

УДК 550.34.063, 550.34.06.013.24

Распределение параметра крипекс–магнитудной корреляции для сейсмичности больших глубин в контексте глобальной тектоники

© 2024 г. А.В. Михеева

ИВМиМГ СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Поступила в редакцию 13.08.2024 г.

Аннотация. В ряде работ автора было показано успешное применение крипекс-параметра сейсмичности в задачах геодинамического исследования областей подготовки крупных событий по изменению во времени как величины крипекса в окрестности их очагов, так и коэффициента парной корреляции графиков магнитуды и крипекса $M_s(t)$ и $Cr(t)$ (крипекс-магнитудной корреляции $K_{кор}$) в сопутствующих роях землетрясений или в период подготовки крупного толчка. С переходом на региональный и глобальный уровни исследования по изменению $K_{кор}$ было обнаружено влияние на процессы подготовки очага со стороны средне- и глубокофокусной сейсмичности ($H \geq 50$ км), распределённой вдоль ближайших к очагу региональных и глобальных глубинных разломов. В данной работе рассмотрена динамика параметра $K_{кор}$ за весь охватываемый глобальным каталогом СМТ период вдоль основных сейсмических поясов Земли. «Основными поясами» названы выявляемые системой GIS-ENDDB глобальные линейменты, в 10%-ной доверительной полосе которых сосредоточено 100% всех землетрясений земного шара с $M_s \geq 7.5$. В динамике $K_{кор}$ обнаруживается закономерность высокой корреляции графиков $M_s(t)$ и $Cr(t)$ накануне нескольких крупнейших землетрясений (названных «ключевыми»). Это может свидетельствовать о создании в период подготовки ключевых событий особого организованного состояния среды, связанного с её консолидацией вдоль сейсмических поясов (в случае обратной корреляции $M_s(t)$ и $Cr(t)$), либо с повышенной разнородностью среды (в случае прямой корреляции). Отмечается периодический характер временного изменения параметра $K_{кор}$ в глобальном масштабе (при его расчёте с фиксированным размером скользящего по времени ряда), возможно, связанный с периодическими флуктуациями скорости вращения Земли.

Ключевые слова: среднеглубинная сейсмичность, механизм очага, крипекс, корреляция графиков параметров сейсмичности, глобальная тектоника.

Для цитирования: Михеева А.В. Распределение параметра крипекс-магнитудной корреляции для сейсмичности больших глубин в контексте глобальной тектоники // Российский сейсмологический журнал. — 2024. — Т. 6, № 4. — С. 53–64. — DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2024.4.04>. — EDN: ZZRHDP

Введение

В работах автора было показано успешное применение крипекс-анализа сейсмичности в задачах сейсмогеодинамического исследования областей подготовки сильнейших событий (с $M_s \geq 7$):

1 — по изменению величины крипекса в области очага [Михеева, Калинин, 2021] или в сопутствующих роях [Mikheeva, 2021], характеризующему динамику соотношения хрупкого разрушения и мягкого проскальзывания в очаге;

2 — по корреляции графиков изменения крипекса $Cr(t)$ и магнитуды $M_s(t)$, а также крипекса

$Cr(t)$ и глубины $H(t)$ [Михеева, 2023], характеризующей организованное состояние геофизической среды или её повышенную разнородность в окрестности очага;

3 — по закономерностям изменения параметра $K_{кор}$ — коэффициента парной корреляции крипекса $Cr(t)$ с магнитудой $M_s(t)$ (по скользящему во времени набору событий средних и больших глубин — $H \geq 50$ км), интерпретируя их с точки зрения влияния на процессы подготовки очага со стороны региональных [Михеева, Калинин, 2023] или глобальных глубинных процессов [Mikheeva, 2023].

В частности, по данным английского каталога ISC (со ссылкой на IDC – International Data Centre, Vienna, Austria) [International ..., 2023] за несколько дней до январских индонезийских событий 8–9 января 2023 г. ($M_s=7.0$; 7.6) были обнаружены устойчивые корреляционные аномалии в региональном [Михеева, Калинин, 2023] и глобальном [Mikheeva, 2023] масштабах. Цель настоящей работы – выяснить, насколько типичным и закономерным является наличие подобных аномалий для этих и других крупнейших событий мирового сейсмогеодинамического процесса по данным из другого источника.

Следует отметить, что в момент перехода к глобальному уровню исследования выявились случаи ретроспективного массового пересчёта агентствами одной или обеих магнитуд землетрясений глобального каталога, а также проблема ограниченного количества в открытом доступе других каталогов, содержащих парные определения магнитуд (например, M_s и m_b). Это лишает достоверности выводы крипекс-анализа, полученные по предыдущим (до пересчёта) версиям каталогов, особенно если отсутствует возможность сопоставления их с данными из других источников. По этой причине в качестве независимого источника данных было решено использовать Гарвардский глобальный каталог CMT [Global ..., 2024].

Расчёты, выполненные по новым данным, позволили подтвердить и расширить сделанные ранее выводы о существовании «ключевых» сейсмических событий, сопровождающихся на порядок более продолжительными аномалиями параметра $K_{\text{КОР}}$ и отмечающих собой изменение в поведении глобального графика $K_{\text{КОР}}(t)$ [Mikheeva, 2023]. Новый глобальный график рассматриваемого параметра выявил дополнительные закономерности, в частности, периодический характер изменения своего усредняющего тренда.

Фактический материал и методы исследования

Параметр крипекс (creep & explosion) Cr , определяющийся в классическом случае разностью поверхностной M_s и объёмной m_b магнитуд (в частности, в наиболее раннем варианте: $Cr_0=M_s-m_b$ [Прозоров, Хадсон, 1974]), показывает относительный вклад «мягкой» (крип) и «жесткой» (эксплозия) подвижек в общий процесс очагового излучения. Этот параметр отражает такие аспекты сейсмогеодинамического режима, как связь характеристик очага с общей тектонической обстановкой, долю вязкого скольже-

ния при образовании сейсмогенерирующего разлома [Прозоров, Хадсон, 1974; Kaverina et al., 1996], специфические свойства очаговой зоны [Boldyrev, Levina, 2008] и т.д. Для расчёта относительного крипекса Cr_0^{cat} (т.е. Cr_0 , приведённого к линейному тренду зависимости $Cr_0(M_s)$ каталога-источника cat [Неверова, 2009]) в программную систему анализа сейсмических данных GIS-ENDDB [Михеева, Калинин, 2021] добавлен соответствующий алгоритм.

Фактическим материалом исследований, проводимых автором в 2021–2023 гг., при расчёте крипекса и корреляционном анализе являлись выборки различных глобальных каталогов. Выбирались записи, содержащие определения парных магнитуд землетрясений одного и того же агентства (в частности, M_s и m_b). Например, в работе [Mikheeva, 2023] были использованы два каталога: по август 2017 г. – каталог CSN [Каталог ..., 2024], а с сентября 2017 г. по текущий день – каталог ISC. Отметим, что после того, как в ноябре 2023 г. составители оригинального каталога IDC массово пересчитали значения M_s , можно говорить о двух вариантах (редакциях) каталога ISC – до и после пересчёта магнитуд.

