

## О влиянии глубинной сейсмичности на подготовку крупных землетрясений Южно-Азиатского региона

*А. В. Михеева<sup>1\*</sup>, И. И. Калинин<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,  
г. Новосибирск, Российская Федерация,

<sup>2</sup> Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Российская Федерация

\* e-mail: anna@omzg.sccc.ru

**Аннотация.** Динамика изменения параметра крипекс во времени и его сопоставление с изменением других параметров землетрясений (магнитуды и глубины) используется для проверки тезиса о воздействии на сильные коровые события со стороны глубинных процессов, связанных с преобразованием и перемещением вещества в верхней мантии на примере сейсмичности южно-азиатского региона.

**Ключевые слова:** глубинная сейсмичность, механизм очага, параметры землетрясений, крипекс, прямая и обратная синхронная корреляция временных графиков

## On the influence of deep seismicity on the preparation of large earthquakes in the South-Asian region

*A. V. Mikheeva<sup>1\*</sup>, I. I. Kalinnikov<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, Novosibirsk,  
Russian Federation,

<sup>2</sup> Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS, Moscow, Russian Federation

\* e-mail: anna@omzg.sccc.ru

**Annotation.** The change dynamics in the creepex parameter over time and its comparison with changes in other earthquake parameters (magnitude and depth) is used to test the thesis about the influence on strong crustal events from deep processes associated with the transformation and movement of matter in the upper mantle using the example of the seismicity of the South-Asian region.

**Keywords:** deep seismicity, focal mechanism, earthquake parameters, creepex, direct and inverse synchronous correlation of time plots

### *Введение*

Известен тезис, что поверхностные землетрясения предваряются глубинной сейсмичностью, так проявляется влияние мантийных процессов на коровую сейсмичность [1-3]. В связи с включением в комплекс методов геодинамического анализа геоинформационной системы GIS-ENDDb нового метода расчёта нормированного крипекса  $Cr_N$  можно попытаться выявить наличие взаимосвязи глубинной и коровой сейсмичности по изменению  $Cr_{N\_cat}$  во времени.

Величина крипекса определяется развитостью термоактивационного механизма преодоления предела прочности среды в разномасштабных структурных единицах очага [4]. В рамках этого постулата скрыто много аспектов подлежащих детальному изучению. Предполагая, что амплитуда отрицательного значе-

ния крипекса растёт при охвате всех масштабов хрупкого разрушения, а положительного - при преимущественно множественном мелкомасштабном разрыве связей в твёрдом теле, следует ожидать, что глубинная сейсмичность будет характеризоваться большей вариабельностью величины крипекса. С одной стороны, фактор давления обеспечивает большую консолидацию среды, обусловленную высокой скоростью залечивания разрывов, т.е. увеличивает масштабность разрушения. С другой стороны, температура увеличивает подвижность мелких структурных элементов и понижает термоактивационный порог разрушения связей, т.е. увеличивает относительную «ползучесть» пород по сравнению с повышенной «хрупкостью» поверхностных слоев. Здесь прослеживается аналогия с объяснением наблюдаемого повышения значений крипекса для большинства крупных коровых землетрясений возможным влиянием на хрупкость явления дилатансии [4]. Кроме того, известно о статистически значимом уменьшении крипекса вследствие высокого уровня тектонических напряжений в очаге и взбросо-сбросовой компоненты подвижки [5], характерных для большинства глубинных землетрясений Южно-Азиатского региона, и о повышении крипекса вследствие приуроченности среднеглубинной сейсмичности зон субдукции к областям современного активного вулканизма [6] - зонам пониженной вязкости.

