

УДК 550.34.063, 550.34.06.013.24

О влиянии предполагаемого глобального глубинного разлома на сильные землетрясения Индонезии

© 2023 г. А.В. Михеева¹, И.И. Калинин²

¹ИВМиМГ СО РАН, г. Новосибирск, Россия; ²ИФЗ РАН, г. Москва, Россия

Поступила в редакцию 28.08.2023 г.

Аннотация. По данным Глобального каталога NEIC, из 14 землетрясений с магнитудой $M_s \geq 7.0$, зарегистрированных в мире за первое полугодие 2023 г., два принадлежат мощному мультитектоническому землетрясению в Турции 06.02.2023 г. ($M_w=7.8$ и 7.7), а остальные 12 произошли в Индонезийском регионе. В работе средствами геоинформационной системы GIS-ENDDB исследуется геодинамическая ситуация в области подготовки серии индонезийских событий, начавшейся с двух землетрясений 8 и 9 января 2023 г. ($M_s=7.0$ и 7.6 , $H=29$ и 105 км). Установлено, что все 12 землетрясений пространственно приурочены к субширотному «Индонезийскому» сейсмолинеamentу длиной 9500 км, выявляемому методом большого круга Земли. Динамика изменения свойств геофизической среды в 950-километровой зоне от оси линеамента оценивалась значением парной корреляции магнитуды M_s и крипекса Cr_{0_isc} . Применялись два метода расчёта коэффициента парной корреляции этих параметров в скользящем временном окне: с фиксированным размером окна и с одним краем, фиксированным на нулевом значении времени (соответствующем моменту сильнейшего индонезийского события 09.01.2023 г.). Оба метода подтверждают факт монотонной консолидации среды вдоль линеамента (равномерно по всей его длине и глубине) за 33 дня до и 31 день после сильнейшего индонезийского толчка – на интервале обратной корреляции ($|K_{kor}| \geq 0.7$) магнитуды и крипекса. Такая же закономерность ранее описана нами для консолидированной части земной коры, где более сильные землетрясения имеют меньший крипекс (характеризующий больший вклад хрупких разрушений). Таким образом, подтверждается факт формирования организованного состояния среды (линейной жёсткой структуры) в пределах предполагаемого глубинного разлома, влияющего на последующую сейсмичность региона в виде пространственно приуроченной к нему полугодовой серии сильнейших землетрясений с $M_s \geq 7$.

Ключевые слова: среднеглубинная сейсмичность, крипекс, коэффициент парной корреляции параметров землетрясений.

Для цитирования: Михеева А.В., Калинин И.И. О влиянии предполагаемого глобального глубинного разлома на сильные землетрясения Индонезии // Российский сейсмологический журнал. – 2023. – Т. 5, № 4. – С. 52–64. – DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2023.4.04>. – EDN: XOVVHA

Введение

Два близкие по времени (менее суток) сильные землетрясения (с магнитудами 7.0 и 7.6, $H=29$ и 105 км) произошли 8 и 9 января 2023 г. в Индонезийском регионе на расстоянии около 4 тыс. км друг от друга, а менее чем через месяц (6 февраля 2023 г.) – мощное по разрушительной силе и числу жертв мультитектоническое землетрясение в Турции с магнитудами толчков $M_w=7.8$, 6.7 и 7.7. Близость по времени территориально удалённых событий Индонезии и Турции заставило нас ещё раз рассмотреть высказанные ранее предположения о приуроченности некоторых крупнейших землетрясений к единым геотекто-

ническим структурам или некоторым глобальным сейсмолинеаментам.

Понятие «линеament» было сформулировано ещё в 1901–1911 гг. американским геологом и геофизиком В. Хоббсом как «не более, чем прямолинейный объект Земли» [Анохин, Ломакин, 2015]. И хотя в дальнейшем этот термин применялся редко (преимущественно для протяжённых зон разрывных нарушений), с началом дешифрирования космоснимков он получил новое значение и широкое применение [Хаин, Ломизе, 1995]. С тех пор выявлено множество достаточно отчётливых, широких (километры, первые десятки километров) и протяжённых (многие сотни, нередко – более тысячи километров) зон

концентрации трещин, разрывов, пересекающих как платформы, так и складчатые системы [Хаин, Ломизе, 1995], линейные зоны сжатия и растяжения [Логвинова и др., 2015], трансконтинентальные и континентально-океанические разломы, а также скрытые тектонические нарушения земной коры [Полемаев, 2013]. Связь линеаментов с сейсмичностью обусловлена приуроченностью землетрясений как к разрывно-трещинным структурам, так и к областям напряжённо-деформированного состояния земной коры, но, поскольку сейсмичность охватывает глубины, далеко выходящие за пределы земной коры, понятие «линеамент» в применении к сейсмичности необходимо ещё более расширить, предположив, что «глобальный сейсмолинеамент» (по терминологии [Забродин, 1981]) может отражать преодолевающую по глубине слой Мохоровичича тектоническую мегаструктуру или единое межрегиональное поле напряжений в литосфере вплоть «до глубин, достигающих астеносферу» [Дядьков, 2005]. Ещё в 2013 г. при исследовании сейсмогенерирующих структур близ побережья Фукусимы, по данным сейсмического каталога JMA, А.В. Михеевой было выявлено строго линейное распределение вдоль 38 параллели крупнейших событий ($M_s \geq 7.0$) последнего десятилетия (2003–2013 гг.) глубиной от 10 до 107 км, включая мегаземлетрясение Тохоку (11.03.2011 г., $M_w=9$) [Mikheeva, 2013], и высказано предположение о наличии здесь древнего, длительное время неактивного разлома, вновь активизированного в период подготовки землетрясения Тохоку в качестве сейсмолинеамента с высоким сейсмическим потенциалом. В ещё более ранних работах [Mikheeva, 2011] при исследовании сейсмичности последнего месяца накануне Алтайского землетрясения (27.09.2003 г., $M_s=7.6$) был выявлен краткосрочный предвестниковый кластер землетрясений с $M_s \geq 3$ 14–20 сентября 2003 г. (за неделю до Алтайского толчка), пространственно протянувшийся в виде линейной сейсмоструктуры от Западного Алтая до Забайкалья. Эта сейсмоструктура оказалась активизированным в преддверии Алтайского события фрагментом «Афро-Байкальского» сейсмолинеамента, выявленного авторами в более поздних работах методами распознавания образов и большого круга Земли (например, [Kalinnikov, Mikheeva, 2015]).

Два недавних близких по времени сильных землетрясения Индонезии (8–9 января 2023 г.) также оказались приурочены к глобальному сейсмолинеаменту [Калинников, Михеева, 2023], выявленному в геоинформационной системе GIS-ENDDB методом большого круга

и имеющему субширотное простирание и длину ~6000 км. Оба индонезийские землетрясения находятся на расстоянии <500 км от этого линеамента, что укладывается в доверительный интервал <10% от его длины (мы применяем здесь подходы формальной статистики, поскольку, как показывают данные томографии [Mikheeva, 2017], для глубин более 50 км конфигурация границ между взаимодействующими блоками среды более размыта, а иногда и вовсе не соответствует наблюдаемой на поверхности). Поскольку по данным [Любушин, 2021] ожидалась дальнейшая сейсмическая активизация близ островов Тонга, т.е. по простиранию этого линеамента в сторону западного полушария, он был уточнён (путём расширения рассматриваемой области) до более протяжённого на восток «Индонезийского» сейсмолинеамента длиной 9500 км (рис. 1). Действительно, вся дальнейшая мировая сейсмическая активность первого полугодия 2023 г. по крупнейшим событиям с $M_s \geq 7.0$ (кроме мультяземлетрясения в Турции) сосредоточилась вдоль этого расширенного линеамента, но в полосе более широкого доверительного интервала, соответствующего ещё более протяжённому линеаменту. Последний также выявляется в системе GIS-ENDDB по более расширенной области, а точнее – два варианта глобального сейсмолинеамента по большому кругу Земли (отмечены фиолетовым цветом на рис. 1), в пределы доверительного интервала которого уместятся все землетрясения последнего полугодия, включая землетрясение в Турции.

