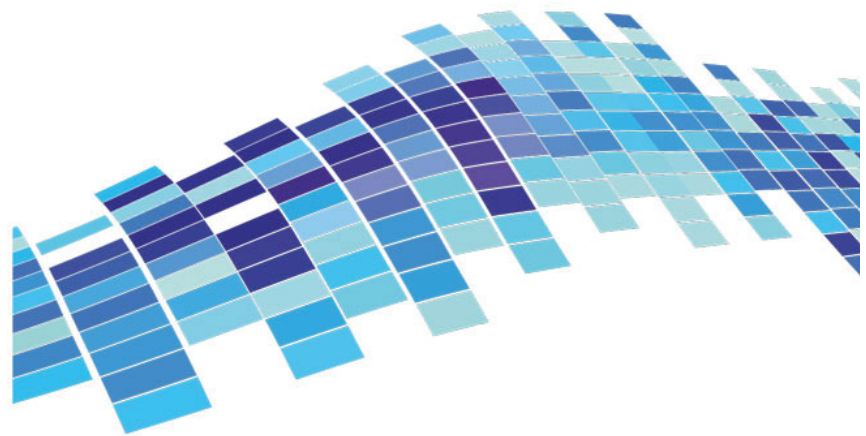


ISSN 2541-8912 (Print)
ISSN 2713-2161 (Online)

ГЕ СИСТЕМЫ ПЕРЕХОДНЫХ ЗОН



GEOSYSTEMS
of Transition Zones

2024 Том 8 № 4

Решением Научно-экспертного совета Морской коллегии
при Правительстве Российской Федерации
доктор геолого-минералогических наук, доцент, член редколлегии
нашего журнала, Ренат Белалович Шакиров награжден медалью
«За достижения в морской науке».

Редколлегия и редакция журнала «Геосистемы переходных зон» поздравляют
Рената Белаловича и его коллектив с этой неординарной наградой
и желают ему дальнейших успехов в морских научных исследованиях
и экспертной работе на международных площадках.



© Авторы, 2024 г.
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)



© The Authors, 2024.
Content is available under Creative Commons Attribution License 4.0 International (CC BY 4.0)

УДК УДК 551.24.03

<https://doi.org/10.30730/gtr.2024.8.4.261-276>
<https://www.elibrary.ru/poihsb>

Напряженное состояние земной коры Алтае-Саянской горной области: реконструкция на основе модифицированных алгоритмов катакластического метода

Ю. Л. Ребецкий[@], Н. А. Сычева

^{@E-mail:} reb@ifz.ru

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

Резюме. Представлены результаты новой реконструкции напряжений в земной коре Алтае-Саянской горной области и ближайших территорий по сейсмологическим данным с использованием новой модификации метода катакластического анализа (МКА) разрывных смещений Ю.Л. Ребецкого. Базой реконструкции стал собранный из различных источников каталог механизмов очагов землетрясений, насчитывающий 584 события. В более ранних работах Ю.Л. Ребецкого с соавторами (2012, 2013 гг.) при исследовании Алтае-Саянской горной области были использованы данные Н.Д. Жалковского с соавторами (1995 г.) о фокальных механизмах 308 событий. В настоящей работе обсуждаются модифицированные алгоритмы, реализованные в последней версии программы STRESSseism, на основе которых и выполнена реконструкция напряжений. Расширение данных по фокальным механизмам обеспечило проведение инверсии напряжений с меньшим масштабом усреднения и позволило получить в каждом узле данные для большего числа временных интервалов квазигомогенного напряженного состояния. Построены карты распределения направлений оси наибольшего сжатия и геодинамического типа напряженного состояния, а также значения коэффициента Лодэ–Надаи, выполнено сравнение с результатами ранее проведенной реконструкции. На основе модификации алгоритма МКА получены устойчивые ориентации осей главных напряжений. Результаты реконструкции напряжений могут быть использованы для тектонофизического районирования опасных сегментов активных разломов.

Ключевые слова: тектонофизика, напряжения, землетрясение, фокальные механизмы

The stressed state of the Earth's crust in the Altai-Sayan mountain region: reconstruction based on the modified algorithms of the cataclastic method

Yuri L. Rebetsky[@], Naylya A. Sycheva

^{@E-mail:} reb@ifz.ru

Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. The article presents the results of a new reconstruction of stress in the Earth's crust in the Altai-Sayan mountain region and their adjacent territories based on seismological data, and using a new modification of the method of cataclastic analysis (MCA) of fault displacements by Yu.L. Rebetsky. The reconstruction is based on the catalog of earthquake focal mechanisms collected from various sources and comprising 584 events. In earlier works by Yu.L. Rebetsky et al. (2012, 2013), the data on focal mechanisms of 308 events obtained in the studies of N.D. Zhalkovsky et al. (1995) were used for studying the Altai-Sayan mountain region. This paper discusses the modified algorithms implemented in the latest version of the STRESSseism program, on the basis of which the stress reconstruction was performed. The extended data on focal mechanisms provided the stress inversion with a smaller averaging scale and allowed obtaining

data for a larger number of time intervals of the quasi-homogeneous stress state in each node. Distribution maps of the directions of the maximum compression axis and the geodynamic type of the stress state, as well as the value of the Lode–Nadai coefficient were constructed and compared with the results of the previously performed reconstruction. Based on the modification of the MCA algorithm, stable orientations of the axes of the principal stresses were obtained. The results of the stress reconstruction can be used for tectonophysical zoning of dangerous segments of active faults.

Keywords: tectonophysics, stress, earthquake, focal mechanisms

Для цитирования: Ребецкий Ю.Л., Сычева Н.А. Напряженное состояние земной коры Алтае-Саянской горной области: реконструкция на основе модифицированных алгоритмов катакластического метода. *Геосистемы переходных зон*, 2024, т. 8, № 4, с. 261–276. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2024.8.4.261-276>; <https://www.elibrary.ru/poihsb>

For citation: Rebetsky Yu.L., Sycheva N.A. The stressed state of the Earth's crust in the Altai-Sayan mountain region: reconstruction based on the modified algorithms of the cataclastic method. *Geosistemy perexodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2024, vol. 8, No. 4, pp. 261–276. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtrz.2024.8.4.261-276>; <https://www.elibrary.ru/poihsb>

Финансирование

Работа проведена в рамках выполнения государственного задания Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (№ 122040600089-4).

Funding

The work was carried out within the framework of the state task of the Schmidt Institute of Physics of the Earth of RAS (№ 122040600089-4).

Введение

Напряженно-деформированное состояние Алтая и Саян рассматривалось во многих работах [1–7 и др.]. В одних исследовались фокальные механизмы [2, 3], в других на основе фокальных механизмов рассчитывались сейсмотектонические деформации [4–7], в третьих выполнена реконструкция напряжений на основе метода катакластического анализа [1, 8–10].

На основе анализа данных о механизмах 453 землетрясений Алтая и Саян в работе [5] показано, что в условиях фиксированного геодинамического режима механизм землетрясений зависит от глубины гипоцентра. Основным фактором, определяющим характер геодинамического режима (с точки зрения сейсмического процесса), является уровень бокового (широтного) стеснения. В областях стесненного сжатия (к ним принадлежит Тянь-Шань) преобладают землетрясения взбросового типа. При нестесненном и умеренно-стесненном сжатии в Алтае-Саянской горной области чаще отмечаются горизонтальные сдвиги, а на малых глубинах – взбросы. Количественный анализ землетрясений Алтая и Саян по типу механизмов, представленный в работах [1–3, 11], показывает разнообразие фокальных механизмов не только по всей рассматриваемой территории, но и в очаговых областях земле-

трясений, что свидетельствует о сложном напряженном состоянии территории.

В результате тектонофизической реконструкции природных напряжений земной коры на основе данных 308 фокальных механизмов землетрясений Алтае-Саянской области [8] показана существенная неоднородность напряженного состояния. Это выражается не только в изменчивости простираения и погружения главных осей тензора напряжений, определяющих изменение геодинамического режима земной коры, но и в близком расположении областей повышенного и пониженного всестороннего тектонического давления по отношению к литостатическому давлению. Неоднородность поля напряжений установлена на основе геолого-структурных и морфоструктурных данных и в работе [12]. Наблюдаемая неоднородность обусловлена воздействием различных источников тектонических сил или сочетанием этих воздействий на исследуемой территории. В работе [13] представлена единая, детальная картина изменчивости поля напряжений для всего Центрально-Азиатского региона, полученная с помощью метода инверсии напряжений. В рамках проекта World Stress Map (WSM) систематически собираются данные о сильных землетрясениях для определения параметров напряженного состояния. Считается, что азимуты осей сжатия P опре-

деляют ориентацию максимального горизонтального напряжения S_{Hmax} . Выпуск базы данных WSM за 2016 г. [14] содержит результаты анализа регионального и глобального поля напряжений. Знание современного поля напряжений в земной коре является ключом к пониманию геодинамических процессов, таких как глобальная тектоника плит и землетрясения.

В последние годы активно развивается и используется метод катакластического анализа (МКА) разрывных смещений, разработанный в лаборатории тектонофизики Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. МКА содержит 4 этапа реконструкции напряжений. Подробное описание всех этапов представлено в работах [8, 15 и др.].