В работе [7] на примере сейсмичности Памиро-Гиндукушской сейсмофокальной зоны (ПГСЗ) по каталогу ISC выявлены свойства динамики параметров глубинных землетрясений с  $H > 100$  км до и после крупнейшего глубинного события этой зоны (26.10.15г,  $M_S = 7.6$ ,  $H = 206$  км): 1) синхронность графиков  $M_S(t)$  и  $H(t)$  друг другу на интервале от 26 месяцев до события 26.10.15 по 28 месяцев после него, 2) график  $Cr_{N\_IDC}(t)$  становится синхронным с  $M_S(t)$  и  $H(t)$  за 11 дней до главного толчка и на протяжении 29 месяцев характеризует отрицательным крипексом большую хрупкость более мелкофокусных и слабых землетрясений. Отметим, что в этом примере синхронность графиков отмечается для событий с  $M_S = 4-5.3$  (для этого диапазона магнитуд оценка достоверности расчетов по данным каталога ISC дает погрешность  $< 8\%$  [7]) и глубиной  $H = 104-188$  км. Уникальность этого примера в том, что сильнейшее событие происходит на большей глубине, чем большинство зафиксированных глубинных событий с  $H > 100$  км. Кроме того, в работе [7] отмечена закономерность синхронного поведения графиков  $Cr_{N\_cat}(t)$  и  $M_S(t)$  в «горячих» зонах спрединга. Отметим, что синхронностью временных графиков различных параметров здесь называется синхронная периодичность по фазе, т.е. совпадение частот колебаний (как синфазных, так и противофазных - прямая и обратная синхронная корреляция) этих графиков.

В настоящей работе поставлена задача аналогичным способом выявить связь между сильными коровыми толчками и предваряющей их умеренной глубинной сейсмичностью, для чего будут рассмотрены характеристики поведения друг относительно друга графиков  $M_S(t)$ ,  $H(t)$  и  $Cr_{N\_cat}(t)$  для землетрясений с  $H \geq 50$  км в окрестности сильнейших коровых событий Южно-Азиатского региона (с  $M_S \geq 7.5$  и  $H < 50$  км) за 2001-2008 годы по данным более представительного [4] по сравнению с ISC китайского каталога CSN. Если такая связь будет прослеживаться, то необходимо показать ее характерные особенности, позволяющие

говорить о прогностических признаках, выраженных в параметре крипекс, для крупных коровых землетрясений региона.

### ***Данные и методы обработки***

Исследование выполнялось в среде геоинформационной системы GIS-ENDDDB [8] с использованием нового метода расчёта нормированного крипекса  $Cr_N$  и его статистической модификации  $Cr_{N\_cat}$ , подробно описанного в [9], и регионального каталога CSN [10], содержащего 58931 записей по всему миру за 26.07.1999-31.08.2017г с парами определений магнитуд:  $M_S$  и  $m_B$  для коровых землетрясений, и  $m_B$  и  $m_V$  для глубинных событий ( $H \geq 50$  км), из которых 31304 записей - за период 01.01.2000–31.12.2008. В программе GIS-ENDDDB осуществляется подготовка данных для изучения сейсмичности: выборка по уровням магнитуд и глубин, выявление на карте окрестностей наиболее крупных землетрясений (при необходимости используются статистические методы GIS-ENDDDB выявления связанных по времени и расстоянию событий) и расчет крипекс-параметра  $Cr_{N\_cat}$  для полученного множества землетрясений. Отметим, что для представленного выше набора данных CSN формула полиномиального тренда, используемая для расчета параметра крипекс, имеет вид:  $Cr_{N\_CSN} = Cr_N - 0,0047M_S^3 + 0,1068M_S^2 - 0,9142M_S + 2,4569$ .

После описанной подготовки данные для каждого множества землетрясений (рис. 1) исследуются по графикам изменения  $Cr_{N\_CSN}(t)$  в сравнении с изменением  $M_S(t)$  и  $H(t)$ ; прослеживаются закономерности их совместной динамики на различных этапах развития очага, выявляются факторы, предположительно влияющие на изменение крипекса.

Кроме того, для оценивания общей тектонической обстановки, окружающей очаги исследуемых сильных землетрясений, используется метод GIS-ENDDDB расчета суммарного направления скольжения, модифицированный с целью различения не только сбросовой и взбросовой компонент напряжения (областей растяжения и сжатия), но и сдвиговой составляющей суммарного поля [11].