Геодинамическая ситуация в области подготовки полугодовой серии крупнейших событий Индонезийского региона, начавшейся с двух январских землетрясений и охватывающей глубины $H=29-594$ км, исследуется в 950-километровой окрестности от оси «Индонезийского» линеамента (рис. 1) с помощью параметра крипекс, отражающего, в том числе, такой аспект сейсмо-геодинамического процесса, как связь пластических характеристик среды сейсмических очагов с общей тектонической обстановкой региона [Kaverina, 1996].

Описание данных и методов геодинамического исследования

Фактическим материалом работы являются данные Глобального каталога NEIC [National Earthquake ..., 2023] за 1973–2023 гг. (при исследовании сейсмичности по крупнейшим событиям $M_s \geq 7.0$ и построении сейсмолинеаментов методом большого круга по событиям с $M_s \geq 5.0$),

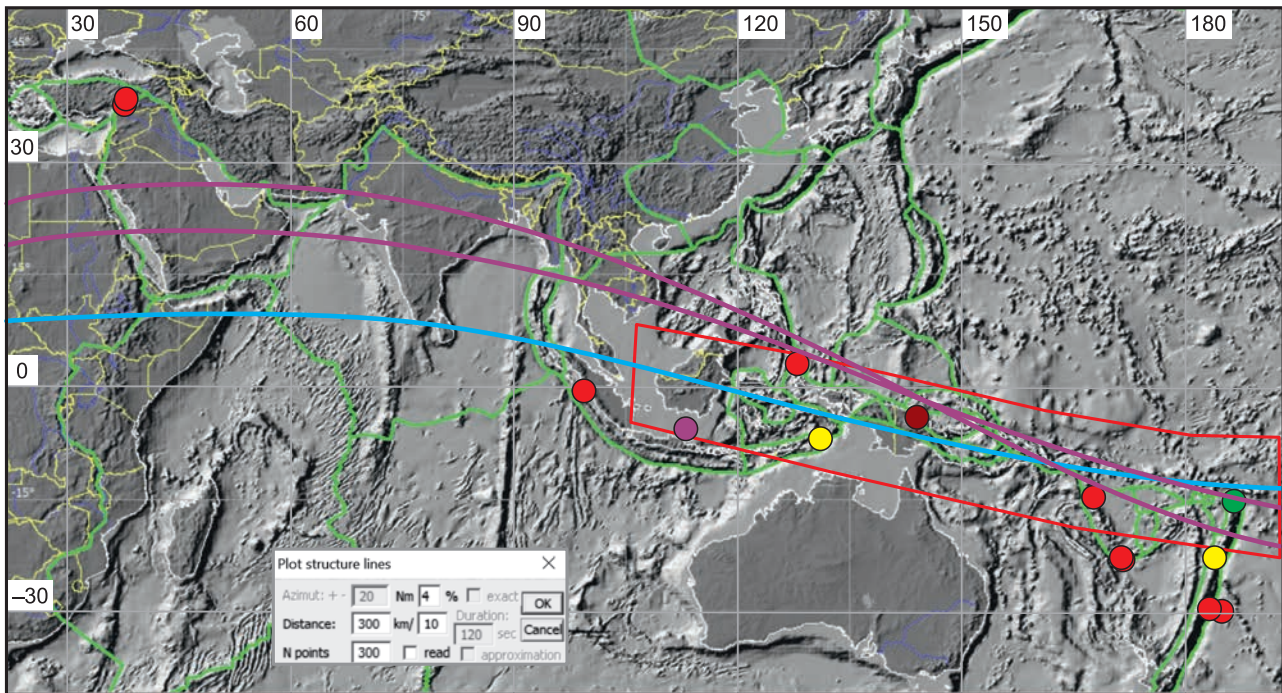


Рис. 1. Распределение сильных землетрясений с $M_S \geq 7.0$ первой половины 2023 г. (по каталогу NEIC) на фоне карты Южно-Азиатского региона с нанесёнными зелёным цветом межплитными разломами.

Фиолетовым цветом показаны сейсмолинеаменты, объединяющие эти землетрясения в пределах доверительного интервала. Бирюзовым цветом показан продолженный на запад «Индонезийский» сейсмолинеамент, объединяющий январские индонезийские землетрясения, красным – его доверительная полоса. Получено в программной системе GIS-ENDDB

а также выборка записей глобального каталога ISC [ISC Bulletin ..., 2023], содержащих определения трёх параметров землетрясения: поверхностной M_S и объёмной m_b магнитуд и глубины H (используемой для расчёта крипекса и сравнительного корреляционного анализа). Отметим, что подавляющее большинство (~96%) выбранных записей каталога ISC содержат определения M_S и m_b от агентства IDC (International Data Centre, Vienna, Austria) за исключением некоторых записей с $H \geq 100$ км (не содержащих определение M_S от IDC), а также в связи с запаздыванием обновлений от агентства IDC – записей последних двух недель от текущей даты пополнения каталога, которые содержат определения широкополосной магнитуды m_b и m_b от агентства GFZ (German Research Centre For Geosciences). Таким образом, при попытке использовать полученную выборку для корреляционного анализа событий последних 14 дней с целью прогноза будущего крупного землетрясения, приходится опираться на оперативные данные GFZ (за единичными исключениями использования определений M_S и m_b от агентства WIE – Wien, Austria),

что существенно снижает достоверность оценок. Лишь при появлении в электронном Интернет-ресурсе ISC более детальных (в ~1.5 раза по количеству записей) данных IDC ими заменяется оперативная часть выборки, взятая от GFZ.

Например, на момент написания статьи глобальная выборка из каталога ISC составила 152803 записи за период 26.07.1999 г. – 26.09.2023 г., из которых 134 последние записи (начиная с 12.09.2023 г.) вместо M_S и m_b содержат определения пар магнитуд m_b и m_b от GFZ (134 записи) и одна запись – с M_S и m_b от WIE. Эта выборка используется в среде GIS-ENDDB под именем *icreepex*.

В работе используется разработанный авторами и реализованный в экспертной геоинформационной системе GIS-ENDDB [Kalinnikov, Mikheeva, 2015] алгоритм поиска сейсмолинеаментов по большому кругу Земли [Михеева, Калинин, 2018]. Параметры построения (число событий линеамента n_{\min} , максимальное расстояние между базовыми крупными событиями L и делитель d вычислимого параметра ширины сейсмолинеамента $\Delta h_{\max} = L/d$) подбираются

так, чтобы из получаемого набора линеаментов отсеять не охватывающие территориально исследуемое множество крупнейших землетрясений (рис. 1).

