

И. И. Калинин¹, А. В. Михеева^{2}*

Анализ динамики развития разломов и сильных землетрясений

¹ ИФЗ РАН, г. Москва, Российская Федерация

² ИВМиМГ СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация

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

Аннотация. В статье средствами геоинформационной системы GIS-ENDDB исследуется геодинамическая ситуация в областях подготовки недавно произошедших в Индонезии двух сильных землетрясений (08-09.01.2023 г., MS=7 и 7.6). Используется подход на основе расчета градиента крипекса в пространстве и парной корреляции изменений во времени крипекса и магнитуды, а также ранее разработанный алгоритм поиска сейсмолинементов по большому кругу Земли. Выявлены закономерности изменения во времени пластичности среды по параметрам роевых последовательностей, окружающих эти землетрясения, в частности, установление корреляции крипекса с магнитудой за ~80 дней до крупного события в глубинной части будущего очага. Закономерности свидетельствуют о формировании организованного состояния среды, выражающегося в её консолидации перед сильнейшими землетрясениями, формирующими региональный глубинный разлом. Растущий тренд изменения крипекса свидетельствует о росте влияния квазипластических процессов в малых подвижках, а «исчерпание пластичности» - выполаживание тренда наступает за ~30 дней до события.

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

I. I. Kalinnikov¹, A. V. Mikheeva²

The dynamics analysis of the faults and strong earthquakes development

¹ IPE RAS, Moscow, Russian Federation

² ICMMG SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

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

Abstract. The paper uses the GIS-ENDDB geoinformation system to investigate the geodynamic situation in the preparation areas of two recent strong earthquakes in Indonesia (08-09.01.2023, MS=7 and 7.6). An approach is used based on the calculation of the creepex gradient in space and the pair correlation of changes in time of the creepex and magnitude, as well as a previously developed algorithm for seismolineaments searching at a large circle of the Earth. The regularities of changes in the environment plasticity over time are established according to the parameters of swarm sequences surrounding these earthquakes, in particular, the establishment of a correlation of the creepex with the magnitude ~80 days before a major event in the deep part of the future focal zone. The regularities indicate the formation of an organized state of the environment, expressed in its consolidation before the strongest earthquakes forming a regional deep fault. The growing trend of changes in the creepex indicates an increase in the influence of quasi-plastic processes in small movements, and the "exhaustion of plasticity" as the flattening of the trend occurs ~30 days before the event.

Keywords: earthquake DB, parameters of the seismogeodynamic process, tectonic situations

Введение

Проблема прогноза землетрясений давно признана неразрешимой [1]. Но благодаря положениям кинетической теории прочности (позволяющей изучать разрушение горных пород при долговременно действующих нагрузках), появилась возможность описывать процесс подготовки землетрясения в статистически однородной геологической среде на основе модели лавинно-неустойчивого трещинообразования [2]. В то же время выявление существенной неоднородности строения земной коры в сейсмоактивных районах и приуроченности крупных землетрясений к глубинным разломам позволило развивать модели подготовки землетрясения применительно к неоднородным средам на основе построения иерархии неоднородностей в горных породах [2]. В 2009г материаловеда, занимающиеся проблемами разрушения, предложили концепцию исчерпания пластичности [3] (о резком уменьшении числа и размеров сильно деформируемых пластических зон) как признака перехода к хрупкому разрушению. Процесс исчерпания пластичности в многофазных иерархически устроенных средах не может быть мгновенным и, следовательно, может быть предсказуемым по месту и времени.

Выявление линейных неоднородностей среды и динамики исчерпания пластичности с переходом к хрупкому разрушению является конечной целью начатого авторами цикла работ на основе инструментария GIS-ENDDB. Два недавних сильных землетрясения, близкие по времени и расстоянию и приуроченные к единому ГГР (Глобальному Глубинному Разлому в терминах [4]), пересекаемому множеством других разломов, исследуются с точки зрения подготовки землетрясения в неоднородной среде.

