

УДК 519.254; 004.942; 550.34.06.013.3.

Крипекс–анализ процессов в очаговых зонах крупных землетрясений средствами GIS–ENDDB

© 2021 г. А.В. Михеева^{1,2}, И.И. Калинин³

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

³ИФЗ РАН, г. Москва, Россия

Поступила в редакцию 15.09.2021 г.

Аннотация. Параметр крипекс (creep & explosion) несёт информацию о соотношении низко- и высокочастотных составляющих излучения в очаге землетрясения и является одной из характеристик комплексного анализа различных аспектов сейсмогенеза, в частности, диагностики процессов подготовки сильных событий и их афтершоковой деятельности. В данной работе исследуется пространственно-временная динамика крипекса в очаговых зонах ряда крупнейших землетрясений из областей конвергенции плит, в том числе континентального Кашмирского (08.10.2005 г., $M_s=7.6$) и континентально-океанического Тохоку (11.03.2011 г., $M_w=8.7$). Одной из целей работы является демонстрация возможностей метода в изучении физически обоснованных закономерностей развития очага в первые часы после главного толчка. В результате исследования сделаны выводы о следующих закономерностях процесса релаксации очага: локализованная во времени отдельность частей (парциальность) афтершокового процесса, положительные значения крипекса в его первые часы (объяснимые влиянием процесса дилатансии), резкие изменения крипекса при глубинных переходах (объяснимые термодинамическим влиянием и ростом давления с глубиной).

Ключевые слова: каталоги и базы данных землетрясений, параметры сейсмогеодинамического процесса, тектоническая обстановка.

Для цитирования: 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: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2021.4.01>

Введение

Формально сконструированный параметр крипекс (creep & explosion), определяющийся различным соотношением магнитуд M_s и m_b : 1) их разностью $Cr_0 = M_s - m_b$ [Прозоров, Хадсон, 1974]; 2) невязкой этих магнитуд в ортогональной регрессии: $Cr = M_s - k \cdot m_b - 1$ [Прозоров, Хадсон, 1983; Каверина, 1998]; 3) приведением классического крипекса к линейному тренду его зависимости от M_s : $Cr_0 - Cr_0(M_s)$ [Неверова, 2009], с математической точки зрения является функцией от разности величин одинаковой размерности, но с разным физическим содержанием. По факту он является нормированным логарифмом отношения оценок энергии землетрясения. Каждая оценка является отражением сложного комплекса информации: об очаге землетрясения; о геофизической среде, вмещающей очаг; о среде в объёмах, охваченных трассами распространения сейсмических волн, и т.д. Магнитуды M_s

и m_b для одного и того же события определяются по разнотипным волнам с различными механизмами генерации в несовпадающих частотных диапазонах (низкочастотном для M_s , обычно с периодом 20 с; высокочастотном для m_b , обычно с периодом 1 с), регистрируемых разнотипной аппаратурой, не обеспеченной единой метрологической сертификацией [Мишаткин, Захарченко, 2012]. Более того, содержащиеся в различных каталогах определения этих магнитуд выполняются различными службами и агентствами с использованием индивидуальных алгоритмических, аппаратно-методических и модельных подходов. Это создаёт трудности в выявлении неслучайных вариаций параметра крипекс, связанных, например, исключительно со структурой среды в области очага. Отдельно стоит отметить, что способ расчёта крипекса как невязки магнитуд M_s и m_b в ортогональной регрессии сталкивается с проблемой нелинейности зависимости $M_s(m_b)$, связанной с различием параметров

насыщения этих двух магнитуд, что делает его интерпретацию неоднозначной с точки зрения физического обоснования.

С другой стороны, в специализированных исследованиях, например, А.Г. Прозорова и других авторов [Прозоров, Хадсон, 1974; 1983; Kaverina et al., 1996; Болдырев, Левина, 2008; Неверова, 2009] показано, что крипекс-параметр может отражать различные аспекты сейсмогеодинамического процесса: связь характеристик очага с общей тектонической обстановкой; отражение фаз подготовки сильного события; определение доли вязкого скольжения при образовании сейсмогенерирующей трещины и т.д. Конкретно в работе [Kaverina et al., 1996] подтверждено, что в зонах спрединга, тектоническое движение в которых проявляет свойство «асейсмической ползучести», сейсмические источники имеют гораздо более высокое значение крипекса, чем в зонах субдукции, характеризующихся «холодным» хрупким разрушением. В работе [Kaverina, Прозоров, 1994] показано статистически значимое влияние на уменьшение крипекса высокого уровня тектонических напряжений в очаге, взбросо-сбросовой компоненты подвижки и, наоборот, влияние на повышение крипекса низкого уровня тектонических напряжений, преобладания сдвиговой компоненты подвижки, высокой скорости спрединга, большого размера очага и относительно высокой температуры материала. То есть по [Болдырев, Левина, 2008] пространственно-временные изменения параметра C_r в целом «обусловлены вариациями условий в очаговой зоне на излучение» высокочастотных и низкочастотных волн сжатия и сдвига.

Таким образом, параметр крипекса можно и нужно использовать для сейсмогеодинамических исследований, но при этом, по возможности, учитывать его зависимость от многих сопутствующих параметров (качества регистрации и обработки данных, аномалий состояния окружающей геофизической среды, скорости тектонических процессов и т.д.), строгую аналитическую связь между которыми установить пока невозможно. Цель работы – показать, как с помощью современной экспертной информационно-вычислительной системы [Михеева и др., 2016] уменьшить влияние на крипекс методических факторов (индивидуальных особенностей, присущих конкретному каталогу) на основе статистического сравнения данных различных каталогов; определять наиболее информативные выборки, на которых затем вычислять и визуализировать распределение крипекс-параметра; проследить его ретроспективную динамику.

Характеристика используемых данных

Расхождения в магнитудах M_s и m_b , предоставляемых различными агентствами, могут быть очень существенными. Так, сопоставление определений m_b в каталогах ISC [ISC Bulletin ..., 2020] и NEIC [Earthquake Hazards, 2021] по круговой области с центром в Памиро-Гиндукушской сейсмофокальной зоне (далее ПГЗ) радиусом 500 км (7093 записи за 1963–2017 гг.) даёт невязку до 35% от значения m_b по NEIC, ограничиваясь значениями до 7% лишь для $m_b \geq 5.5$ [Kalinnikov, Mikheeva, 2020].

