

УДК 551.432(235.222)

## ПАРАГЕНЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СЕТИ НОВЕЙШИХ РАЗРЫВНЫХ НАРУШЕНИЙ ЦЕНТРАЛЬНОГО АЛТАЯ<sup>#</sup>

© 2025 г. И. С. Новиков<sup>1,\*</sup>, К. Ж. Семинский<sup>2,\*\*</sup>, А. А. Кривов<sup>3,\*\*\*</sup>

<sup>1</sup> Институт геологии и минералогии имени В. С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup> Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

<sup>3</sup> Новосибирское высшее военное командное училище МО РФ, Новосибирск, Россия

\* E-mail: novikov@igm.nsc.ru

\*\* E-mail: seminsky@crust.irk.ru

\*\*\* E-mail: krivov\_ka@mail.ru

Поступила в редакцию 13.03.2024 г.

После доработки 19.07.2024 г.

Принята к публикации 25.09.2024 г.

Для центральной части Горного Алтая на базе крупномасштабной геоморфологической съемки проведено выделение сети новейших разрывных нарушений, движения по которым формируют основные черты современного рельефа. Проведен парагенетический анализ выделенных новейших разломов. Его результат с реконструкцией трех полей напряжений оказался удовлетворяющим формальным критериям достоверности. В целом результаты парагенетического анализа подтверждают предварительный вывод о формировании разломной сети Центрального Алтая в трех динамических обстановках. Они позволили построить схемы разрывов, активных в каждом из трех реконструированных полей напряжений. Судя по результатам проведенного анализа, породный массив центральной части Горного Алтая находится на третьей стадии разрушения, когда отдельные разрывы соединяются в законченную сеть разломов с характерным структурным рисунком и земная кора представляет систему блоков, контактирующих по разломам. Блоковая делимость Центрального Алтая формируется системой разломов, образующих ансамбль правостороннего сдвига. По мере укрупнения масштаба исследований количество выделяемых разломов увеличивается. При региональных исследованиях с составлением карт неотектоники в масштабе 1:1000 000 выделяются только границы крупных блоков, выраженных в рельефе в виде основных хребтов и впадин. При локальных исследованиях на неотектонических картах масштаба 1:50000 выделяется разломная сеть, ограничивающая блоки, являющиеся составными частями хребтов и впадин. В центральной части Горного Алтая она повторяет на более низком иерархическом уровне закономерности структурного рисунка неотектонического и орографического строения Большого Алтая — правые сдвиги северо-западного простираения, взбросы субширотного простираения и зоны растяжения с преобладающим субмеридиональным простираением. Парагенетический анализ позволил с высокой надежностью реконструировать кинематические характеристики новейших разломов Центрального Алтая по их положению в структурном ансамбле. Полученные схемы новейших разломов в совокупности с характером реконструированных обстановок могут служить основой для дальнейшего обсуждения механизмов деструкции коры в регионе с привлечением сейсмологических, GPS-геодезических и других материалов.

**Ключевые слова:** Алтай; неотектоника; новейшие разломы; кинематический анализ; тектонофизика; структурный ансамбль; морфотектоника

**DOI:** 10.31857/S2949178925020092; **EDN:** GQEBWR

<sup>#</sup> Ссылка для цитирования: Новиков И. С., Семинский К. Ж., Кривов А. А. (2025) Парагенетический анализ сети новейших разрывных нарушений Центрального Алтая. *Геоморфология и палеогеография*. Т. 56. № 2. С. 307–322. <https://doi.org/10.31857/S2949178925020092>; <https://elibrary.ru/GQEBWR>

## ВВЕДЕНИЕ

В орографическом отношении Большой Алтай представляет горную систему, протягивающуюся в северо-западном направлении на 1100 км со средней шириной около 180 км. На севере ширина горной системы увеличивается до 300 км, в районе южного окончания — уменьшается до 100 км. Традиционно Большой Алтай делится на северную часть — Горный Алтай и южную — Монгольский Алтай. Горный Алтай разделяется на Северо-Восточный, Северо-Западный, Юго-Восточный и Юго-Западный (Рудный). На стыке этих районов Горного Алтая мы выделяем Центральный Алтай, характеризующийся наиболее сложным геоморфологическим и неотектоническим строением.