В настоящей работе полученные в [Mikheeva, 2023] результаты исследования по глобальной выборке землетрясений с $H \geq 50$ км (из описанного выше сборного каталога по двум источникам) апробируются с помощью Гарвардского глобального каталога CMT. В открытом доступе CMT-каталог также существует в двух, несколько отличающихся редакциях: 1 – в виде единого файла за 1976–2020 гг.; 2 – в виде поисковой информационной системы, позволяющей выводить данные запросов постранично по настоящее время. Поскольку магнитуды m_b приводятся в этом каталоге лишь до 25 сентября 2013 г., было решено использовать пары магнитуд: поверхностной M_s и моментной M_w , вычисляемой по формуле Канамори [Kanamori, 1977]. Полученная модификация крипекса $Cr_w=M_s-M_w$ имеет ясный физический смысл оценки степени обогащения разрыва в очаге сейсмической энергией E_s на единицу момента [Татевосян, 2016], т.е. как и классический крипекс, отражает соотношение между «криповой» и «взрывной» компонентами движения в очаге (точнее, между медленным и быстрым движением) [Прозоров, Хадсон, 1974].

В этой связи имело решающее значение наличие линейной зависимости $Cr_w=M_s-M_w$ от M_s (с достоверностью аппроксимации $R^2=0.4243$ по каталогу CMT) (рис. 1а), аналогичной традиционно используемой для расчёта

крипекса зависимости $Cr_0 = M_s - m_b$ от M_s ($R^2 = 0.5569$ по CMT и $R^2 = 0.551$ по сборному каталогу CSN+ISC). Этот факт позволяет использовать пару M_s и M_w в расчёте крипекса на основе описанного выше приведения разности $M_s - M_w$ к линейному тренду зависимости $Cr_w(M_s)$. Отметим, что для разности магнитуд $M_w - m_b$, например, линейная зависимость от M_w отсутствует ($R^2 = 0.0017$ по данным CMT).

Таким образом, с учётом эмпирического выражения для линейной аппроксимирующей функции $Cr_w(M_s)$ (рис. 1а) расчёт крипекса производится здесь по следующей формуле:

$$Cr_w^{CMT} = M_s - M_w - 0.2934 \cdot M_s - 1.8061.$$

На данном примере можно сделать общий вывод, что по свойству линейной зависимости крипекса от уменьшаемой магнитуды в исследуемой паре, а также по относительно высокой достоверности аппроксимации R^2 усредняющего тренда полученного облака точек (с желательным значением: $R^2 \geq 0.4$) можно сравнивать качество исходных данных различных каталогов и осуществлять выбор каталога и исследуемой пары магнитуд.

Очевидно, что полнота различных каталогов существенно различается (таблица) и определя-

ется как представительностью каталога по магнитуде, так и временем его охвата. Для наших задач более важной характеристикой является время охвата. Сравнение же каталогов ISC и CMT по представительности говорит об их идентичности при $M_s \geq 4.5$ (рис. 1б).

Для оценки синхронного поведения во времени параметров Cr_w^{CMT} и M_s по выборке $H \geq 50$ км используется описанный в [Мухеева, 2023] подход на основе расчёта парной корреляции их временных рядов. В исследовании применяются два метода расчёта коэффициента корреляции $K_{кор}$:

Метод 1 — с фиксированным размером N скользящего во времени набора событий;

Метод 2 — с одним краем окна расчёта $K_{кор}$ скользящим, а другим — фиксированным на нулевой отметке времени, соответствующей моменту t_0 изучаемого сильнейшего толчка (например, 9 января 2023 г.).

Алгоритм Метода 2 подробно описан в [Мухеева, 2023]. В нём размер $N(t)$ ряда событий для расчёта $K_{кор}$ уменьшается по мере приближения к моменту главного события t_0 ($N(t_0) = 1$).

В алгоритме Метода 1 расчёта $K_{кор}$ размер рассматриваемой последовательности событий N постоянен (является изначально задаваемым параметром) и каждой точке ряда присваивается

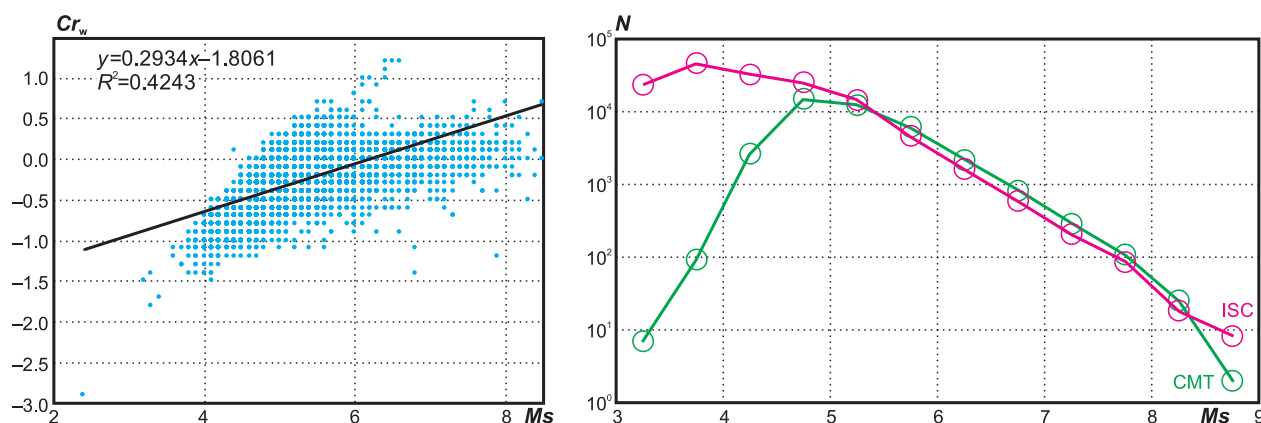


Рис. 1. График зависимости крипекса $Cr_w = M_s - M_w$ от магнитуды M_s по каталогу CMT (а), и графики повторяемости землетрясений по каталогам ISC и CMT (б)

Таблица. Сводка используемых выборок глобальных каталогов с парными определениями магнитуд

Каталог	Период охвата	Записей всего	Записей с $H \geq 50$
CSN	26.02.1999–31.08.2017	58931	8938
ISC с данными IDC 1-й редакции	–01.09.2017–07.11.2023	96785	15738
ISC с данными IDC 2-й редакции	26.02.2000–05.12.2023 ⁺	310403	52633
CMT 1-й редакции	01.01.1976–31.12.2020	56833	5241
CMT 2-й редакции	–01.01.2021–29.07.2024 ⁺	8976	1709

Примечание: «–», «+» — открытые для соответствующих каталогов даты в прямом и обратном хронологическом направлении.

значение коэффициента корреляции, рассчитанное по общему количеству N предшествующих и последующих по отношению к этой центральной точке событий. В работе показаны результаты для размера скользящего ряда $N=50$ точек (рис. 2, 3в, 4). Для глобальной выборки зем-

трясений с $H \geq 50$ км из каталога СМТ 2-й редакции (ввиду их относительно небольшого количества) 50 точек соответствуют периоду времени в несколько десятков дней, а для землетрясений всех глубин — несколько дней (что зависит от временной частоты событий, попавших в выборку).

