

А. В. Михеева^{2}, И. И. Калинин¹*

Исследование влияния удаленных сейсмических активизаций на крупные южно-азиатские землетрясения

¹ ИФЗ РАН, г. Москва, Российская Федерация

² ИВМиМГ СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация

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

Аннотация. На примере пяти крупнейших ($M_s \geq 7.9$) южно-азиатских землетрясений рассмотрена возможная геодинамическая взаимосвязанность процессов подготовки очага с предваряющей умеренной сейсмической активизацией на участках субдукционных или коллизионных глубинных разломов (и сопутствующих им трещин меньшего ранга), пересекающих удаленные от очага области подготовки будущего землетрясения. С помощью методов программной системы GIS-ENDDB (выбор круговой зоны влияния области подготовки сейсмического очага, кластеризация выборки событий, расчет нормированного крипекса и визуализация его динамики) исследовано 50% крупнейших событий Китайского глобального каталога CSN. Выявлены признаки такой взаимосвязанности, что, в случае подтверждения для других крупнейших событий, может послужить веским свидетельством в пользу концепции исчерпания пластичности среды в области подготовки как признака перехода к хрупкому разрушению в будущем очаге.

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

A. V. Mikheeva^{2}, I. I. Kalinnikov¹*

Study of the influence of remote activations on large South Asian earthquakes

¹ IPE RAS, Moscow, Russian Federation

² ICM&MG SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

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

Abstract. Using the example of the five largest ($M_s \geq 7.9$) South Asian earthquakes, the possible geodynamic interconnectedness of their focal zone preparation processes with preceding moderate seismic activation in areas of subduction or collision deep faults (and accompanying cracks of a lower rank) crossing remote areas of a future earthquake preparation zone is considered. Using the methods of the GIS-ENDDB software system (selection of the circular area of influence of the earthquake focal zone preparation field, clustering a sample of events, calculating the normalized creepex and visualizing its dynamics), 50% of the largest events in the Chinese CSN global catalog were studied. Signs of such interconnectedness have been identified, which, if confirmed for other major earthquakes, may serve as strong evidence in favor of the concept of environment plasticity exhaustion in the preparation area as a sign of transition to brittle fracture in the future focal zone.

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

Введение

В соответствии с «планетарно-региональной моделью подготовки тектонических землетрясений, наблюдаемые в природе случаи удаленной форшоковой активизации могут свидетельствовать о едином геодинамическом процессе регионального масштаба, предшествующем крупному землетрясению» [1, 2] и «подготовительные деформационные процессы могут происходить на удалении от будущего сейсмического очага на десятки и сотни километров» [3].

С другой стороны, «известны случаи, когда афтершоки происходят достаточно далеко от плоскости разрыва главного землетрясения» [4], что по аналогии позволяет предположить возможность триггирующего воздействия на подготовку главного толчка со стороны предшествующей сейсмической активизации вдоль удаленных от него региональных или глобальных глубинных разломов. С точки зрения теории трещин такое воздействие можно объяснить локализацией аномалий повышенных напряжений, вызванных главным разрывом, не только вблизи вершин трещины, но и «с каждой стороны трещины на расстоянии порядка её размера» [4], а согласно модели лавинно-неустойчивого трещинообразования [5] - взаимодействием полей упругих напряжений множества разноранговых трещин. Оценки размера зоны влияния области подготовки очага землетрясения, основанные на решении задачи теории упругости [5], дают величину, большую примерно в полтора порядка (то есть в ~ 36 раз) по сравнению с размерами самой области очага [6].

В настоящей работе на примере крупнейших ($M_S \geq 7.9$) южно-азиатских землетрясений рассмотрим, насколько распространенными являются случаи предварения их умеренной сейсмической активизацией вдоль субдукционных или коллизионных глубинных разломов (и пересекающих их трещин меньшего ранга), удаленных на расстояние до 2000 км от будущего землетрясения. Согласно концепции исчерпания пластичности как признака перехода к хрупкому разрушению [7, 8], авторы рассматривают умеренную сейсмичность в удаленных разломных зонах (являющихся аномальными, инородными включениями в расширенную область подготовки крупного землетрясения) в качестве подготовительного процесса постадийного исчерпания пластичности, предваряющего хрупкое разрушение в главном очаге.

