

А. В. Михеева^{1✉}

Об особенностях изменения геодинамической обстановки до и после Алтайского землетрясения

¹Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: anna@omzg.sscs.ru

Аннотация. Рассмотрены особенности изменения во времени напряженно-деформированного состояния среды в очаге и за его пределами для крупнейшего в Алтае-Саянской складчатой области Алтайского землетрясения (АЗ) 27.09.2003 ($M_S=7.2$). Использован сейсмический параметр $K_{кор}$ - коэффициент парной корреляции магнитуды и крипекса для сопутствующей этому событию сейсмичности в области удаленного влияния очага. Установлено наличие отрицательной аномалии графика $K_{кор}(t)$ - до значений $K_{кор} \leq -0.7$ за 31 день до события в области подготовки АЗ, что свидетельствует об установлении режима консолидации среды в преддверие события. Исследуется возможное влияние на подготовку очага со стороны глобальных и региональных глубинных процессов, в том числе, как причины роста консолидации при подготовке сильнейших землетрясений Горного Алтая.

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

A. V. Mikheeva^{1✉}

On the features of change in the geodynamic setting before and after the 2003 Altai earthquake

¹The Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS,
Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: anna@omzg.sscs.ru

Abstract. The time variation features of the environment stress-strain state in the seismic focus and beyond are considered for one of the largest in the Altai-Sayan folded region of the Altai Earthquake (AE) of 27.09.2003 ($M_S=7.2$). The seismic parameter $K_{кор}$ - the coefficient of paired correlation of magnitude and creepex in the accompanying pre- and subsequent seismicity of this event is used. The presence of a negative anomaly in the $K_{кор}(t)$ graph was established - up to values of $K_{кор} \leq -0.7$ 31 days before the event in the area of AE preparation, which indicates the establishment of environment consolidation regime on the eve of this event. The possible influence of regional and global deep processes on the preparation of the earthquake focus is investigated including as the reasons for the increased environment consolidation during the preparation of the strongest earthquakes in the Altai Mountains.

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

Введение

Параметр крипекс [1], рассчитываемый по соотношению поверхностной M_S и объемной m_b магнитуд, содержит информацию о состоянии геофизической

среды как в очаге землетрясения (размером l_0 км), так и в удаленной от него (до расстояния l) зоне влияния на подготовку очага (и зоне последующей триггерной сейсмоактивности за пределами очага). Известно, что на рост крипекса влияет не только преобладание в подвижке очага квази-пластичной составляющей (по сравнению с хрупким разрушением). Но и повышение температуры окружающей среды [1], дилатансия, вызывающая поглощение высокочастотного излучения, а при росте крипекса, синхронном с ростом магнитуды землетрясений – реологическая неоднородность среды в очаге и за его пределами (т.е. отсутствие ее консолидации) [2].

Величина l зоны удаленного влияния очага оценивается на основе теории упругости и превосходит размер области очага l_0 «примерно в полтора порядка» [3]. Исходя из этой оценки, для землетрясения энергетического класса $K=17$ (т.е. магнитуды $M_S=7.2$, связанной с K эмпирической формулой ФИЦ ЕГС РАН) размер очага оценивается как $l_0=100$ км, а $l = 10^{1.5 \cdot \frac{K-11}{3}} = 1000$ км [4].

Полученной круговой областью удаленного влияния Алтайского (Чуйского) землетрясения (АЗ) 27.09.2003, $M_S=7.2$ диаметром $2 \cdot l=2000$ км охватывается практически вся сейсмоактивная территория Алтае-Саянской складчатой области (АССО), т.е. почти все (за единичными исключениями) события используемой в настоящем исследовании выборки каталогов Алтае-Саянского филиала ФИЦ ЕГС РАН.