9 января 2023 года недалеко от побережья Индонезии (в море Банда) на глубине 105 км было зафиксировано мощное землетрясение магнитудой $M_s=7.6$. За сутки до него также в индонезийском регионе (близ острова Вануату) произошло мелкофокусное землетрясение магнитудой 7.0 (рис. 1), а ещё за сутки (7 января 2023г) - магнитудой 5.0 в Турции. Меньше чем через месяц после этих событий (и ещё трех землетрясений с $M_s>5$ в Турции) 6 февраля 2023г произошло мощное мульти-землетрясение в Турции с магнитудами толчков M_w : 7.8, 6.7 и 7.7, унесшее жизни десятков тысяч человек. Близость по времени территориально удаленных событий Турции и Индонезии позволяет нам обратиться к высказанным ранее предположениям о перекличке крупнейших землетрясений, приуроченных к взаимосвязанным системам глубинных разломов во время их активизации. Так, все описанные выше события приурочены к Южно-Азиатской геотектонической мегаструктуре, характеризуемой подобной перекличкой, в том числе, между ее центром и окраинами [5, 6]. Например, аналогично рассматриваемому случаю, за месяц до мега-землетрясения Тохоку (11.03.2011, $M_s=9$), принадлежащего правой ветви этой структуры, в ее географическом центре (в области моря Целебес, расположенного всего на ~300 км севернее моря Банда) 10.02.2011 произошло глубинное землетрясение: $M_s=7.6$ и $H=531$ км.

В данной работе мы рассмотрим менее протяженную глубинную разломную структуру (отмечена зеленым цветом на врезке рис. 1), которая могла оказать

влияние на пару индонезийских землетрясений 8 и 9 января 2023г, имеющих схожие прогностические признаки по методу [7].

Данные и методические подходы исследования

Фактическим материалом работы является выборка записей глобального каталога ISC [8], содержащих определения трех исследуемых параметров землетрясения: M_s , m_b и H . Выбор каталога ISC обусловлен наличием в нем наиболее полного на текущий момент набора магнитуд M_s и m_b как собственного определения, так и определений других агентств. Сравнение полноты выборки собственных определений M_s и m_b каталога ISC с более представительным региональным китайским каталогом CSN [9] показывает следующие оценки: количество записей каталога CSN превышает его в ~ 5 раз, что увеличивает статистическую погрешность оценок по крупным событиям ISC (с $M_s \geq 7$) в ~ 2 раза по сравнению с CSN. Кроме того, как было показано в [10] не всегда результаты крипекс-анализа по парам собственных определений M_s и m_b агентства ISC более достоверны, чем по независимым определениям M_s и m_b от других агентств. Учет записей ISC с парными определениями M_s и m_b от других агентств увеличивает полноту выборки в 3-4 раза, и, принимая во внимание отсутствие данных CSN после 2017г (в связи с запаздыванием его обновлений), было принято решение об использовании именно этой расширенной выборки ISC. Полученная выборка составила 83454 записи за 09.2017–02.2023 (против 58931 записей каталога CSN за 26.07.1999–31.08.2017). Единственное требование к магнитудам других агентств - принадлежность определений и M_s , и m_b одному агентству.