Целью данной работы является применение модифицированных алгоритмов МКА к анализу напряженного состояния территории Алтая–Саян и ближайших областей на основе собранного каталога фокальных механизмов очагов (584 землетрясения) и сравнение с результатами реконструкции напряжений, выполненной в работе [8] для этого же региона на основе 308 землетрясений.

В статье представлены результаты первых двух этапов новой реконструкции напряжений для Алтая и Саян (Западного и Восточного). Результаты реконструкции напряжений в дальнейшем могут быть использованы для тектонофизического районирования опасных участков активных разломов.

Исходные данные

Сбор данных по фокальным механизмам проводился по территории 78–105° в.д. и 45–55° с.ш. Эта территория шире, чем Алтай–Саяны, и включает Гобийский, Монгольский и Горный Алтай, Зайсанскую впадину, а также Южное Прибайкалье. Сбор данных по такой территории позволяет оценить напряженное состояние не только Алтая–Саян, но и ближайших областей. Для сбора данных и создания каталога фокальных механизмов использовались следующие источники: ФИЦ ЕГС РАН (Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба РАН») (<http://www.gsras.ru>); Землетрясения Северной Евразии [16]; ежегодник «Землетрясения России» [17] – 239 землетрясений за период 12.07.1998 – 22.10.2020;

данные Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения РАН (ИНГГ СО РАН) (<http://www.ipgg.sbras.ru>, отв. О.А. Кучай [18]) – 201 землетрясение, период 29.10.1963 – 25.07.2003; Global Centroid Moment Tensor (CMT) database (www.globalcmt.org/CMTsearch.html) – 81 землетрясение, период 03.08.1978 – 22.10.2021; данные из отдельных публикаций [1, 19, 20] – соответственно, 28 землетрясений (период: 27.12.1991 – 27.09.2003), 24 (период 21.09.1996 – 06.03.2006), 11 событий после землетрясения 15.05.1970.

В статье [1] представлены механизмы очагов наиболее сильных афтершоков Бусингольского (1991 г.) и Чуйского (2003 г.) землетрясений – 17 по первому и 11 по второму. Данные из этой работы добавлены в каталог с авторством (Kuchay_2012).

Статья [19] содержит 28 не опубликованных ранее решений механизмов очагов землетрясений для территории Южного Прибайкалья, Забайкалья, Тувы и Северной Монголии, определенных по знакам вступлений продольных волн на станциях Байкальской, Бурятской, Алтае-Саянской сетей Геофизической службы РАН и Монгольской национальной сети. Для всех представленных решений отсутствуют данные по глубине события. В рамках исследуемой нами территории произошли 24 землетрясения, они добавлены в каталог с авторством (Radziminivich_2021).

В работе [20] представлены решения фокальных механизмов очагов 11 событий (афтершоков и других землетрясений) в области одного из крупнейших землетрясений Алтая (15.05.1970 г., $M = 7$) – Урэг-Нурского и выполнен всесторонний анализ данных о сейсмическом процессе, вызванном этим землетрясением. Решения по фокальным механизмам были добавлены в каталог с авторством (Еманов_2012).

Для исключения дублируемых событий использовалась авторская программа. При отсутствии параметров главных осей снимаемых напряжений их расчет проводился на основе программ из пакета SEISMO (Matlab). В результате объединения всех источников был составлен итоговый каталог фокальных меха-

низмов, который включает 584 землетрясения за период 29.10.1963 – 22.10.2021 (в 1963 г. одно событие, реально каталог включает данные с 1967 по 2021 г.). Период с 1963 по 2003 г. представлен данными ИНГГ СО РАН. Данные ФИЦ ЕГС РАН представлены в основном событиями с 2000 по 2020 г. Данные СМТ малочисленны, включают землетрясения, произошедшие с 1978 по 2021 г. на территории Китая, Казахстана, Монголии и Байкальской рифтовой зоны (Южное Прибайкалье).

На рис. 1 приведена карта фокальных механизмов, где цвет механизма соответствует типу подвижки. Механизмы очагов на рассматриваемой территории разнообразны, и события с механизмами разного типа (взброс, сброс, горизонтальный сдвиг) могут происходить на близких участках. На рис. 2 а показано количественное распределение землетрясений в зависимости от типа подвижки в очаге (тип фокального механизма). Для определения типа подвижки использовались данные об углах

погружения главных осей напряжений (P_{plunge} , T_{plunge}) относительно горизонтальной плоскости. Согласно полученным данным, ~39 % от общего числа событий составляют взбросы и взбросо-сдвиги, ~25 % – горизонтальные сдвиги и взрезы, ~36 % в сумме приходится на сбросы и сбросо-сдвиги. К взрезам отнесены события с близвертикальным смещением крыльев.

Некоторые статистические характеристики каталога представлены на рис. 2. 25 % землетрясений имеют класс $K = 9.5$ ($M = 3.25$) (рис. 2 б). Наиболее равномерно представлен период с 1993 по 2003 г. (каталог ИНГГ СО РАН, отв. Кучай О.А.). Максимальное число событий приходится на 2013 г. 18.06.2013 г. произошло Бачатское землетрясение с $M_L = 6.1$, которое сопровождалось афтершоковой активностью (рис. 2 с). Глубина землетрясений большей частью до 35 км (рис. 2 d). Из-за плохо определяемых глубин очагов землетрясений [1] существует большое число событий (около 300), которым была при-

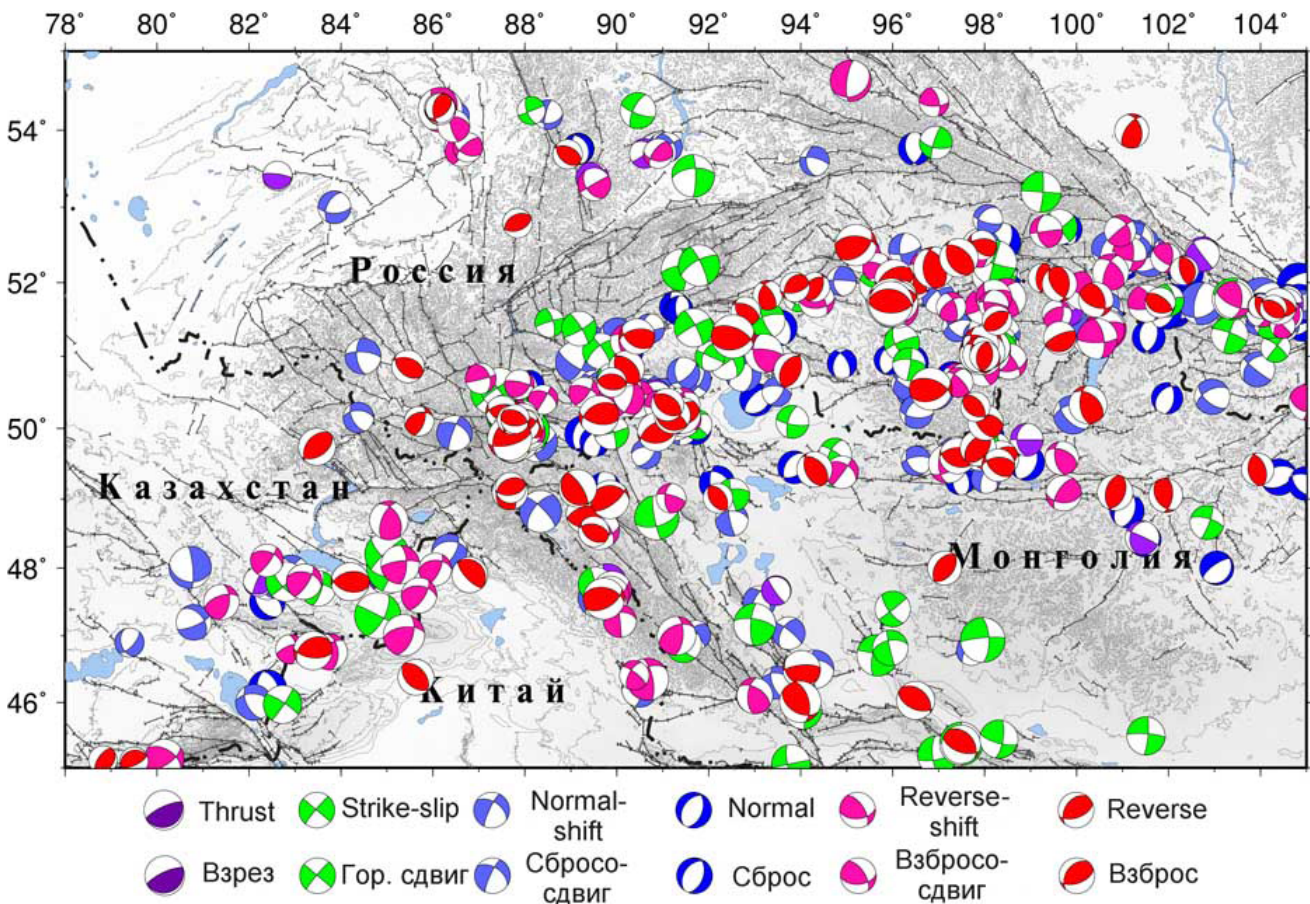


Рис. 1. Фокальные механизмы очагов землетрясений (584 события).
Fig. 1. Focal mechanisms of earthquakes (584 events).