В исследовании используется также описанный в [Михеева, 2023] подход на основе расчёта парной корреляции изменений во времени крипекса и магнитуды. Для этого в программные средства анализа сейсмических данных GIS-ENDDB добавлен алгоритм расчёта относительного крипекса Cr_{0_ISC} [Mikheeva, Kalinnikov, 2021], получаемого приведением [Неверова, 2009] величины классического крипекса ($Cr_0 = M_s - m_b$ [Прозоров, Хадсон, 1974]) для каждого события к среднему для его M_s значению по исследуемому каталогу (рис. 2). В данной работе по описанной выше выборке каталога ISC получена следующая формула осредняющего тренда (со значением достоверности аппроксимации $R^2=0.551$):

$$Cr_{0_СРЕДНЯЯ} = 0.4745 \cdot M_s - 2.3186,$$

Параметр Cr_{0_ISC} для каждого события вычисляется как разность $Cr_0 - Cr_{0_СРЕДНЯЯ}$:

$$Cr_{0_ISC} = M_s - m_b - 0.4745 \cdot M_s + 2.3186.$$

Напомним, что параметр крипекс (creep & explosion), определяющийся разностью поверхностной M_s и объёмной m_b магнитуд, показывает относительный вклад «мягкой» (крип) и «жёсткой» (эксплозия) подвижек в общий процесс очагового излучения, позволяя выявлять закономерности корреляционной зависимости крипекса от магнитуды по набору событий и интерпретировать её с точки зрения динамики состояния среды от очага к очагу [Михеева, 2023]. Если ранее такая зависимость исследовалась в 1000-километровой окрестности крупнейших

землетрясений [Михеева, 2023], то в настоящей работе рассматривается окрестность целого сейсмолинеамента. Для этого в среде GIS-ENDDB сначала строится сейсмолинеамент с параметрами $n_{\min}=300$, $L=300$ км и $d=10$ км – единственный линеамент субширотного простирания, выявляемый алгоритмом Большого круга по выборке сейсмичности каталога NEIC с $M_s \geq 5.0$, $H=0-700$ км в Австрало-Индонезийском регионе ($31^\circ\text{S}-40^\circ\text{N}$; $105^\circ\text{E}-170^\circ\text{W}$). Затем в его полосовой окрестности (полуширина которой определяется как 10% от его длины) на полученную карту наносится буферная зона заданной ширины относительно линеамента (рис. 1) и задаются параметры ($H \geq 50$ км и $M_s \geq 2.0$) для автоматической выборки землетрясений из каталога *icreepex*.

Для оценки синхронного поведения во времени параметров Cr_{0_ISC} , M_s и H событий выборки в окрестности «Индонезийского» линеамента применялись два метода расчёта коэффициента парной корреляции K_{KOR} (формула расчёта K_{KOR} приведена в работе [Михеева, 2023]) в зависимости от выбираемого окна расчёта: 1) с фиксированным размером скользящего временного окна; 2) с одним скользящим краем окна, а с другим краем – фиксированным на нулевом значении времени, соответствующем моменту сильнейшего индонезийского события 09.01.2023 года.

Алгоритм второго метода подробно описан в [Михеева, 2023]. В нём размер окна расчёта $t(t_0)$ уменьшается по мере приближения к моменту главного события (рис. 3) и поэтому более точно устанавливаются как момент начала аномалии K_{KOR} , так и её длительность. В первом же алгоритме ширина временного окна t постоянна (является изначально задаваемым параметром алгоритма) и каждой хронологической точке ряда присваивается значение коэффициента корреляции, рассчитанное по предшествующему этой точке интервалу t включительно. Этот метод, в отличие от предыдущего, не столь точно определяет параметры выявляемой аномалии (её амплитуда и длительность зависят от размера окна t), но ввиду своей независимости от конкретного землетрясения может быть использован (при наличии чётко выраженных предвестниковых аномалий) для предсказания будущего крупного землетрясения в аналогичной геодинамической ситуации. В работе показаны результаты для трёх различных размеров окна: $t=10, 20$ и 40 точек (рис. 4).

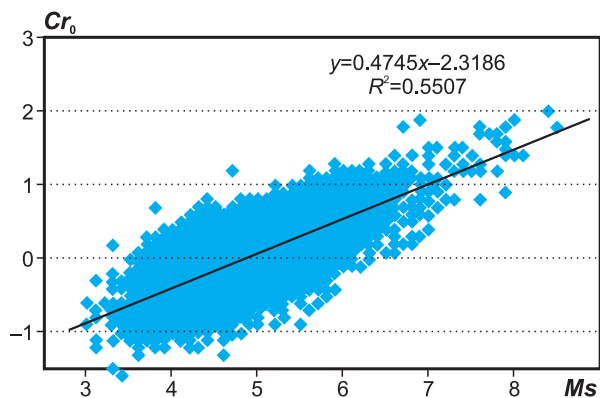


Рис. 2. График зависимости $Cr_0(M_s)$ каталога ISC с линией осредняющего тренда

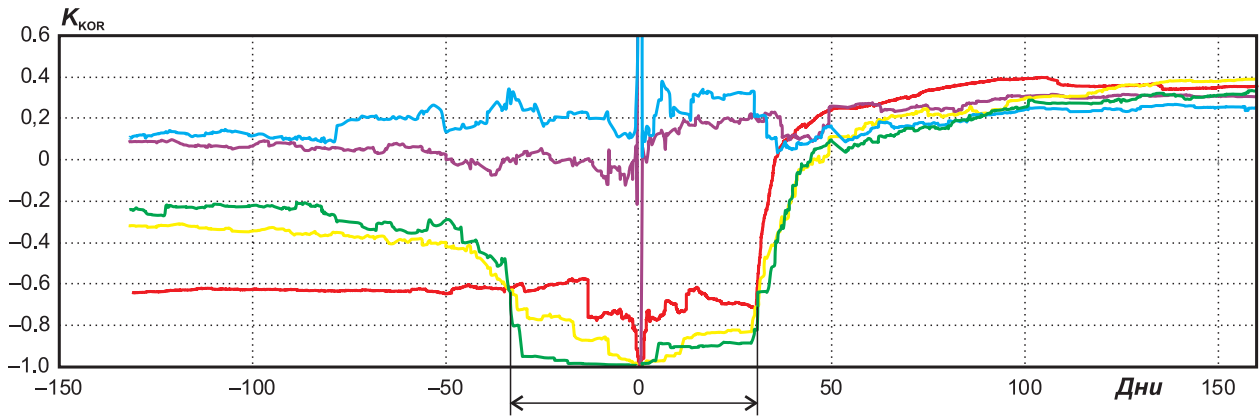
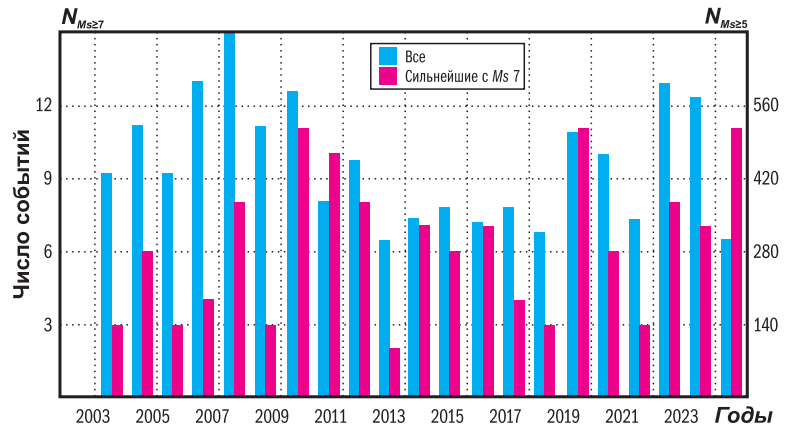


Рис 3. Распределение $K_{кор}(t)$ парной корреляции в скользящем окне с фиксированным краем параметров сейсмичности (за период 01.09.2022 г. – 15.08.2023 г.).