Отметим, что при сопоставлении различных каталогов существует проблема синхронизации событий. Относительно значений m_b из каталога ISC (где собраны определения m_b со ссылками на разные источники) картина распределения невязок немногим лучше. Так, $\Delta m_b = m_{b_ISC} - m_{b_NEIC}$ (т.е. разница в определениях m_b со ссылками на ISC и NEIC) для наиболее крупных событий достигает приемлемых значений 10% от m_{b_ISC} уже с $m_b \geq 5$ (рис. 1а). Отметим, что отдельное рассмотрение 288 глубинных событий (зарегистрированных ниже границы Мохоровичича) показывает здесь увеличение разброса невязки Δm_b до 45.2% от m_{b_ISC} для наиболее глубоких событий.

В приведённом сравнении каталогов мы использовали пары синхронных событий с разницей в определениях времени до 2.6 с. Но и более строгие условия отбора синхронных событий, например, с разницей по времени возникновения не более 1 с, уменьшают число событий до 3689, но не обеспечивают более строгой эквивалентности других параметров регистрации. Например, разница в определениях координат гипоцентров и глубин эпицентров может достигать 10 км (рис. 1б). Отметим, что наибольший разброс по глубине наблюдается здесь на отрезке 1986–2008 гг., т.е. в период общего занижения значений m_b в каталоге ISC (рис. 1а, б), что может говорить об общем изменении качества регистрации в этот период. Кроме того, приведённые в каталоге NEIC погрешности определения глубин позволяют оценить относительное количество событий с недостоверной глубиной: 1072 против 4682 (т.е. почти ¼ от числа событий с достоверной глубиной), однако на распределение невязок по магнитудам влияния этого параметра не выявлено.

Таким образом, анализ соответствия друг другу параметров, предоставляемых различными каталогами, показывает, что использование смешанных определений от различных агентств нежелательно из-за большого разброса значений,

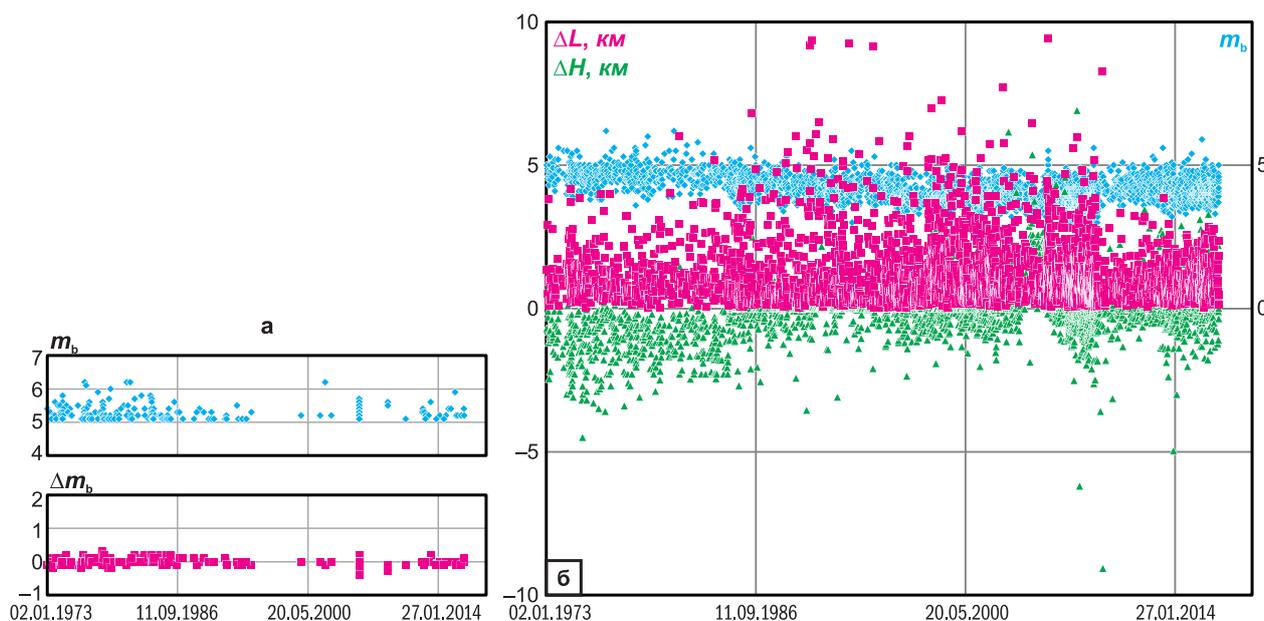


Рис. 1. Распределение по времени параметров выборок из каталогов ISC и NEIC в радиусе 500 км от Памиро-Гиндукушской сейсмофокальной зоны (ПГЗ) за 1973–2016 гг:

а – распределение 181 определений $m_b > 5$ каталога ISC (синие точки) и невязок $\Delta m_b = m_{b_ISC} - m_{b_NEIC}$ (красные точки); б – распределение 3689 определений m_b из каталога ISC (синий цвет), разностей определений эпицентров синхронных событий ISC и NEIC ΔL в км (красный) и разностей определений глубин $\Delta H = H_{ISC} - H_{NEIC}$ в км (зелёный)

определяемого расширенным многообразием погрешностей определений. Если допустить, что погрешности эти носят менее разнообразный характер в пределах каждого каталога, то анализ распределения характеристик землетрясений лучше проводить в рамках единого каталога.

В настоящей работе на различных выборках различных каталогов показано, что в конкретном исследовании необходимо контролировать качество каждой выборки, например, по графикам $M_S(m_b)$, $Cr(M_S)$ или $Cr(m_b)$. В круговой области ПГЗ (радиусом 500 км за 1963–2017 гг.) мы сравнили результаты использования двух выборок каталога ISC – с собственными определениями M_S (выборка *lcreepex*: 1560 записей) и с определениями M_S различных агентств, собранными в ISC (более полная выборка *preepex*: 9734 записи). Кроме того, для более детального исследования крипекса в очаговых зонах отдельных крупных землетрясений были добавлены более представительные региональные каталоги CSN [Каталог землетрясений ..., 2021] и ВJI [Data reports ..., 2021], имеющие собственные определения M_S и m_b , в частности, выборка CSN *kcreepex*: 4655 записей в области 10°S–80°N, 50–180°E за период 11.03.2010–11.03.2012 и выборка ВJI *icreepex*: 20814 записей по всему миру за период 01.01.2000–29.12.2008. Для определе-

ния тренда CSN-каталога использовалась генеральная выборка по Южно-Азиатской области: 7226 записей за период 01.11.2012–30.09.2015.