Методы и материалы

Исследование проводилось в среде геоинформационной системы GIS-ENDDDB [9] с использованием данных регионального каталога CSN [10], содержащего параметры 58931 землетрясений по всему миру за период с 26.07.1999 г. по 31.08.2017 г. с магнитудами M_S и m_b . По соотношению этих магнитуд оценивается параметр крипекс (creep & explosion), показывающий относительный вклад «мягкой» (крип) и «жесткой» (эксплозия) подвижек в процесс очагового излучения. Используемый в GIS-ENDDDB метод расчета нормированного крипекса подробно описан, например, в [11]. В данной работе также используется следующий ряд методов GIS-ENDDDB, описанных в [9]: 1) выбор на карте круго-

вой области диаметром 2000 км вокруг сильнейших ($M_S \geq 7.9$) землетрясений Южно-Азиатского региона за 2011-2016 гг, 2) расчет для круговой области каждого сильнейшего землетрясения графика временного распределения $M_S(t)$ ранжированной по магнитуде и крипексу сейсмичности за ~2 месяца до главного толчка, 3) метод расчета кластеров и вывод на карту кластеризованных пар событий, связанных направленными отрезками в соответствии с заданными параметрами dT и dS (предельные разности времени и расстояния в каждой паре событий; здесь $dT=10$ дней и $dS=4000$ км).

Результаты

Исследование выборки предваряющей умеренной сейсмичности в круговой области землетрясения Тохоку (301 событие) отчётливо проявляются стадии процесса подготовки этого мега-землетрясения (рис. 1):

1) в период 1.1.2011-27.2.2011 (129 событий) режим парциальных, периодических цепочек землетрясений (см. график их временного распределения $M_S(t)$ в верхней врезке) с преимущественно положительным значением крипекса и пространственным группированием событий (белые линии кластеризации), центрально-ориентированным к локальной области 26-27.5 с.ш., 143-144.5 в.д. в ~1200 км к югу от очага Тохоку и наиболее протяженными (до 3000 км) «лучами» северного, СЗ и СВ простирания,