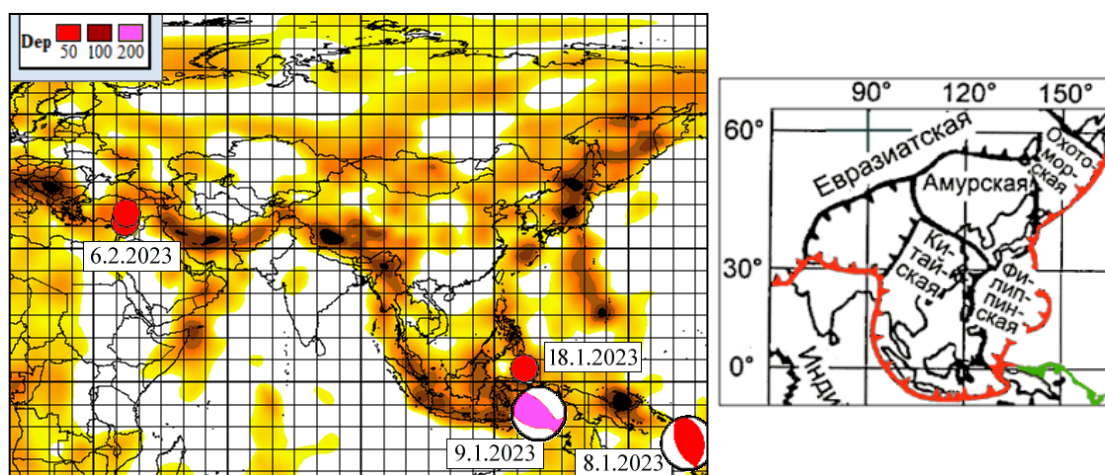


Рис. 1. Распределение сильных землетрясений $M_s \geq 7$ в 2023г (по каталогу NEIC) на фоне Южно-Азиатской \bar{U} -образной геофизической мегаструктуры, выявленной по томографическим данным ниже подошвы литосферы [6]. Землетрясения 8.01.2023 и 9.01.2023 показаны в виде диаграмм механизмов типа взброс (по данным СМТ-каталога [11]). Во врезке: межплитные разломы по [12] с изменениями автора: красным цветом выделены разломы, относящиеся к Южно-Азиатской мегаструктуре.

В исследовании использованы средства экспертной геоинформационной системы GIS-ENDDB [5] и описанный в работе [13] подход на основе расчета градиента крипекса в пространстве и парной корреляции изменений во времени крипекса и магнитуды. Напомним, что параметр крипекс (creep & explosion), определяющийся соотношением магнитуд M_s и m_b [14] (как и его модификация в GIS-ENDDB, названная Cr_{N_ISC} [15]), показывает относительный вклад «мягкой» (крип) и «жесткой» (эксплозия) подвижек в общий процесс очагового излучения, отражая такие аспекты сейсмо-геодинамического процесса как связь характеристик очага с общей тектонической обстановкой, долю вязкого скольжения при образовании сейсмогенерирующей трещины [14, 16], «меру специфики очаговой зоны» [17].

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 (рис. 3).

Для оценки синхронного поведения во времени параметров Cr_{N_ISC} , M_s и H роёв событий в окрестности рассматриваемых индонезийских землетрясений используется расчет коэффициента парной корреляции в скользящем временном окне с одним краем, фиксированным на нулевом значении времени (соответствующем моменту главного события) [13] (рис. 4).

В работе используются также другие методы и алгоритмы, разработанные авторами и реализованные в GIS-ENDDB, в частности, алгоритм поиска сейсмолинементов по большому кругу Земли [18] (рис. 2).

Исследование индонезийских землетрясений 8-9 января 2023 года

Первый вопрос, возникающий при появлении двух близких по времени сильнейших землетрясений на расстоянии более 4 тыс. км, не принадлежат ли они единому родительскому ГГР или глобальному сейсмолинементу (по терминологии [20]). Действительно, математическим алгоритмом поиска сейсмолинементов по большому кругу Земли среди девяти линементов региона (8 из которых имеют ЮЗ-СВ, СЗ-ЮВ и субмеридианальное простирания) выявлен наиболее протяженный (более 6 тыс. км) сейсмолинемент субширотного простирания (названный «Индонезийским»), отделяющий Австралию от индонезийских островов (рис. 2). Оба землетрясения находятся на расстоянии <500 км от линеамента, что укладывается в доверительный интервал <10% от его длины.

Более сильное и более глубокое (возможно, ниже границы Мохо) землетрясение 09.01.23 ($H=105$ км, $M_s=7.6$) в процессе своей подготовки могло наряду с предваряющим его глубинным землетрясением у острова Фиджи (06.01.23, $H=497$ км, $M_s=5.9$ [11]) консолидировать глубинный разлом и активировать в большом радиусе хрупкие поверхностные землетрясения, в том числе, и событие 08.01.2023 ($H=29$ км, $M_s=7.0$). Это предположение подтверждается как отрицательным значением крипекса обоих землетрясений ($Cr_{N_ISC}=-0.1$ для 08.01 и $Cr_{N_ISC}=-0.2$ для 09.01), свидетельствующим о возросшей хрупкости среды в их

очагах, так и наличием между ними системы межплитных разломов, которые могли являться передаточной цепью дислокаций, активизируемых сейсмическими волнами ГГР (рис. 2).