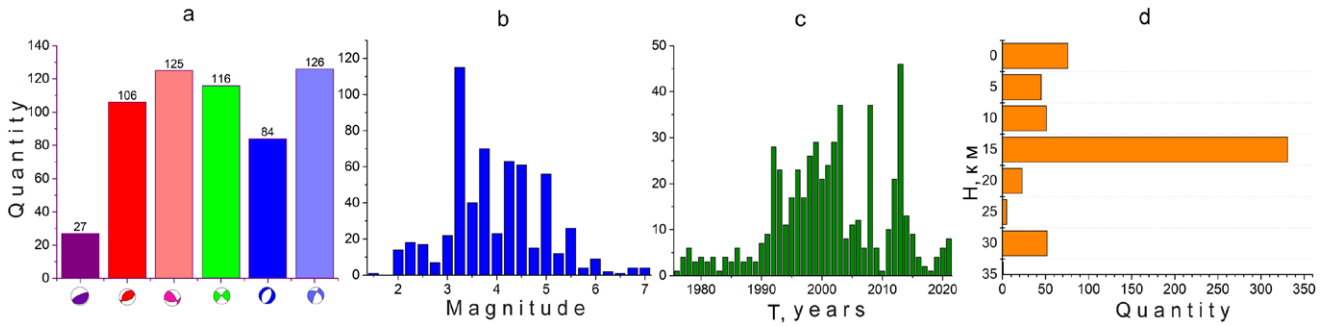


Рис. 2. Количественное распределение рассматриваемых землетрясений: (а) по типу подвижки в очаге (см. легенду к карте на рис. 1), (б) по магнитуде, (с) по годам, (д) по глубине.

Fig. 2. Quantitative distribution of the studied earthquakes: (a) by type of displacement in the earthquake focus (see legend to the map on Fig. 1), (b) by magnitude, (c) by years, (d) by depth.

своя глубина 15 км. Землетрясения глубже 30 км происходят на территории Монгольского и Гобийского Алтая.

Статистические характеристики параметров осей главных снимаемых напряжений позволяют определить некоторые закономерности деформационных процессов. Построены диаграммы распределения азимутов осей сжатия и растяжения, а также графики зависимости числа землетрясений от угла погружения этих осей. При построении значения углов простирания усреднялись с шагом 5°, а углов погружения – с шагом 10°. Согласно полученным результатам, направление осей сжатия меняется от северо-северо-западного до северо-восточного (разброс ограничен сектором 325°–65°) (рис. 3 а). Наиболее ярко для осей сжатия выделяются три направления: северное, северо-северо-восточное и северо-восточ-

ное. Направление осей растяжения меняется от северо-западного до юго-западного (разброс ограничен сектором 210°–330°, рис. 3 б). Значительная часть осей растяжения имеет северо-северо-западное направление. Субгоризонтальное положение (до 30) имеют 65 % осей сжатия и 52 % осей растяжения (рис. 3 с).

Методика расчета реконструкции напряжений

Исследование современного напряженно-госостояния земной коры региона Алтае-Саян выполнялось на представленной в предыдущем разделе базе сейсмологических данных о механизмах очагов землетрясений. Для инверсии напряжений использовался программный комплекс STRESSseism. Процедуры этого комплекса построены на алгоритмах метода

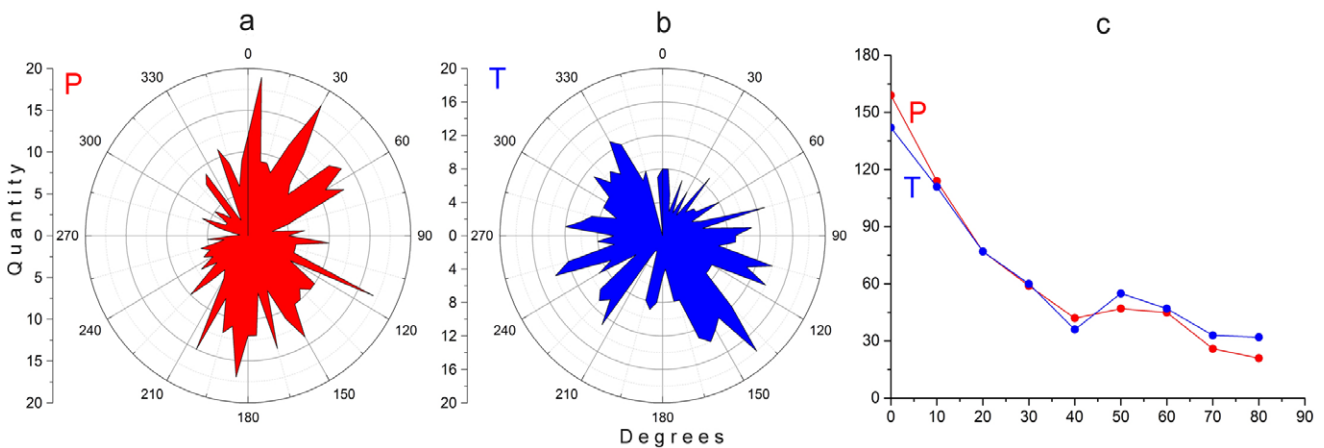


Рис. 3. Диаграммы распределения азимутов осей сжатия Р (а), растяжения Т (б) и зависимость числа землетрясений от угла погружения главных осей напряжений Р и Т (с).

Fig. 3. Distribution diagrams of the azimuths of compression axes P (a) and tension axes T (b) and the dependence of the number of earthquakes on the immersion angle of the main stress axes P and T (c).

катакластического анализа Ю.Л. Ребецкого [8, 15, 21, 22 и др.]. Алгоритм катакластического метода позволяет рассчитывать не только параметры эллипсоида напряжений (ориентацию его главных осей и форму – коэффициент Лоде–Надаи), но и параметры эллипсоида тензора приращений сейсмоструктурных деформаций (СТД) – первый этап реконструкции, а также напряжения, нормированные на прочность сцепления.

В МКА расчет тензоров приращений сейсмоструктурных деформаций выполняется на основе проверки данных (фокальных механизмов) на однородность. Область исследования определяется на основе критерия кумулятивности (взаимное пересечение) областей упругой разгрузки землетрясений и критерия диссипации упругой энергии для каждого землетрясения на искомом тензоре напряжений. Использование этих критериев позволяет именовать созданную выборку однородной. Она характеризует квазиоднородное деформирование отвечающего ей пространственного домена. Размер такого домена, к которому и относятся результаты расчета, зависит от плотности распределения землетрясений и их магнитуды. Расчет выполняется для доменов, в который попали 6 и более землетрясений. Такой подход применялся ранее при исследовании поля напряжений. Попадание в домен менее 6 землетрясений не позволяло провести инверсию для этого домена.

В данной работе выполнен поиск нового подхода к формированию выборки, который позволил бы увеличить площадь исследования. Проведено несколько предварительных реконструкций напряжений, целью которых был выбор оптимальных параметров создания однородных выборок землетрясений, характеризующих квазиоднородную фазу напряженного состояния участка коры вблизи узла расчета. Оптимальность определялась возможностью максимально плотного покрытия участков исследуемого региона, для которых имелись данные о фокальных механизмах землетрясений, узлами градусной сетки, для которых удавалось выполнить реконструкцию напряжений.

Последняя версия программы STRESSseism содержит несколько модификаций, каса-

ющихся как организации начальных выборок механизмов очагов землетрясений, так и более фундаментальных проблем: формы области хрупкого разрушения на диаграмме Мора; определяющего максимального принципа (см. о нем ниже), по которому проводится оптимальный выбор параметров эллипсоида напряжений.

Создание начальной выборки землетрясений

Программа STRESSseism варьирует масштаб усреднения в зависимости от плотности распределения эпицентров землетрясений, для которых имеются данные о механизмах очагов. В специальном файле программы («сценарии расчета» STRESS.map) задаются крайние точки по широте и долготе исследуемого региона и диапазон глубин, в пределах которых будет проводиться расчет напряжений. В этом же файле задаются предельные значения радиуса усреднения и коэффициенты, определяющие размер области упругой разгрузки в окрестности эпицентра землетрясения, а также максимальное число итераций, для которых идет постепенное увеличение радиуса усреднения до максимального значения.

Для коры Алтая–Саян расчет проводился для региона 78–105° в.д. и 45–55° с.ш. с шагом узлов сетки 0.25°. Максимальный радиус усреднения R_{\max} составлял 100 км при максимальном числе итераций I_{\max} , равном 6. Программа ориентирована на расчет по наименьшему радиусу усреднения, и поэтому в ней на каждом итерационном этапе происходит постепенное увеличение радиуса усреднения:

$$R_i = I R_{\max} / I_{\max}, I = 1, \dots, I_{\max}. \quad (1)$$

При этом в так называемую «начальную выборку» землетрясений включаются все землетрясения, эпицентры которых попадают внутрь области радиуса R_i . События, эпицентры которых расположены за пределами области радиуса R_i , включаются в начальную выборку в том случае, если радиус области упругой разгрузки этих землетрясений R_{eq} меньше R_i , т.е. если эти области упругой разгрузки накрывают узел расчета напряжений и тем самым создают вклад в тензор прира-

щений сейсмотектонических деформаций. Радиус упругой разгрузки зависит от магнитуды землетрясения, точности определения его эпицентра ($A1$) и параметра ($A3$), характеризующего скорость затухания деформаций за пределами очага землетрясения [23, 24].