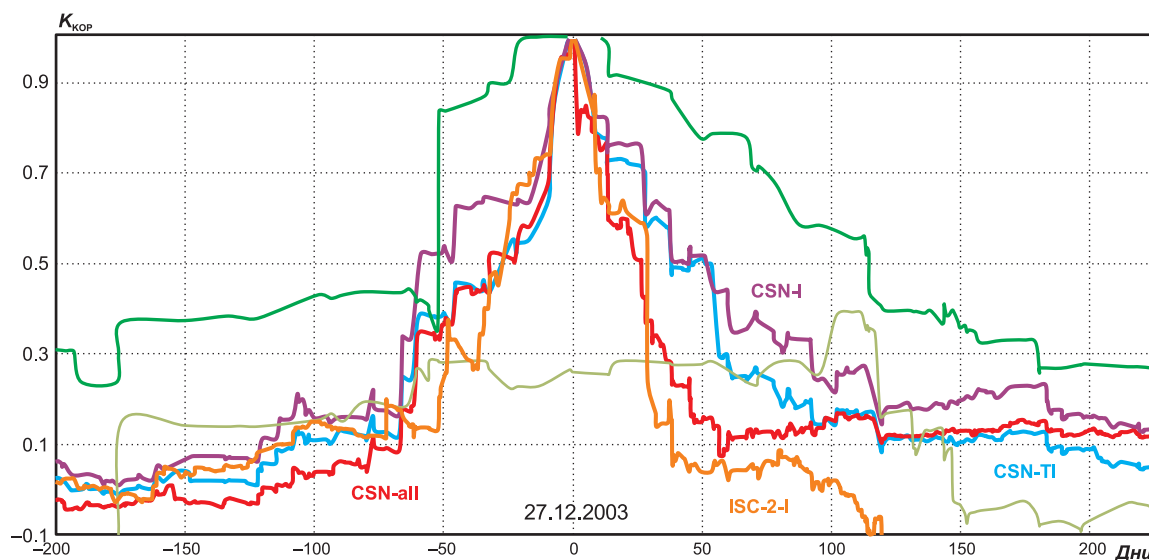


Рис. 2. Графики изменения крипекс-магнитудной корреляции $K_{\text{КОР}}$ (Метод расчёта 2: с одним фиксированным краем) для землетрясений с $H \geq 50$ км за 200 дней до Ново-Каледонского землетрясения, $M_s=7$, 27 декабря 2003 г. (нулевая отметка времени) и 250 дней после него по разномасштабным выборкам различных каталогов.

ISC-EH-local (зелёный цвет) — в 1000-километровой окрестности землетрясения по данным ISC 2-й редакции; CSN-I (фиолетовый) — в окрестности Индонезийского сейсмогенерирующего регионального глубинного разлома [Mikheeva, 2023] по данным CSN-каталога; ISC-EH-I (оранжевый) — в окрестности Индонезийского разлома по данным ISC 2-й редакции; CSN-TI (синий) — в окрестности расширенного Индонезийского трансрегионального разлома [Mikheeva, 2023]; CSN-all (красный) — по всей глобальной сейсмичности каталога CSN. Тёмно-зелёным цветом показана более сглаженная аномалия глобального масштаба, полученная Методом 1: с фиксированным размером скользящего по времени ряда ($N=50$)

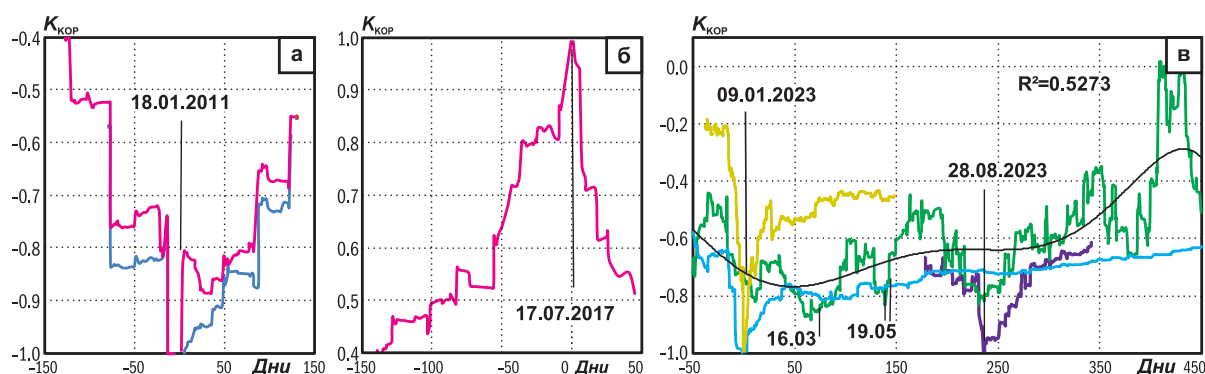


Рис. 3. Графики изменения крипекс-магнитудной корреляции $K_{\text{КОР}}$ (Метод 2) глобальной сейсмичности с $H \geq 50$ км по каталогу СМТ 1-й редакции (красный цвет) и 2-й редакции (синий цвет).

На нулевой отметке времени — землетрясение: а — 18 января 2011 г. с $M_s=7.0$, 7.0; б — 17 июля 2017 г. с $M_s=7.9$ (каталог CSN); в — 8–9 января 2023 г. с $M_s=7.0$, 7.6. Остальные цвета — графики по данным каталога СМТ 2-й редакции: жёлтый — для всего диапазона глубин; фиолетовый — рассчитанный Методом 2 относительно события 28 августа 2023 г. ($M_s=7.2$, $H=521$ км); темно-зелёный — рассчитанный Методом 1 ($N=50$) с полиномиальным трендом 6-го порядка ($R^2=0.5273$), вертикальными линиями отмечены проявленные его минимумами события Индонезийской серии (16 марта 2023 г. с $M_s=7.0$, 19–20 мая 2023 г. с $M_s=7.2$ –8.7, 27 мая 2023 г. с $M_s=7.8$ и 28 августа 2023 г. с $M_s=7.2$)