### ***Поведение параметров глубинной сейсмичности в окрестности сильнейших землетрясений Южно-Азиатского региона***

В работе рассмотрены 8 областей (рис. 1) – окрестностей крупнейших событий (среди которых есть пары и каскады сильнейших событий). Таким образом, охвачено 15 коровых землетрясений региона с  $M_S \geq 7.5$ : 14.11.2001,  $M_S=7,6$  (Тибет); 02.01.2002,  $M_S=7,5$  (Папуа); 10.10.2002,  $M_S=7,5$  и 07.02.2004,  $M_S=7,5$  (Индонезия); 20.01.2003,  $M_S=7,6$ , 01.04.2007,  $M_S=7,9$  и  $M_S=7,7$  (Папуа); 24.07.2005,  $M_S=7,6$  (Суматра); 21.01.2007,  $M_S=7,5$  (Индонезия); 15.11.2006, 13.01.2007,  $M_S=8-8.1$  (пролив Фриза); 12.09.2007,  $M_S=8,6$ , 12.09.2007,  $M_S=8,2$ , 13.09.2007,  $M_S=7,7$  и 20.02.2008,  $M_S=7,7$  (Суматра).

Из них только четыре имеют сдвиговой механизм очага: 14.11.2001,  $M_S=7,6$  (Тибет); 10.10.2002,  $M_S=7,5$  и 07.02.2004,  $M_S=7,5$  (Индонезия); 24.07.2005,  $M_S=7,6$  (Суматра), хотя и произошли они в обстановке общего тектонического сжатия. Графики  $Cr_{N\_CSN}(t)$  и  $M_S(t)$  по глубинной сейсмичности в окрестностях всех че-

тырех сдвиговых событий демонстрируют прямую синхронную корреляцию (за исключением некоторых, отмеченных на графиках, единичных точек), начинающуюся, соответственно, за 135, 532, 89 и 34 дня до главного события сдвигового типа. Что касается графика изменения глубины  $H(t)$ , то его синхронность с ними наблюдается не всегда (лишь на отдельных фрагментах графика), что объясняется меньшей дифференцированностью по глубине реологических свойств среды на глубинах верхней мантии по сравнению с коровыми слоями, а также описанные выше особенности глубинной сейсмичности зон субдукции. После главного корового толчка синхронность  $Cr_{N\_CSN}(t)$  и  $M_S(t)$  либо полностью нарушается (как в случаях 07.02.2004 и 24.07.2005), либо сменяется на обратную синхронную корреляцию (т.е. синхронность в противофазе) этих графиков (в случаях 14.11.2001 и 10.10.2002) (Рис. 2).