Динамика хрупкого состояния в очагах и окрестностях рассматриваемых землетрясений по сейсмичности $5 < M_s < 8$ показывает (рис. 3а), что отрицательная аномалия усредненного по равномерным ячейкам крипекса постепенно концентрируется вокруг выявленного «Индонезийского» сейсмолинеамента, в особенности за последний годовой период перед событиями (предпоследняя карта рисунка 3а). Подобная картина сохраняется при отдельном рассмотрении коровой и среднеглубинной сейсмичности и лишь при расчете усредненного крипекса для всего набора магнитуд $2 < M_s < 8$ демонстрирует преобладание положительных значений крипекса и рост интенсивности положительной аномалии (благодаря увеличивающемуся вкладу растущего множества слабых событий, связанных с маломасштабными квазипластическими процессами).

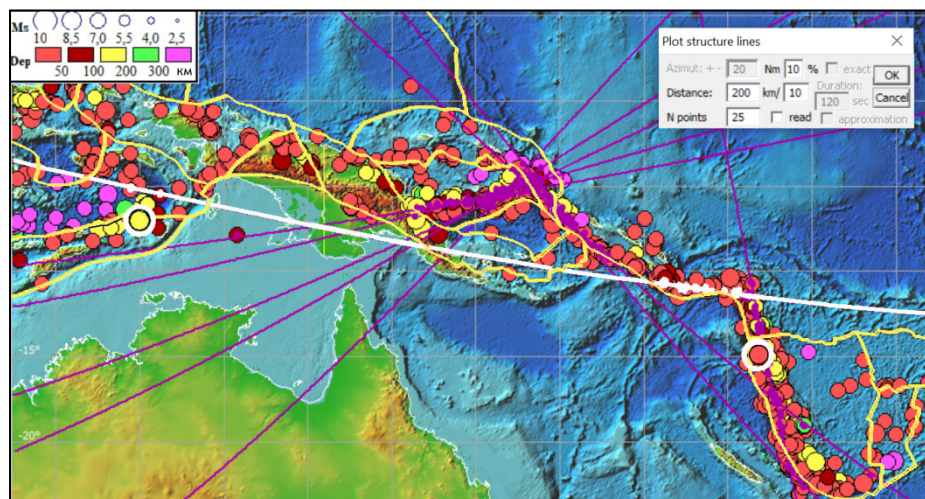


Рис. 2. Карта сейсмолинеаментов большого круга Земли для землетрясений с $M_s > 5$ австрало-индонезийского региона (каталог NEIC) с нанесенными желтым цветом межплитными разломами [19]. Белым цветом выделен сейсмолинеамент, объединяющий рассматриваемые индонезийские землетрясения, отмеченные белыми окружностями. Получено в GIS-ENDDB

Таким образом, изменение во времени крипекс-аномалий говорит о перестройке среды в преддверие крупных событий. Так, появление положительных аномалий с правого и левого края «Индонезийского» сейсмолинеамента (предпоследняя карта рис. 3а) показывает, что в последний год перед двумя рассматриваемыми событиями линеамент активизируется локальными процессами, сопровождающимися среднеглубинными и глубинными роями у о. Сулавеси и о. Фиджи. Наибольший вклад в рост крипекса у о. Сулавеси внесли события: 26.3.22 ($H=38$ км, $M_s=5.4$, $Cr_{N_ISC}=0.19$), 11.5.22 ($H=179$ км, $M_s=5.1$, $Cr_{N_ISC}=0.26$) и 12.5.22 ($H=134$ км, $M_s=5.2$, $Cr_{N_ISC}=0.12$). А у о. Фиджи: 3.4.22 ($H=59$ км, $M_s=5.4$,

$Cr_{N_ISC}=0.11$), 14.4.22 ($H=76$ км, $M_S=6.3$, $Cr_{N_ISC}=0.32$) и 06.01.23 ($H=497$ км, $M_S=5.9$, $Cr_{N_ISC}=0.13$).