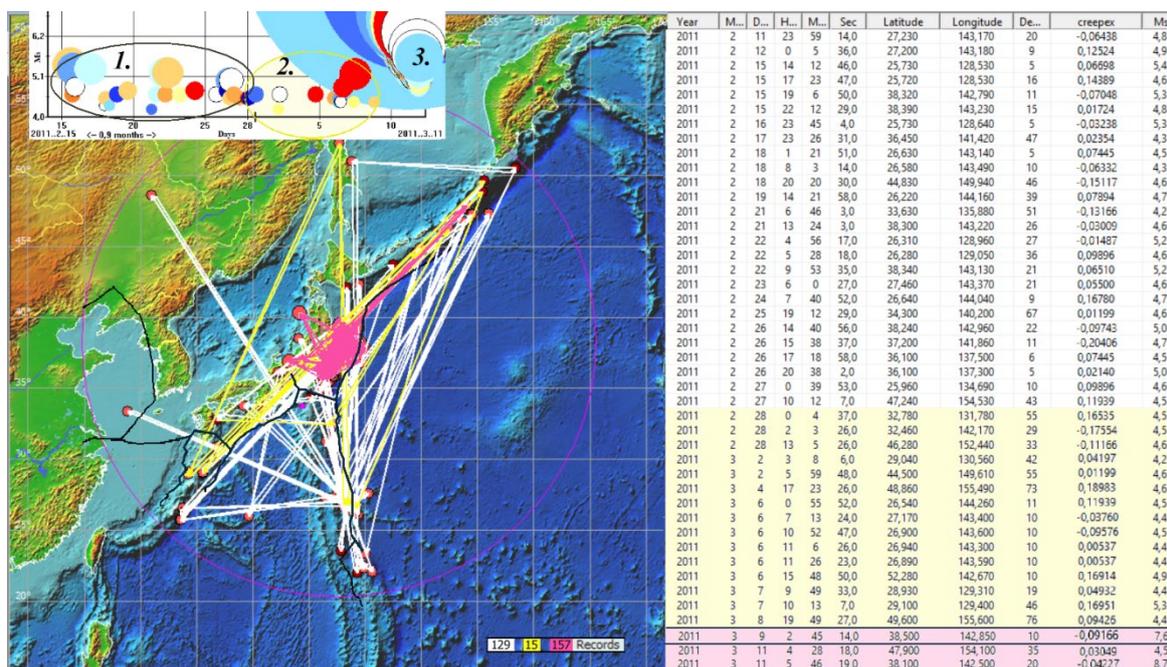


Рис. 1. Карта распределения (слева) и фрагмент списка (справа) событий умеренной сейсмичности в окрестности землетрясения Тохоку: 11.3.2011, $M_S=8.7$. Во врезке вверху: график их временного распределения $M_S(t)$. Черными линиями нанесены межплитные границы.

2) в период 28.2.2011-8.3.2011 (15 событий) динамика распределения землетрясений резко меняется: их частота падает в 1.5 раза (см. выделенный желтым овалом отрезок на графике $M_S(t)$ и желтой подсветкой - фрагмент списка), крипекс возрастает, а пространственное распределение, не смотря на большой разброс (до 2500 км), становится симметричным (желтые линии кластеризации) относительно будущего очага (отмеченного розовым цветом),

3) в 3-дневный период форшоковой и начала афтершоковой активности очага Тохоку: 9.3.2011-11.3.2011 (157 событий), во-первых, резко растет частота землетрясений (9 и 10 марта – в 16 раз, начиная с крупнейшего его форшока: 9.3.2011, $M_S=7.6$, а в день события Тохоку 11 марта – в 80 раз), во-вторых, локализация событий ограничена 400-километровой окрестностью северной части острова Хонсю (розовые линии кластеризации) лишь с одним 1300-километровым «выбросом» в сторону центральной части Курильской гряды - к землетрясению 11.3.2011, $M_S=4.5$, за час до события Тохоку (рис. 1). Отметим, что очаг Тохоку располагается не на межплитном разломе (в 130 км от него) в отличие от центра группирования предваряющих его событий (п. 1).

Очаг следующего сильнейшего события CSN-каталога: 11.4.2012, $M_S=8.6$ (кластерные линии розового цвета на рис. 2) расположился в 600 км от острова Суматра, к западу от края Зондской плиты (рис. 2).

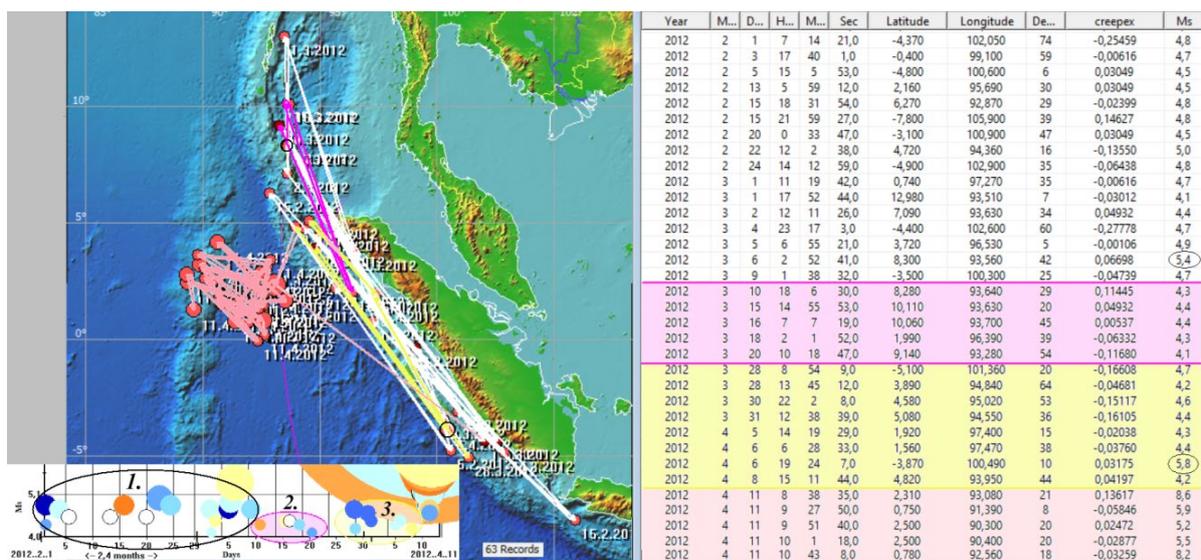


Рис. 2. Карта распределения, график $M_S(t)$ и список событий умеренной сейсмичности накануне суматринского землетрясения 11.4.2012, $M_S=8.6$.