Коэффициенты, определяющие размер области упругой разгрузки, принимали следующие значения: $A1 = 5$ км (точность локации эпицентра) и $A3 = 0.6$:

$$R_{eq} = A1 + A2 * 10^{(A3 * (1.24 + 0.8 * M) - 5)} \text{ км.} \quad (2)$$

Параметр $A2$ зависит от текущего радиуса усреднения R_i и рассчитывается программой автоматически.

Наш опыт реконструкции природных напряжений из данных о механизмах очагов землетрясений показывает, что для работы с исходными данными одного иерархического уровня необходимо использовать землетрясения с шириной магнитудного диапазона 2.5–3.5. В этом случае, с одной стороны, исключаются варибельные механизмы относительно слабых землетрясений, которые могут исказить результаты в отдельных узлах расчета, там, где число событий слабых магнитуд

достаточно большое. С другой стороны, исключаются сильные события, которые, имея большую область упругой разгрузки, будут влиять на результаты расчетов в большом числе узлов. Для Алтае-Саян был выбран магнитудный диапазон от 2.0 до 6.0, что определило участие в расчетах 567 землетрясений.

Область хрупкого разрушения на диаграмме Мора

Масштаб усреднения напряжений в МКА по данным о механизмах очагов землетрясений составляет первые десятки километров, достигая иногда 100 км и более [25, 26]. Это позволяет упростить зависимость параметров прочности от напряжений (см. рис. 4 а), полагая коэффициенты внутреннего (k_p) и статического поверхностного (k_s) трения, а также прочность сцепления τ_f постоянными.

В предыдущей версии программы STRESSseism было принято $k_s = k_f$ (рис. 4 б). Это является достаточно сильным упрощением реальной предельной линии прочности, которая имеет криволинейный вид (см. рис. 4 а), выполаживаясь при больших величинах сжимающих напряжений σ_{nn} . В этой работе

Рис. 4. Графическая схема предельных состояний на диаграмме Мора. Большие круги Мора касаются предельной линии прочности: (а) в виде криволинейной огибающей; (б) в виде прямолинейной предельной линии, параллельной линии сухого трения; (с) в виде прямолинейной предельной линии, не параллельной линии минимального сухого трения. 1 – предел хрупкой прочности (криволинейная или прямая линия); 2 – минимальное сопротивление «сухого» статического трения (стационарная стадия на разломе); 3 – касательные к предельной огибающей; 4 – предельное состояние на разломе, отвечающее максимальной прочности; 5 – напряженные состояния на участках разрыва, меньшие предельного; 6 – напряженное состояние минимального сопротивления хрупкого разрушения (точка К для (б) и (с)). А, В, С, F – предельные состояния хрупкого разрушения, Е – состояние, разделяющее область хрупкого (слева) и псевдопластического (справа) деформирования породы.

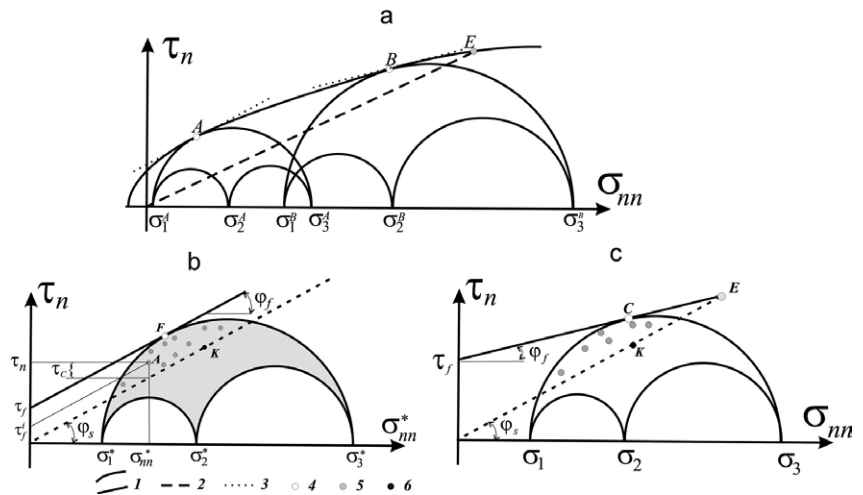


Fig. 4. Graphic schemes of limit states on the Mohr diagram. Large Mohr’s circles are tangent to the strength limit line: (a) in the form of a curved envelope; (b) in the form of a straight limit line parallel to the dry friction line; (c) in the form of a straight limit line not parallel to the minimum dry friction line. 1, brittle strength limit (curved or straight line); 2, minimum resistance of “dry” static friction (stationary stage on the fault); 3, tangents to the limit envelope; 4, limit state on the fault corresponding to the maximum strength; 5, stress states on the rupture sections less than the limit; 6, stress state of minimum resistance to brittle fracture (point K for (b) and (c)). A, B, C, and F indicate limit states of brittle fracture; E denotes the state dividing the region of brittle (left) and pseudoplastic (right) deformation of the rock.

расчет нормированных величин напряжений на втором этапе реконструкции МКА выполнялся для диаграммы хрупкой прочности Кулон–Мора, представленной на рис. 4 с. Здесь учитывается главная особенность реальной диаграммы хрупкой прочности (рис. 4 а), в которой максимальные значения кулоновых напряжений достигаются при низком уровне нормальных к разрыву напряжений σ_{nn} . Для этой диаграммы линия предельной хрупкой прочности не параллельна линии минимального сопротивления сухого трения, т.е. $k_s > k_f$.

Максимальный принцип

В работе был использован новый вид функции, максимум которой определяет единственность выбора параметров эллипсоида напряжений (ориентация осей главных напряжений и коэффициент Лоде–Надаи) в конце первого этапа реконструкции МКА. На этой стадии после суммирования квадрантов сжатия и растяжения механизмов очагов землетрясений из однородной их выборки на двух полусферах локализуются участки, в которых могут находиться искомые главные напряжения, соответственно, наибольшего и наименьшего сжатия. Ранее для этого использовалась функция следующего вида:

$$F = \sum \frac{1}{W^k} s_n^k \tau_{ns}^k \rightarrow \max, \quad (3)$$

где s_n^k и τ_{ns}^k – соответственно, вектор смещений и вектор касательного напряжения для k -го очага землетрясения с нормалью n^k ; W^k – характерный размер области упругой разгрузки в направлении нормали n^k .

Можно показать, что эта функция является произведением тензора приращений сейсмоструктурных деформаций на тензор напряжений. В теории пластичности такая функция именуется диссипативной. Достижение ею максимальных значений именуется максимальным принципом Мизеса. В теории пластичности этот принцип определяет совпадение главных осей тензоров напряжений и приращений пластических деформаций. Приложение этого принципа в теории хрупкого разрушения может приводить к ошибкам в определении осей главных напряжений на 15–20°. В МКА это сказывается в меньшей

степени, чем в других методах, так как он применяется на финальной стадии первого этапа, когда области возможного расположения осей главных напряжений на двух полусферах уже локализованы. Однако в каких-то случаях это также может происходить, например, в зонах субдукции на участках малой вариабельности механизмов очагов землетрясений.

В силу этого в новой версии МКА при определении максимальной функции предлагается использовать другой, достаточно стандартный подход, применяемый в теории пластичности, и в частности в теории псевдопластичности, ориентированной на изучение деформаций в горных породах [27, 28]. Здесь при выборе пластического потенциала используется функция текучести типа Кулона–Мора или Друккера–Прагера. В приложении к рассмотренной выше проблеме упруго-хрупкого тела будем использовать критерий Кулона–Мора:

$$\tau_{ns}^k - k_s |\sigma_{nn}^k| = \tau_f^k, \quad (4)$$

где σ_{nn}^k – нормальное напряжение на разрыве, τ_f^k – прочность сцепления k -го разрыва.

В этом случае функцию F и максимальный принцип на ее основе можно записать в следующем виде:

$$F = \sum \frac{1}{W^k} (s_n^k \tau_{ns}^k - k_s s_n^k |\sigma_{nn}^k|) \rightarrow \max \quad (5)$$

Этот вид максимальной функции F реализован в алгоритме модифицированной версии программы STRESSseism.

Реконструкция напряженного состояния

В статье представлены результаты новой реконструкции напряжений для Алтая и Саян (Западного и Восточного) первых двух этапов МКА и проведено их сопоставление с предыдущими результатами реконструкции напряжений [8] для Алтая и Западного Саяна (рис. 5 и 6). На рис. 5 показаны геодинамический тип напряженного состояния, значение коэффициента Лоде–Надаи и оси наибольшего горизонтального сжатия. Направления действия напряжений наибольшего горизонтального сжатия получены по правилам тензорного анализа, а не как азимуты осей наибольшего сжа-

тия [14]. Оси этих напряжений (рис. 5 в) были построены в большем масштабе усреднения, чем два других параметра напряженного состояния (рис. 5 а, б).