Данные исследуются на основе нормированного крипекса Cr_0^{cat} , представляющего собой [2, 5] величину отклонения классического крипекса $Cr_0=M_S-m_b$ [1] от тренда зависимости $Cr_0(M_S)$ по выбранному каталогу. Для Алтае-Саянского каталога полученная эмпирическая формула имеет вид:

$$Cr_0^{\text{Alt}} = M_S - m_b - 0.4503 \cdot M_S + 2.056.$$

Отметим, что ранее, в результате применения крипекса Cr_0^{cat} в сейсмо-геодинамических исследованиях различного масштаба [2, 6] было установлено, что в преддверие отдельных сильнейших землетрясений по сопровождающей их умеренной сейсмичности характерно установление высокой корреляции во времени параметров Cr_0^{cat} и M_S (т.е. синхронная или, наоборот, противофазная их динамика). Начинается эта корреляция за десятки дней до главного события и продолжается десятки и сотни дней после него [6]. Причем прямая корреляция (синхронность) характерна для большинства землетрясений рифтовых зон (геодинамический режим растяжения), а обратная (противофазная динамика) – для зон субдукции (режим сжатия). Таким образом, по знаку и величине $K_{\text{кор}}$ - коэффициента парной корреляции крипекса и магнитуды можно оценить соотношение пластичности и консолидации геофизической среды исследуемых областей.

В настоящей работе по изменению во времени значений $K_{\text{кор}}$, рассчитываемых в скользящем окне из N хронологически последовательных событий, мы будем оценивать усредненную динамику напряженно-деформированного состояния окружающей среды охватываемого ими периода сейсмичности.

Методы и материалы

Исследование проводилось в среде геоинформационной системы GIS-ENDDB [7] на основе каталога, составленного по данным сборников «Землетрясения Северной Евразии» для Алтая и Саян - по 2020 год [8]. Полученный каталог содержит выборку записей с определением пар магнитуд M_S и m_b (M_S в пересчете из энергетического класса K или локальной магнитуды M_L по формулам ФИЦ ЕГС РАН) и содержит параметры 1172 землетрясений за период с 09.06.1988 по 31.12.2020.

В данной работе также используется следующий ряд методов GIS-ENDDB: 1) выбор на карте круговой области диаметром 2000 км вокруг Алтайского землетрясения; 2) расчет для сейсмичности этой области временных графиков параметра $K_{кор}$ с использованием алгоритма расчета «с фиксированным размером скользящего временного окна» равным N точек (Метод 1) как по всей используемой выборке, так и по умеренной сейсмичности с $M_S \geq 4$, а также алгоритмом расчета $K_{кор}$ «с фиксированным в точке главного события краем окна» (Метод 2) по выборке без учета афтершоков (методы подробно описаны в [5, 6]); 3) модифицированный метод Прозорова [9] удаления афтершоков из выборки землетрясений; 4) расчет и визуализация сферических диаграмм механизмов по данным «Каталога механизмов очагов землетрясений Алтая и Саян» [8], а также гарвардскому каталогу GCMT [10].

Результаты

Изменение во времени параметра крипекс-магнитудной корреляции $K_{кор}(t)$ (рассчитанного Методом 1 по сейсмичности без учета афтершоков) в l -окрестности очага Алтайского землетрясения показывает динамику напряженно-деформированного состояния среды в виде выраженной отрицательной аномалии (красный график на рис. 1а). Это может отражать процесс консолидации среды на интервале для $K_{кор} \leq -0.7$, начинающемся за 32 дня до момента главного события и заканчивающемся через 131 суток после него (интервал отмечен зелеными точками на рис. 1а и включает 12 событий выборки). Отметим, что график $K_{кор}(t)$, рассчитанный Методом 2 (показывающим более сглаженную долгосрочную динамику параметра) для всех событий, включая афтершоки, подтверждает отрицательную, хотя и менее выраженную аномалию на этом интервале (синий цвет на рис. 1а).

С другой стороны, визуализация механизмов показывает взбросо-сдвиговый (по GCMT) или преимущественно сдвиговый (по [8]) характер подвижки Алтайского землетрясения (верхняя врезка на рис. 1б), а для всех сильнейших исторических землетрясений рассматриваемой области (рис. 1б) – преимущественную локализацию сдвиговых механизмов в районе Горного Алтая, а вокруг него - механизмов сжатия. Это говорит о том, что проявляемый аномалией графика $K_{кор}(t)$ эпизод резкого роста консолидации среды за месяц до АЗ носит не локальный, а региональный характер. Т.е. отражает свойство всей АССО, являющейся в геодинамическом отношении частью зоны субмеридионального сжа-

тия (обусловленного Индо-Евразийской коллизией [11]), осложненного, однако, за 8 лет до АЗ активизацией режима образования сдвиговых зон [12].