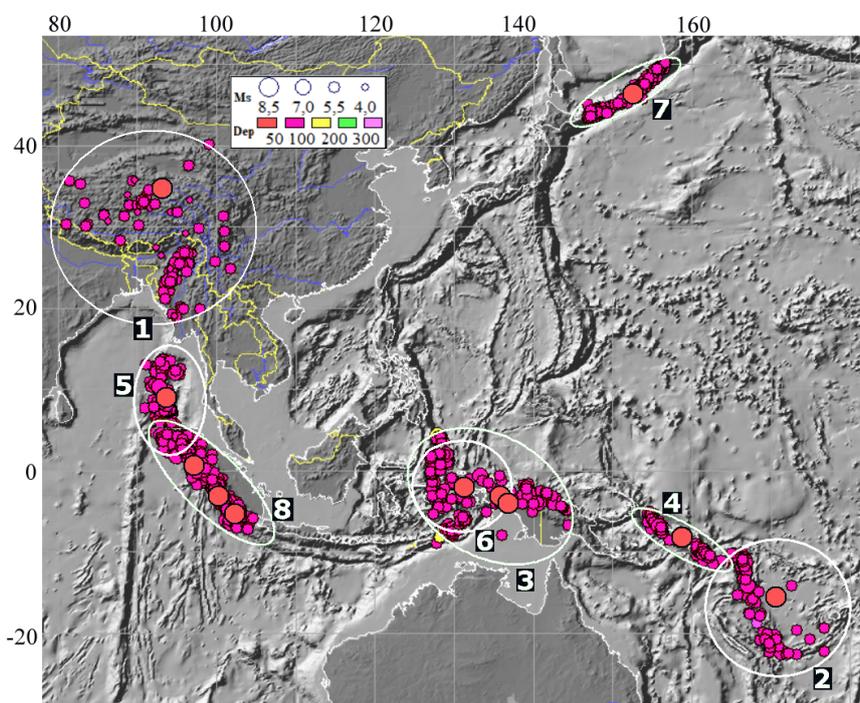


Рис. 1. Распределение глубинной сейсмичности ( $H \geq 50$  км) в окрестности сильнейших коровых землетрясений ( $M_S \geq 7.5$  и  $H < 50$  км) Южно-Азиатского региона за 2001-2008 годы, полученное средствами системы GIS-ENDDB:

1 – Тибет, 14.11.2001,  $M_S=7,6$ ; 2 – Папуа, 02.01.2002,  $M_S=7,5$ ; 3 – Индонезия, 10.10.2002,  $M_S=7,5$ , 07.02.2004,  $M_S=7,5$ ; 4 – Папуа, 20.01.2003,  $M_S=7,6$ , 01.04.2007,  $M_S=7,9$ ,  $M_S=7,7$ ; 5 – Суматра, 24.07.2005,  $M_S=7,6$ ; 6 – Индонезия, 21.01.2007,  $M_S=7,5$ ; 7 – пролив Фриза, 15.11.2006, 13.01.2007,  $M_S=8-8,1$ ; 7 – Суматра, 12.09.2007,  $M_S=8,6$ , 12.09.2007,  $M_S=8,2$ , 13.09.2007,  $M_S=7,7$ , 20.02.2008,  $M_S=7,7$

В работе [7] было высказано предположение, что прямо-пропорциональная синхронность изменения параметров  $H$ ,  $M_S$  и  $Cr_{N\_cat}$  характеризует состояние среды, благоприятное для завершения подготовки крупного землетрясения в активном очаге. В настоящей работе это предположение однозначно подтверди-

лось (за исключением обязательной синхронной корреляции с глубиной) для глубинной сейсмичности перед сильными коровыми землетрясениями сдвигового типа. Прямо-пропорциональную связь крипекса глубинных землетрясений с магнитудой можно объяснить растущей гетерогенностью среды одновременно с ростом размера очага более сильных толчков, что, видимо, характерно для сейсмичности зон с пониженной вязкостью и вызвано поступлением глубинного материала (например водорода) и неравномерностью фазовых переходов его взаимодействующих компонент [7].

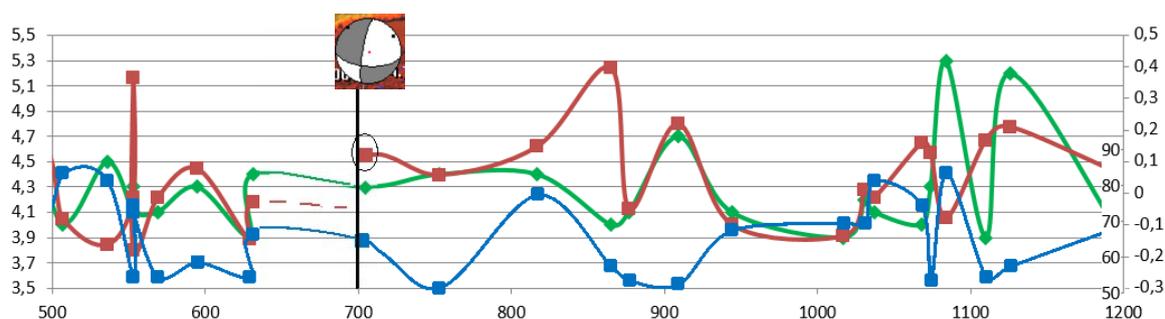


Рис. 2. Распределение параметров  $M_S(t)$ ,  $H(t)$  и  $Cr_{N\_CSN}(t)$  глубинной сейсмичности (с  $H \geq 50$  км) в окрестности сильного корового землетрясения 14.11.2001,  $M_S=7,6$ ,  $H=11$  км (Тибет), отмеченного вертикальной чертой.