Выборка предваряющей это землетрясение умеренной сейсмичности (63 события) целиком приходится на разломную зону субдукционного надвига под Зондскую плиту и демонстрирует следующую стадийную динамику:

1) в период 1.2.2012-9.3.2012 (17 событий) – парциальные, периодические цепочки событий (см. график $M_S(t)$ в нижней врезке) с пространственным разбросом до 2000 км (белые линии кластеризации),

2) в период 10.3.2012-20.3.2012 (5 событий) уменьшается магнитуда и частота событий (выделенный сиреневым овалом отрезок на графике $M_S(t)$ и сиреневой подсветкой фрагмент списка), а пространственное их распределение (сиреневые линии кластеризации) имеет значительно меньший разброс (до 800 км), находясь южным своим концом на ближайшем к будущему очагу расстоянии ~ 500 км,

3) в период 28.3.2012-8.4.2012 (8 событий) несколько растет магнитуда и частота событий (выделенный желтым овалом отрезок на графике $M_S(t)$ и желтой подсветкой фрагмент списка), а пространственное распределение (желтые линии кластеризации) северным своим концом находится на ближайшем к будущему очагу расстоянии (рис. 2).

Можно предположить, что кластеры пунктов (2) и (3), противоположно расположенные относительно будущего очага, отмечают поочередно активизируемые более тонкие структуры Зондского надвига. В пользу этого предположения свидетельствует факт, что на противоположных концах их локализации произошли два сильнейших события форшоковой выборки (отмечены черными окружностями на рис. 2) с $M_S=5.4$ и 5.8 , соответственно.

Следующим является землетрясение 12.04.2014 ($M_S=7.9$) близ Соломоновых островов (рис. 3).