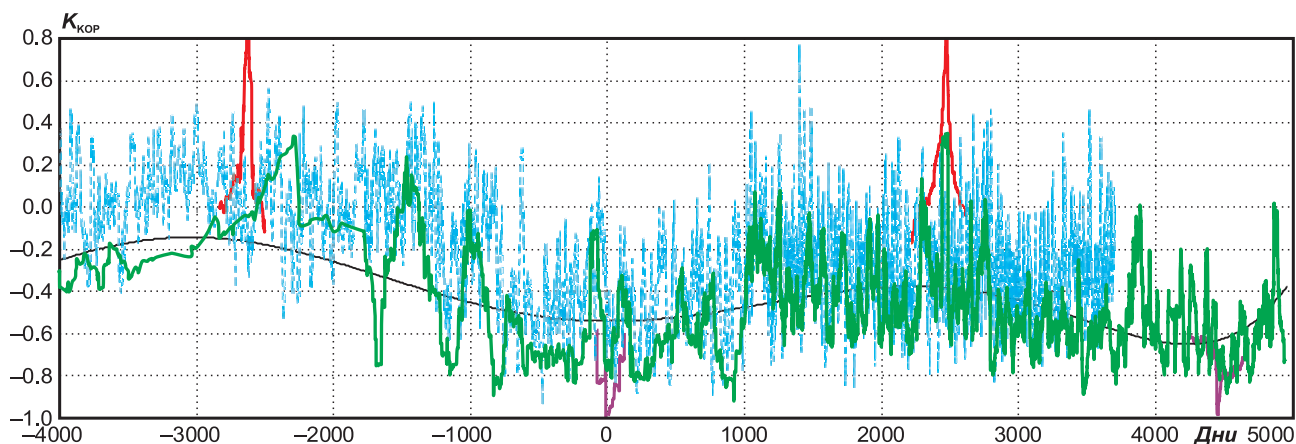


Рис. 4. График изменения крипекс-магнитудной корреляции $K_{\text{кор}}$ (Метод 1: $N=50$) для землетрясений с $H \geq 50$ км каталога СМТ за 26 июля 1976 г. – 29 июля 2024 г.

За нулевую отметку времени принято Пакистанское двойное землетрясение 18 января 2011 г. ($M_s=7.0$; 7.0). Чёрной линией показан усредняющий полиномиальный тренд (6-го порядка). Пики красного и фиолетового цвета соответствуют приведённым на рис. 2, 3 аномалиям (Метод 2) по событиям 2003, 2011, 2017 и 2023 гг. Пунктирной линией синего цвета показан график $K_{\text{кор}}$ (Метод 1, $N=50$) для землетрясений всего диапазона глубин (каталог СМТ 1-й редакции)

Распределение параметра $K_{\text{кор}}$ для сейсмичности с $H \geq 50$ км в период подготовки и релаксации «ключевых» землетрясений

При рассмотрении изменения корреляционного параметра $K_{\text{кор}}$ по землетрясениям с $H \geq 50$ км в глобальном масштабе были выявлены положительные и отрицательные аномалии, сопутствующие сильнейшим землетрясениям мира с $M_s \geq 8.0$ [Mikheeva, 2023]. Если они обусловлены свойствами геофизической среды, то можно говорить: 1 – в случае отрицательных аномалий – о равномерной консолидации среды вдоль глобальных сейсмических поясов; 2 – в случае положительных аномалий – о разуплотнении среды или о повышенной её разнородности. Последнее имеет место, например, когда процессы хрупкого разрушения блоков пододвигающейся коры соседствуют с процессами поступления глубинного мантийного материала.

Более того, были выделены так называемые ключевые землетрясения [Mikheeva, 2023], которые сопровождаются на порядок более продолжительными аномалиями $K_{\text{кор}}$ и отмечают собой последующее скачкообразное изменение в поведении графика [Mikheeva, 2023] или, как показано далее, особые точки его усредняющего тренда (рис. 3в, 4). Учитывая глобальный масштаб выборки землетрясений, объяснением изменений сейсмогеодинамического режима, выраженного аномалиями рассматри-

ваемого параметра, может быть предположение о некоторой планетарной их причине (например, связанной с наиболее ощутимыми периодическими флуктуациями скорости вращения Земли, отмечаемыми астрономическими наблюдениями через промежутки времени от 2 до 30 лет [Stephenson et al., 2016]). Речь шла о трёх «ключевых» событиях [Mikheeva, 2023]. Это два события, характеризующиеся отрицательными аномалиями: парное землетрясение в Пакистане 18 января 2011 г. ($M_s=7.0$, 7.0), всего на 1.5 месяца предвещающее мегаземлетрясение Тохоку (11 марта 2011 г.), и пара Индонезийских землетрясений 8–9 января 2023 г. ($M_s=7.0$, 7.6). Интервал между «ключевыми» землетрясениями составляет ~12 лет. Возможно, они отражают процесс консолидации среды, вызванный периодическими эпизодами геотектонического сжатия новейшего времени вследствие более интенсивного замедления вращения Земли [Mikheeva, 2023]. В центре промежутка между этими событиями выделяется крупное Алеутское землетрясение 17 июля 2017 г. ($M_s=7.9$) с противоположными характеристиками (крупной положительной аномалией $K_{\text{кор}}$, характеризующей повышенную неоднородность сейсмогенерирующей среды), что не исключает его предположительную связь с эпизодом относительного ускорения вращения Земли [Mikheeva, 2023] и/или активизацией глубинного магматизма.

Во 2-й редакции каталога ISC аномалия 2017 г. оказалась по амплитуде в 3 раза слабее, а по времени – в 6 раз менее длительной по сравнению

с показанной в [Mikheeva, 2023], практически не выделяясь на фоне аномалий других сильных землетрясений мира. Однако в обеих редакциях каталога ISC сохранилась крупнейшая положительная аномалия, соответствующая землетрясению 27 декабря 2003 г. ($M_s=7.0$, $H=14$ км, Новая Каледония) (рис. 2). Она заметна и на общемировом графике $K_{\text{кор}}$, показанном в [Mikheeva, 2023] по данным каталога CSN.

Рис. 2 демонстрирует, что, аналогично другим трём выявленным «ключевым» аномалиям (в частности, аналогично отдельно показанной в работах [Михеева, Калинин, 2023; Mikheeva, 2023] аномалии, сопровождающей Индонезийское событие 9 января 2023 г.), длительность аномалии 27 декабря 2003 г. увеличивается при уменьшении масштаба охватываемой выборкой географической области: от глобальных сейсмических поясов до очаговой зоны главного толчка. Значение корреляции, превышающее уровень $|K_{\text{кор}}|=0.7$, сохраняется здесь (рис. 2):

1 — для выборки по всей мировой сейсмичности — начиная с 15 дней до главного толчка и продолжаясь в течение 26 дней;

2 — в масштабе, ограниченном Индонезийским регионом — продолжаясь в течение 40 дней;

3 — в 1000-километровой области очага 27 декабря 2003 г. — начинаясь за 52 дня до толчка и продолжаясь в течение 124 дней.

При этом для других (не ключевых) событий с $M_s \geq 7.0$ глобальных каталогов аномалии $K_{\text{кор}}$ либо отсутствуют, либо имеют длительность от 1 до 3 дней (в редких случаях достигая в локальных областях очагов 5–10 дней).

Таким образом, можно говорить о четырёх уникальных событиях мировой сейсмичности с $H \geq 50$ км, имеющих особенно протяжённые аномалии $K_{\text{кор}}$ (Метод 2) по данным хотя бы одного из трёх рассмотренных каталогов и их редакций. Поскольку для событий рассматриваемой выборки в целом характерны заниженные значения крипекс-магнитудной корреляции (рис. 4), примем в качестве аномальных амплитудные уровни $|K_{\text{кор}}| \geq 0.7$ для отрицательных аномалий и $K_{\text{кор}} \geq 0.4$ для положительных. Тогда протяжённость $K_{\text{кор}}$ -аномалий по глобальной сейсмичности $H \geq 50$ км составляет:

— 75 дней для землетрясения 27 декабря 2003 г. по данным как CSN, так и 2-й редакции каталога ISC (рис. 2);

— 190 дней для землетрясения 18 января 2011 г. — CSN, CMT (рис. 3а);

— 185 дней для землетрясения 17 июля 2017 г. — CSN (рис. 3б);

— 321 день для землетрясений 8–9 января 2023 г. — по CMT (или 63 и 27 дней по ISC 1-й и 2-й редакции, соответственно) (рис. 3в).