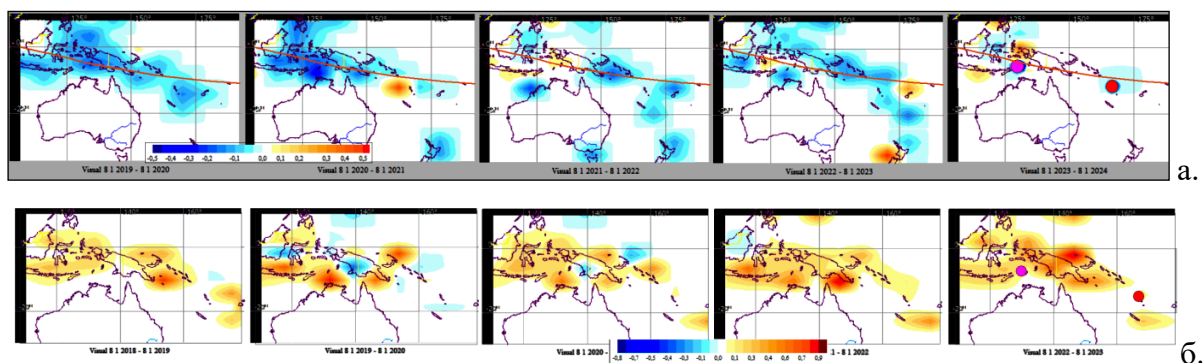


Рис. 3. Динамика аномалий усреднённого крипекса Cr_{N_ISC} по годовым интервалам за 2019–2023 гг. в Австрало-Индонезийском регионе: а – для $5 < M_S < 8$ и $0 \leq H < 552$ км, ячейка $5 \times 8^\circ$. Красной линией нанесен «Индонезийский» сейсмолинеament; б – для $2 < M_S < 8$ и $50 \leq H < 552$ км, ячейка $5.5 \times 9^\circ$. На последних картограммах рисунков (а) и (б) нанесены индонезийские землетрясения 08.01.23 и 09.01.23 (цветом, соответствующим легенде на рис.1). Рисунки получены в системе GIS-ENDDDB

Исследование динамики параметров Cr_{0_ISC} , M_S и H в окрестностях рассматриваемых землетрясений показывает соответствие выявленной ранее [13] закономерности: крипекс начинает коррелировать с магнитудой за несколько дней до крупного события в глубинной части будущего очага. Для индонезийских событий корреляция $|K_{кор}| \geq 0.7$ наступает за 34,7 дня до первого и 80 дней до второго события (рис. 4а), т.е. начинается значительно раньше для сильнейшего события 9.1.23, хотя оно произошло на сутки позже, чем первое. При этом корреляция крипекса и магнитуды в обоих случаях обратная, и продолжается по сей день на уровне $K_{кор} = -1$ (рис. 4а).

В работе [13] было обосновано предположение о том, что прямая корреляция магнитуды и крипекса, наблюдаемая перед большинством сильных землетрясений, связана с ростом неоднородности среды в зоне подготовки очага вследствие привнесения горячих материалов из глубин. В противоположность этому, факт обратной корреляции магнитуды и крипекса можно объяснить процессом консолидации среды в зоне очага, когда чем крупнее подвижка по магнитуде, тем она более жесткая (с более низким значением крипекса). Это согласуется и с высказанным выше предположением о консолидации ГГР в период подготовки крупных событий. В [13] также показано, что $K_{кор}$ крипекса и магнитуды перед крупным событием отрицателен лишь в тех редких случаях, когда крипекс синфазно коррелирует с глубиной. В рассматриваемом случае близкая к $K_{кор}=0.5$ корреляция с глубиной начинается за 72 дня до события (рис. 4б). Это типичная картина для консолидированной части земной коры, где более сильные события

имеют меньший крипекс и меньшую глубину [21]. Наличие той же закономерности для роев рассматриваемой пары событий, одно из которых находится ниже земной коры (или в нижней ее части), может говорить о равномерной консолидации глубинного разлома по всей его глубине с преобладанием хрупких разрушений даже на глубинах промежуточного слоя. А поскольку зависимости крипекса от магнитуды и глубины, характерные для хрупких деформаций верхних слоев кристаллической оболочки, устанавливаются в глубинной части очага за 80 и 72 дня до главного толчка, то консолидацию разлома можно связать с периодом подготовки толчка.