Примеры применения метода

Вместо приведённых выше классических представлений крипекса в подсистеме анализа программы GIS-ENDDB [Мухеева и др., 2016] авторами предложена и реализована нормированная оценка этого параметра: $Cr_N = 4(M_S - m_b) / (M_S + m_b)$ [Mikheeva, Kalinnikov, 2020]. Преимущество нормирования заключается в его универсальности по отношению к типу зависимости $M_S(m_b)$ исследуемой выборки и в подавлении наблюдаемой систематической зависимости разности $(M_S - m_b)$ от величины землетрясений M_S по линейно растущему закону [Неверова, 2009] (жёлтые точки и жёлтая линия тренда на рис. 2, внизу), а чаще – по нелинейно растущему закону. Дело в том, что на практике наличие зависимости $(M_S - m_b)$ от M_S не позволяет выявлять аномалии крипекса, не связанные с размером очага, с целью интерпретировать их с точки зрения физики очага – относительного вклада «мягкой» и «жёсткой» подвижек в общий процесс очагового излучения. Применение параметра Cr_N значительно уменьшает разброс значений (красные точки на рис. 2) относительно тренда $Cr_N(M_S)$,

однако полностью не устраняет роста этого тренда (красная линия на рис. 2, внизу). Поэтому была предложена [Mikheeva, Kalinnikov, 2021] модификация нормированного крипекса $Cr_{N_{cat}}$ – результат приведения Cr_N каждого события к средним по выбранному каталогу (например, ISC, CSN либо ВJI) значениям крипекса, рассчитываемым по полиномиальному тренду $Cr_N(M_S)$. Так, для выборки, формула полиномиального тренда которой указана на рис. 2 красным шрифтом, параметр крипекс будет рассчитан по формуле: $Cr_{N_{cat}} = Cr_N + 0.0354 \cdot M_S^2 - 0.5202 \cdot M_S + 1.7289$. В результате распределение $Cr_{N_{ISC}}(M_S)$ (зелёные квадраты на рис. 2) не имеет линейного роста по своему тренду (чёрная жирная линия на рис. 2, внизу), что даёт возможность более адекватной

интерпретации аномалий параметра $Cr_{N_{cat}}$ без специального рассмотрения магнитуд каждого события выборки.

Отметим, что аналогичная процедура приведения классического крипекса Cr к линейному тренду зависимости $Cr(M_S)$ [Неверова, 2009] не даёт удовлетворительного результата, т.к. не учитывает проблемы нелинейности зависимости $Cr(M_S)$, вытекающей из фактически устанавливаемой нелинейности $M_S(m_b)$. Как показывают верхние графики рис. 2, для каталога *lcreepex* прямолинейный тренд $m_b(M_S)$ имеет высокую достоверность аппроксимации наряду с полиномиальным ($R^2=0.6434$ и $R^2=0.794$ соответственно), ещё более близко соотношение R^2 у трендов обратных зависимостей $M_S(m_b)$ ($R^2=0.6422$ и $R^2=0.71$).

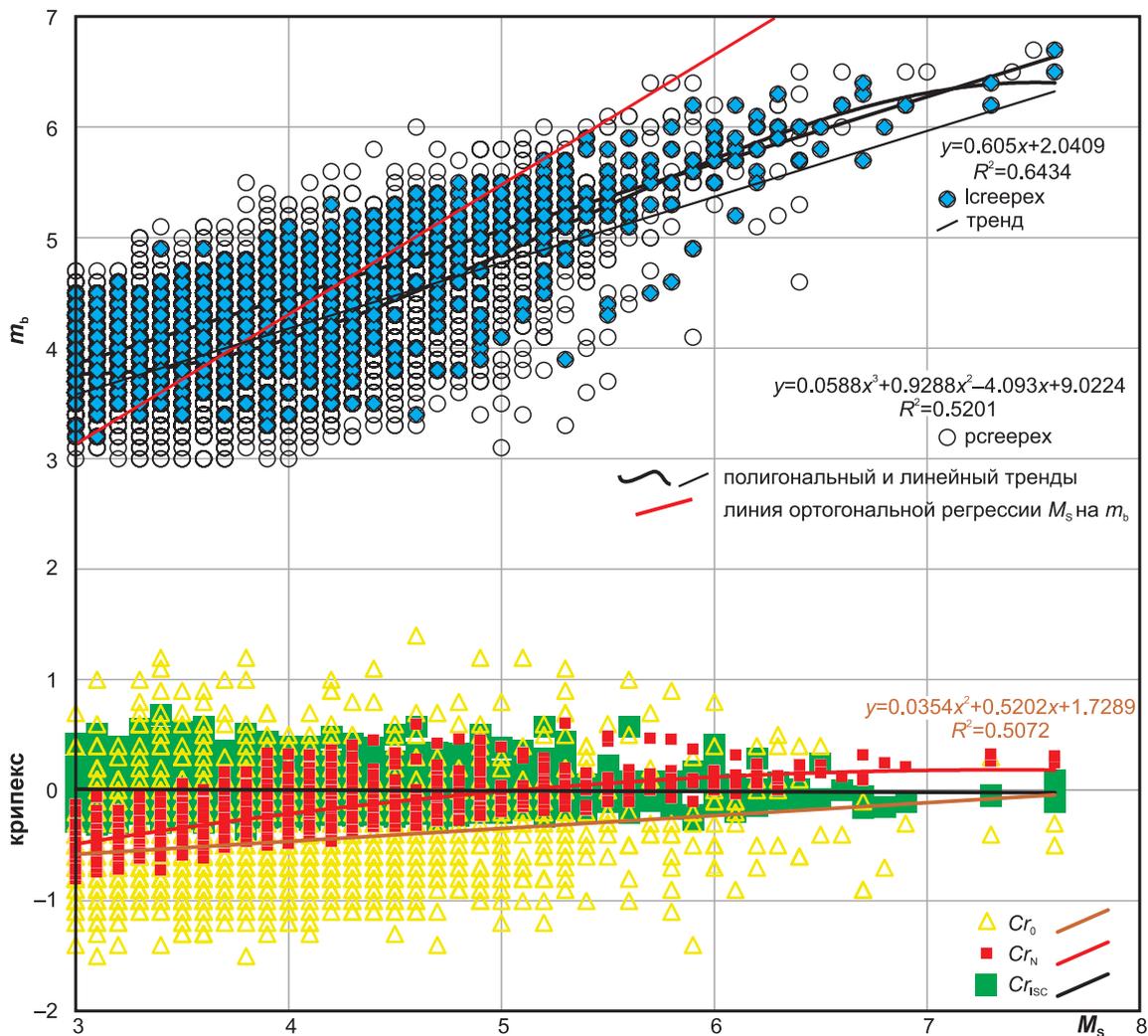


Рис. 2. Зависимости от M_S : а – магнитуды m_b (по выборкам каталога ISC: *lcreepex* и *pcreepex* – синие и белые кружки); б – крипексов $Cr_0 = M_S - m_b$, $Cr_N = 4(M_S - m_b)/(M_S + m_b)$ и $Cr_{N_{ISC}}$ и их тренды для событий в окрестности ПГЗ (крипексы Cr_0 , Cr_N и $Cr_{N_{ISC}}$ рассчитаны по данным выборки *lcreepex*).