На отмеченном оранжевой линией временном отрезке видна прямая синхронная корреляция всех трех графиков (коэффициент корреляции ( $K_{COR}$ ) графиков  $M_S(t)$  и  $Cr_{N\_CSN}(t)$  равен 0,7192 против 0,0756 для всего роя,  $K_{COR}$  графиков  $M_S(t)$  и  $H(t)$  равен 0,8588 против 0,0302 для всего роя) за 135 дней до главного события, и обратная корреляция графиков  $M_S(t)$  и  $Cr_{N\_CSN}(t)$  ( $K_{COR}=-0,4915$ ) в течение 173 дней после него. Овалом отмечены точки исключения (в данном случае, асинхронный скачок значения  $Cr_{N\_CSN}$  после главного события)

Для сильных событий со взбросо-сбросовым механизмом (независимо от типа окружающей тектонической обстановки) выявляются другие закономерности динамики параметров глубинной сейсмичности. В рассмотренной выборке таких событий три, два из которых множественные: 02.01.2002 (Попуа); двойное: 15.11.2006 и 13.01.2007 (пролив Фриза), а также серия: 12.09.2007, 12.09.2007, 13.09.2007 и 20.02.2008 (близ о. Суматра). Синхронное поведение графиков  $M_S$  и  $Cr_{N\_cat}$  здесь начинается, соответственно, за 230, 335, 162 дней до первого главного толчка, но непосредственно перед ним (от нескольких дней до нескольких десятков дней) нарушается одним или несколькими глубинными событиями с асинхронным значением крипекса. После главного события синхронность восстанавливается, продолжаясь ещё, соответственно, 459, 49 и 90 дней после главных толчков.

Тип синхронности здесь в основном прямо-пропорциональный, лишь после множественного землетрясения 12.09.2007 (через 73 дня и за 82 дня до следую-

шего и последнего толчка этой серии: 20.02.2008) он сменяется на обратно-пропорциональный, сохраняясь и после события 20.02.2008. Этот единственный случай обратной корреляции не случайно наблюдается в очаге, уже активизированном предыдущими крупными толчками, и может быть связан с возросшей температурой очага.

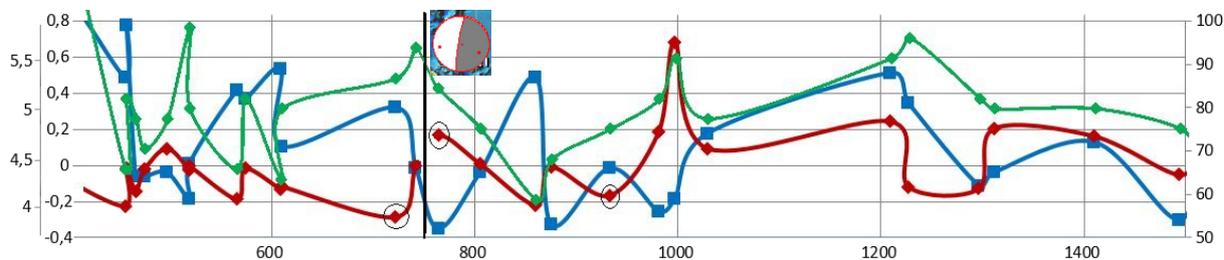


Рис. 3. Распределение параметров  $M_S(t)$ ,  $H(t)$  и  $Cr_{N\_CSN}(t)$  глубинной сейсмичности ( $H \geq 50$  км) в окрестности сильного корового землетрясения 02.01.2002,  $M_S=7,5$ ,  $H=27$  км (Папуа), отмеченного вертикальной чертой.