В течение ~85 дней перед событием 09.01.2023 в динамике крипекса выявляется ещё одна типичная закономерность развития сейсмогенеза перед сильным толчком - это растущий тренд изменения крипекса (рис. 4б). Та же закономерность наблюдалась перед мега-землетрясением Тохоку [10], показывая рост доли событий более слабых и глубоких с более высоким крипексом. Т.е. по [14]: «в чередовании событий квазипластического течения и хрупкого разрушения» растет влияние квазипластических процессов в малых подвижках. «Исчерпание пластичности» [3] - выполаживание тренда наступает за ~30 дней до события (рис. 4б), а «запас пластичности», вероятно, исчерпывается активацией малых подвижек за ~10 дней.

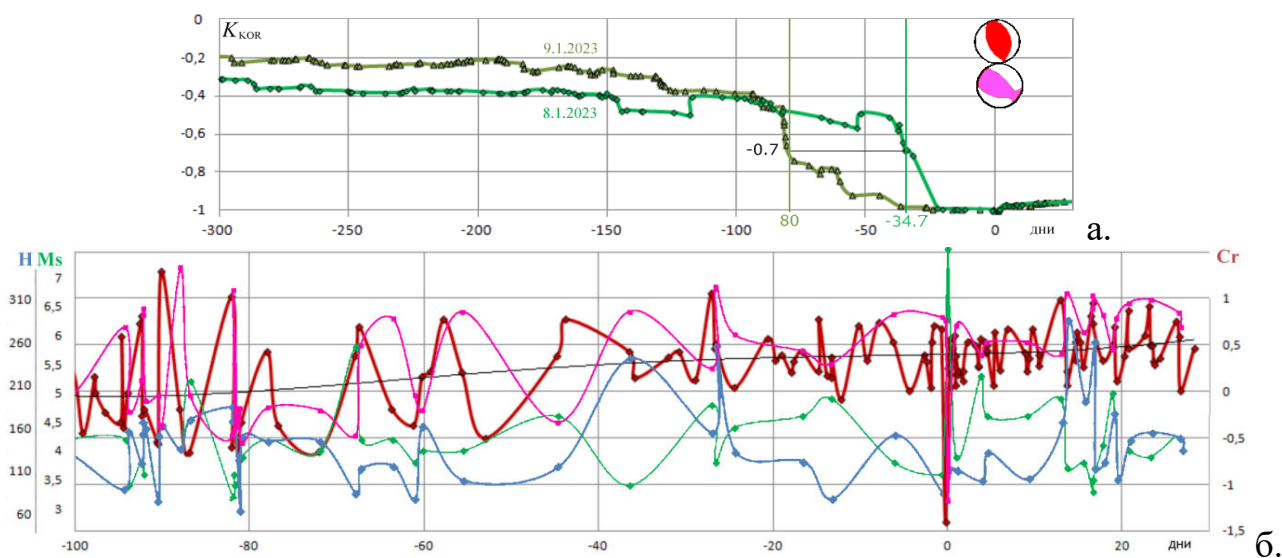


Рис. 4. Распределение параметров сейсмичности с $H \geq 50$ км в окрестности землетрясения 09.01.2023г, $M_s=7.6$, $H=105$ км: а – $K_{кор}(t)$ парной корреляции $M_s(t)$ и $Cr_{0_ISC}(t)$ в скользящем окне в сравнении с тем же для события 08.01.2023г, $M_s=7.0$, $H=29$ км (светло-зеленый график); б – $M_s(t)$ (зеленый), $H(t)$ (синий) и $Cr_{0_CSN}(t)$ (розовый график для $H \geq 50$ км и красный для $H \geq 0$ км с трендом)

Заключение

Землетрясения в Индонезии 8 и 9 января 2023г ($M_s=7.6$ и 7.0) пространственно приурочены субширотному сейсмолинеamentу, выявленному методом большого круга Земли вычислительной системы GIS-ENDDB. Реализованный в

системе метод расчёта нормированного крипекса Cr_{N_ISC} позволяет обосновать предположение о наличии здесь глобального глубинного разлома на основе комплексного исследования поведения пластичности геофизической среды в пространстве и времени. С помощью этого подхода подтверждается факт равномерной консолидации глубинного разлома по всей его глубине за ~80 дней до сильнейшего толчка (в период его подготовки) с преобладанием хрупких разрушений даже на глубинах промежуточного слоя, а также активизация мелкомасштабных подкоровых квазипластических процессов перед сильными землетрясениями.