Для индонезийских событий 8–9 января 2023 г. рассчитанная Методом 2 аномалия начинается за 15 дней до толчков и возвращается к уровню $|K_{\text{кор}}| < 0.7$ лишь на 306-й день после главных толчков (рис. 3в), сопровождая уникальную, линейно вытянутую в пространстве серию из 12 событий с $M_s \geq 7.0$ Индонезийского региона [Михеева, Калинин, 2023]. Для сравнения, по сейсмичности полного диапазона глубин аномалия длится только 13.5 дней (жёлтая линия на рис. 3в). Отрицательная аномалия корреляционного графика, рассчитанного Методом 1 (при $N=50$), возвращается к уровню $|K_{\text{кор}}| \leq 0.4$ лишь в декабре 2023 г. (показан на рис. 3в зелёным цветом), т.е. через ~378 дней после главного события. При этом усредняющий тренд этого графика показывает протяжённый минимум в области упомянутой полугодовой серии (рис. 3в). Наиболее выраженные (с амплитудой $|K_{\text{кор}}| \geq 0.8$) минимумы графика соответствуют январским, мартовскому и майским событиям (8–9 января 2023 г., 16 марта 2023 г., 19 мая 2023 г. и 27 мая 2023 г.) рассматриваемой серии (рис. 3в) и последующему глубокому (также индонезийскому) августовскому событию (28 августа 2023 г., $M_s=7.2$, $H=521$ км). При этом последнее событие также сопровождается крупной отрицательной аномалией, рассчитанной Методом 2 (показана фиолетовым цветом на рис. 3в), аналогичной по форме и продолжительности начальным событиям серии. Это может говорить и о его значимости в описываемых сейсмогеодинамических процессах.

Мировая динамика изменения параметра $K_{\text{кор}}$ по каталогу CMT в целом представлена в виде графика, рассчитанного Методом 1 ($N=50$ точек) для всего диапазона глубин и для событий средних и больших глубин (соответственно, синий и зелёный цвет на рис. 4). Второй практически на всём своём протяжении располагается в области отрицательных значений крипекса, что, по-видимому, характерно для событий с $H \geq 50$ км. Ключевые события нанесены в соответствующем масштабе по данным рис. 2 и 3 красным (положительные аномалии) и фиолетовым цветом (отрицательные аномалии). Они приходятся на области максимумов и минимумов тренда мирового графика, что подтверждает правильность выводов об их соответствии некоторым переломным периодам глобального сейсмогеодинамического процесса.

Дискуссия

Ранее в работе [Михеева, Калинин, 2023] отмечалось, что два недавних, близких по времени сильных землетрясения Индонезии (8–9 января 2023 г.) оказались приурочены к региональному «Индонезийскому» сейсмолинеamentу, выявленному по распределению сейсмичности в геоинформационной системе GIS-ENDDB [Михеева, Дядьков, 2014] методом «Большого круга Земли» (описанным в [Kalinnikov, Mikheeva, 2017]). Затем вдоль «Индонезийского» линеамента на основе оценки соотношения изменений во времени крипекс-параметра [Mikheeva, Kalinnikov, 2021] с изменением магнитуды событий больших глубин ($H \geq 50$ км) было показано наличие признаков влияния этой глобальной глубинной геотектонической структуры на подготовку серии сильнейших индонезийских землетрясений первого полугодия 2023 года. Такое влияние подтвердилось фактом, что вся мировая сейсмическая активность по событиям с $M_s \geq 7$ этого полугодия (кроме мультитектонического землетрясения Турции) сосредоточилась вдоль «Индонезийского» линеамента [Михеева, Калинин, 2023].

Алгоритмом GIS-ENDDB выявляется также более протяжённый вариант «Индонезийского» сейсмолинеамента Большого круга, охватывающий в пределах своей доверительной полосы не только упомянутую индонезийскую серию, но и Турецкое мультитектоническое землетрясение 6 февраля 2023 г. ($M_w = 7.8, 7.7$) [Михеева, Калинин, 2023].

На рис. 5 расширенный Индонезийский сейсмолинеament, а также ранее выявленный Афро-Байкальский сейсмолинеament диагональной, по отношению к «основным кругам», направленности [Kalinnikov, Mikheeva, 2017] показаны белым цветом на фоне этих двух «основных Больших кругов» Земли (I и II), обозначенных сиреневым цветом. Термин «основные круги» введён [Mikheeva, 2023] для выявляемых алгоритмом GIS-ENDDB двух строго ортогональных друг другу больших кругов Земли, 3000-километровые доверительные интервалы которых охватывают 100% всех землетрясений земного шара с $M_s \geq 7.5$ инструментального периода сейсмических наблюдений. Не исключено, что эти «сейсмические пояса» отражают современные проявления тектонической активности, связанной с вращением Земли.

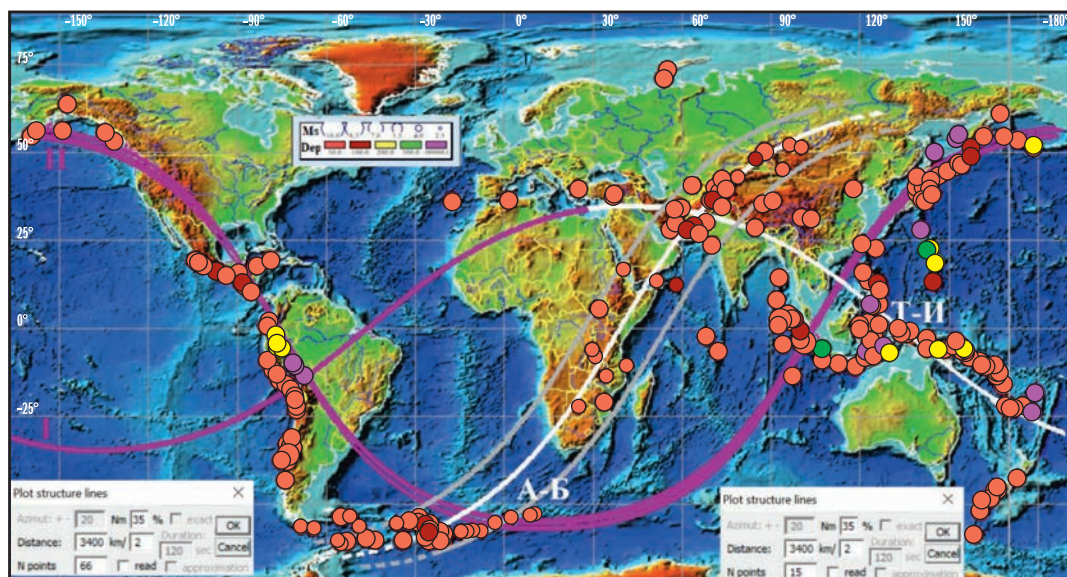


Рис. 5. Построенные в среде GIS-ENDDB Афро-Байкальский (А-Б) и Турецко-Индонезийский (Т-И) сейсмолинеamentы (белый цвет) на фоне двух «основных кругов» Земли (сиреневый цвет).