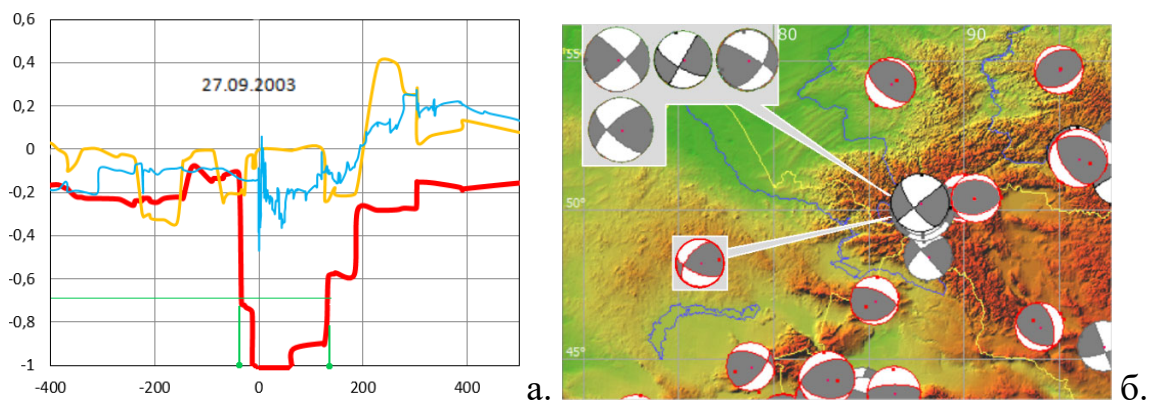


Рис. 1. Распределение параметров землетрясений АССО (афтершоки удалены): а) графики $K_{\text{КОР}}(t)$ в l -окрестности очага АЗ: 27.9.2003 ($M_S=7.2$) за 400 дней до и 500 дней после события по выборке [8]: красный цвет - рассчитанный Методом 2, синий и желтый - Методом 1 для всех событий выборки ($N=50$, см. рис. 2) и для выборки без афтершоков ($N=20$), за нулевую отметку времени принято АЗ; б) карта распределения механизмов событий с $M_S \geq 5.5$ после 1995 года по GCMT [10], в верхней врезке вынесены механизмы АЗ и первых его афтершоков (через 7 часов ($M_S=6.6$) и через 4 дня ($M_S=6.9$) после главного события) по данным [8], в нижнем ряду – по [10], отдельно вынесен механизм недавнего землетрясения 15.02.2025 ($M_S=5.7$).

Сдвиговый характер АЗ в общей обстановке сжатия обычно объясняют сложным строением поля напряжений в его очаге [11, 13]. Однако, отметим, что недавнее землетрясение 15.02.2025 ($M_S=5.7$) в области очага АЗ (нижняя врезка на рис. 1б) имеет значительно большую взбросовую составляющую подвижки, что может говорить о переходе среды этой области к большей согласованности с окружающей тектонической обстановкой сжатия.

Для исследования вопроса о влиянии окружающей геотектонической обстановки на подготовку Алтайского землетрясения, рассмотрим динамику крипекс-магнитудной корреляции $K_{\text{КОР}}(t)$ по всем землетрясениям и землетрясениям с $M_S \geq 4$ выборки [8] в АССО за весь исторический период (соответственно, синий и красный графики на рис. 2а). На интервале после 1995 года графики показывают периодичность, не совпадающую по фазе с периодом изменения мирового тренда $K_{\text{КОР}}(t)$, полученного в [6] по данным СМТ-каталога [10] (темно-зеленая кривая на рис. 2а). Отметим, что поведение последнего на 80-90% определяется сейсмичностью в зонах субдукции, а АЗ произошло в континентальной части Южно-Азиатской глубинной мегаструктуры, включающей и сейсмофокальные зоны южно-азиатской окраины Евразии [14]. Первый график сдвинут по фазе относительно мирового почти на 6 лет в начале и центре графика (для второго графика сдвиг составляет ~5 лет) и менее 4 лет в его правой части. Возможно, это