Согласно графике, приведенной на рисунках 5 а, б, в новой реконструкции для коры Алтая в основном представлены геодинамические типы напряженного состояния горизонтального сдвига и его сочетание с сжатием или растяжением. В то время как в работе [8] (рис. 6 а) имеются участки широкого представительства режимов горизонтального растяжения (кора Курайской и Чуйской впадин) и сжатия (кора севера Монгольского Алтая). Эти различия могут быть обусловлены особенностью напряженного состояния Алтая в период подготовки Алтайского землетрясения 2003 г.

Различия в значениях коэффициента Лодэ–Надаи также проявились в коре Алтая. В новой реконструкции (рис. 5 б) здесь больше представлены значения этого коэффициента, отвечающие его близости к чистому сдвигу ($-0.2 \dots 0.2$), а также его сочетанию с одноосным растяжением ($-0.2 \dots -0.6$) и одноосным сжатием ($0.2 \dots 0.6$). В реконструкции из работы [8] в большей степени представлены значения коэффициента Лодэ–Надаи, близкие к одноосному растяжению ($-0.6 \dots -1.0$).

Разница в ориентации осей напряжений наибольшего горизонтального сжатия между новой реконструкцией и полученной в работе [8], также наблюдается для коры Алтая, в особенности в Монгольском Алтае.

Наибольшая близость результатов этих двух реконструкций наблюдается для Западного Саяна и Зайсанской впадины, хотя и здесь наблюдается уменьшение горизонтального сжатия за счет увеличения горизонтального сдвига. Небольшие частные различия в конкретных узлах расчета имеются также и в площадном распределении коэффициента Лодэ–Надаи при основном диапазоне от -0.6 до 0.6 .

Отмеченные различия в параметрах эллипсоида напряжений (его оси и его форма, определяемая коэффициентом Лодэ–Надаи) могут быть связаны: 1) с большим числом механизмов очагов землетрясений в новом каталоге механизмов (дополнительные 259 событий к 308, использованным в работе [8]);

2) с новым максимальным принципом расчета параметров эллипсоида напряжений (выражения (3)–(5)). В первом случае изменение параметров напряженного состояния связано с временными вариациями, а во втором – с изменением определяющего максимального принципа расчета напряжений.

Маловероятно влияние нового алгоритма создания начальной выборки землетрясений (выражения (1)–(2)) на результаты расчета в части параметров эллипсоида напряжений. Этот алгоритм сказывается на количестве узлов, в которых были получены данные о напряжениях.

Для выяснения причин различия в параметрах напряженного состояния в расчетах, проведенных в разное время и представленных на рисунках 5 и 6, были выполнены новые расчеты для новой версии программы STRESSseism на основе тех же сейсмологических данных (308 событий за 1963–2003 гг.), которые были использованы в работе [8] (см. рис. 7). Этот расчет следует сравнивать с результатами, представленными в работе [8] (рис. 6).

Видно, что распределение по площади типов геодинамических режимов в обоих расчетах достаточно схожее, кроме севера Монгольского Алтая. Здесь в реконструкции по работе [8] (старый алгоритм МКА) имеет место горизонтальное сжатие и его сочетание со сдвигом. В реконструкции по модифицированному алгоритму МКА здесь имеет место сочетание горизонтального сжатия со сдвигом. Такое, казалось бы, серьезное изменение напряженного состояния на самом деле обусловлено изменением угла погружения оси максимального сжатия на $15\text{--}25^\circ$.

Сравнивая результаты расчетов, представленные на рисунках 7 и 5, можно предположить, что изменения для коры западной части Алтая в районе Курайско-Чуйской впадины связаны с произошедшим сильным Алтайским землетрясением 2003 г. Здесь в прежних расчетах [8] получены результаты, характеризующие этот регион как горизонтальное растяжение и горизонтальное растяжение со сдвигом. В наших расчетах в этом регионе наблюдается горизонтальный сдвиг и горизонтальный сдвиг со сжатием.

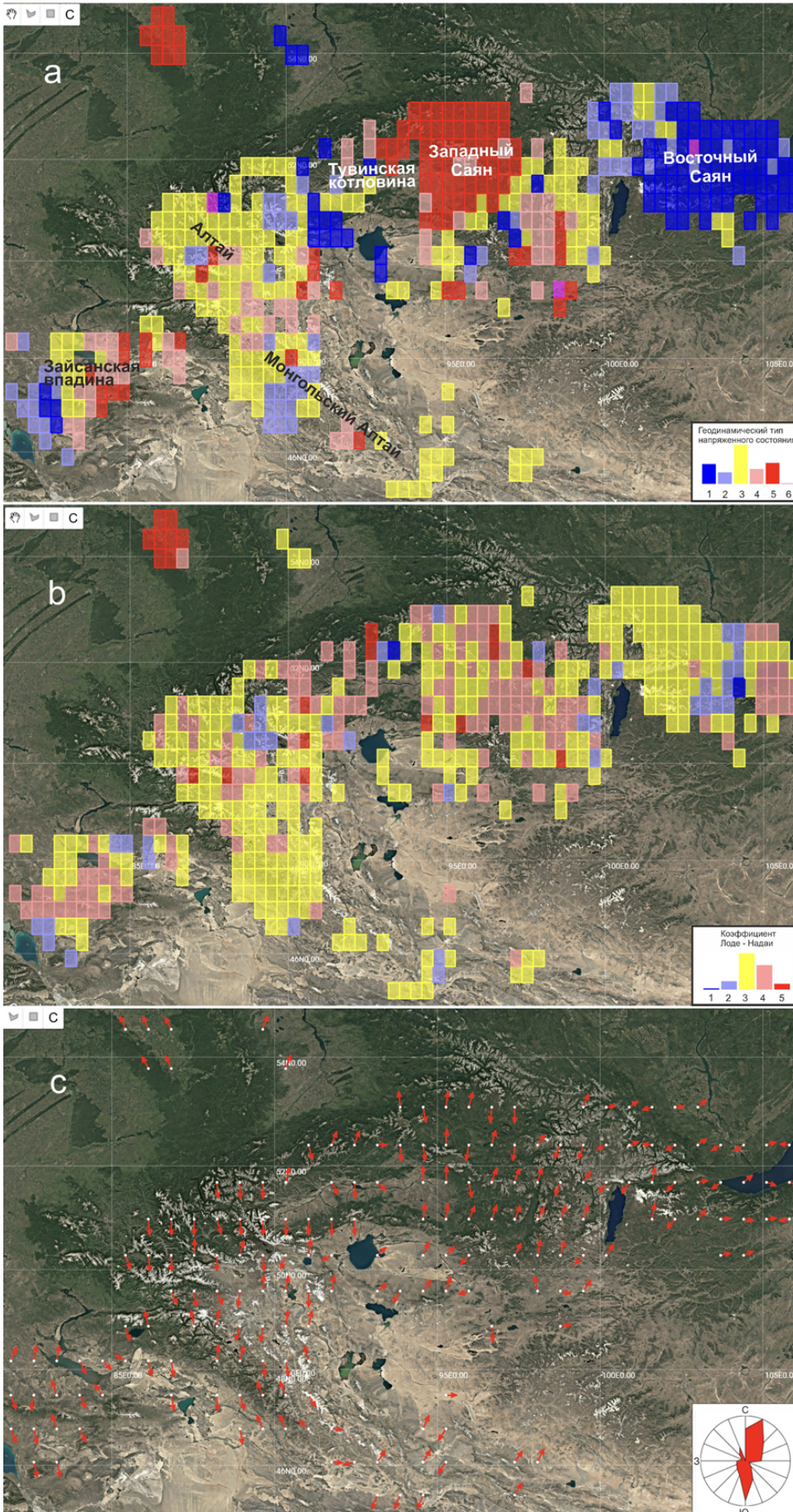


Рис. 5. Результаты, полученные в данной работе на основе анализа 567 событий: (а) геодинамический тип напряженного состояния: 1 – горизонтальные растяжения, 2 – горизонтальный сдвиг с растяжением, 3 – горизонтальный сдвиг, 4 – горизонтальный сдвиг со сжатием, 5 – горизонтальное сжатие, 6 – вертикальный сдвиг; (б) значение коэффициента Лоде–Надаи: (1) $\mu_\sigma < -0.6$; (2) $\mu_\sigma < -0.2$; (3) $-0.2 \leq \mu_\sigma < 0.2$; (4) $\mu_\sigma \geq 0.2$; (5) $\mu_\sigma \geq 0.6$; (с) оси наибольшего горизонтального сжатия. Рисунки получены из Интернет-ресурса ИФЗ РАН («Тектонические напряжения Евразии»).

Fig. 5. The results obtained in this study based on the analysis of 567 events: (a) geodynamic type of stress state: 1, horizontal tension; 2, horizontal shear with tension; 3, horizontal shear; 4, horizontal shear with compression; 5, horizontal compression; 6, vertical shear; (b) the value of the Lode–Nadai coefficient: (1) $\mu_\sigma < -0.6$; (2) $\mu_\sigma < -0.2$; (3) $-0.2 \leq \mu_\sigma < 0.2$; (4) $\mu_\sigma \geq 0.2$; (5) $\mu_\sigma \geq 0.6$; (c) maximum horizontal compression axes. The images are obtained from the Internet resource of the IFZ RAN (“Tectonic stress of the Eurasia”).