Зелёный график – параметров $M_S(t)$ и $Cr_{0_ISC}(t)$ для 894 событий с $H \geq 50$ км в окрестности «Индонезийского» линеамента (синий – параметров $H(t)$ и $Cr_{0_ISC}(t)$ той же выборки); жёлтый – $M_S(t)$ и $Cr_{0_ISC}(t)$ по 915 событиям с $H \geq 50$ км всего Тихоокеанского региона за исключением полосы линеамента (сиреневый – параметров $H(t)$ и $Cr_{0_ISC}(t)$ той же выборки), красный – $M_S(t)$ и $Cr_{0_ISC}(t)$ по 9119 событиям с $H \leq 50$ км Южно-Азиатского региона, показанного на рис. 1). На нулевой отметке времени – событие 09.01.2023 г. с $M_S=7.6$, $H=105$ км

Year	Mo	Da	Ho	Mn	Sec	Latitude	Longitude	Dep	Ms
2022	9	10	23	47	0.2	-6.29	146.50	116	7.6
2022	9	14	11	4	6.6	-21.19	170.27	137	7.0
2022	11	9	9	51	4.1	-26.09	178.34	660	7.0
2022	11	11	10	48	46.7	-19.29	-172.15	37	7.3
2022	11	12	7	9	13.5	-20.11	-178.35	579	7.0
2022	11	22	2	3	6.9	-9.82	159.60	14	7.0
2023	1	8	12	32	42.4	-14.95	166.88	29	7.0
2023	1	9	17	47	35.0	-7.06	130.01	105	7.6
2023	1	18	6	6	11.5	2.73	127.02	30	7.0
2023	3	16	0	56	0.1	-30.17	-176.21	10	7.0
2023	4	2	18	4	11.3	-4.33	143.16	70	7.0
2023	4	14	9	55	45.2	-6.04	112.05	597	7.0
2023	4	24	0	41	53.6	-29.99	-177.81	29	7.1
2023	4	24	20	0	57.3	-0.81	98.51	34	7.1
2023	5	10	16	2	0.3	-15.63	-174.49	210	7.6
2023	5	19	2	57	3.2	-23.21	170.74	18	7.7
2023	5	20	1	50	59.2	-23.04	170.56	27	7.1
2023	6	15	18	6	28.6	-22.99	-177.11	179	7.2

а



б

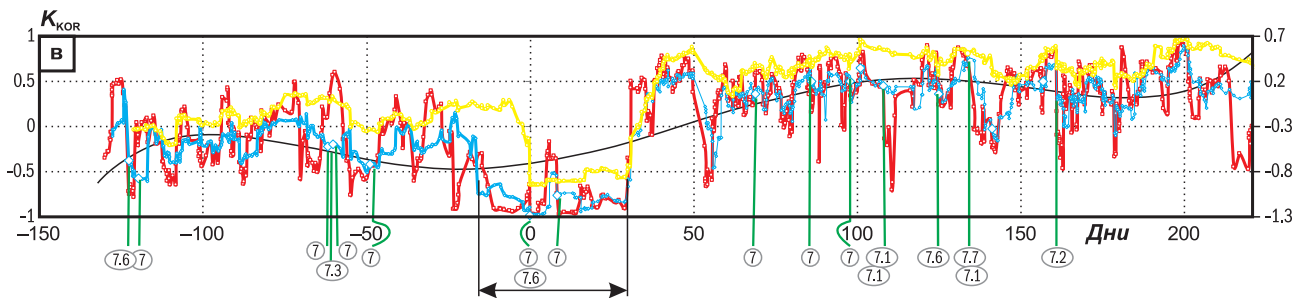


Рис. 4. Индонезийская серия крупнейших землетрясений с $M_S \geq 7.0$:

а – за последний год (01.09.2022 г. – 31.08.2023 г.) в виде списка параметров, моменты этих событий отмечены на графике (в) вертикальными зелёными линиями; б – за последние 20 лет (красные столбцы, шкала слева) в виде гистограммы количества событий в год, приведено также количество землетрясений с $M_S \geq 5.0$ (синие столбцы, шкала справа); в – на графиках изменения $K_{кор}$ при $t=10$ (красная кривая, шкала слева), $t=20$ (синяя кривая, шкала слева) и $t=40$ (жёлтая кривая, шкала справа).

Под шкалой времени (в днях) указаны магнитуды землетрясений с $M_S \geq 7.0$

Результаты исследования

Для оценки синхронного поведения во времени параметров крипекса Cr_{0_ISC} и магнитуды M_S в работе используется описанная выше выборка каталога ISC, составившая 2839 землетрясений с $H \geq 50$ км в 9500×1900-километровой полосе полученного нашим алгоритмом «Индонезийского» линеамента (рис. 1). Предполагается, что сейсмолинеament Большого круга отражает взаимосвязанную систему глубинных разломов (например, межплитных границ), в данном случае активизированную двумя сильными землетрясениями на её краях в январе 2023 г. [Калинников, Михеева, 2023] и подготовившую условия для последующей серии сильнейших землетрясений к северо-западу (Турция, февраль) и юго-востоку (в районе островов Тонга: март-июнь) от него.

Применяемый ранее [Михеева, 2023] метод расчёта коэффициента парной корреляции в скользящем временном окне с одним краем, фиксированным на моменте сильнейшего события (09.01.2023 г., $M_S=7.6$, $H=105$ км, $t_0=0$), показывает хронологический интервал абсолютно синхронного ($|K_{KOR}| \geq 0.95$) поведения параметров Cr_{0_ISC} и M_S событий линеамента. Интервал фиксируется хорошо выраженной аномалией обратной корреляции магнитуды и крипекса и начинается скачкообразно за 33 дня до нулевого события, а заканчивается также скачкообразно через 31 день после него (рис. 3, зелёный график). Закономерность роста абсолютной величины отрицательного крипекса с ростом магнитуды события описана нами в более ранних работах не только для консолидированной части земной коры, но и для окрестностей некоторых глубинных землетрясений с $M_S \geq 7.0$ в период их подготовки [Михеева, 2023]. В данном случае подобная закономерность, наблюдаемая на диапазоне глубин от 10 до 105 км вдоль линеамента в целом (по всей его длине и глубине), возможна при монотонной 64-дневной самоорганизации среды, например, при её равномерной консолидации в некоторую глубинную геотектоническую структуру.

Последующие события Индонезийского региона с $M_S \geq 7.0$ (это последние девять событий списка на рис. 4а) не характеризовались столь же протяжённой аномалией K_{KOR} . Например, для землетрясения 24.04.2023 г. ($M_S=7.1$) более сглаженная по форме аномалия K_{KOR} начинается за три дня до события и заканчивается на девятый день после него. Следовательно, можно предположить, что потенциальная тектони-

ческая структура, отмечаемая «Индонезийским» линеamentом, не связана напрямую с последующими землетрясениями, но динамика её свойств (в частности, её 64-дневная консолидация) могла послужить толчком для последующего активизационного процесса, изменив состояние геофизической среды вдоль своего простираения (например, путём создания соответствующего регионального поля напряжений в литосфере) или в зоне сейсмоакустической мелкоочаговой активизации [Sobolev et al., 2001; Борняков, Шерман, 2000].

Это предположение отчасти подтверждается поведением рассмотренного графика для землетрясений полосы линеамента с $H \geq 50$ км, а также подобными графиками распределения K_{KOR} для событий всего Тихоокеанского региона (исключая события линеамента) и для событий с $H \leq 50$ км – всего Южно-Азиатского региона. Последние два графика не имеют столь же чётких скачкообразных переходов к аномальной абсолютной корреляции за 33 дня до январских землетрясений, но имеют аналогичный крутой переход от отрицательного к положительному уровню корреляции через 31 день после них (рис. 3).

Чтобы подтвердить предположение об изменении состояния геофизической среды после январской активизации, проследим динамику параметра K_{KOR} вдоль линеамента в течение целого года, воспользовавшись другим методом его расчёта: в скользящем временном окне фиксированной длины. Приведём результаты этого метода (рис. 4).