говорит о запаздывании реакции сейсмоактивности АССО на динамику глобальных глубинных процессов. Отметим, что график $K_{\text{кор}}(t)$ для Байкальской рифтовой зоны (БРЗ) (светло-зеленая кривая на рис. 2а) проявляет полную синхронность с мировым трендом. Это объясняется прямой связью геодинамики БРЗ с тихоокеанскими зонами субдукции, периодическая (возможно, связанная с ротационной геотектоникой) активизация которых сопровождается эпизодами отодвигания Амурской плиты от Евразии, вызывая растяжение и сбросовые подвижки в БРЗ.

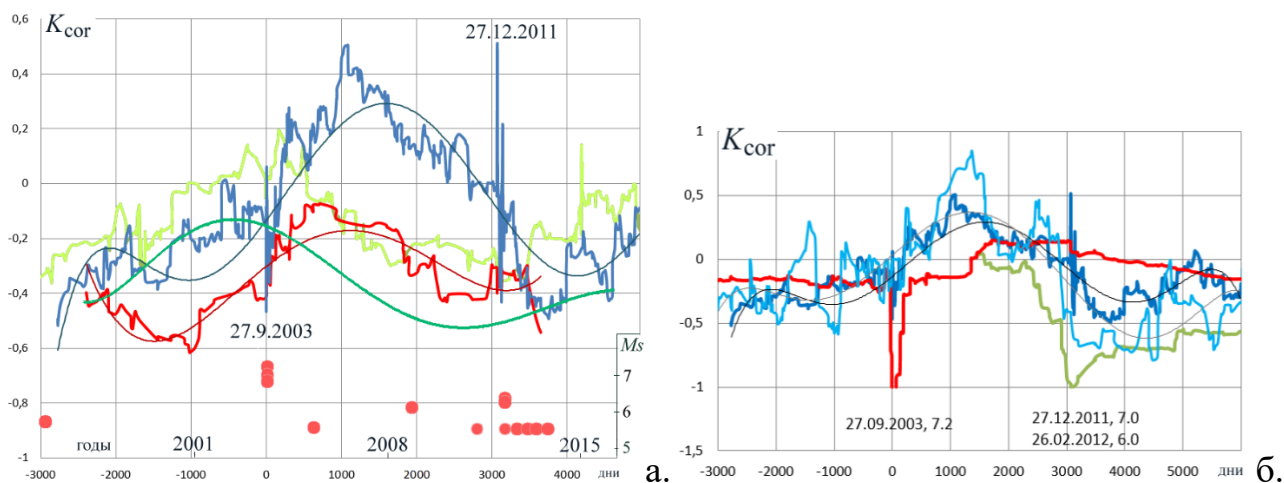


Рис. 2. Графики $K_{\text{кор}}(t)$ (Метод 2, $N=50$) в l -окрестности очага Алтайского землетрясения за весь исторический период по каталогу [8]: а) синий цвет - для всех событий, красный – для $M_s \geq 4$, светло-зеленый – по БРЗ для $M_s \geq 4$, темно-зеленый - для глобальной сейсмичности по каталогу GСMT; б) синий цвет – для всех событий, светло-синий – без афтершоков, красный и зеленый – $K_{\text{кор}}(t)$ (Метод 1) для двух сильнейших землетрясений АССО: 27.9.2003 и 27.12.2011.

Однако большее запаздывание по фазе тренда АССО в начале графика позволяет предположить временный, связанный с особенностями сейсмо-геодинамического режима региона характер его несогласованности с мировым. Это предположение подтверждается, например, по временному (рис. 3б) изменению соотношения типов механизмов «Внутриазиатского» [14] горного пояса (фрагмент которого активизировался за неделю до АЗ в виде Чуйского кластера [15] (черная линия на рис. 3а)). За 8 лет до АЗ на графике (рис. 3б) отмечается установление здесь геодинамического режима образования сдвиговых зон, а начиная с 2003 года - его быстрая смена режимом с преобладанием взбросовой составляющей.