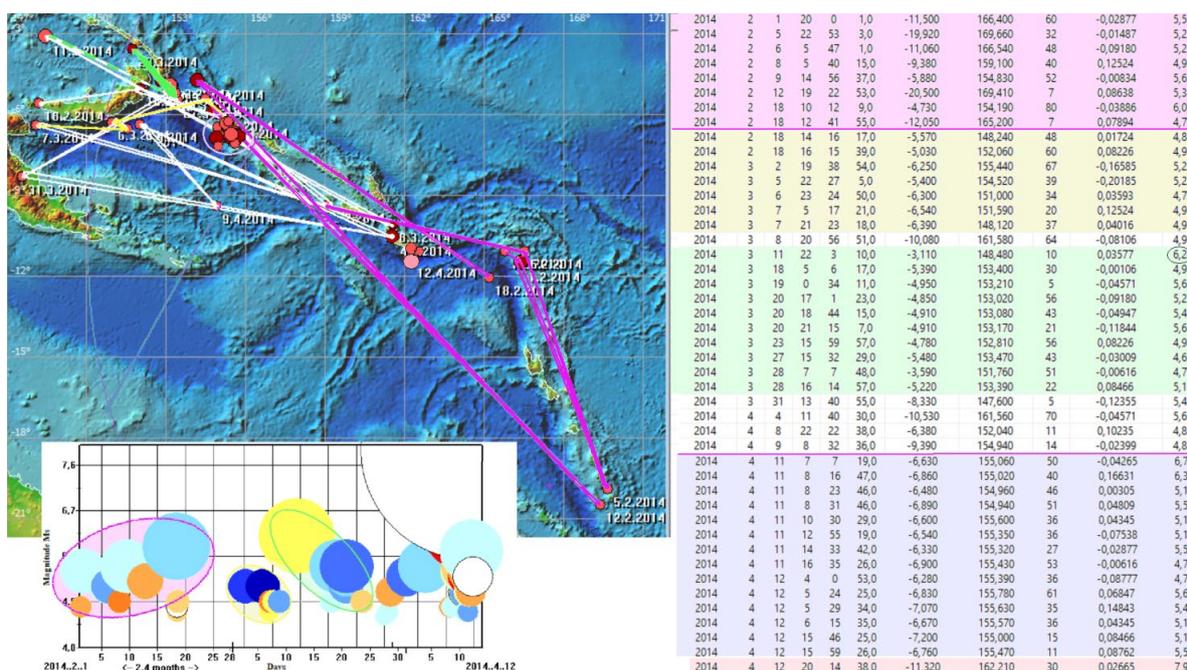


Рис. 3. Карта распределения, график $M_S(t)$ и список событий умеренной сейсмичности накануне соломоновского землетрясения 12.4.2014, $M_S=7.9$

Хотя само событие и его форшоки (14 событий) располагаются на конвергентной границе плит, последние (гнездовое скопление красных и темно-красных кружков на карте и синяя подсветка в списке) удалены на 800 км к северо-западу от главного толчка, а предшествующая им умеренная сейсмичность рас-

пределена в виде бабочкообразной структуры. При этом сначала активизировалось юго-восточное ее «крыло» справа от будущего толчка (сиреневый цвет линий кластеризации и подсветки в списке), затем слева - северо-западное «крыло» (белые линии), в центре которого и произошел форшоковый рой. В этом «крыле» выявляются более тонкие сейсмолинеаменты (выделены желтым и зеленым цветом на карте, графике и в списке), а также цепочка событий: $M_S=6.2$, зеленый линеамент, рой форшоков и главный толчок.

Следующее землетрясение 25.04.2015 ($M_S=8.2$) располагается в тибетской зоне коллизии континентальных плит, но и здесь мы видим похожую динамику (рис. 4). По сейсмичности 1-7 апреля метод кластеризации выявляет локальную структуру (голубой цвет линий кластеризации и подсветки в списке) с центром в ~ 800 км к северо-западу от будущего толчка, а до и после активизации этой структуры – переключку между фрагментами параллельных друг другу линейных структур СЗ-ЮВ направления: «Афро-Байкальского» линеамента [12] и Шанского нагорья (белые линии – до локальной структуры, сиреневые - после) с перемещением центра активизаций к югу (к широте будущего толчка)

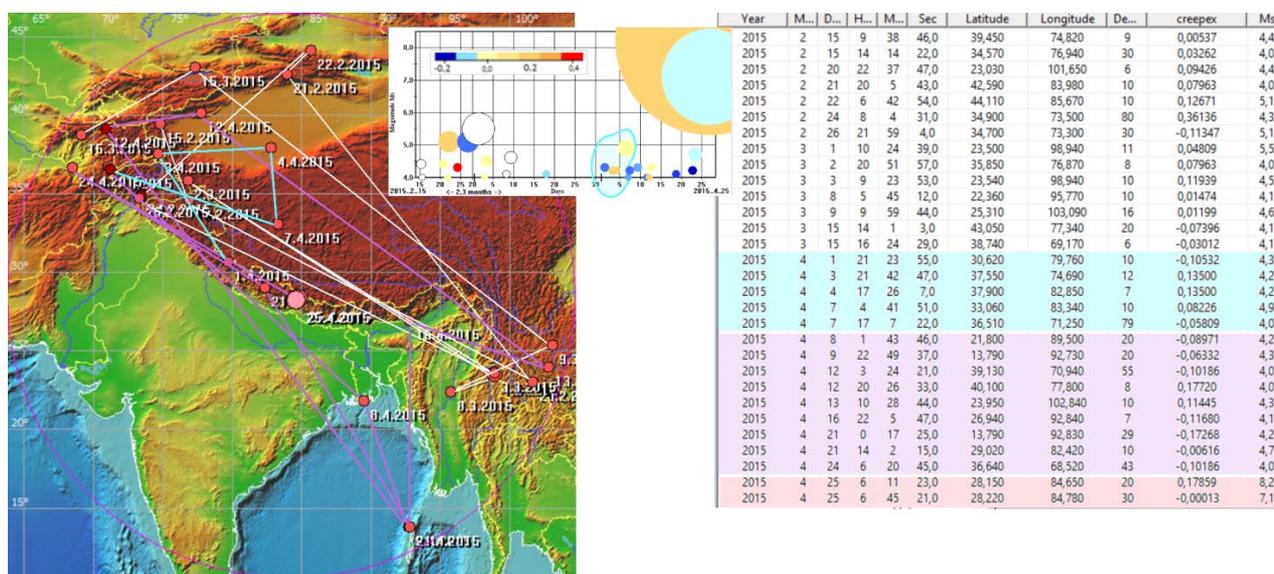


Рис. 4. Карта распределения, график $M_S(t)$ и список событий умеренной сейсмичности накануне тибетского землетрясения 25.4.2015, $M_S=8.2$