Для А-Б-линеамента показан доверительный интервал шириной ~2500 км (серый цвет).

Выведены землетрясения каталога NEIC по всему миру с $M_s \geq 7.5$ за 1973–2023 гг. (219 событий) [National ..., 2024] и землетрясения с $M_s \geq 6.5$ в доверительной полосе А-Б-линеамента.

На врезках внизу – параметры алгоритма БК выявления «основных кругов» (слева) и А-Б-линеамента (справа): Distance – максимально возможное расстояние между парами базовых хронологически последовательных сильнейших землетрясений БК, а также минимально возможное расстояние, обычно равное первому числу, делённому пополам; N points – минимальное для обеспечения представительности выборки число событий, отстоящих от плоскости БК не далее Nm (в % к Distance). На врезке сверху – легенда шкал визуализации землетрясений (размер кружка – магнитуда, цвет – глубина в км)

Возможность влияния изменений скорости вращения Земли на её тектоническую активность (землетрясения, извержения вулканов, цунами) может быть обусловлена, например, воздействием этих флуктуаций на крупномасштабные движения в жидком ядре Земли (вязком сферическом слое), по расчётам [Krivonosova et al., 2023] вызывающем «более высокое относительное усиление меридиональной кинетической энергии по сравнению с азимутальной составляющей». Кроме того, согласно теоретическим расчётам [Пухляков, 1970], сокращение скорости вращения Земли (вследствие приливного трения), наиболее интенсивно начавшееся в конце среднего эоцена и фиксируемое в настоящее время астрономическими наблюдениями [Рыбкин, 2019], должно приводить к возникновению напряжений сжатия, параллельных экватору, и за счёт них — к повсеместному формированию взбросовых дислокаций субмеридионального простирания (ими могут быть новейшие складкообразовательные движения и эпизоды субдукции в Кордильерах, на Андаманских островах, Суматре, Сулавеси, Соломоновых и Ново-Гэбридских островах, Филиппинах и Марианских островах, Тайване, Рюкю, Японии, Курильских островах и Камчатке, охватываемые «основным кругом II»), а ближе к экваториальной зоне — к формированию дислокаций субширотного простирания [Bohm, 1910] (например, в охватываемых «основным кругом I» молодых складчатых сооружениях Южной Европы и Северной Африки, Большого Кавказского хребта, Копетдага, Гималаев, а также в активизациях зон Заварицкого-Беньоффа островов Ява, Новая Гвинея и Самоа).

Заметим, что, хотя точки пересечения «основных кругов» находятся на ~1600 км севернее современного экватора в восточном полушарии и на столько же южнее — в западном, из палеомагнитных данных известно, что в олигоцене во время наиболее интенсивного сокращения скорости вращения (когда формировались Альпы, Кавказ, Атлас и т.д.) «экватор располагался именно там, где в настоящее время возвышаются эти горные сооружения» [Пухляков, 1970; Storetvedt, 1999].

Отметим также, что согласно [Storetvedt, 1999], каледонский складчатый пояс в момент своего образования (400–500 млн лет назад) также совпадал с экваториальной зоной того периода. Таким образом, располагающийся под углом ~50° к «основному кругу I» Афро-Байкальский сейсмолинеament, выявляемый алгоритмом «Большого круга» по значительно более сла-

бым событиям ($M_s \leq 6.5$) в сравнении с «основными кругами» (т.е. являющийся геотектонической структурой меньшего ранга), может также отражать один из периодов тектонического развития Земли. Он практически совпадает с «большой диагональю» Л.М. Расцветаева (а точнее, с его «Белуджистан-Сибирской трансконтинентальной сдвиговой зоной») [Расцветаев, 1987], а также с глобальным «Африкано-Чукотским» линеamentом диагонального простирания А.И. Полетаева [Полетаев, 2013].

В настоящей работе показано, что глобальная сейсмичность с $H \geq 50$ км не только имеет приуроченность к основным сейсмическим поясам Земли субширотного и субмеридионального простирания, заложенным в эоценовое время, но и характеризуется периодической динамикой корреляционного параметра (рис. 4). Эти факты можно объяснить режимом изменения скорости вращения Земли: наиболее интенсивным её замедлением в эоценовом периоде и, на фоне этого продолжающегося замедления, периодическими флуктуациями через «промежутки времени от 10 до 30 и более лет» [Пухляков, 1970].

Заключение

В настоящей работе показаны возможности исследования динамики крипекс-магнитудной корреляции $K_{\text{кор}}(t)$ (корреляции рядов магнитуды $M_s(t)$ и крипекса $Cr(t)$) по глобальной средне- и глубокофокусной ($H \geq 50$ км) сейсмичности, простирающейся вдоль двух ортогональных друг другу основных сейсмических поясов Земли. Эти пояса, охватывающие 100% всех землетрясений земного шара с $M_s \geq 7.5$, были выявлены сейсмолинеamentным алгоритмом GIS-ENDDB [Mikheeva, 2023].

Графики $K_{\text{кор}}$, рассчитанные по данным СМТ-каталога, демонстрируют, что наиболее протяжёнными аномалиями $K_{\text{кор}}$ отмечаются четыре землетрясения с приблизительно одинаковыми временными интервалами между ними.

Это два землетрясения: Новокаледонское 27 декабря 2003 г. ($M_s = 7.0$) и Алеутское 17 июля 2017 г. ($M_s = 7.9$), соответствующие положительным аномалиям (начинающимся за 190 и 185 дней до главного толчка соответственно) и максимуму растущего до этого тренда, начавшего убывать после этих событий. Подобные проявления можно связать с эндогенными процессами, повышающими разнородность среды и/или её относительную температуру (например, в результате поступления глубинного магнийного материала, связанного с эпизодами

геотектонического растяжения новейшего времени). А это, в свою очередь, закономерно проявляется в установлении прямой корреляции параметров $M_s(t)$ и $Cr(t)$.

В то же время, Пакистанские (18 января 2011 г.) ($M_s=7.0$, 7.0) и Индонезийские (8–9 января 2023 г.) ($M_s=7.0$, 7.7) события, наоборот, отмечаются наибольшими по протяжённости отрицательными аномалиями, начинающимися за 49 и 15 дней до главного толчка соответственно. Поскольку отрицательная аномалия соответствует случаям обратной корреляции $M_s(t)$ и $Cr(t)$ (когда более сильные землетрясения характеризуются меньшим крипексом, т.е. большим вкладом хрупких разрушений), логично связать эти два события с консолидацией среды вдоль глобальных сейсмических поясов (или процессами роста напряжений в них). В свою очередь, такие явления, простирающиеся в двух взаимно перпендикулярных направлениях, могут быть связаны с эпизодами наиболее интенсивного геотектонического сжатия новейшего времени.