Красным цветом показана формула полиномиального тренда зависимости $Cr_N(M_S)$, используемая для нахождения $Cr_{N_{ISC}}$

Для событий же каталога *pcreeperex* зависимость $m_b(M_s)$ можно аппроксимировать только полиномиальным трендом ($R^2=0.5201$: рис. 2), т.к. в области магнитуд $M_s > 6.5$ линейный тренд ($R^2=0.493$: обозначен тонкой линией на рис. 2) выходит за пределы реального распределения событий этого каталога. Применение стандартного алгоритма расчёта крипекса как «разности между M_s и ортогональной регрессией M_s на m_b » [Каверина, Прозоров, 1994] (красная линия ортогональной регрессии показана на рис. 2, вверху) привело бы к систематическому и физически не оправданному завышению крипекса на больших магнитудах. Это относится ко всем перечисленным выше классическим алгоритмам расчёта крипекса, не учитывающим нелинейности $M_s(m_b)$, которая более явно проявляется на больших выборках, например, выборке *pcreeperex*, в 7 раз превосходящей *lcreeperex* по количеству записей (рис. 2).

Несмотря на недостаточную полноту данных каталога *lcreeperex* (сформированного по собственным определениям параметров M_s и m_b агентства ISC), применение описанного метода расчёта параметра Cr_{N_ISC} показывает на этом каталоге непротиворечивые результаты. Визуализация распределения в пространстве окрашенных по величине крипекса очагов землетрясений показывает (рис. 3а) преимущественно отрицательные значения (оттенки синего) для сла-

бых землетрясений, связанных с хрупким разрушением, и положительные значения (белый, жёлтый, красный) для крупных событий, вероятно, связанных с более глубинными квазипластическими процессами. Однако этот каталог не даёт парных определений магнитуд для глубинных событий, поэтому на карте отсутствует глубинная сейсмичность Памиро-Гиндукушской сейсмофокальной зоны (рис. 3а). Каталог *pcreeperex* данные о глубинных событиях содержит, но в целом даёт более пёструю картину распределения крипекса в пространстве (рис. 3б), что можно объяснить неблагоприятным влиянием фактора множественности источников определений M_s , собранных в этом каталоге. Вот почему для исследования очагов отдельных крупных землетрясений было решено использовать также региональные каталоги CSN и ВJI, значительно превосходящие ISC по полноте, и, при этом, имеющие собственные однозначные определения как M_s , так и m_b .

Приведём примеры сейсмогеодинамических исследований в очагах землетрясений средствами GIS-ENDDB, в частности, по графикам временного распределения ранжированных по магнитудам форшоков и афтершоков $M_s(t)$, а также графики поведения их крипекса $Cr_{N_cat}(t)$ по ряду крупнейших событий (рис. 4), произошедших в областях конвергенции плит. Временное распределение афтершоков отчётливо проявляет процесс

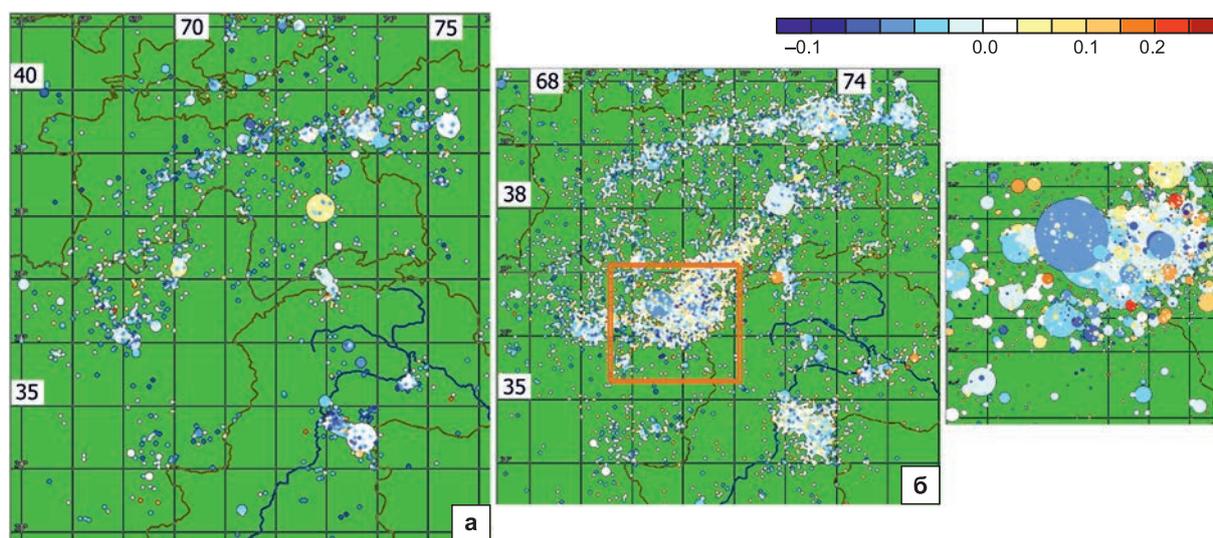


Рис. 3. Распределение на карте очагов землетрясений окрестности ПГЗ, окрашенных по величине крипекса (отрицательные значения – оттенки синего, положительные значения – оттенки жёлтого и красного): а – по выборке каталога ISC: *lcreeperex* (1560 событий); б – по выборке каталога ISC: *pcreeperex* (9734 событий) с зуммированием области ПГЗ.

Размер кружков соответствует магнитуде землетрясения ($\lg L = aK + c$, где $a=0.244$, $c=-2.266$ [Ризниченко, 1976]), цвет – величине крипекса

релаксации очага в первые часы после главного толчка парциальными, периодическими цепочками событий (графики $M_S(t)$ на рис. 4 а–в). Поведение крипекса в подавляющем большинстве примеров демонстрирует в момент главного толчка положительный скачок крипекса (что может характеризовать большой вклад квазипластического движения в механизм главных толчков, а иногда и нескольких последующих толчков), после чего в первые часы наблюдается динамика крипекса в пределах значений 0–0.3 или знакопеременная динамика с положительным трендом (парциальная дилатансия), затем постепенный или знакопеременный с отрицательным трендом спад (от нескольких часов до нескольких суток, месяцев), характеризующий переход среды к хрупкому разрушению.