Последнее сильнейшее землетрясение рассматриваемого каталога: Суматринское 2.3.2016, $M_S=7.9$, дает картину распределения предваряющей его сейсмичности (рис. 5) похожую на рассмотренную выше (рис. 2). Очаг главного толчка здесь также расположен в стороне от зоны конвергенции плит. В январе проявляется локальный пучок умеренной сейсмичности с двумя ортогональными друг другу ветвями (белые линии кластеризации на карте), расположенный в 800 км севернее будущего события. В феврале - переключка внутри двух растущих по магнитуде и крипексу цепочек: 13.02-17.02 и 21.02-02.03 (см. график $M_S(t)$), с амплитудой пространственного разброса до 2300 и 2700 км, соответ-

ственно (сиреневые линии). Все события (кроме главного толчка $M_S=7.9$ и его афтершока $M_S=5.6$) расположены вдоль субдукционной дуги по краю Зондской плиты за исключением события 13.01.2016, $M_S=4.6$, относящегося к области очага землетрясения 11.4.2012, $M_S=8.6$ (рис. 2).

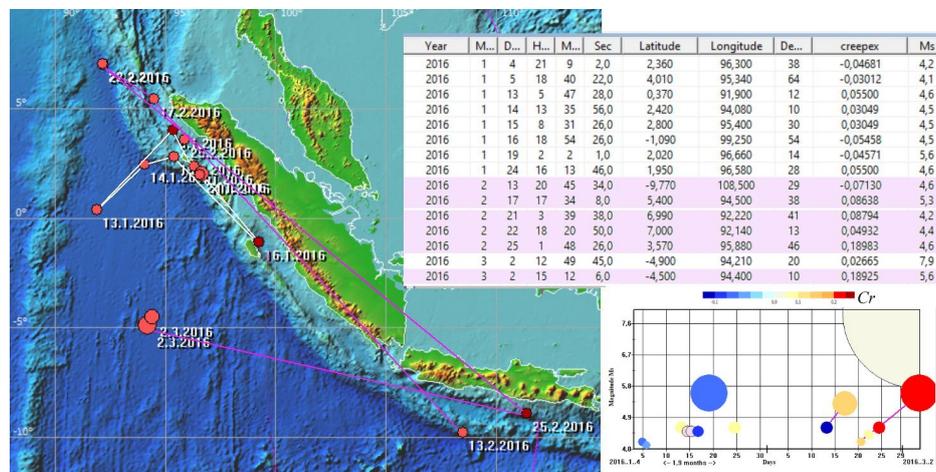


Рис. 5. Карта и временной график распределения событий умеренной сейсмичности накануне суматринского землетрясения 2.3.2016, $M_S=7.9$.

Обсуждение

В соответствии с «планетарно-региональной моделью» подготовки тектонических землетрясений, предполагающей связанность землетрясений на расстояниях в сотни и тысячи километров, для подавляющего большинства рассмотренных землетрясений с $M_S \geq 7.9$ (составляющих половину всех землетрясений этого ранга в каталоге CSN за 1999-2017гг) выявлены признаки взаимосвязи с предваряющей их умеренной сейсмичностью ближайших к очагу участков глобальных разломов и их более тонких структурных составляющих.

Распределение крипекса во времени показывает: 1) отрицательное или близкое к нулю значение в момент главного толчка, а в случае положительного значения (отражающего дилатансию или влияние флюидометаморфогенных процессов в очаге [13]) главный толчок сопровождается повторным толчком или крупным афтершоком с отрицательным значением крипекса, 2) наличие высоких значений крипекса в предваряющей сейсмической активизации, что характеризует большой вклад квазипластического движения в их механизмах, 3) наличие гнездовых или линейных локальных скоплений предваряющей сейсмичности на глубинных разломах, пересекающих область подготовки главного толчка, за месяц или менее до него.