Приведённые результаты анализа по новым данным СМТ-каталога подтверждают справедливость более ранних выводов, сделанных на основе исследования классического параметра крипекс $Cr_0=M_s-m_b$ по данным каталога IDC 1-й редакции [Mikhееva, 2023]. Необходимость проверки (и дополнения) этих выводов возникла в связи с наблюдаемыми случаями массовых ретроспективных пересчётов значений M_s каталога ISC-IDC. А отсутствие достаточной представительности парных определений M_s и m_b заставило вовлечь в крипекс-анализ другие пары магнитуд, в частности, поверхностную и моментную магнитуды M_s и M_w (имеющиеся в каталоге СМТ).

Возможность подтверждения выводов крипекс-анализа данными других каталогов (в т.ч. с привлечением других пар магнитуд), обязательность массовых определений магнитуд M_s и m_b (M_s и M_w , или M_s , m_b и M_w) от одного и того же агентства и их большая надёжность повысили бы достоверность результатов ретроспективного крипекс-анализа динамических процессов в очаге. А охват каталогами периода времени по настоящее время позволил бы оценить возможность использовать свойство синхронности изменения параметров сейсмичности с $H \geq 50$ км накануне сильнейших событий также для прогноза этих землетрясений.

Работа выполнена в рамках госзадания ИВМиМГ СО РАН № 0251-2021-0004.

Литература

- Каталог землетрясений сети станций Китая // Национальный центр данных о землетрясениях [сайт]. — URL: <https://data.earthquake.cn/gcywfl/index.html> (дата обращения 09.08.2024). (In Chinese).
- 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., Дядьков П.Г. Структурные элементы сейсмичности, выявляемые с помощью цифровых моделей ГИС ENDDDB // Новые технологии обработки и использования данных дистанционного зондирования Земли в геологоразведочных работах и при ведении мониторинга опасных геологических процессов: Материалы Второй Международной конференции (г. Санкт-Петербург, 22–24 апреля 2014 г.). — СПб.: ФГУП «ВСЕГЕИ», 2014. — С. 123–127.
- 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: 10.35540/2686-7907.2021.4.01. — EDN: HCYJIL
- Михеева А.В., Калинин И.И. О влиянии предполагаемого глубинного разлома на сильные землетрясения Индонезии // Российский сейсмологический журнал. — 2023. — Т. 5, № 4. — С. 52–64. — DOI: 0.35540/2686-7907.2023.4.04. — EDN: XOVVHA
- 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: SWDUPV
- Полетаев А.И. Схема современных вращательных движений блоков земной коры восточного полушария Земли // Актуальные проблемы региональной геологии и геодинамики: 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 MLN 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.
- Пухляков Л.А. Обзор геотектонических гипотез. — Томск: Изд-во Томского университета, 1970. — 265 с.
- Расцветаев Л.М. Выявление парагенетических семейств тектонических дизъюнктивов как метод палеогеомеханического анализа полей напряжений

и деформаций земной коры // Поля напряжений и деформаций в земной коре. — М.: Наука, 1987. — С. 171–181.

Рыбкин В.В. Теория замедления вращения Земли на основе данных геологии, геофизики и астрономии // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. — 2019. — № 11. — С. 110–125. — DOI: 10.17513/mjpf.12942. — EDN: TSLDBO

Татевосян Р.Э. О статье Г.Г. Кочарян, Г.Н. Иванченко, С.Б. Кишкина «Энергия, излучаемая сейсмическими событиями различного масштаба и генезиса» // Физика Земли. — 2016. — № 4. — С. 157–159. — DOI: 10.7868/S0002333716040104. — EDN: WALRNV

Bohm A. Abplattung und Gebirgsbildung. — Leipzig und Wien, 1910. (In German).

Boldyrev S.A., Levina V.I. Creepex of Kamchatka shallow earthquakes // Izvestiya. Physics of the Solid Earth. — 2008. — V. 44, N 3. — P. 209–225. — DOI: 10.1007/s11486-008-3004-8. — EDN: LLBSDF

Global CMT Catalog // Global CMT Web Page [Site]. — Lamont-Doherty Earth Observatory (LDEO) of Columbia University, Columbia, SC, USA, 2023. — URL: <http://www.globalcmt.org>

International Seismological Centre (ISC) // On-line Bulletin [Site]. — United Kingdom, Thatcham: Internat. Seismol. Centre, 2024. — DOI: 10.31905/D808B830

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

Kanamori H. The energy release in great earthquakes // Journal of Geophysical Research. — 1977. — V. 82, Is. 20. — P. 2981–2987. — DOI: 10.1029/jb082i020p02981

Kaverina A.N., Lander A.V., Prozorov A.G. Global creepex distribution and its relation to earthquake-source geometry and tectonic origin // Geo-

physical Journal International. — 1996. — V. 125, N 1. — P. 249–265. — DOI: 10.1111/j.1365-246X.1996.tb06549.x. — EDN: LDMVED

Krivososova O., Gritsevich M., Zhilenko D., Read P. Noise induced effects in the axisymmetric spherical Couette flow // Philosophical Transactions of the Royal Society. — 2023. — V. 381, Is. 2246. — P. 17. — DOI: 10.1098/rsta.2022.0124

Mikheeva A.V. The dynamics of parameters of individual earthquake swarm sequences in different geotectonic settings // Bulletin of the Novosibirsk Computing Center. Series: Mathematical Modeling in Geophysics. — 2021. — V. 23. — P. 43–56. — EDN: ZUMPPM

Mikheeva A.V. The development dynamics of the “Afro-Baikal” and the expanded “Indonesian” transregional seismolineaments based on the creepex analysis // Bulletin of the Novosibirsk Computing Center, Series: Mathematical Modeling in Geophysics. — 2023. — V. 25. — P. 35–48. — EDN: YEQWOX

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) / Yu.I. Shokin et al. (Eds.). — Novosibirsk, Russia, 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/> (дата обращения 15.05.2024).

Stephenson F.R., Morrison L.V., Hohenkerk C.Y. Measurement of the Earth's rotation: 720 BC to AD 2015 // Proceedings of the Royal Society A. — 2016. — V. 472, Is. 2196. — P. 1–26. — DOI: 10.1098/rspa.2016.0404

Storetvedt K.M. Global Wrench Tectonics (Replacement Model for Plate Tectonics) // Memoir Geological Society of India. — 1999. — N 43. — P. 521–547.