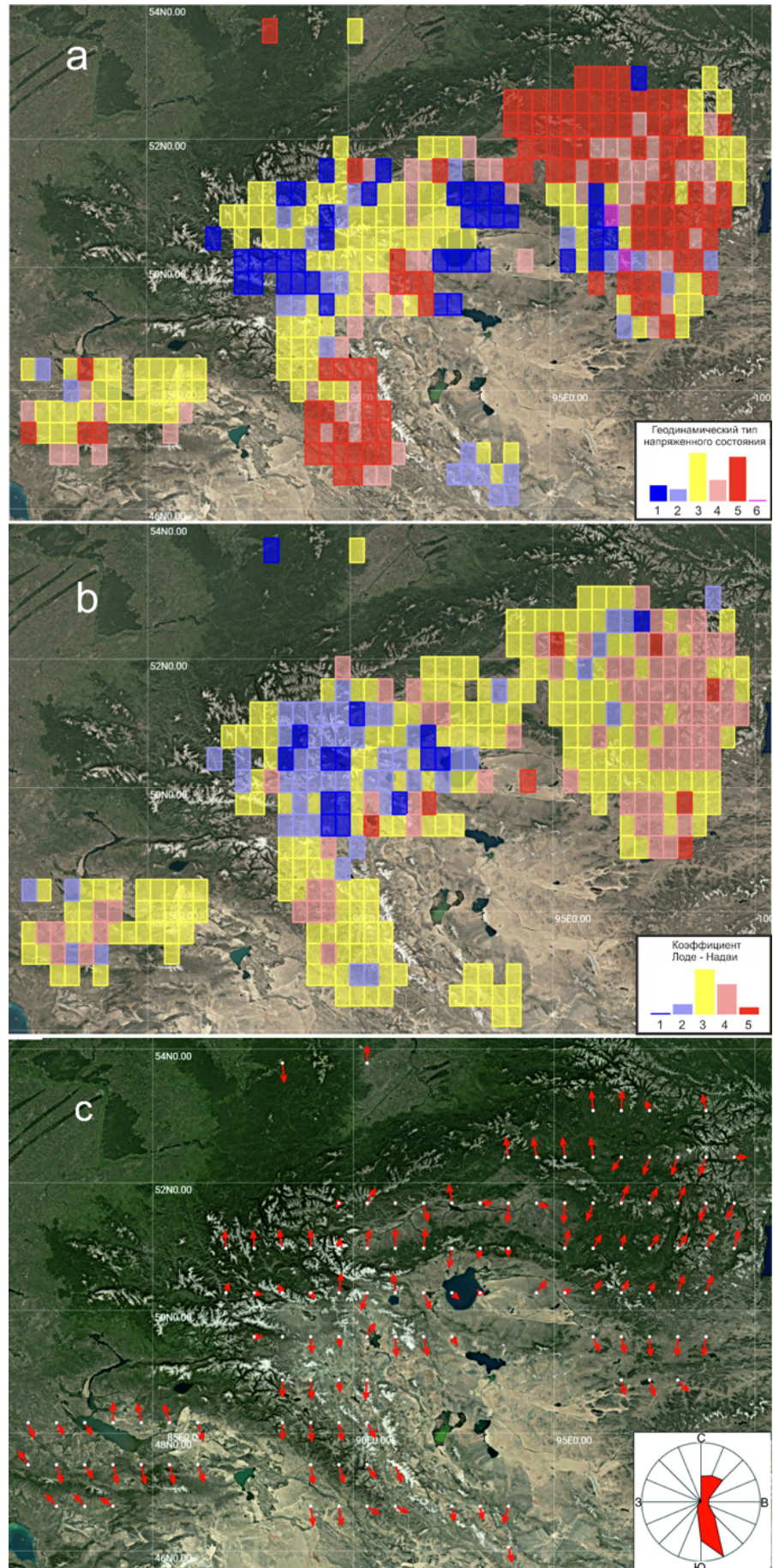


Рис. 6. Результаты, полученные в работе [8] на основе анализа 308 землетрясений: (а) геодинамический тип напряженного состояния; (б) значение коэффициента Лодэ-Надаи; (с) оси наибольшего горизонтального сжатия. Остальные обозначения см. в подписи к рис. 5.

Fig. 6. The results obtained in [8] based on the analysis of 308 earthquakes: (a) geodynamic type of stress state; (b) the value of the Lode-Nadai coefficient; (c) maximum compression axes. See also the captions to Figure 5.

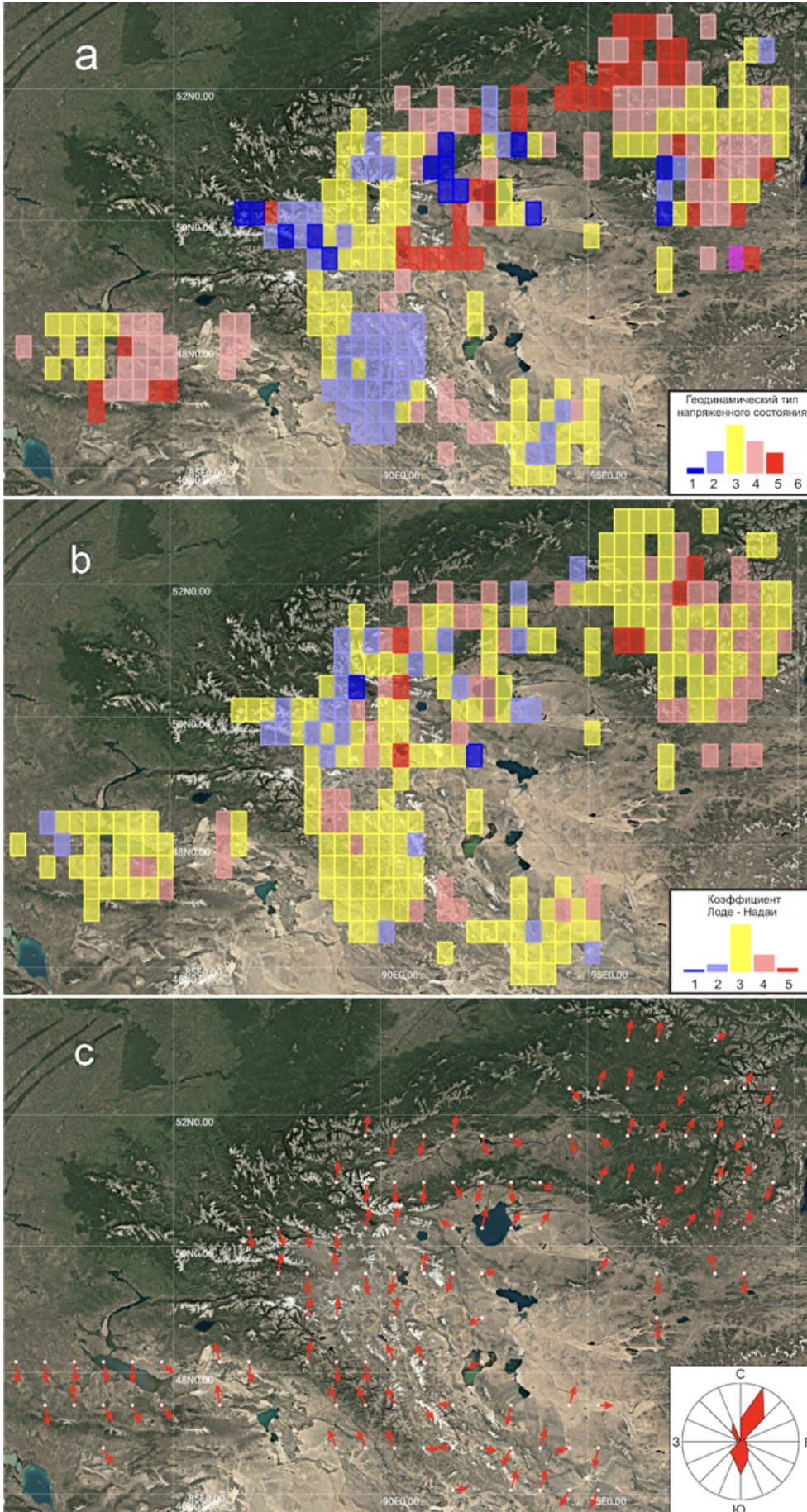


Рис. 7. Новый расчет по модифицированному алгоритму МКА по данным о 308 механизмах очагов землетрясений, использованных в работе [8]: (а) геодинамический тип напряженного состояния; (б) значение коэффициента Лодэ-Надаи; (с) оси наибольшего горизонтального сжатия. См. также подписи к рис. 5.

Fig. 7. A new calculation using the modified MCA algorithm based on 308 earthquake source mechanisms used in [8]: (a) geodynamic type of stress state; (b) the value of the Lode-Nadai coefficient; (c) maximum horizontal compression axes. See also captions to Figure 5.