На отмеченном оранжевой линией временном отрезке видна прямая синхронная корреляция графиков  $M_S(t)$  и  $Cr_{N\_CSN}(t)$  ( $K_{COR} = 0,5827$  без первой точки исключения, против  $0,2675$  для всего роя) и обратная синхронная корреляция графиков  $H(t)$  и  $Cr_{N\_CSN}(t)$  ( $K_{COR} = -0,7471$  без последней точки отрезка, против  $-0,2223$  для всего роя) за 231 дней до главного события и в течение 441 дней после него. Овалом отмечены точки исключения  $Cr_{N\_CSN}(t)$  относительно кривой  $M_S(t)$

Таким образом, для всех взбросо-сбросовых событий в поведении параметров сопровождающей их глубинной сейсмичности характерно, что независимо от типа синхронности (прямой или обратной) характер первоначальной синхронности после главного события не изменяется. Это говорит об установлении устойчивого организованного состояния среды в глубинной части очага сильного землетрясения, благоприятное для его подготовки и независимое от процессов напряжения/релаксации в коровой части очага.

Оставшиеся три события рассматриваемой выборки Южно-Азиатского региона являются взбросами в обстановке общего сжатия: 20.01.2003, 01.04.2007 (Папуа); 21.01.2007 (Индонезия). Для этого типа также, как и для взбросо-взбросовых землетрясений, характерна синхронная корреляция графиков  $M_S$  и  $Cr_{N\_cat}$  как до, так и после главного корового события: за 273, 102 и 441 дней до главного события и 382, 80 и 109 дней после него. Корреляция этих параметров с глубиной присутствует только для двойного события 01.04.2007 (рис. 4), где говорит о дополнительном свойстве организованной среды – строгой дифференциации по глубине параметра, влияющего на значение крипекса (например, температуры).

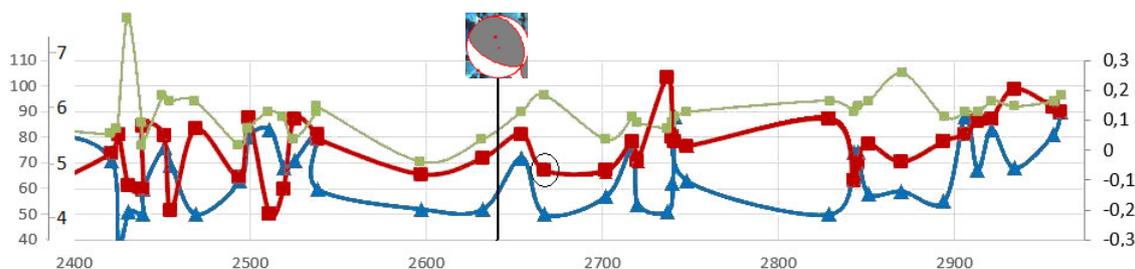


Рис. 4. Распределение параметров  $M_S(t)$ ,  $H(t)$  и  $Cr_{N\_CSN}(t)$  глубинной сейсмичности (с  $H \geq 50$  км) в окрестности двойного корового землетрясения 01.04.2007,  $M_S=7,7-7,9$ ,  $H=10$  км (Попуа), отмеченного вертикальной чертой.

На отмеченном оранжевой линией временном отрезке видна прямая синхронная корреляция трех графиков  $M_S(t)$ ,  $H(t)$  и  $Cr_{N\_CSN}(t)$  ( $K_{COR}$  графиков  $M_S(t)$  и  $Cr_{N\_CSN}(t)$  0,8956 без точки исключения, против 0,1791 для всего роя;  $K_{COR}$  графиков  $H(t)$  и  $Cr_{N\_CSN}(t)$  0,8065 против 0,062 для всего роя) за 102 дня до главного события и в течение 80 дней после него. Овалом отмечена точка исключения  $Cr_{N\_CSN}(t)$  относительно кривой  $M_S(t)$ .

### Заключение

Применение параметра крипекс в геодинамических исследованиях обусловлено тем, что большинство сильных сейсмических событий являются хрупкими разрушениями, преодолевающими предел прочности пород в результате воздействия различных физических условий, меняющихся во времени и приводящих к разным соотношениям вклада вязко-пластичного и жесткого скольжения в механизм разрушения.