Выполнено в рамках госзаданий № 0251-2021-0004 и № FWZZ-2022-0019.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Садовский М. А., Нерсесов И. Л. Прогноз землетрясений: состояние проблемы // Научные обзоры и сообщения. – 1969. – №4. – С. 61-69.
2. Садовский М. А., Соболев Г. А. и др. Исследование предвестников разрушения на модели неоднородной среды // Докл. АН СССР. – 1986. – Т. 287. – №6. – С. 1354–1357.
3. Жаркова Н. А. Влияние свойств материала на структуру зоны пластической деформации в условиях одноосного растяжения // Деформация и разрушение материалов и наноматериалов. – М: Интерконтакт Наука, 2009. – С. 61.
4. Пейве А. В. Глубинные разломы в геосинклинальных областях // Изв. АН СССР. Сер. геол. – 1945. – №5. – С. 23-46
5. 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. – IOS Press. – 2017. – P. 576-592.
6. Михеева А. В. Южно-азиатская мегаструктура по данным геоинформационной системы GIS-ENDDB // Геоинформатика. - №4. – 2018. – С. 2–13.
7. Любушин А. А. Низкочастотный сейсмический шум земли на глобальном и региональном уровнях // Проблемы комплексного геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов. – Петропавловск-Камчатский, 2021. – С. 83–85.
8. ISC Bulletin: event catalogue search // International Seismological Centre [Site]. – URL: www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/catalogue/. – United Kingdom, Thatcham, 2020.
9. China Seismological Network. (2022). [CSN Catalog of the Earthquakes]. – URL: <https://data.earthquake.cn/gcywfl/index.html>. (In China).
10. Kalinnikov I. I., Mikheeva A. V. Creepex-analysis by the GIS-ENDDB tools of processes in large earthquakes focal zones on the Tohoku example // Bulletin of the Novosibirsk Computing Center, Series: Math. Model. in Geophys. – 2020. – V. 22. - С. 11-21.
11. Global CMT Catalog // Global CMT Web Page [Site]. – URL: <http://www.globalcmt.org>.
12. Добрецов Н. Л. и др. Глубинная геодинамика. - Новосибирск, 2001. – 409 с.
13. Михеева А. В. Динамика параметров среднеглубинной сейсмичности перед крупными землетрясениями южно-азиатских сейсмофокальных зон // Российский сейсмологический журнал. – 2023. – Т. 5. – №1. – С. 100-115.
14. Прозоров А. Г., Хадсон Д. Зависимость между M_{LN} и m_{PV} от региональных условий и локальных взаимосвязей // Магнитуда и энергетическая классификация землетрясений. – Т. 2. – М. ИФЗ АН СССР, 1974. – С. 208–216.
15. 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. – Novosibirsk, Russia, 2021. – P. 194-202.
16. Kaverina A. N. et al. Global Creepex Distribution and Its Relation to Earthquake-Source Geometry and Tectonic Origin // Geophysical Journal. – 1996. – V. 125. – No. 1. – P. 249–265.

17. Болдырев С. А., Левина В. И. Крипекс Камчатских мелкофокусных землетрясений // Физика Земли. – 2008. – № 3. – С. 40-57.
18. Михеева А. В., Калинин И. И. Методы выявления геодинамических мегаструктур по геофизическим данным // Интерэкспо ГЕО-Сибирь: XIV Международный научный конгресс (г. Новосибирск, 23-27 апреля 2018 г.). – 2018. – Т. 2. – С. 17-25.
19. Bird P. An updated digital model of plate boundaries // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. – 2003. – V. 4. – No. 3. – P. 1027.
20. Забродин В. Ю. Системный анализ дизъюнктивов. – М.: Наука, 1981. – 207 с.
21. Михеева А. В. Примеры геоинформационного исследования сейсмичности Южно-Азиатского региона // Проблемы комплексного геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов. – Петропавловск-Камчатский, 2021. – С. 187-191.

© И. И. Калинин, А. В. Михеева, 2023