1. Наиболее информативной оказалась кривая изменения K_{KOR} при $t=20$ точек, которая показывает почти симметричную относительно январских событий форму (аналогично графику рис. 3) пониженной аномалии $K_{KOR} < -0.7$ за 16 дней до события 08.01.2023 г. и через 20 дней после события 18.01.2023 г. (отмечена отрезком на рис. 4). Это даёт основание использовать подобный расчёт в дальнейшем для предсказания будущего землетрясения. Интересно также, что сглаженная динамика тренда этой кривой (наглядно выявляемая, например, полиномиальным трендом 6-го порядка) показывает в целом переход от нулевого уровня корреляции к отрицательным значениям (< -0.4) за ~50 дней до трёх январских событий 08.01.–18.01.2023 г. и к положительным значениям (> 0.3) через ~60 дней после них (когда 16.03.2023 г. произошло первое следующее событие с $M_S \geq 7.0$ индонезийской полугодовой серии). После этого тренд по сей день остаётся в области положительных

значений. Смена уровня значений параметра может говорить об изменённом состоянии среды после январских событий.

2. Кривая изменения K_{KOR} при $t=10$ точек хотя и имеет тренд, аналогичный тренду первой кривой, но количество выбросов амплитудой >0.5 относительно тренда на этой кривой в несколько раз больше (рис. 4). Эта кривая интересна тем, что показывает в левой части графика (до январских землетрясений) за несколько дней до и после каждого крупного события узкие положительные импульсы, а в правой части графика (начиная с январских событий) — отрицательные. Ввиду неустойчивости этого признака использовать эту кривую для прогноза будущего сильного события не представляется возможным.

3. Наиболее сглаженная кривая K_{KOR} при $t=40$ точек не демонстрирует каких-либо закономерных аномалий кроме одной пониженной ($K_{\text{KOR}} < -0.7$) длительностью 30 дней для январских землетрясений. Аномалия начинается с момента первого январского события и поэтому не может использоваться в дальнейшем для предсказания будущих аналогичных землетрясений.

Таким образом, на основании исследования параметра крипекс, нам удалось подтвердить уникальный факт формирования организованного состояния среды (возможно, линейной жёсткой структуры) в январе 2023 г. в пределах предполагаемого регионального глубинного разлома, повлиявшего на последующую сейсмичность региона в виде пространственно приуроченной к нему полугодовой серии сильнейших землетрясений с $M_s \geq 7.0$. Более того, вся глобальная сейсмичность первой половины 2023 г. целиком подчинена этому событию (12 из 14 землетрясений мира с $M_s \geq 7.0$ принадлежат индонезийскому региону). А по данным гистограммы распределения землетрясений за последние 20 лет (рис. 4б), именно в 2023 г. в индонезийском регионе соотношение числа землетрясений с магнитудами $M_s \geq 7$ и $M_s \geq 5$ аномально завышено и составляет 3.6% против 0.3–1.3% большинства предшествующих годовых интервалов (лишь в 2014 и 2016 гг. это соотношение достигает уровня 2%, а в 2010 и 2018 гг. — 2.2 и 2.6%).

Дискуссия

Ряд работ мировой геологической литературы посвящён выявлению и описанию глобальных линеаментов Земли как субширотного [Долгинов, Долгинов, 2013], так и диагонального [Полетаев, 2013] простирания и объяснению их образования ротационной моделью, в частности,

как результата дифференцированного вращения вещества ранней расплавленной Земли [Долгинов, Долгинов, 2013] или активного развития современных вращательных движений [Полетаев, 2013]. Например, А.И. Полетаев на своей схеме 2013 г. [Полетаев, 2013] выделяет Североморско-Индонезийский (СМ-И) и Африкано-Чукотский (А-Ч) глобальные линеаменты диагонального простирания (рис. 5), которые отражают границы «блоков» Земли, характеризующихся обратными соотношениями между поднятыми и опущенными «блоками» дневной поверхности. Выявленные на его схеме планетарные линеаменты характеризуются не только вращением разделяемых ими блоков, но и сдвиговыми смещениями вдоль линейного своего простирания, т.е. «разрывными» нарушениями — глобальными глубинными разломами. Интересно, что несколько позже и независимо от этих данных, авторами данной статьи с помощью алгоритма группирования землетрясений (см., например, [Kalinnikov, Mikheeva, 2015]) был выявлен Афро-Байкальский сейсмический линеамент (совпадающий по простиранию с глобальным А-Ч-линеаментом А.И. Полетаева), а теперь и «Индонезийский» сейсмолинеамент (оказавшийся частью СМ-И-линеамента А.И. Полетаева).

Не случайно также, что, по данным каталога NEIC, подтвердилась активизация «Индонезийского» сейсмолинеамента в первой половине 2023 г.: по 12 из 14 крупнейших (с магнитудой $M_s \geq 7.0$) землетрясений мира, которые пришлось на область этого линеамента, а активизация более протяжённого на восток и северо-запад Североморско-Индонезийского линеамента А.И. Полетаева — по всем 14 крупнейшим событиям полугодия, включая два, принадлежащих мощному мультиземлетрясению Турции 06.02.2023 г. с $M_w=7.8$ и 7.7 (рис. 5). Отметим, что последнее по суммарному энергетическому классу — логарифму суммарной энергии двух его толчков с $M_s \geq 7$ ($K_s=16.6$) — почти эквивалентно суммарному классу всей полугодовой сейсмичности Индонезии с $M_s \geq 7$ ($K_s=16.8$) и вошло в пятёрку самых смертоносных землетрясений текущего века наряду с землетрясениями на Суматре в 2004 г., в Пакистане в 2005 г., в Китае в 2008 г. и на Гаити в 2010 году.

В целом эта планетарная линейно направленная активизация подтверждает обоснованность предположения о существовании глобальной системы линеаментов, в частности, диагональной ротационной системы восточного полушария А.И. Полетаева [Полетаев, 2013]. К сожалению, поскольку принятие этого допущения