Подобное поведение $Cr_{N,cat}$ было установлено по данным каталога ВЛ для Кашмирского землетрясения 08.10.2005 г., $M_S=7.6$ (красный график на рис. 4а); для землетрясений 21.01.2007 г., $M_S=7.5$ в Молуккском море, Индонезия; Симуширского 13.01.2007 г., $M_S=8.1$; сильнейших событий многолетнего роя у юго-западного побережья Суматры 04.06.2000 г., $M_S=7.9$; 13.02.2001 г., $M_S=7.4$; 10.04.2005 г., $M_S=7.0$; 12.09.2007 г., $M_S=8.6$ и 13.09.2007 г., $M_S=7.7$, несмотря на большой разброс их глубин от 10 до 64 км.

Отметим, однако, что значительная часть исследованных крупных землетрясений имеет почти нулевой либо близкий к фоновому крипекс. В этих случаях в первые часы после главного толчка крипексы характеризуются незначительным положительным скачком (на величину 0.1 или менее, а для глубоких афтершоков – более 0.1), каскадом таких скачков или плавным экспоненциальным ростом тренда. Эта особенность крипекса интуитивно объяснима воздействием главного толчка в первые часы афтершокового процесса на изменение состояния среды, далее продолжающееся аналогично описанному выше типичному сценарию. Такая картина наблюдается, например, по данным каталога ISC для Кашмирского землетрясения с $M_S=7.6$ и его сильнейшего афтершока с $M_S=6.2$ 08.10.2005 г. (рис. 4а), для землетрясения вблизи о. Хонсю 28.12.1994 г. с $M_S=7.9$ (каталог CSN), для роя землетрясений вблизи пролива Фриза (рис. 4в) (каталог CSN), а также для землетрясения Тохоку 11.03.2011 г. с $M_S=8.7$ (рис. 4б) (каталоги ISC, CSN).

Не исключено, что близкие к нулю (т.е. средние по выборке) значения крипекса наиболее крупных (а значит, наиболее редких) событий с $M_S>7.5$ могут являться следствием статистической необеспеченности нелинейного трен-

да $Cr_N(M_S)$ при нахождении удовлетворительной аппроксимации в области высоких значений M_S на используемых выборках. Например, в выборках из каталога ISC: *lcreepex* и *pcreeperex* (рис. 2) лишь пять и восемь событий соответственно имеют магнитуду $M_S \geq 7$. А в используемой (рис. 4 б–в) выборке каталога CSN уже 23 события имеют магнитуду $M_S \geq 7$, девять из которых – $M_S \geq 7.5$ и одно – $M_S \geq 8$. Это обеспечивает высокую статистическую погрешность оценок для событий $M_S \geq 7$ даже для каталога CSN – 21%. Более полным является каталог ВЛ (107 событий с $M_S \geq 7$, т.е. погрешность <10%). Но более достоверную информацию о характере разрушения в очаге (с удовлетворительной погрешностью количественных оценок: <3%) может дать поведение во времени крипекса событий с $M_S < 7$: форшоков и афтершоков или менее крупных главных толчков, принадлежащих магнитудному диапазону со статистически достаточным размером выборки (сотни, тысячи событий). Вот почему рост крипекса сразу после главного толчка, имеющего нулевое значение, может означать переход к более достоверным величинам крипекса.

С точки зрения физической интерпретации можно предположить, что землетрясения со значительным положительным крипексом являются результатом как хрупкого (под действием упругих напряжений), так и термодинамического преодоления предела прочности пород [Журков, Нарзулаев, 1953] (например, под действием «деформационного разогрева» [Кулаковский и др., 2015] для первых или главных толчков или «сдвигового плавления» [Лыскова, 2014] в первые часы после главного толчка). Степень термодинамического воздействия может определять результирующую величину крипекса: от нуля при её условном равенстве масштабу хрупкого разрушения (принимаемому для статистического среднего) до положительного значения, определяющего превышение её вклада над хрупким разрушением. А разные сценарии поведения крипекса перед сильным толчком являются убедительным указанием на обилие форм перехода в критичность, которая потенциально оперативно предсказуема согласно [Калинников и др., 2017].

Исследования только начаты, поэтому многое подлежит уточнению. Например, для Кашмирского землетрясения более статистически достоверным является высокое значение крипекса по каталогу ВЛ: $Cr_{N,ВЛ}=0.33$. Физически его можно объяснить воздействием глубинных термодинамических процессов на подготовку главного