Эти закономерности свидетельствуют в пользу концепции исчерпания пластичности умеренными землетрясениями средней удаленности от будущего главного толчка (в пределах геодинамически связанной области его подготовки), как признака перехода к хрупкому разрушению в его очаге [7, 8].

Заключение

Выявлены закономерности изменения упруго-пластичного состояния среды в области подготовки крупнейших землетрясений Южно-Азиатского региона, показывающие поэтапный процесс исчерпания пластичности среды умеренными землетрясениями средней удаленности от будущего очага (в пределах геодинамически связанной области его подготовки). Среди этих закономерностей: наличие гнездового или линейного локального скопления предваряющей сейсмичности за месяц или менее до главного толчка на глубинных разломах, пересекающих область его подготовки; преимущественно положительные значения их крипекса, а также миграция центра сейсмической активности в сторону локализации будущего очага.

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Фирстов П.П., Макаров Е.О., Глухов В.Е., Титков Н.Н., Жаринов Н.А., Такахаша Х. Наклономерные наблюдения на полуострове Камчатка в 2012-2016 гг // Сейсмические приборы. – 2021. – Т. 57. – № 1. – С. 49– 68. – DOI: 10.21455/si2021.1-4
2. Широков В.А., Бузевич А.В., Широкова Н.В. О причинах возникновения удалённых геофизических предвестников, регистрирующихся на заключительной, около недели, стадии подготовки сильных мировых землетрясений // Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений: V междунар. конф., с. Паратунка, Камчатский край, 2-7 авг. 2009 г.: Сб. докл. Петропавловск-Камчатский: ИКИР ДВО РАН, 2009. – С.478– 482.
3. Кафтан В.И., Кафтан И., Гёк Е. Исследование движений и деформаций земной коры восточной Турции в связи с землетрясением Ван (23.10.2011 г., $M_w=7.2$) с использованием данных GPS-наблюдений // Физика Земли. – 2021. – № 3. – С. 30– 44.
4. Смирнов В.Б., Пономарёв А.В. Физика переходных режимов сейсмичности. — М.: РАН, 2020. – 412 с.
5. Добровольский И.П. Математическая теория подготовки и прогноза тектонического землетрясения. – М.: ФИЗМАЛИТ, 2009. – 240 с.
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: Материалы Четвертой тектонофизической конференции в ИФЗ РАН (03–08 октября 2016 г.). – М.: Изд-во ИФЗ РАН, 2016. – Т. 1. – С. 470-474.
7. Никулин С.А., Добаткин С.В., Ханжин В.Г., Рогачев С.О. Влияние включений на деформацию и разрушение субмикроструктурных алюминиевых сплавов и титана // Деформация и разрушение материалов и наноматериалов. - М: Наука, 2009. – С. 225– 226.
8. 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– 62.
9. Михеева А.В. Геоструктурные элементы, выявляемые математическими алгоритмами и цифровыми моделями геоинформационно-вычислительной системы GIS-ENDDB. – Новосибирск: Омега Принт, 2016. – 300 с.
10. Каталог землетрясений сети станций Китая // Национальный центр данных о землетрясениях [сайт]. – URL: <https://data.earthquake.cn/gcywfl/index.html> (17.03.2024).

11. Михеева А.В., Калинин И.И. Крипекс-анализ процессов в очаговых зонах крупных землетрясений средствами GIS-ENDDDB // Российский сейсмологический журнал. – 2021. – Т. 3, № 4. – С. 7–17. – DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2021.4.01>

12. Kalinnikov I.I., Mikheeva A.V. The GIS-EEDB computing system, lineaments and the earthquake prediction problem // Bulletin of the Novosibirsk Computing Center. Series: Mathematical Modeling in Geophysics. – 2015. – N 18. – P. 17–34.

13. Калинин В.А., Родкин М.В., Томашевская И.С. 1989. Геодинамические эффекты физико-химических превращений в твердой среде. – М.: Наука. – 157 с.

© А. В. Михеева, И. И. Калинин, 2024