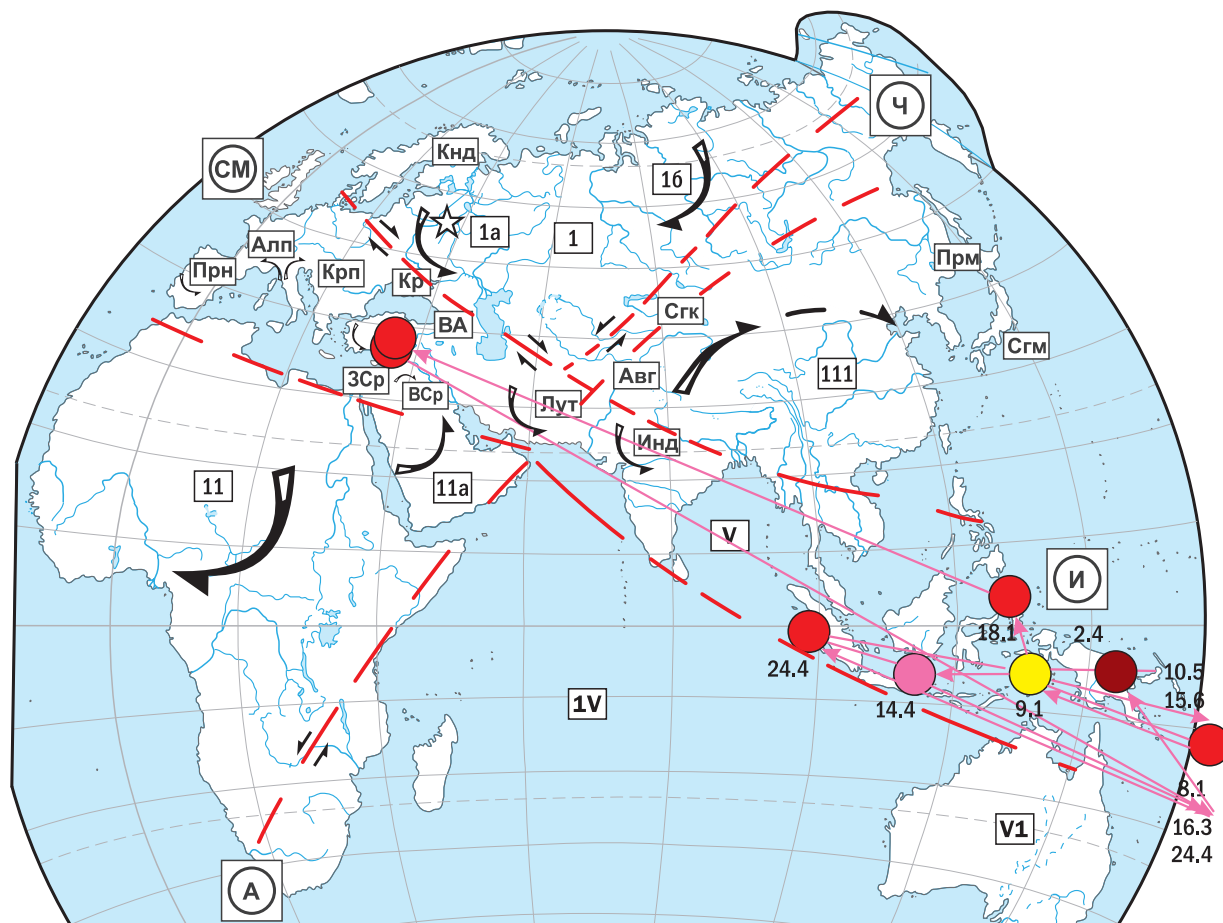


Рис. 5. Крупнейшие ($M_s \geq 7.0$) землетрясения первой половины 2023 г. на схеме современных вращательных движений блоков земной коры восточного полушария Земли А.И. Полетаева [Полетаев, 2013].

СМ-И – Североморско-Индонезийский линеамент

требует признания фиксистой позиции в образовании тектонических структур и не отвечает мобилистским представлениям, планетарные и региональные тектонофизические основы формирования линеаментов, связанные с системно-иерархическим представлением их размещения, до сегодняшнего дня так и не разработаны [Никонов, 2011]. Решение этой проблемы видится в формировании в конце XX в. в науках о Земле новых системных взглядов, обусловленных необходимостью разработки учения об общих принципах эволюции и самоорганизации сложных систем [Никонов, 2011]. Авторы надеются, что их исследования внесут дополнительные предпосылки для создания такого учения, объясняя все проявляющиеся в изменении параметра крипекса закономерности развития геодинамической ситуации процессами самоорганизации среды в структуры с некоторыми новыми свойствами, например, её консолидации в жёсткие структуры повышенной хрупкости.

Заключение

В работе исследуется геодинамическая ситуация в преддверии и во время серии крупнейших землетрясений в индонезийском регионе, произошедшей в первом полугодии 2023 года. Математические алгоритмы выявления сейсмолинеаментов и расчёта относительного крипекса Cr_{0_ISC} , реализованные в экспертной геоинформационной системе GIS-ENDDB, позволяют построить «Индонезийский» линеамент и обосновать предположение о появлении в его области особого свойства геофизической среды – зависимости крипекса от магнитуды землетрясения (когда более сильные землетрясения имеют меньший крипекс, характеризующий больший вклад в очаговую подвижку хрупких разрушений). Это свойство можно объяснить самоорганизацией среды в динамичную глобальную тектоническую структуру (глобальный глубинный разлом) повышенной хрупкости, активизированную

процессами подготовки двух январских землетрясений (8 и 9 января 2023 г.) на её краях.

Подобное изменение свойств глобальной геоструктуры могло послужить толчком для последующего активизационного процесса, изменив состояние геофизической среды вдоль своего простирания и далеко за её пределами путём инициированного изменения регионального поля напряжений в литосфере.

Как показывает статистика распределения землетрясений с $M_s \geq 7.0$, а также годовая динамика изменения параметра корреляции крипекса и магнитуды для сейсмичности всего Южно-Азиатского и соседнего ему Тихоокеанского регионов, вся глобальная сейсмичность первой половины 2023 г. подчинена именно этому событию, возможно связанному с глобальными подвижками ротационного характера вдоль планетарного Североморско-Индонезийского линеамента, выявленного А.И. Полетаевым.

Работа выполнена в рамках государственного задания № 0251-2021-0004.

Литература

- Анохин В.М., Ломакин И.Э.* Линеаменты и регматическая сеть как реальные явления глобальной тектоники // Геология морей и океанов: Материалы XXI Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. Т. V. — М.: ГЕОС, 2015. — С. 9–13.
- Борняков С.А., Шерман С.И.* Многоуровневая самоорганизация деструктивного процесса в сдвиговой зоне (по результатам физического моделирования) // Физическая мезомеханика. — 2000. — Т. 3, № 4. — С. 107–115. — EDN: KWPITZ
- Долгинов Е.А., Долгинов А.З.* Глобальная система широтных линеаментов и её возможное происхождение // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. — 2013. — № 4. — С. 41–49. — EDN: RJYYMN
- Дядьков П.Г.* Закономерности в изменениях напряжённого состояния земной коры и сейсмического режима в Байкальском регионе в условиях влияния процессов на ближайших конвергентных границах плит // Современная геодинамика и опасные природные процессы в Центральной Азии: Материалы Всероссийского совещания «Современная геодинамика и сейсмичность Центральной Азии: фундаментальный и прикладной аспекты» (Иркутск, 20–23 сентября 2005 г.). Вып. 3. — Иркутск: ИЗК СО РАН, 2005. — С. 174–180.
- Забродин В.Ю.* Системный анализ дизъюнктивов. — М.: Наука, 1981. — 207 с.
- Калинников И.И., Михеева А.В.* Анализ динамики развития разломов и сильных землетрясений // Интерэкспо Гео-Сибирь. — 2023. — Т. 4, № 1. — С. 120–128. DOI 10.33764/2618-981X-2023-4-1-120-128.
- Логвинова Т.В., Домарева А.Е., Харченко В.М.* Космическая съёмка для оценки нефтегазоносности территорий в глобальном, региональном и локальном планах // Актуальные проблемы нефтегазовой отрасли Северо-Кавказского федерального округа: Материалы III ежегодной научно-практической конференции Северо-Кавказского федерального университета. — Ставрополь: Издательский дом «Тэсэра», 2015. — С. 36–39.
- Любушин А.А.* Низкочастотный сейсмический шум Земли на глобальном и региональном уровнях // Проблемы комплексного геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов [Электронный ресурс]: Труды Восьмой Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. Петропавловск-Камчатский. 26 сентября — 2 октября 2021 г. / Отв. ред. Д.В. Чебров. — Петропавловск-Камчатский: КФ ФИЦ ЕГС РАН, 2021. — С. 83–85. — DOI: 10.35540/903258-451.2021.8.13. — EDN: MMHILX
- Михеева А.В.* Динамика параметров среднеглубинной сейсмичности перед крупными землетрясениями южно-азиатских сейсмофокальных зон // Российский сейсмологический журнал. — 2023. — Т. 5, № 2. — С. 51–60. — DOI: 10.35540/2686-7907.2023.2.04. — EDN: CGGNOM
- Михеева А.В.* Изучение глобальных геотектонических структур в среде GIS-ENDDb по данным сейсмичности и томографии // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы XII Международной сейсмологической школы / Отв. ред. А.А. Маловичко. — Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. — С. 227–231. — EDN: ZRVHTR
- Михеева А.В.* Программно-алгоритмический инструментарий подготовки и анализа сейсмологических данных в информационно-вычислительном комплексе EEDB: автореф. дисс. ... канд. физ.-мат. наук: 05.13.11. — Новосибирск: ИСИ СО РАН, 2011. — 22 с. — EDN: QHTZJX
- Михеева А.В., Калинин И.И.* Методы выявления геодинамических мегаструктур по геофизическим данным // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. — 2018. — Т. 2, № 4. — С. 17–25. — EDN: YOREOT
- 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. — EDN: SWDUVP
- Никонов А.И.* Тектонофизические аспекты структурного дешифрирования линеаментных систем

