4	8,7	80	285
	2012	4	11	8	38	37,8	2,237	93,014	26	2,0	8,6	8107	1052
■	2012	4	11	10	43	10,5	0,767	92,428	21	1,3	8,2	8107	2317
	2015	4	25	6	11	26,6	28,130	84,717	13	2,0	8,2	9261	8516
	2016	11	13	11	2	59,7	-42,665	172,923	16	1,9	8,0	9595	4939
■	2016	12	8	17	38	46,8	-10,790	161,280	47	1,6	8,1	9862	1309
■	2018	1	23	9	31	40,9	55,931	-149,188	9	1,3	8,2	2564	2530
■	2021	7	29	6	15	47,4	55,445	-157,997	22	1,2	8,1	1280	4020

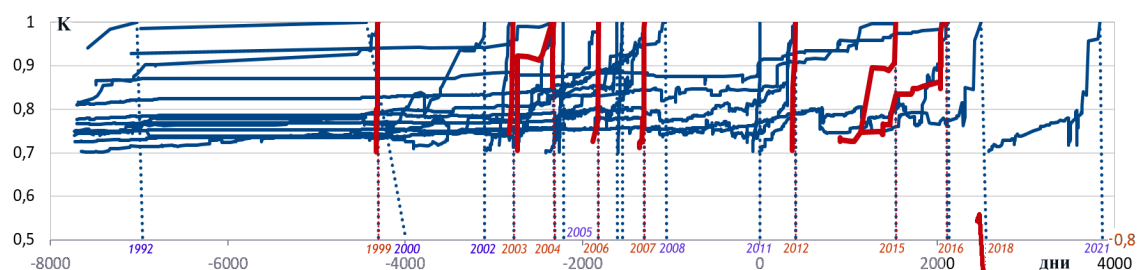


Рис. 2. Аномалии $|K_{\text{кор}}^0| \geq 0.7$ (синий цвет) и $|K_{\text{кор}}| \geq 0.7$ (красный) перед катастрофическими землетрясениями $M_S \geq 8$ каталога ВЛ в дальней области R_d влияния их будущих очагов. На оси времени отмечены моменты событий.

Аномалии $K_{\text{кор}}^0$ перед событиями $M_S \geq 8$ всегда положительны, не зависимо от типа очагов и их геодинамического окружения. Общее количество землетрясений, входящих в их цепочки высокой корреляции составляет 19% от общего количества событий каталога. Однако, не только перед сильнейшими событиями каталога присутствуют подобные высоко-корреляционные цепочки землетрясений. Они выявляются также накануне 10994 событий меньшей магнитуды ($4.6 \leq M_S < 8$) в их R_d -областях (при этом, лишь 289 из них – отрицательные: $K_{\text{кор}}^0 \leq -0.7$). Все они имеют длительность от 20 дней до 24 лет (≥ 4 событий в цепочке),

многие цепочки перекрываются (т.е. один ряд событий может входить в десятки цепочек), но общее количество событий в них охватывает 84% всех событий каталога. Лишь 2% из этих цепочек (269) включают сильнейшие $M_s \geq 8$ события, т.е. связаны с их подготовкой или релаксацией. Это говорит о том, что процессы, проявляемые роями в преддверии 31% умеренных $M_s \geq 4.6$ землетрясений каталога в их относительно небольших R_d -областях (охватывающих, в том числе, и более сильные землетрясения), аналогичны процессам подготовки сильнейших событий. Отметим, что по среднеглубинной сейсмичности в R_d -областях всех событий с $M_s \geq 4.6$ их предваряющих цепочек с $|K_{\text{КОР}}| \geq 0.7$ вчетверо меньше.

Корреляция параметров событий хронологических цепочек R_d -областей может свидетельствовать, например, об особом напряженно-деформированном состоянии среды в этих областях, иногда очень длительном. Возможно, что часть этих цепочек составляют сейсмические рои, общий генезис которых может отражаться в аномалиях $K_{\text{КОР}}^0$. Чтобы оценить влияние роев на приведенную выше статистику, проведем сканирование каталога, очищенного от роев. Это влияние оказывается незначительным – общее количество событий $M_s \geq 4.6$ после этой операции уменьшается в 2.1 раз (16937 событий), а количество цепочек в их R_d -областях – в 2.8 раз (3947 цепочек).