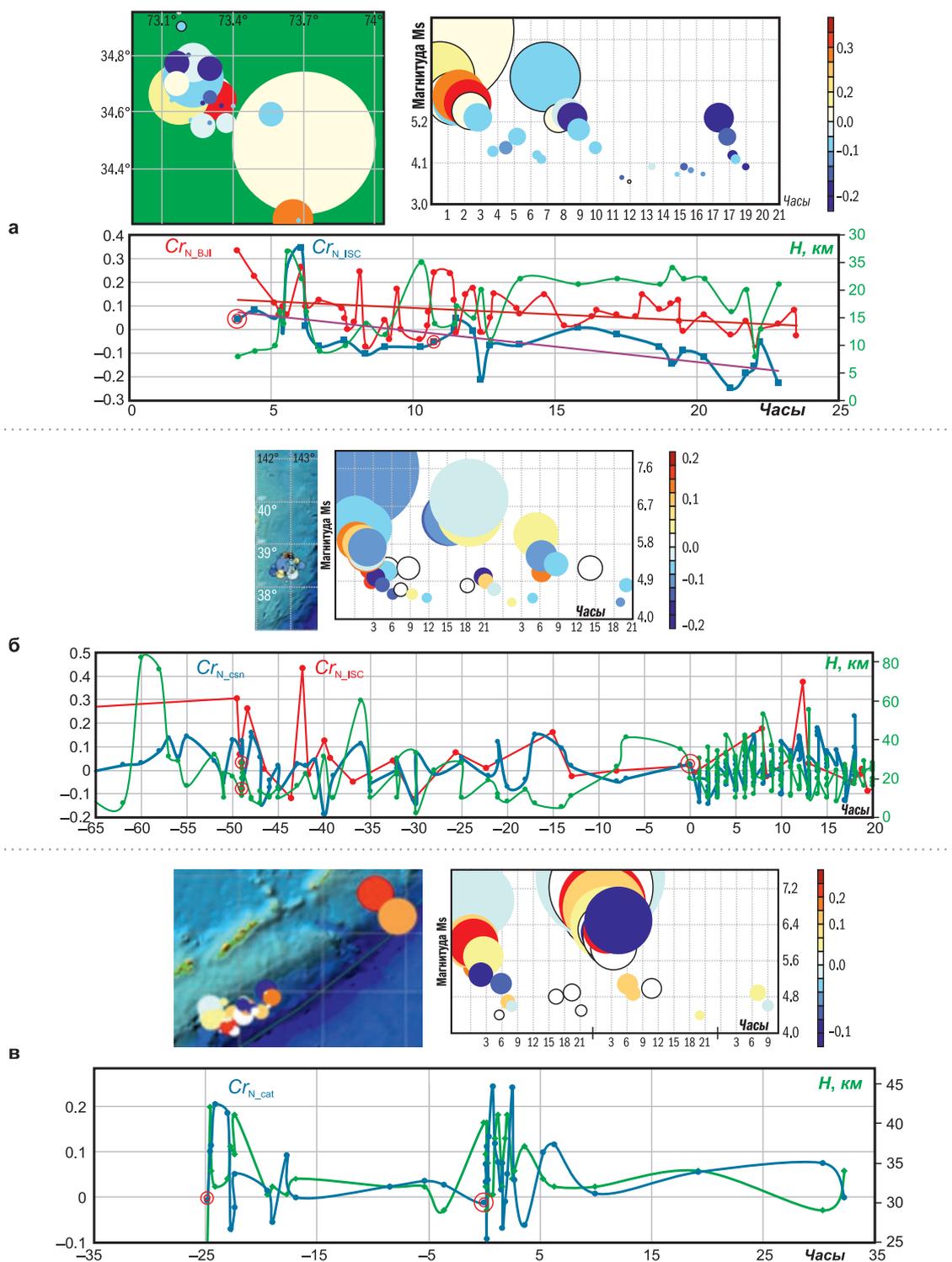


Рис. 4. Развитие во времени (часы) сейсмогеодинамического процесса ($M_s(t)$ и $Cr_{N_cat}(t)$) в очаговой зоне землетрясений: а – Кашмирского 08.10.2005 г., на графике $Cr_{N_cat}(t)$ обведены крипексы наиболее крупных толчков: главного ($M_s=7.6$) и афтершока ($M_s=6.2$), график $H(t)$ по ISC – шкала справа; б – Тохоку (график $M_s(t)$ ограничен двумя сутками 9.03–10.03), на графике $Cr_{N_cat}(t)$ обведены крипексы форшока (09.03.2011 г., $M_s=6.8$) и главного толчка (11.03.2011 г., $M_s=8.7$); в – роя у пролива Фриза, обведены крипексы форшока (02.12.1995 г., $M_s=6.9$) и главного толчка (03.12.1995 г., $M_s=7.5$), на карте во врезке кроме роя нанесены Симуширские землетрясения (15.11.2006 г., $M_s=8.0$ и 13.01.2007 г., $M_s=8.1$, ВЛ), имеющие положительный крипекс.

Графики $M_s(t)$ и карты получены в системе GIS-ENDDB (радиус кругов определён размерами очага [Ризниченко, 1976])

толчка, учитывая, что каталог NEIC определяет его глубину в 26 км, а афтершоков – только 7–13 км. Интересно отметить, что каталог ISC в настоящее время (август 2021 г.), наоборот, определяет глубину главного толчка в 8.2 км, а афтершоков первых часов – в 21–24 км (за редким исключением). Однако используемый в настоящей работе оперативный каталог ISC (по ещё не уточнённым данным по [Storchak et al., 2020] – до февраля 2020 г.) указывал на связь с глубинной сейсмичностью как первого толчка (благодаря двум форшокам за 3 часа до события в его очаге, имевших магнитуду 5.4 и 6.5, а глубину 15 и 14 км), так и его афтершоков, всплески крипекса которых хорошо коррелируют с глубиной (см. ISC-графики $Cr_{N_ISC}(t)$ и $H(t)$ на рис. 4а). Более того, сопоставление графиков $Cr_{N_cat}(t)$ и $H(t)$ для землетрясения Тохоку или Фриза (рис. 4 б–в) показывают, что всплески крипекса после главного толчка, а также главные отмеченные окружностью на графиках события имеют большие глубины или ассоциируются с большими глубинами предваряющих их толчков: форшок Тохоку предваряется событиями на 82 и 76 км (сам форшок – 10 км), Тохоку – на 41 и 35 км (само событие – 20 км), всплески крипекса после первого толчка пролива Фриза: 42 и 41 км, второй и главный толчок – 40 км, а два всплеска крипекса после него предваряются событиями на глубине 41 км.

Другим объяснением случаев положительного скачка крипекса в момент главного толчка (особенно в случае отсутствия его связи с глубиной) может быть процесс дилатансии – разрушения пород в очаге и перевода их в мелкодисперсное (сыпучее) состояние с высоким поглощением высокочастотных сейсмических волн, в результате чего сейсмическое излучение по выходе из очага оказывается обеднённым высокочастотной составляющей. Такая же модель (но уже в виде разрушения отдельных хрупких парциальностей очага и перевода их в мелкодисперсное состояние) хорошо объясняет знакопеременное поведение крипекса после главных толчков: Тохоку (рис. 4б) и у пролива Фриза (рис. 4в). Впоследствии геофизическая среда, благодаря флюидам, давлению и температуре, залечивается (например, хлориды магния и железа цементируют сыпучие силикаты за несколько суток до монолитного состояния горной породы). Залечивание сопровождается возникновением новых внутренних напряжений (например, из-за кристаллизационного давления), и в очаге наблюдается плавный отрицательный тренд величины крипекса в течение нескольких суток или месяцев.

Заключение

Реализованный в геоинформационной системе GIS-ENDDDB метод расчёта нормированного крипекса Cr_N и его статистической модификации Cr_{N_cat} позволяет использовать последний в комплексном геодинамическом анализе, выявляя связь сейсмических событий с тектонической обстановкой (по его изменениям в пространстве), а также закономерности процессов сейсмогенеза в очаге до и после рассматриваемого сильного события (по изменению Cr_{N_cat} во времени).

Приведённые примеры использования этого параметра в геодинамических исследованиях конкретных очагов позволяют предположить, что большинство афтершоковых последовательностей крупных землетрясений являются актами парциального хрупкого разрушения, преодолевающего предел прочности пород комплексом воздействий. Комплекс, возникший в момент главного толчка и в первые часы после него, приводит к росту вклада вязкого скольжения в механизм разрушения, что отмечается максимумом крипекса (либо постепенным ростом его тренда после наиболее крупных толчков). Такое изменение состояния геофизической среды может быть вызвано дилатансией в отдельных хрупких парциальностях очага в момент главного толчка, либо термодинамическим воздействием на очаг, связанным с «горячими» глубинными процессами.