Что касается возможного геодинамического воздействия со стороны Индо-Евразийской коллизии, то здесь также наблюдается временное отставание реакции сейсмической активности Алтая. Например, 2-годовая задержка его отклика на перераспределение поля напряжений в результате крупнейшего северо-тибетского землетрясения на разломе Куньлунь: 14.11.2001, $M_s=8.1$.

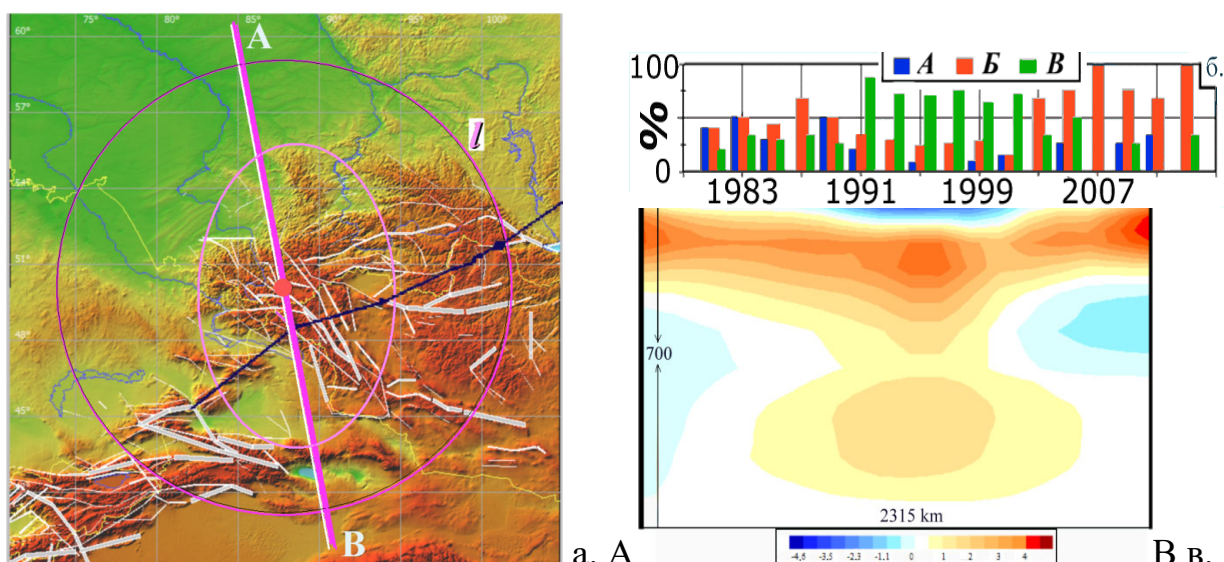


Рис. 3. Карта тектонических зон (серые линии) по [16] в l -окрестности очага АЗ (а) и томографический разрез (в) по профилю АВ: б) соотношение в % типов механизмов «Внутриазиатского» сейсмолинеамента [14] по 2-годовым интервалам: А - сбросы, Б - взбросы, В – сдвиги; в) шкала скорости поперечной волны S_V в % к базовой (по данным 3D-модели сейсмоскоростной томографии от [17]), глубина разреза 700 км. Получено в системе GIS-ENDDB.

Как показывает численное моделирование [13], «при растягивающих напряжениях в районе разлома Куньлунь в районе Горного Алтая деформации были сжимающими». Они могли проявиться в слабой сейсмичности АССО по минимуму тренда графика $K_{\text{КОР}}(t)$ в 2001г, построенному с учетом событий с $M_S < 4$ (синяя кривая на рис. 2а). При этом, как показано в [13], по умеренной сейсмичности без учета афтершоков в Горном Алтае наблюдалось годовое затишье, что говорит о возможном особом состоянии его среды (например, связанном с подготовкой АЗ) и «запертом» состоянии его разломов.