В период подготовки сильного корового землетрясения (а для взбросового и взбросо-сбросового типа подвижек - и после него) выявлена закономерность прямой корреляции графиков  $M_S(t)$  и  $Cr_{N\_cat}(t)$  глубинных событий в окрестности будущего землетрясения, свидетельствующая о создании условий строго детерминированного влияния размера глубинных очагов на крипекс, выражающегося в пропорциональном соотношении крипекса и магнитуды. Такая аналитическая связанность, по-видимому, является следствием установления в глубинной части очага особого состояния среды, характеризуемого, например, пониженной вязкостью или гетерогенностью, вызванной поступлением глубинного материала и неравномерностью фазовых переходов его компонент. Особое состояние среды может дополнительно характеризоваться также синхронной (с прямой или обратной корреляцией по фазе) динамикой  $M_S(t)$  и  $H(t)$ , их прямой или обратной корреляцией с  $Cr_{N\_cat}$ , отражающей влияние в очаге дополнительных физических процессов, связанных с глубиной. Но именно прямая синхронная корреляция изменения параметров  $M_S(t)$  и  $Cr_{N\_cat}(t)$  в глубинных слоях верхней мантии характеризует состояние среды, благоприятное для процессов завершения подготовки крупного корового землетрясения. Физическая природа и носитель такой корреляции подлежат изучению.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИВМиМГ СО РАН № 0251-2021-0004.*

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Sarkar I., Sanyal S. Static stress transfers in the Pamir Hindu Kush seismic zone // *J. Asian Earth Sci.* – 2004. – V. 23. – No. 4. – P. 449-459.
2. Михеева А. В., Калинин И. И. Геоструктурные элементы, выявляемые цифровыми моделями и алгоритмами ГИС ENDDDB // В сб. «Современные методы обработки и интерпретации сейсмологического данных». Мат. 10-й Международной сейсмологической школы (Новоханы, Азербайджан, 14–18 сентября 2015 г.) / отв. ред. А. А. Маловичко. – Обнинск: ГС РАН, 2015. – С. 221-225.
3. Mikheeva A. V. The Central and South-East Asian geodynamic structures manifested in the seismicity and tomography data // *Bulletin of the Novosibirsk Computing Center, Series: Math. Model. in Geophys.* – 2017. – V. 20. – P. 41-55.
4. Михеева А. В., Калинин И. И. Крипекс-анализ процессов в очаговых зонах крупных землетрясений средствами GIS-ENDDDB // *Российский сейсмологический журнал.* – 2021. – Т. 3, No 4. – С. 7–17.
5. 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.
6. 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.
7. Mikheeva A. V. The dynamics of parameters of individual earthquake swarm sequences in different geotectonic settings // *Bulletin of the Novosibirsk Computing Center, Series: Math. Model. in Geophys.* – 2021. – V. 23. – С. 11-21.
8. 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 et al. (Eds.). – IOS Press, 2017. – P. 576-592.
9. Mikheeva A. V., Kalinnikov I. I. Creepex as a parameter of seismo-geodynamic studies based on geo-information systems // *CEUR Workshop Proceedings: All-Russian Conference “Spatial Data Processing for Monitoring of Natural and Anthropogenic Processes”, Novosibirsk, Russia, August 24-27, 2021.* – P. 194-202.
10. Каталог землетрясений сети станций Китая // Национальный центр данных о землетрясениях [сайт]. – URL: <https://data.earthquake.cn/gcywfl/index.html> (дата обращения 17.03.2022).
11. Михеева А. В., Калинин И. И. Примеры геоинформационного исследования сейсмичности Южно-Азиатского региона // *Труды Восьмой научно-технической конференции «Проблемы комплексного геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов» (г. Петропавловск-Камчатский, 26 сентября – 2 октября 2021).* / Отв. ред. Д.В. Чебров. – Петропавловск-Камчатский: КФ ФИЦ ЕГС РАН, 2021а. – С. 187-191.

© А. В. Михеева, И. И. Калинин, 2022