Сведения об авторе

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.sscs.ru

Distribution of the creepex–magnitude correlation parameter for big–depth seismicity in the context of global tectonics

© 2024 A.V. Mikheeva

ICM&MG RAS, Novosibirsk, Russia

Received August 13, 2024

Abstract In a number of the author’s papers, the successful application of creepex-parameter of seismicity in the problems of geodynamic research of preparation areas of large events by time-changing both the creepex value in the vicinity of their sources and the pair correlation coefficient of creepex $Cr(t)$ and magnitude $M_s(t)$ graphs (the creepex-magnitude correlation K_{COR}) in accompanying earthquakes swarms or during the preparation of a large shock was demonstrated. With the transition to regional and global levels of research on the K_{COR} change, the influence of big-depth seismicity ($H \geq 50$ km), distributed along the regional and global deep faults closest to the focal zone on the processes of source preparation was discovered. In this paper, the dynamics of K_{COR} parameter for the entire period covered by the CMT global catalog along the main Earth’s seismic belts is considered. The “main belts” are the global lineaments detected by the GIS-ENDDB system, in the 10% confidence band of which the 100% of all Globe earthquakes with $M_s \geq 7.5$ are located. In K_{COR} dynamics a pattern of high correlation of $M_s(t)$ and $Cr(t)$ sets was revealed on the eve of several major earthquakes (called “key ones”). This can indicate the creation of a special organized environment state during their preparation, possibly associated with the environment consolidation along the seismic belts (in the case of inverse correlation of $M_s(t)$ and $Cr(t)$), or with increased environmental variability (in the case of direct correlation). The periodic nature of K_{COR} time-change on a global scale is shown (in the case of its calculation with a fixed size of a time-sliding series), possibly associated with periodic fluctuations in the Earth’s rotation speed.

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

For citation Mikheeva, A.V. (2024). [Distribution of the creepex-magnitude correlation parameter for big-depth seismicity in the context of global tectonics]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 6(4), 53–64. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2024.4.04>. EDN: ZZRHDP

References

- Bohm, A. (1910). *Abplattung und Gebirgsbildung* [Flattening and mountain building]. Leipzig und Wien. (In German).
- Boldyrev, S.A., & Levina, V.I. (2008). Creepex of Kamchatka shallow earthquakes. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 44(3), 209–225. DOI: [10.1007/s11486-008-3004-8](https://doi.org/10.1007/s11486-008-3004-8). EDN: LLBSDF
- China Seismological Network. (2024). [CSN Catalog of the Earthquakes]. Retrieved from <https://data.earthquake.cn/gcywfl/index.html>. (In Chinese).
- Global CMT Catalog. (2024). *Global CMT Web Page*. Lamont-Doherty Earth Observatory (LDEO) of Columbia University, Columbia, SC, USA. Retrieved from <http://www.globalcmt.org>
- International Seismological Centre. (2024). *On-line Bulletin*. DOI: [10.31905/D808B830](https://doi.org/10.31905/D808B830)
- 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](https://doi.org/10.21469/22233792.3.1.03). EDN: YPSZHR
- Kanamori, H. (1977). The Energy Release in Great Earthquakes. *Journal of Geophysical Research*, 82(20), 2981–2987. DOI: [10.1029/jb082i020p02981](https://doi.org/10.1029/jb082i020p02981)
- 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](https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1996.tb06549.x). EDN: LDMVED
- Krivososova, O., Gritsevich, M., Zhilenko, D., & Read, P. (2023). Noise induced effects in the axisymmetric spherical Couette flow. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 381(2246), 17. DOI: [10.1098/rsta.2022.0124](https://doi.org/10.1098/rsta.2022.0124)
- Mikheeva, A.V. (2021). The dynamics of parameters of individual earthquake swarm sequences in different geotectonic settings. *Bulletin of the Novosibirsk Computing Center. Series: Mathematical Modeling in Geophysics*, 23, 43–56. EDN: ZUMPPM

- 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. (2023). The development dynamics of the “Afro-Baikal” and the expanded “Indonesian” trans-regional seismolineaments based on the creepex analysis. *Bulletin of the Novosibirsk Computing Center, Series: Mathematical Modeling in Geophysics*, 25, 35-48. EDN: YEQWOX
- Mikheeva, A.V., & Kalinnikov, I.I. (2021). [Creepex-analysis of processes in focal zones of large earthquakes by means of GIS-ENDDB]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 3(4), 7-17. (In Russ.). DOI: 10.35540/2686-7907.2021.4.01. EDN: HCYJIL
- 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
- 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: 10.35540/2686-7907.2023.4.04. EDN: XOVVHA
- Mikheeva, A.V., & Dyadkov, P.G. (2014). [Structural elements of seismicity revealed by digital models of GIS ENDDDB]. In *Novyye tekhnologii obrabotki i ispol'zovaniya dannykh distantsionnogo zondirovaniya Zemli v geologorazvedochnykh rabotakh i pri vedenii monitoringa opasnykh geologicheskikh protsessov: Materialy Vtoroy Mezhdunarodnoy konferentsii. g. Sankt-Peterburg. 22-24 aprelya 2014 g.* [New technologies for processing and using Earth remote sensing data in geological exploration and monitoring of hazardous geological processes: Proceedings of the Second International Conference. St. Petersburg, April 22-24, 2014] (pp. 123-127). St. Petersburg, Russia: FGBU “VSEGEI” Publ. (In Russ.).
- National Earthquake Information Center: Earthquake Hazards (2024). *U.S. Geological Survey*. Retrieved from <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes>
- Neverova, N.P. (2009). [Creepex – characteristic of seismic center]. In *Materialy Chetvertoi Mezhdunarodnoy seismologicheskoy shkoly “Sovremennyye metody obrabotki i interpretatsii seismologicheskikh 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
- Poletaev, A.I. (2013). [Scheme of modern rotational movements of blocks of the Earth’s crust of the Eastern hemisphere of the Earth]. In: *Aktual'nye problemy regional'noi geologii i geodinamiki: XV Gorshkovskie chteniia. Materialy konferentsii, posviashchennoi 104-i godovshchine so dnia rozhdeniia G.P. Gorshkova (1909–1984). Pod red. N.V. Koronovskogo* [Current problems of regional geology and geodynamics: 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 energeticheskaya klassifikatsiya 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.).
- Pukhlyakov, L.A. (1970). *Obzor geotektonicheskikh gipotez* [Review of geotectonic hypotheses]. Tomsk: Tomsk University Press Publ., 265 p. (In Russ.).
- Rastsvetaev, L.M. (1987). [Identification of paragenetic families of tectonic disjunctives as a method of paleogeomechanical analysis of stress and deformation fields of the earth’s crust]. In *Polya napryazheniy i deformatsiy v zemnoy kore* [Stress and deformation fields in the earth’s crust] (pp. 171-181). Moscow, Russia: Nauka Publ. (In Russ.).
- Rybkin, V.V. (2019). [The theory of slowing the Earth’s rotation based on data geology, geophysics and astronomy]. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy* [International Journal of Applied and Fundamental Research], 11, 110-125. (In Russ.). DOI: 10.17513/mjpf.12942. EDN: TSLDBO
- Stephenson, F.R., Morrison, L.V., & Hohenkerk, C.Y. (2016). Measurement of the Earth’s rotation: 720 BC to AD 2015. *Proceedings of the Royal Society A*, 472(2196), 1-26. DOI: 10.1098/rspa.2016.0404
- Storetvedt, K.M. (1999). Global Wrench Tectonics (Replacement Model for Plate Tectonics). *Memoir Geological Society of India*, 43, 521-547.
- Tatevosyan, R.E. (2016). [About the article by G.G. Kocharyan, G.N. Ivanchenko, S.B. Kishkin “Energy emitted by seismic events of various scales and genesis”]. *Fizika Zemli* [Physics of the Solid Earth], 4, 157-159. DOI: 10.7868/S0002333716040104. EDN: WALRNV

Information about author

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