Развитость термоактивационного механизма преодоления предела прочности среды в разномасштабных структурных единицах очага определяет результирующую величину крипекса: отрицательную при охвате всех масштабов хрупкого разрушения; положительную при преимущественно множественном мелкомасштабном разрыве связей в твёрдом теле.

Степень достоверности полученных результатов оценивается на основе сравнительного анализа данных используемых каталогов или их отдельных выборок.

Исследования выполнены в рамках государственного задания № 0251-2021-0004 ИВМиМГ СО РАН.

Литература

- Болдырев С.А., Левина В.И. Крипекс камчатских мелкофокусных землетрясений // Физика Земли. – 2008. – № 3. – С. 40–57.
- Журков Н.С., Нарзулаев Б.Н. Временная зависимость прочности твёрдых тел // Журнал технической физики. – 1953. – Т. 23, № 10. – С. 1677–1689.

- Каверина А.Н.* Спектрально-магнитудные аномалии сейсмических источников: автореферат дисс. ... канд. физ.-мат. наук. — М.: ИТПЗиМГ РАН, 1998. — 16 с.
- Каверина А.Н., Прозоров А.Г.* Вариации крипекса в зависимости от типа тектонических структур и механизма очага: статистический анализ // Геодинамика и прогноз землетрясений (Вычислительная сейсмология, вып. 26). — М.: Наука, 1994. — С. 85–93. — URL: https://www.itpz-ran.ru/wp-content/vs/26/v26_085_Kaverina.pdf
- Калинников И.И., Манукин А.Б., Матюнин В.П.* Землетрясения и достоверность прогноза. Процессы термоактивации и мезомеханика очаговой зоны // Доклады Академии наук. — 2017. — Т. 474, № 4. — С. 483–485. doi: 10.7868/S0869565217040181
- Каталог землетрясений сети станций Китая* // Национальный центр данных о землетрясениях [сайт]. — URL: <https://data.earthquake.cn/gcywfl/index.html> (дата обращения 17.03.2021).
- Кулаковский А.Л., Морозов Ю.А., Смольская А.И.* Тектонический стресс как дополнительный термодинамический фактор метаморфизма // Геофизические исследования. — 2015. — Т. 16, № 1. — С. 44–68.
- Лыскова Е.Л.* Глубокофокусные землетрясения // Вопросы геофизики. Вып. 47. — СПб: Изд-во СПбГУ, 2014. (Учёные записки СПбГУ № 447). — С. 62–74.
- Михеева А.В., Дядьков П.Г., Марчук А.Г., Егоров А.А.* Геоинформационные технологии экспертной системы GIS-ENDDB («Базы данных природных катастроф Земли») // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. — 2016. — Т. 14, вып. 3. — С. 49–60.
- Мишаткин В.Н., Захарченко Н.З.* Проблема сертификации сейсмических станций // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Второй региональной научно-технической конференции / Отв. ред. В.Н. Чебров. — Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2010. — С. 278–282.
- Неверова Н.П.* Крипекс — характеристика очага землетрясения // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Четвёртой Международной сейсмологической школы. — Обнинск: ГС РАН, 2009. — С. 127–129.
- Прозоров А.Г., Хадсон Д.А.* Изменение крипекса перед сильными землетрясениями // Вычислительная сейсмология. — М.: Наука, 1983. — Вып. 15. — С. 26–35.
- Прозоров А.Г., Хадсон Д.А.* Статистический анализ поверхностных и объёмных волн при землетрясениях // Магнитуда и энергетическая классификация землетрясений. Т. 2. — М.: Наука, 1974. — С. 208–216.
- Ризниченко Ю.В.* Размеры очага корового землетрясения и сейсмический момент // Исследования по физике землетрясений. — М.: Наука, 1976. — С. 9–27.
- Data reports contributed by: BJI* // International Seismological Centre [Site]. — URL: <http://www.isc.ac.uk/cgi-bin/collect?Reporter=BJI> (дата обращения 17.03.2021). — United Kingdom, Thatcham: Internat. Seismol. Centre, 2021.
- Earthquake Hazards. Earthquakes* // USGS [Site]. — URL: <https://www.usgs.gov/natural-hazards/earthquake-hazards/earthquakes> (дата обращения 17.03.2021).
- ISC Bulletin: event catalogue search* // International Seismological Centre [Site]. — URL: <http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/catalogue/#iscbulletin/>. — United Kingdom, Thatcham: Internat. Seismol. Centre, 2020.
- Kalinnikov I.I., Mikheeva A.V.* The Creepex-analysis of processes in large earthquakes focal zones by the GIS-ENDDB tools on the Tohoku example // Bulletin of the Novosibirsk Computing Center. Series: Mathematical Modeling in Geophysics. — 2020. — V. 22. — P. 11–21.
- 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, Iss. 1. — P. 249–265.
- Mikheeva A.V., Kalinnikov I.I.* Creepex as a parameter of seismo-geodynamic studies based on geo-information systems // CEUR Workshop Proceedings: Proceeding of the All-Russian Conference “Spatial Data Processing for Monitoring of Natural and Anthropogenic Processes”. — Novosibirsk, Russia, August 24–27, 2021.
- Storchak D.A., Harris J., Brown L., Lieser K., Shumba B., Di Giacomo D.* Rebuild of the Bulletin of the International Seismological Centre (ISC) — part 2: 1980–2010 // Geoscience Letters. — 2020. — V. 7. — Article number: 18. doi: 10.1186/s40562-020-00164-6

Сведения об авторах

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), г. Новосибирск, Россия; 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

Калинников Игорь Иванович, канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр. Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук (ИФЗ РАН), г. Москва, Россия. E-mail: i-kalinn@yandex.ru

Creepex–analysis of processes in focal zones of large earthquakes by means of GIS–ENDDB

© 2021 A.V. Mikheeva^{1,2}, I.I. Kalinnikov³

¹ICMMG SB RAS, Novosibirsk, Russia; ²IPGG SB RAS, Novosibirsk, Russia; ³IPE RAS, Moscow, Russia

Received September 15, 2021

Abstract The creepex (creep & explosion) parameter provides information on the relation between low- and high-frequency radiation components in the earthquake source and has become a physically meaningful tool for analyzing various aspects of seismogenesis, in particular, the diagnostics of the preparation processes and the its aftershocks activity of a strong event. This paper investigates the spatial-temporal dynamics of creepex in the focal zones of a number of the major earthquakes from the plate convergence regions, including continental Kashmir earthquake (08.10.2005, $M_s=7.6$) and continental-oceanic Tohoku (11.03.2011, $M_w=8.7$). One of the goals of this work is to demonstrate the capabilities of the method in studying physically grounded patterns of focal zones development at the first hours after the main shock. Because of this study, the following regularities of the source relaxation process were revealed: the partiality of the aftershock process, positive values of the creepex at its first hours (explained by the influence of the dilatancy process), and abrupt changes in the creepex during deep transitions (explained by the thermodynamic effect and by the increase in pressure with depth).