Отсюда следует, что отмеченные выше разночтения в результатах расчетов (рисунки 5 и 6) связаны именно с алгоритмом нового максимального принципа. Сопоставление рисунков 5, 6, 7 показывает, что различия в ориентации главных напряжений за счет нового максимального принципа имеются, хотя не столь большие, в пределах $15\text{--}25^\circ$ (в отдельных точках отмечено 30°). Этим изменениям достаточно, чтобы в каких-то участках коры сменился тип геодинамического режима, например горизонтальный сдвиг на горизонтальный сдвиг с растяжением или со сжатием.

Заключение

Выполненная для коры Алтая–Саян и ближайших территорий реконструкция природного напряженного состояния по сейсмологическим данным на основе модифицированного алгоритма катакластического метода является следующей после совместной работы с О.А. Кучай в 2012 и 2013 гг. Эти реконструкции различаются не только по набору анализируемых данных (в прежней были использованы данные о фокальных механизмах 308 событий, в новой, финальной версии расчета – 567 событий из 584 собранных), но и по используемым при расчетах алгоритмам МКА.

Расширение банка анализируемых данных позволило выполнить инверсию напряжений с меньшим масштабом усреднения и получить в каждом узле данные для большего числа временных интервалов квазигомогенного напряженного состояния.

Использование новой модификации катакластического метода показало, что она позволяет получать устойчивые ориентации осей главных напряжений, которые лучше согласуются с теорией хрупкого разрушения в рамках подхода Кулон–Мора. Сравнение новой модификации метода со старым алгоритмом показывает, что различия в ориентации осей главных напряжений могут составлять $15\text{--}25^\circ$ и в отдельных случаях достигать 30° .

Полученные данные о напряженном состоянии коры Алтая–Саян следует рассматривать в качестве основы для тектонофизического районирования опасных участков активных разломов по степени опасности генерирова-

ния сильных землетрясений с магнитудой 7.0 и более, аналогично тому, как это сделано для Восточной зоны разломов в Турции [29] и разломов Байкальской рифтовой зоны [30]. Картирование активных разломов по степени опасности позволит выделить наиболее опасные участки и в дальнейшем проводить тектонофизический мониторинг изменения напряженного состояния и осуществлять наблюдение за движениями поверхности методами дистанционного зондирования.

Список литературы

1. Кучай О.А. 2012. Особенности поля напряжений афтершоковых процессов землетрясений Алтае-Саянской горной области. *Geodynamics & Tectonophysics*, 3(1): 59–68. <https://doi.org/10.5800/gt-2012-3-1-0062>
2. Цибульчик И.Д. 1975. Некоторые результаты исследования напряженного состояния в очагах землетрясений Алтая и Саян. В кн.: *Сейсмичность Алтае-Саянской области* (отв. ред. А.В. Гайский): сб. науч. трудов. Новосибирск: ИГиГ СО АН СССР, с. 48–56.
3. Жалковский Н.Д., Кучай О.А., Мучная В.И. 1995. Сейсмичность и некоторые характеристики напряженного состояния земной коры Алтае-Саянской области. *Геология и геофизика*, 36(10): 20–30.
4. Кузнецова К.И., Лукина Н.В., Кучай О.А. 1999. Деформации земной коры и верхней мантии: проблема взаимообусловленности (Алтае-Саянская область). *Вулканология и сейсмология*, 4-5: 41–49.
5. Гольдин С.В., Кучай О.А. 2007. Сейсмоструктурные деформации Алтае-Саянской сейсмоактивной области и элементы блочно-коллизонной геодинамики. *Геология и геофизика*, 48(7): 692–723.
6. Гольдин С.В., Кучай О.А. 2008. Сейсмоструктурные деформации в окрестности сильных землетрясений Алтая. *Физическая мезомеханика*, 11(1): 5–13.
7. Сычева Н.А. 2023. Исследование сейсмоструктурных деформаций земной коры Алтае-Саянской горной области. Часть I. *Геосистемы переходных зон*, 7(3): 223–242. <https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.3.223-242>; <https://www.elibrary.ru/kttdqi>
8. Ребецкий Ю.Л., Кучай О.А., Маринин А.В. 2013. Напряженное состояние и деформации земной коры Алтае-Саянской горной области. *Геология и геофизика*, 54(2): 271–291.
9. Лескова Е.В., Еманов А. А. 2014. Некоторые свойства иерархической модели напряженного состояния эпицентральной области Чуйского землетрясения 2003 г. *Физика Земли*, 3: 92–102.

10. Лескова Е.В., Еманов А.А. **2013**. Изменение поля тектонических напряжений с глубиной и во времени (по данным сейсмологического мониторинга 2003–2012 гг.). В кн.: *Материалы третьей молодежной школы-семинара. Т. 1. Современная тектонофизика. Методы и результаты*, с. 187–193.
11. Кучай О.А., Бушенкова Н.А. **2009**. Механизмы очагов землетрясений Центральной Азии. *Физическая мезомеханика*, 12(1): 17–24. EDN: OALPEF
12. Саньков В.А., Парфеевец А.В. **2020**. Кайнозойское напряженное состояние земной коры Монголии по геолого-структурным данным (обзор). *Геодинамика и тектонофизика*, 11(4): 722–742. <https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-4-0503>
13. Karagianni I., Papazachos C.B., Scordilis E.M., Karakaisis G.F. **2015**. Reviewing the active stress field in Central Asia by using a modified stress tensor approach. *Journal of Seismology*, 19(2): 541–565. <https://doi.org/10.1007/s10950-015-9481-4>
14. Heidbach O., Rajabi M., Cui X., Fuchs K., Müller B., Reinecker J., Reiter K., Tingay M., Wenzel F., Xie F., Ziegler M.O., Zoback M., Zoback M. **2018**. The World Stress Map database release 2016. Crustal stress pattern across scales. *Tectonophysics*, 744: 484–498. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2018.07.007>
15. Ребецкий Ю.Л. **1997**. Реконструкция тектонических напряжений и сейсмотектонических деформаций: методические основы, поле современных напряжений Юго-Восточной Азии и Океании. *Доклады АН*, 354(1): 101–104.
16. Землетрясения Северной Евразии. URL: <http://www.gsras.ru/zse/contents.html>
17. Землетрясения России ...: Ежегодник. URL: <http://www.gsras.ru/zr/>
18. Кучай О.А. **2013**. Параметры механизмов очагов землетрясений Алтае-Саянской области: Свидетельство о государственной регистрации базы данных: Свид-во о прогр. RU 2013620060. № 20126211; заявл. 01.11.2012; опублик. 09.01.2013.
19. Радзиминович Н.А. **2021**. Механизмы очагов землетрясений юга Байкальского региона и Северной Монголии. *Геодинамика и тектонофизика*, 12(4): 902–908. <https://doi.org/10.5800/GT-2021-12-4-0562>
20. Еманов А.Ф., Еманов А.А., Лескова Е.В., Колесников Ю.И., Янкайтис В.В., Филина А.Г. **2012**. Урэг-Нурское землетрясение 15.05.1970 г., Ms = 7.0 (Монгольский Алтай): афтершоковый процесс и особенности современной сейсмичности эпицентральной области. *Геология и геофизика*, 53(10): 1417–1429.
21. Rebetsky Yu.L. **1996**. I. Stress-monitoring: Issues of reconstruction methods of tectonic stresses and seismotectonic deformations. *Journal of Earthquake Prediction Research*, Beijing (China), 5(4): 557–573.
22. Rebetsky Yu.L., Mikhailova A.V., Rosanova G.V., Fursova E.V. **1997**. II. Stress-monitoring: The modern field of regional stresses in South-East Asia and Oceania. Principles of quasiplastic deforming of fractured media. *Journal of Earthquake Prediction Research*, Beijing (China), 6(1): 11–36.
23. Ребецкий Ю.Л., Лермонтова А.С. **2016**. Учет закритического состояния геосреды и проблема дальнедействующего влияния очагов землетрясений. *Вестник КРАУНЦ, Науки о Земле*, 4(32): 115–123.
24. Ребецкий Ю.Л., Лермонтова А.С. **2018**. О проблеме дальнедействующего влияния очагов землетрясений. *Вулканология и сейсмология*, 5: 53–66.
25. Ребецкий Ю.Л. **2003**. Развитие метода катакластического анализа сколов для оценки величин тектонических напряжений. *Доклады, РАН*, 388(2): 237–241.
26. Rebetsky Yu.L., Polets A.Yu. **2018**. The method of cataclastic analysis of discontinuous displacements. In: *Moment tensor solutions – A useful tool for seismotectonics*. Ed. Sebastiano D’Amico. Springer, p. 111–162. https://doi.org/10.1007/978-3-319-77359-9_6
27. Макаров П.В., Еремин М.О. **2013**. Модель разрушения хрупких и квазихрупких материалов и геосред. *Физическая мезомеханика*, 16(1): 5–26. EDN: PYVJGJ
28. Stefanov Yu.P., Chertov M.A., Aidagulov G.R., Myasnikov A.V. **2011**. Dynamics of inelastic deformation of porous rocks and formation of localized compaction zones studied by numerical modeling. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 59(11): 2323–2340. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2011.08.002>
29. Тихоцкий С.А., Татевосян Р.Э., Ребецкий Ю.Л., Овсяченко А.Н., Ларьков А.С. **2023**. Караманрашские землетрясения 2023 г. в Турции: сейсмическое движение по сопряженным разломам. *Доклады АН*, 511(2): 228–235. <https://doi.org/10.31857/S2686739723600765>
30. Rebetsky Yu.L., Dobrynina A.A., Sankov V.A. **2024**. Tectonophysical zoning of active faults of the Baikal Rift System. *Geodynamics & Tectonophysics*, 15(4): 0775. (In Russ.). <https://doi.org/10.5800/gt-2024-15-4-0775>; EDN: LSSFVG

References

1. Kuchai O.A. **2012**. Specific features of fields of stresses associated with aftershock processes in the Altai-Sayan mountainous region. *Geodynamics & Tectonophysics*, 3(1): 59–68. (In Russ.). <https://doi.org/10.5800/gt-2012-3-1-0062>
2. Tsibulchik I.D. **1975**. Some results of the study of the stress state in the earthquake foci of Altai and Sayan. In: Gaisky A.V. (Ed.) *Seismicity of the Altai-Sayan region: Collection of scientific papers*. Novosibirsk: IGIG SO AN SSSR, p. 48–56.