Максимальное отклонение по фазе алтайского тренда $K_{\text{КОР}}(t)$ от мирового приходится на период подготовки не только АЗ, но и другого крупного землетрясения АССО: 27.12.2011, $M_S = 6.8$ (рис. 2б), благодаря аномально высокому максимуму тренда графика между этими двумя событиями (рис. 2а), по-видимому, отмечающему повышенную реологическую неоднородность среды в АССО в 2004-2008гг. Более отчетливо этот максимум выражен (достигая значений очень высокой корреляции - $K_{\text{КОР}} = 0.81$) на графике, построенном без учета афтершоков (светло-синяя кривая на рис. 2б), что исключает влияние на рост крипекса изменений в очаге в результате АЗ, например, связанных с «деформационным разогревом» среды [5].

Тем не менее, все крупные землетрясения АССО с 1995 по 2016 годы с $M_S \geq 5.5$ (кроме самого Алтайского события) приходятся (красные точки на рис. 1а) на отрицательный полупериод мирового тренда $K_{\text{КОР}}(t)$, то есть, очевидно, приурочены к эпизодам глобального геотектонического сжатия, а не растяжения.

Это свидетельствует о восприимчивости среды АССО к глобальному сжимающему «энергонасыщению» не смотря на региональную неоднородность этой области или наличие других (вероятно, ограниченных по времени) факторов, повышающих крипекс её сейсмичности.

Обсуждение

Наличие отрицательных аномалий графиков $K_{\text{КОР}}(t)$ (Метод 1) до $K_{\text{КОР}} \leq -0.7$ в областях подготовки двух крупнейших землетрясений АССО свидетельствует о резком росте консолидации среды в преддверие этих событий. Этот режим начинается для них, соответственно, за 32 и 133 дня до главного события и сохраняется в течение нескольких месяцев и даже лет после землетрясений: для АЗ - 131 день, а для землетрясения 27.12.2011 ($M_s=6.8$) - 737 дней. Последний интервал охватывает целую серию сильных толчков: с $M_s=6.1$ - 26.02.2012 и с $M_s=5.5$: 26.02.2012, 06.06.2012, 30.07.2012, 03.10.2012, 24.01.2013, 18.06.2013.

Фазовая несогласованность периодичности графиков $K_{\text{КОР}}(t)$ (Метод 2, $N=50$ точек) по АССО и по всему миру говорит о неоднородности блоковой среды АССО, запертом состоянии её разломов или зависимости от некоторых региональных геодинамических факторов, понижающих или повышающих крипекс. Региональным фактором понижения крипекса в 2011 году может быть влияние эпизода активизации Индо-Евразийской коллизии, а фактором его высоких значений в 2004-2008гг (между двумя сильнейшими событиями) – ростом неоднородности, возможно, вызванной глубинными процессами АССО.

Обособленное и сложное геодинамическое строение Алтае-Саянского региона подтверждается геоданными системы GIS-ENDDB (рис. 3). Это и отличающаяся от окружающих коллизионных структур субширотного простираения, ССЗ-ЮЮВ ориентация линейаменто-доменных структур (по [16]) Горного Алтая (обведены розовым овалом на рис. 3а). А также локализованная здесь высокоплотностная структура глубинного погружения литосферы (возможно, сформированная на раннем островодужном этапе развития АССО), выявляемая по томографическому разрезу GIS-ENDDB (рис. 3в) и, вероятно, вносящая эндогенную составляющую в процесс расчленения растущего вдоль Центрально-Азиатского складчатого пояса орогена.

Заключение

С помощью параметра крипекс в области удаленного влияния очага Алтайского землетрясения удалось выявить не только общую закономерность изменения упруго-пластичного состояния среды (её консолидацию) во время крупнейших землетрясений, но и особенности развития Алтайского региона. В частности, несоответствие изменения коэффициента корреляции магнитуды и крипекса Алтае-Саянской складчатой области обнаруженным ранее периодическим изменениям этого параметра в глобальном масштабе, очевидно, связанное с обособленным и сложным строением региона.