Для сравнения проверим наличие корреляции в хронологических цепочках каталога без ограничений по расстоянию. Сканирование каталога выявляет 2962 таких цепочек (8% от общего числа событий каталога) длительностью от 20 дней до 2.25 лет. Причем аномалии $K_{\text{КОР}}^0$ только для двух цепочек отрицательны с длительностью менее 1.5 месяцев (характеризуют возможную кратковременную консолидацию среды), остальные положительны. Цепочки охватывают 28885 событий, т.е. ~82% событий каталога группируются в эти относительно краткие по времени и разбросанные территориально последовательности, характеризуемые корреляцией, не зависимо от зон подготовки конкретных землетрясений (при этом, 85% событий этих цепочек входят также в цепочки R_d -кругов подготовки землетрясений $M_s \geq 4.6$). Наличие этих цепочек может быть обусловлено внешними (региональными или планетарными) процессами растяжения/сжатия, вызывающими триггерную нелокализованную сейсмичность, в свою очередь, провоцирующую дальнейшую сейсмическую активность областей с особым состоянием среды. Интересно, что при рассмотрении среднеглубинной сейсмичности (ограниченной глубиной $H \geq 50$ км), предваряющей все землетрясения $M_s \geq 4.6$, выявляется вдвое больше корреляционных цепочек: 5999 (из них 72 отрицательных), хотя общее количество событий $H \geq 50$ км составляют лишь 11% каталога (82% из которых входят в цепочки корреляции). Из них 1122 событий имеют цепочки как по всему диапазону глубин (38% из 2962 цепочек), так и по среднеглубинной сейсмичности (рис. 3). Эти цифры могут говорить о том, что глубинные процессы во много раз более активно реагируют на внешние причины глобальных изменений растяжения/сжатия, создавая условия активизации коровой сейсмичности для 17% событий каталога.

Положительный знак аномалий $K_{\text{КОР}}^0$ и их многолетняя длительность в R_d -областях подготовки всех сильнейших и 30% умеренных землетрясений (в ближней и дальней зоне их очагов) можно объяснить пластическими процессами, например,

гидростатическим давлением вязкоупругой среды при заполнении существующих разломов дополнительным материалом. Источником привноса пластичного вещества могут быть глубинные области частичного плавления пород [15–16]. Ростом плотностной неоднородности среды объясняется пропорциональная зависимость крипекса от величины очага [1] (т.е. их высокая корреляция) в областях подготовки землетрясений.

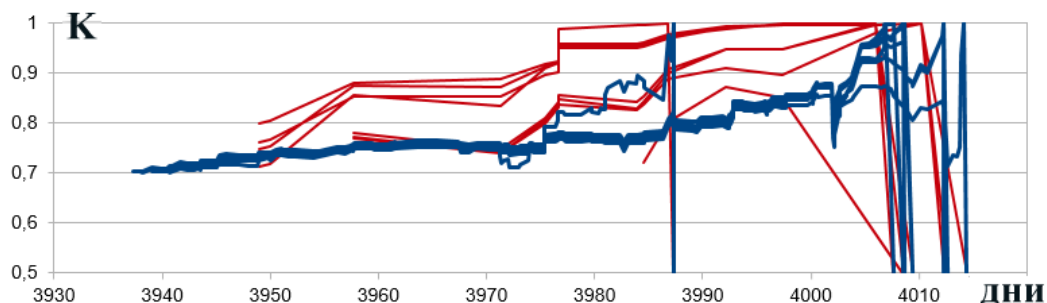


Рис. 3. Аномалии $K_{\text{КОР}}^0 \geq 0.7$ перед землетрясениями $M_s \geq 4.6$ октября-декабря 2021г каталога ВЛ по всей сейсмичности каталога (синий цвет) и по сейсмичности $H \geq 50$ км (красный).