// Современная тектонофизика. Методы и результаты: Материалы Второй молодёжной школы семинара: в 2-х томах. Т. 2. — М.: ИФЗ РАН, 2011. — С. 78–93. — EDN: ZNKUFV

Полетаев А.И. Схема современных вращательных движений блоков земной коры восточного полушария Земли // XV Горшковские чтения. Материалы конференции, посвящённой 104-й годовщине со дня рождения Г.П. Горшкова (1909–1984) / Под ред. Н.В. Короновского. — М.: МГУ, 2013. — С. 24–25.

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

Хаин В.Е., Ломизе М.Г. Геотектоника с основами геодинамики: учебник для студентов геологических специальностей ВУЗов. — М.: Изд-во МГУ, 1995. — 480 с.

International Seismological Centre (ISC). On-line Bulletin [Site]. — URL: <http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/catalogue/>. — United Kingdom, Thatcham: Internat. Seismol. Centre, 2023. — DOI: 10.31905/D808B830

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

Kalinnikov I.I., Mikheeva A.V. The GIS-ENDDB algorithms and methods for geoinformation-

expert data analysis // Machine Learning and Data Analysis. — 2017. — V. 3, Is. 1. — P. 36–49. — DOI: 10.21469/22233792.3.1.03. — EDN: YPSZHR

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, N 1. — P. 249–265. — DOI: 10.1111/j.1365-246X.1996.tb06549.x. — EDN: LDMVED

Mikheeva A.V. Studying a spatial-temporal distribution of seismicity in the area around Fukushima Prefecture by GIS-EEDB program tools // Bulletin of the Novosibirsk Computing Center. Numerical Analysis. — 2013. — N 16. — P. 65–79.

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: Proceedings of the All-Russian conference with international participation (SDM-2021). — Novosibirsk, 2021. — P. 194–202. — URL: http://ceur-ws.org/Vol-3006/23_short_paper.pdf

National Earthquake Information Center. Earthquake Hazards // U.S. Geological Survey [Site]. — URL: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/>. — 2023.

Sobolev G.A., Ponomarev A.V., Kol'tsov A.V., Salov B.G., Babichev O.V., Terent'ev V.A., Patonin A.V., Mostryukov A.O. Excitation of acoustic emission by elastic impulses // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. — 2001. — V. 37, N 1. — P. 73–77. — EDN: LGQUKL

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. 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

On the influence of the supposed global deep fault on the strong earthquakes in Indonesia

© 2023 A.V. Mikheeva¹, I.I. Kalinnikov²

¹ICM&MG RAS, Novosibirsk, Russia; ²IPE RAS, Moscow, Russia

Received August 28, 2023

Abstract According to the NEIC global catalog, out of 14 earthquakes with a magnitude of $M_s \geq 7.0$ registered in the world in the first six months of 2023, two belong to the powerful multi-earthquake of Turkey 06.02.2023 (M_w : 7.8 и 7.7), and the remaining 12 occurred in the Indonesian region. In the paper the geodynamic situation in the preparation of a series of Indonesian events, which began with two earthquakes: 08 and 09.01.2023 (M_s : 7.0 и 7.6, $H=29$ и 105 km), is investigated by means of a geoinformation system by means of a geofomation system GIS-ENDDB. It is established that all 12 earthquakes are spatially confined to the sub-latitudinal “Indonesian” seismolineament with a length of 9500 km, detected by the method of the great circle of the Earth. The dynamics of changes in the geophysical environment properties of the 950-kilometer zone from the axis of the lineament was estimated by the value of the paired correlation of magnitude M_s and creepex Cr_{0_ISC} . Two methods were used to calculate the coefficient of paired correlation of these parameters in a sliding time window: 1) with a fixed window size and 2) with one edge fixed at zero time (corresponding to the moment of the strongest Indonesian event on 09.01.2023). Both methods confirm the fact of monotonous consolidation of the environment along the lineament (evenly along its entire length and depth) 33 days before and 31 days after the strongest Indonesian shock: at the interval of reverse correlation ($|K_{KOR}| \geq 0.7$) of magnitude and creepex. The same pattern was previously described by us for the consolidated part of the earth’s crust, where stronger earthquakes have a smaller creepex (characterizing the greater contribution of brittle destruction). Thus, the fact of the formation of an organized state of the environment (linear rigid structure) within the limits of the assumed deep fault, affecting the subsequent seismicity of the region in the form of a spatially timed semi-annual series of the strongest earthquakes with $M_s \geq 7.0$ is confirmed.

Keywords Mean-depth seismicity, creepex, the coefficient of paired correlation of earthquake parameters.

For citation Mikheeva, A.V., & Kalinnikov, I.I. (2023). [On the influence of the supposed global deep fault on the strong earthquakes in Indonesia]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 5(4), 52-64. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2023.4.04>. EDN: XOVVHA

References

- Anokhin, V.M., & Lomakin, I.E. (2015). [Lineaments and the regmatic network as real phenomena of global tectonics]. In *Geologiya morei i okeanov: Materialy XXI Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii (Shkoly) po morskoi geologii. T. V.* [Geology of seas and oceans: Proceedings of XXI International Conference on Marine Geology. Vol. V] (pp. 9-13). Moscow, Russia: GEOS Publ. (In Russ.).
- Borniyakov, S.A., & Sherman, S.I. (2000). [Multilevel self-organization of a destructive process in a shear zone (based on the results of physical modeling)]. *Fizicheskaya mezhmekhanika* [Physical Mesomechanics], 3(4), 107-115. (In Russ.). EDN: KWPITZ
- Dolginov, E.A., & Dolginov, A.Z. (2013). [The global system of latitudinal lineaments and its possible origin]. *Vestnik Rossiiskogo universiteta družby narodov. Seriya: Inzhenerye issledovaniia* [Bulletin of the Peoples’ Friendship University of Russia. Series: Engineering Research], 4, 41-49. (In Russ.).
- Dyadkov, P.G. (2005). [Regularities in changes in the stress state of the Earth’s crust and the seismic regime in the Baikal region under the influence of processes on the nearest convergent plate faces]. In *Sovremennaya geodinamika i opasnye prirodnye protsessy v Tsentral’noi Azii: Materialy Vserossiiskogo soveshchaniia «Sovremennaya geodinamika i seismichnost’ Tsentral’noi Azii: fundamental’nyi i prikladnoi aspekty» (Irkutsk, 20–23 sentiabria 2005 g.). Vyp. 3* [Proceedings All-Russian Meeting “Modern Geodynamics and Seismicity of Central Asia: Fundamental and applied aspects” (Irkutsk, September 20-23, 2005)] (pp. 174-180). Irkutsk, Russia: IEC SB RAS Publ. (In Russ.).
- International Seismological Centre. (2023). On-line Bulletin. DOI: [10.31905/D808B830](https://doi.org/10.31905/D808B830)
- Kalinnikov, I.I., & Mikheeva, A.V. (2015). The GIS-EEDB computing system, lineaments and the earthquake