Выполнено в рамках госзадания ИВМиМГ СО РАН № FWNM-2025-0004.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Каверина А. Н., Прозоров А. Г. Вариации крипекса в зависимости от типа тектонических структур и механизма очага: статистический анализ // Геодинамика и прогноз землетрясений. – М.: Наука, 1994. – С. 85–93.
2. Михеева А. В. О влиянии предполагаемого глобального глубинного разлома на сильные землетрясения // Российский сейсмологический журнал. – 2023. – Т. 5, № 4. – 52–64.
3. Лермонтова А. С., Ребецкий Ю. Л. О проблеме дальнего действия аномалии напряженного состояния включения/разрыва в среде, находящейся в закритическом состоянии // Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле. – М.: Изд-во ИФЗ РАН, 2016. – Т. 1. – С. 470–474.
4. Mikheeva A. V. On the possible relationship between remote seismic activations and strong earthquakes in southeast regions of Eurasia and adjacent seismic focal zones // Bulletin of the Novosibirsk Computing Center. Series: Math Modeling in Geoph. – 2024. – V. 26 – P. 17–27.
5. Михеева А. В., Калинин И. И. Крипекс-анализ процессов в очаговых зонах крупных землетрясений средствами GIS-ENDDB // Российский сейсмологический журнал. – 2021. – Т. 3, № 4. – С. 7–17.
6. Михеева А. В. Распределение параметра крипекс-магнитудной корреляции для сейсмичности больших глубин в контексте глобальной тектоники // Российский сейсмологический журнал. – 2024. – Т. 6, № 4. – 53–64.
7. Vazhenin A., Mikheeva A., Dyadkov P., Marchuk An. The software using digital databases and GIS interface for detecting geodynamic structures // New Trends in Intelligent Software Methodologies, Tools and Techniques. – IOS Press, 2017. – P. 576–592.
8. Землетрясения Северной Евразии, 1992 год ... 2020 год. / Под ред. Старовойт О.Е. – Обнинск, ГС РАН, 1998–2024гг.
9. Dyadkov P. G., Mikheeva A. V. The expert earthquake database (EEDB) for seismic-geodynamic research // Bulletin of the Novosibirsk Computing Center. Series: Mathematical Modeling in Geophysics. – 2010. – V. 13. – P. 15–30.
10. Global CMT Catalog. [Электронный ресурс]. – Lamont-Doherty Earth Observatory (LDEO) of Columbia University, Columbia, SC, USA. – 2025. – URL: <http://www.globalcmt.org>.
11. Гольдин С. В., Кучай О. А. Сейсмотектонические деформации в окрестности сильных землетрясений Алтая // Физическая мезомеханика. – 2008. – №1. – С. 5–13.
12. Новиков И. С., Дядьков П. Г., Козлова М. П., Мамедов Г. М., Михеева А. В. [и др.] Неотектоника и сейсмичность западной части Алтае-Саянской горной области, Джунгарской впадины и Тянь-Шаня // Геология и геофизика. – 2014. – Т. 55. – № 12. – С. 1802–1814.
13. Дядьков П. Г., Назаров Л. А., Назарова Л. А., Михеева А. В., Кузнецова Ю. М. Возможное влияние землетрясений в Северном Тибете (2001 г.) и близ о. Хоккайдо (2003 г.) на процесс подготовки Алтайского землетрясения 2003 года // Физическая мезомеханика. – 2006. – №1. – С. 67–72.
14. Михеева А. В. Южно-Азиатская мегаструктура по данным геоинформационной системы GIS-ENDDB // Геоинформатика. – 2018. – № 4. – С. 2–13.
15. Михеева А. В. Программно-алгоритмический инструментарий... [Электронный ресурс]. – Новосибирск, ИСИ. – 2025. – URL: www.iis.nsk.su/files/abstract/pdf/miheeva.pdf
16. Ulomov V. I. Earthquake Source Zones of Northern Eurasia. [Электронный ресурс] / Editor-in-Chief V.I. Ulomov. – 2000. – URL: www.seismo.ethz.ch/static/gshap/neurasia/.
17. Schaeffer A. J., Lebedev S. I. Global shear speed structure of the upper mantle and transition zone / A.J. Schaeffer // Geophysical Journal International. – 2013. – V. 194. – P. 417–449.

© А. В. Михеева, 2025