Keywords Catalogs and databases of earthquake, seismic and geodynamic process, tectonic environments.

For citation 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: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2021.4.01>

References

- Data reports contributed by:* BJI. International Seismological Centre (2021). Retrieved from <http://www.isc.ac.uk/cgi-bin/collect?Reporter=BJI>
- Boldyrev, S.A., & Levina, V.I. (2008). Creepex of Kamchatka shallow earthquakes. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 44(3), 209-225. doi: 10.1007/s11486-008-3004-8
- Earthquake Catalogue of China Station Network.* National Earthquake Science Data Center. (2021). Retrieved from <https://data.earthquake.cn/gcywfl/index.html>
- USGS. Earthquake Hazards. Earthquakes. (2021). Retrieved from <https://www.usgs.gov/natural-hazards/earthquake-hazards/earthquakes>
- ISC Bulletin: Event catalogue search (2021). Retrieved from <http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/catalogue/#iscbulletin/>. United Kingdom, Thatcham: Internat. Seismol. Centre. doi: 10.31905/D808B830
- Kalinnikov, I.I., & Mikheeva, A.V. (2020). The Creepex-analysis of processes in large earthquakes focal zones by the GIS-ENDDB tools on the Tohoku example. *Bulletin of the Novosibirsk Computing Center. Series: Mathematical Modeling in Geophysics*, 22, 11-21.
- Kalinnikov, I.I., Manukin, A.B., & Matyunin, V.P. (2017). Earthquakes and forecast reliability: thermoactivation and mesomechanics of the focal zone. *Doklady Earth Sciences*, 474(2), 646-648. doi: 10.1134/S1028334X17060046
- Kaverina, A.N. (1998). *Spektralno-magnitudnyye anomalii seysmicheskikh istochnikov* [Spectral-magnitude anomalies of seismic sources: Dis. ... PhD. phys.-math. sciences]. Moscow, Russia: IEPT RAS Publ, 16 p. (In Russ.).
- Kaverina, A.N., & Prozorov, A.G. (1994). [Variations of creepex depending on the type of tectonic structures and the focal mechanism: statistical analysis]. In *Geodinamika i prognoz zemletryaseniy* [Geodynamics and forecast of earthquakes] (*Vychisl. seysmologiya* [Computational seismology, Iss. 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.
- Kulakovskiy, A.L., Morozov, Yu.A., & Smulskaya, A.I. (2015). [Tectonic stress as additional thermodynamic factor of metamorphism (Northern Ladoga Region)]. *Geofizicheskiye issledovaniya* [Geophysical Research], 16(1), 44-68. (In Russ.).
- Lyskova, E.L. (2014). [Deep focus earthquakes]. In *Voprosy geofiziki* [Problems of Geophysics, Iss. 47]

- (Scientific notes of St. Petersburg State University No. 447) (pp. 62-74). St. Petersburg, Russia: Publishing house of St. Petersburg State University. (In Russ.).
- Mikheeva, A.V., & Kalinnikov, I.I. (2021). Creepex as a parameter of seismo-geodynamic studies based on geo-information systems. In *CEUR Workshop Proceedings: All-Russian Conference "Spatial Data Processing for Monitoring of Natural and Anthropogenic Processes"*. Novosibirsk, Russia.
- Mikheeva, A.V., Dyadkov, P.G., Marchuk, A.G., & Egorov, A.A. (2016). [Geoinformation technologies of the expert system GIS-ENDDB ("Databases of Earth's Natural Disasters")]. *Vestnik NGU. Seriya: Informatsionnyye tekhnologii* [Vestnik NSU. Series: Information Technologies], 14(3), 49-60. (In Russ.).
- Mishatkin, V.N., & Zakharchenko, N.Z. (2012). [The problem of certification of seismic stations]. In *Problemy kompleksnogo geofizicheskogo monitoringa Dal'nego Vostoka Rossii. Trudy Vtoroi regional'noi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii. Otv. red. V.N. Chebrov* [Problems of complex geophysical monitoring of the Russian Far East. Proceedings of the Second Regional Scientific and Technical Conference. Ed. by V.N. Chebrov] (pp. 278-282). Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
- Neverova, N.P. (2009). [Creepex - characteristics of an earthquake source]. In *Materialy IV Mezhdunarodnoy seysmologicheskoy shkoly "Sovremennyye metody obrabotki i interpretatsii seysmologicheskikh dannykh"* [Proceedings of the IV International Seismological Workshop "Modern Methods of Processing and Interpretation of Seismological Data"] (pp. 127-129). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
- Prozorov, A.G., & Hudson, D.A. (1974). [Statistical analysis of surface and body waves during earthquakes]. In *Magnituda i energeticheskaya klassifikatsiya zemletriasenii. T. 2* [Magnitude and energy classification of earthquakes. V. 2] (pp. 208-216). Moscow, Russia: Nauka Publ. (In Russ.).
- Prozorov, A.G., & Hudson, D.A. (1983). [Changes in creepex before strong earthquakes]. In *Vychislitel'naya seysmologiya, vyp. 15* [Computational seismology, Iss. 15] (pp. 26-35). Moscow, Russia: Nauka Publ. (In Russ.).
- Riznichenko, Yu.V. (1976). [The size of the core of a crust earthquake and seismic moment]. In *Issledovaniya po fizike zemletryaseniya* [Studies in the physics of earthquakes] (pp. 9-27). Moscow, Russia: Nauka Publ. (In Russ.).
- Storchak, D.A., Harris, J., Brown, L., Lieser, K., Shumba, B., & Di Giacomo, D. (2020). Rebuild of the Bulletin of the International Seismological Centre (ISC) – part 2: 1980–2010. *Geoscience Letters*, 7(18). doi: 10.1186/s40562-020-00164-6
- Zhurkov, N.S., & Narzulaev, B.N. (1953). [Time dependence of the strength of solids]. In *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki* [Journal of Technical Physics], 23(10), 1677-1689. (In Russ.).

Information about author

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

Kalinnikov Igor Ivanovich, PhD, Leading Researcher of the Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences (IPE RAS), Moscow, Russia. E-mail: i-kalinn@yandex.ru