3. Zhalkovsky N.D., Kuchai O.A., Muchnaya V.I. **1995**. [Seismicity and some characteristics of the stress state of the earth's crust in the Altai-Sayan region]. *Geology and Geophysics*, 36(10): 20–30. (In Russ.).
4. Kuznetsova K.I., Lukina N.V., Kuchai O.A. **1999**. Deformation of Earth crust and upper mantle: the problem of interdependence (Altai-Sayany area). *Volcanology and seismology*, 4-5: 41–49. (In Russ.).
5. Gol'din S.V., Kuchai O.A. **2007**. Seismic strain in the Altai-Sayan active seismic area and elements of collisional geodynamics. *Russian Geology and Geophysics*, 48(7): 536–557. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2007.06.005>
6. Gol'din S.V., Kuchai O.A. **2008**. Seismotectonic strains in the vicinity of severe Altai earthquakes. *Physical mesomechanics*, 11(1): 5–13. (In Russ.).
7. Sycheva N.A. **2023**. Study of seismotectonic deformations of the Earth's crust in the Altai-Sayan mountain region. Pt I. *Geosistemy perednykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 7(3): 223–242. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.3.223-242>; <https://www.elibrary.ru/ktttdq>
8. Rebetsky Yu.L., Kuchai O.A., Marinin A.V. **2013**. Stress state and deformations of the Earth's crust in the Altai-Sayan mountain region. *Russian Geology and Geophysics*, 54(2): 206–222. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2013.01.011>
9. Leskova E.V., Emanov A.A. **2014**. Some properties of the hierarchical model reproducing the stress state of the epicentral area of the 2003 Chuya earthquake. *Izv., Physics of the Solid Earth*, 50(3): 393–402. <https://doi.org/10.1134/S1069351314030057>
10. Leskova E.V., Emanov A.A. **2013**. [Change in tectonic stress field with depth and time (according to 2003–2012 seismological monitoring data)]. In: *Materialy tret'ei molodezhnoi shkoly seminara. Vol. 1. Modern tectonophysics. Methods and results*, p. 187–193. (In Russ.).
11. Kuchay O.A., Bushenkova N.A. **2009**. Earthquake focal mechanisms in Central Asia. *Physical mesomechanics*, 12(1): 17–24. (In Russ.).
12. Sankov V.A., Parfeevets A.V. **2020**. The Cenozoic crustal stress state of Mongolia according to geological and structural data (Review). *Geodynamics & Tectonophysics*, 11(4): 722–742. (In Russ.). <https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-4-0503>
13. Karagianni I., Papazachos C.B., Scordilis E.M., Karakaisis G.F. **2015**. Reviewing the active stress field in Central Asia by using a modified stress tensor approach. *Journal of Seismology*, 19(2): 541–565. <https://doi.org/10.1007/s10950-015-9481-4>
14. Heidbach O., Rajabi M., Cui X., Fuchs K., Müller B., Reinecker J., Reiter K., Tingay M., Wenzel F., Xie F., Ziegler M.O., Zoback M., Zoback M. **2018**. The World Stress Map database release 2016. Crustal stress pattern across scales. *Tectonophysics*, 744: 484–498. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2018.07.007>
15. Rebetsky Yu.L. **1997**. Reconstruction of tectonic stresses and seismotectonic strains: Methodical fundamentals, current stress field of Southeastern Asia and Oceania. *Doklady AN = Proceedings of the Academy of Sciences*, 354(4): 560–563.
16. *Earthquakes of Northern Eurasia*. URL: <http://www.gsras.ru/zse/contents.html>
17. *Earthquakes of Russia: Yearbook*. URL: <http://www.gsras.ru/zr/>
18. Kuchai O.A. **2013**. Parameters of earthquake focal mechanisms in the Altai-Sayan region: Certificate of state registration of the database: Certificate of program RU 2013620060. No. 20126211, declared 01.11.2012, publ. 09.01.2013. (In Russ.).
19. Radziminovich N.A. **2021**. Focal mechanisms of earthquakes of Southern Baikal Region and Northern Mongolia. *Geodynamics & Tectonophysics*, 12(4): 902–908. (In Russ.). <https://doi:10.5800/GT-2021-12-4-0562>
20. Emanov A.F., Emanov A.A., Leskova E.V., Kolesnikov Y.I., Yankaitis V.V., Filina A.G. **2012**. The $M_s = 7.0$ Uureg Nuur earthquake of 15.05.1970 (Mongolian Altai): The aftershock process and current seismicity in the epicentral area. *Russian Geology and Geophysics*, 53(10): 1090–1099. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2012.08.009>
21. Rebetsky Yu.L. **1996**. I. Stress-monitoring: Issues of reconstruction methods of tectonic stresses and seismotectonic deformations. *Journal of Earthquake Prediction Research*, Beijing (China), 5(4): 557–573.
22. Rebetsky Yu.L., Mikhailova A.V., Rosanova G.V., Fursova E.V. **1997**. II. Stress-monitoring: The modern field of regional stresses in South-East Asia and Oceania. Principles of quasiplastic deforming of fractured media. *Journal of Earthquake Prediction Research*, Beijing (China), 6(1): 11–36.
23. Rebetsky Yu.L., Lermontova A.S. **2016**. Registration of supercritical conditions of geologic environment and challenges in earthquake source remote sensing. *Vestnik KRAUNTS. Nauki o Zemle = Earth Sciences Bulletin of KRAESC*, 4(32): 115–123. (In Russ.).
24. Rebetsky Yu.L., Lermontova A.S. **2018**. On the long-range influence of earthquake rupture zones. *Journal of Volcanology and Seismology*, 12: 341–352. <https://doi.org/10.1134/s0742046318050068>
25. Rebetskii Yu.L. **2003**. Development of the method of cataclastic analysis of shear fractures for tectonic stress estimation. *Doklady Earth Sciences*, 388(1): 72–76.

26. Rebetsky Yu.L., Polets A.Yu. **2018**. The method of cataclastic analysis of discontinuous displacements. In: *Moment tensor solutions – A useful tool for seismotectonics*. Ed. Sebastiano D’Amico. Springer, p. 111–162. https://doi.org/10.1007/978-3-319-77359-9_6
27. Makarov P.V., M.O. Eremin M.O. **2013**. Fracture model of brittle and quasi-brittle materials and geomechanics. *Physical mesomechanics*, 16: 207–226. <https://doi.org/10.1134/s1029959913030041>
28. Stefanov Yu.P., Chertov M.A., Aidagulov G.R., Myasnikov A.V. **2011**. Dynamics of inelastic deformation of porous rocks and formation of localized compaction zones studied by numerical modeling. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 59(11): 2323–2340. <https://doi.org/10.1016/j.jmps.2011.08.002>
29. Tikhotsky S.A., Tatevosyan R.E., Rebetsky Yu.L., Ovsyuchenko A.N., Larkov A.S. **2023**. The 2023 Kahramanmaraş earthquakes in Turkey: Seismic movements along conjugated faults. *Doklady Earth Sciences*, 511: 703–709. <https://doi.org/10.1134/s1028334x23600974>
30. Rebetsky Yu.L., Dobrynina A.A., Sankov V.A. **2024**. Tectonophysical zoning of active faults of the Baikal Rift System. *Geodynamics & Tectonophysics*, 15(4): 0775. (In Russ.). <https://doi.org/10.5800/gt-2024-15-4-0775>; EDN: LSSFVG

Об авторах

Ребецкий Юрий Леонидович (<https://orcid.org/0000-0003-3492-2452>), доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией тектонофизики, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия, reb@ifz.ru

Сычева Найля Абдулловна (<https://orcid.org/0000-0003-0386-3752>), кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия, ivtran@mail.ru

Поступила 05.11.2024

Принята к публикации 12.12.2024

About the Authors

Rebetsky, Yuri L. (<https://orcid.org/0000-0003-3492-2452>), Doctor of Physics and Mathematics, Head of the Laboratory of tectonophysics, Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, reb@ifz.ru

Sycheva, Naylya A. (<https://orcid.org/0000-0003-0386-3752>), Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Senior Researcher, Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, ivtran@mail.ru

Received 5 November 2024

Accepted 12 December 2024