- prediction problem. *Bulletin of the Novosibirsk Computing Center. Series: Mathematical Modeling in Geophysics*, 18, 17-34. EDN: TOKSCB
- Kalinnikov, I.I., & Mikheeva, A.V. (2017). The GIS-ENDDB algorithms and methods for geoinformation-expert data analysis. *Machine Learning and Data Analysis*, 3(1), 36-49. DOI: 10.21469/22233792.3.1.03. EDN: YPSZHR
- Kalinnikov, I.I., & Mikheeva, A.V. (2023). [Analysis of the dynamics of the development of faults and strong earthquakes]. *InterEkspo Geo-Sibir'* [Interexpo Geo-Siberia], 4(1), 120-128. DOI: 10.33764/2618-981X-2023-4-1-120-128 (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. DOI: 10.1111/j.1365-246X.1996.tb06549.x. EDN: LDMVED
- Khain, V.E., & Lomize, M.G. (1995). *Geotektonika s osnovami geodinamiki: uchebnik dlia studentov geologicheskikh spetsial'nostei VUZov* [Geotectonics with the basics of geodynamics : textbook for students of geological specialties of universities]. Moscow, Russia: MSU Publ., 480 p. (In Russ.).
- Logvinova, T.V., Domareva, A.E., & Kharchenko, V.M. (2015). [Space survey for assessing the oil and gas potential of territories in global, regional and local plans]. In *Aktual'nye problemy neftegazovoi otrasli Severo-Kavkazskogo federal'nogo okruga: Materialy III ezhegodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii Severo-Kavkazskogo federal'nogo universiteta* [Actual problems of the oil and gas industry of the North Caucasus Federal District : Proceedings of the III Annual scientific and practical conference of the North Caucasus Federal University] (pp. 36-39). Stavropol, Russia: Publishing house "Tesera". (In Russ.).
- Lyubushin, A.A. (2021). [Low-frequency seismic noise of the earth at the global and regional levels]. In *Problemy kompleksnogo geofizicheskogo monitoringa seismoaktivnykh regionov (Elektronnyi resurs): Trudy Vos'moi Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem. Petropavlovsk-Kamchatskii. 26 sentiabria — 2 oktiabria 2021 g. Otv. red. D.V. Chebrov* [Problems of complex geophysical monitoring of seismically active regions (Electronic resource): Proceedings of the Eighth All-Russian Scientific and Technical Conference with International Participation. Petropavlovsk-Kamchatsky. September 26 — October 2, 2021. Ed. by D.V. Chebrov] (pp. 83-85). Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia: KB GS RAS Publ. (In Russ.). DOI: 10.35540/903258-451.2021.8.13. EDN: MMHILX
- Mikheeva, A.V. (2011). *Programmno-algoritmicheskii instrumentarii podgotovki i analiza seismologicheskikh dannykh v informatsionno-vychislitel'nom komplekse EEDB: avtoref. diss. ... kand. fiz.-mat. nauk: 05.13.11* [Software and algorithmic tools for the preparation and analysis of seismological data in the information and computing complex EEDB: Candidate phys. and math. sci. abstract diss.: 05.13.11]. Novosibirsk, Russia: IIS SB RAS, 22 p. (In Russ.). EDN: QHTZJX
- Mikheeva, A.V. (2013). Studying a spatial-temporal distribution of seismicity in the area around Fukushima Prefecture by GIS-EEDB program tools. *Bulletin of the Novosibirsk Computing Center. Series: Mathematical Modeling in Geophysics*, 16, 65-79.
- Mikheeva, A.V. (2017). [Studying of global geotectonic structures in the GIS-ENDDB environment according to seismicity and a tomography data]. In *Materialy XII Mezhdunarodnoy seysmologicheskoy shkoly "Sovremennyye metody obrabotki i interpretatsii seysmologicheskikh dannykh"* [Proceedings of the XII International Seismological Workshop "Modern Methods of Processing and Interpretation of Seismological Data"] (pp. 227-231). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.). EDN: ZRVHTP
- Mikheeva, A.V. (2023). [Dynamics of parameters of mid-depth seismicity before large earthquakes of South Asian seismofocal zones]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 5(2), 51-60. (In Russ.). DOI: 10.35540/2686-7907.2023.2.04. EDN: CGGHOM
- Mikheeva, A.V., & Kalinnikov, I.I. (2018). [Methods for detecting geodynamic megastructures from geophysical data]. *InterEkspo Geo-Sibir'* [Interexpo Geo-Siberia], 2(4), 17-25. (In Russ.). EDN: YOREOT
- Mikheeva, A.V., & Kalinnikov, I.I. (2021). Creepex as a parameter of seismo-geodynamic studies based on geo-information systems. In *Spatial Data Processing for Monitoring of Natural and Anthropogenic Processes: Proceedings of the All-Russian conference with international participation (SDM-2021)* (pp. 194-202). Novosibirsk, Russia. Available at: http://ceur-ws.org/Vol-3006/23_short_paper.pdf
- National Earthquake Information Center: Earthquake Hazards (2023). *U.S. Geological Survey*. Retrieved from <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes>.
- Neverova, N.P. (2009). [Creepex — characteristic of seismic center]. In *Materialy Chetvertoi Mezhdunarodnoy seysmologicheskoy shkoly "Sovremennyye metody obrabotki i interpretatsii seysmologicheskikh dannykh"* [Materials of Fourth International Seismological Workshop "Modern Methods of Processing and Interpretation of Seismological Data"] (pp. 127-129). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.). EDN: SWDUVP
- Nikonov, A.I. (2011). [Tectonophysical aspects of structural decoding of lineament systems]. In *Sovremennaiia tektonofizika. Metody i rezul'taty: Materialy Vtoroi molodezhnoi shkoly seminara: v 2-kh tomakh. T. 2* [Modern tectonophysics. Methods and results. Proc. of the Second youth school-seminar: in 2 volumes. Vol. 2] (pp. 78-93). Moscow, Russia: IPE RAS Publ. (In Russ.). EDN: ZNKUFV

- Poletaev, A.I. (2013). [Scheme of modern rotational movements of blocks of the Earth's crust of the Eastern hemisphere of the Earth]. In: *XV Gorshkovskie chteniia. Materialy konferentsii, posviashchennoi 104-i godovshchine so dnia rozhdeniia G.P. Gorshkova (1909–1984). Pod red. N.V. Koronovskogo* [XV Gorshkov readings. Proceedings of the conference dedicated to the 104th anniversary of the birth of G.P. Gorshkov (1909–1984). Ed. N.V. Koronovsky] (pp. 24–25). Moscow, Russia: MSU Publ. (In Russ.).
- Prozorov, A.G., & Hudson, D. (1974). [Dependence between *MLH* and *MPV* on regional conditions and local interconnections]. In *Magnituda i energeticheskaia klassifikatsiia zemletriasenii: v 2-kh tomakh. T. 2* [Magnitude and energy classification of earthquakes. Is. 2] (pp. 208–216). Moscow, Russia: IPE AS USSR Publ. (In Russ.).
- Sobolev, G.A., Ponomarev, A.V., Kol'tsov, A.V., Salov, B.G., Babichev, O.V., Terent'ev, V.A., Patonin, A.V., & Mostryukov, A.O. (2001). Excitation of acoustic emission by elastic impulses. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 37(1), 73–77. EDN: LGQUKL
- Zabrodin, V.Yu. (1981). *Sistemnyi analiz diz'iunktivov* [System analysis of disjunctive]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 207 p. (In Russ.).

Information about authors

Mikheeva Anna Vladlenovna, PhD, Researcher of the Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (ICM&MG 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