Заключение

Сканирование параметров сейсмических событий глобального ВЛ-каталога показывает закономерность наличия длительных от 0.4 до 26 лет аномалий $K_{\text{КОР}}^0$ (коэффициента парной корреляции классического крипекса и магнитуды землетрясения) с $|K_{\text{КОР}}^0| \geq 0.7$ в области R_d влияния подготовки будущего очага всех сильнейших и трети умеренных землетрясений каталога. Преимущество использования параметра $K_{\text{КОР}}^0$ (основанного на классическом крипексе $Cr_0 = M_s - m_b$ по сравнению с нормированной модификацией крипекса $K_{\text{КОР}}$, в наличии его аномалий для 100% случаев катастрофических событий $M_s \geq 8$ мирового каталога ВЛ. При этом, аномальные по $K_{\text{КОР}}^0$ цепочки событий в R_d -областях умеренных ($M_s \geq 4.6$) землетрясений ВЛ не уступают им по длительности (до 24 лет), а по охвату событий в цепочках имеют массовый характер (84% всех событий каталога), подтверждая, что свойство линейной зависимости классического крипекса от магнитуды, статистически проявляемое по всему каталогу, сконцентрировано в локальных цепочках сейсмичности, предвещающих некоторые события в их областях подготовки. Положительный знак и массовость описанных аномалий могут свидетельствовать о пластических процессах подготовки будущего очага, весьма длительных (многолетних) по времени и масштабных (от десятков до пары тысяч км) по расстоянию. Выполнено в рамках госзадания № FWNM–2025–0004.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Прозоров А. Г., Хадсон Д. Зависимость между MLH и mPV от региональных условий и локальных взаимосвязей // Магнитуда и энергетическая классификация землетрясений. – Т. 2. – М. ИФЗ АН СССР, 1974. – С. 208–216.

2. Прозоров А. Г., Хадсон Д. А. Изменение крипекса перед сильными землетрясениями // Вычислительная сейсмология. – М.: Наука, 1983. – Вып. 45. – С. 26–35.
3. Неверова Н.П. (2009). Крипекс – характеристика очага землетрясения // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Мат. IV Межд. сейсмологической школы. – Обнинск: ГС РАН. – С. 127–129.
4. 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.
5. Свод правил СП 283.1325800.2016 "Объекты строительные повышенной ответственности. Правила сейсмического микрорайонирования" (утв. приказом Мин-ва строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ от 16.12.2016 г. N 981/пр).
6. Лермонтова А. С., Ребецкий Ю. Л. О проблеме дальнего действия аномалии напряженного состояния включения/разрыва в среде, находящейся в закритическом состоянии // Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле. – М.: Изд-во ИФЗ РАН, 2016. – Т. 1. – С. 470–474.
7. Mikheeva A. V. The magnitude and creepex correlation parameter as an indicator of the environmental restructuring in preparation for the strongest earthquakes // Bulletin of the Novosibirsk Computing Center, Series: Math. Model. in Geophys. – 2025. – V. 27. – P. 13–22.
8. International Data Centre, CTBTO (IDC) // In: On-line Bulletin [Site]. – United Kingdom, Thatcham: Internat. Seismol. Centre. – URL: <https://www.isc.ac.uk/cgi-bin/agency-get?agency=IDC> (the application date 20.03.2026).
9. Михеева А. В. Динамика параметров среднеглубинной сейсмичности перед крупными землетрясениями южно-азиатских сейсмофокальных зон // Российский сейсмологический журнал. – 2023. – Т. 5, № 2. – С. 51–60.
10. Михеева А. В., Калинин И. И. О влиянии предполагаемого глобального глубинного разлома на сильные землетрясения Индонезии // Российский сейсмологический журнал. – 2023. – Т. 5, № 4. – С. 52–64.
11. Catalog of China Bureau of Earthquake Research BJI of Institute of Geophysics, Academy of Sciences of China. URL: www.isc.ac.uk/cgi-bin/collect?Reporter=BJI (the application date 20.03.2026).
12. Михеева А. В. Геоструктурные элементы, выявляемые математическими алгоритмами и цифровыми моделями геоинформационно-вычислительной системы GIS-ENDDB. – Новосибирск: Омега Принт, 2016. – 300 с.
13. Прозоров А. Г. Динамический алгоритм выделения афтершоков для мирового каталога землетрясений // Вычислительная сейсмология. – 1986. – Вып. 19 : Математические методы в сейсмологии и геодинимике. – С. 58–62.
14. Global CMT Catalog. [Электронный ресурс]. – Lamont-Doherty Earth Observatory (LDEO) of Columbia University, Columbia, SC, USA. – 2025. – URL: <http://www.globalcmt.org>.
15. Волярович М. П., Томашевская И. С., Будников В. А. Механика горных пород при высоких давлениях. – М.: Наука, 1979. – 151 с.
16. Калинин А. С., Шарапов В. Н., Васильева Э. Н. О динамике конвективного плавления пород коры в зонах глубинных разломов // Геология и геофизика. – 1976. – Т. 2. – С. 54–59.

© А. В. Михеева, 2026