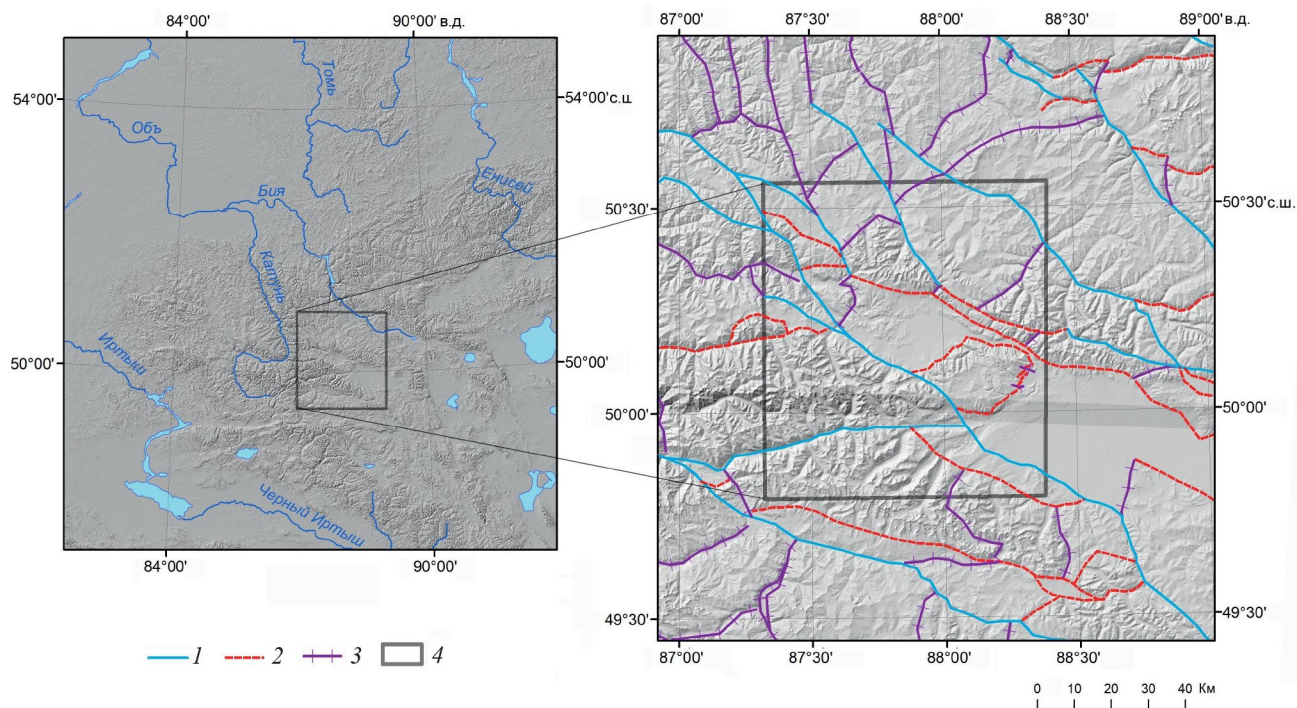
В тектоническом отношении Большой Алтай представляет мобильную зону, которая с севера и юга граничит со стабильными блоками (Западно-Сибирским и Джунгарским), сближающимися на протяжении как минимум последних 2 млн лет (Novikov, Sokol, 2007) под воздействием субмеридионального сокращения со скоростью около 4 мм/год, с правосторонним проскальзыванием (England, Molnar, 1997; 2005; Yang et al., 2005). Поскольку правосторонние смещения происходят по разломам северо-западного простирания, ориентированным под углом 45° и более к оси сжатия, средние скорости смещения по ним на неотектоническом этапе существенно выше 4 мм/год, что фиксируется геологическими данными (Трифонов, 1985; Трифонов, Макаров, 1988; Ding Guoyu, 1984; Shi Jianbang et al., 1984). Сжатие связано с процессом Индо-Евразийской коллизии, в ходе которой горизонтальное смещение Индо-Австралийской плиты на север относительно Евразийской составляет 50–60 мм/год. Поглощаясь за счет выдавливания коровых масс в мобильных зонах Гималаев, Тянь-Шаня и Алтая в верхнее и нижнее полупространство, амплитуда горизонтального смещения скачкообразно снижается с юга на север до 10–25 мм/год для Таримского и до первых мм/год для Джунгарского блоков (Calais et al., 2006; Zhao et al., 2015). Поскольку мобильная зона Большого Алтая имеет северо-западное простирание и косо ориентирована к субмеридиональной оси сжатия, по мобильной зоне происходит правостороннее сдвиговое смещение в северо-западном направлении на 1–2 мм/год (Тимофеев и др., 2019). Во время катастрофических сейсмических событий скорость смещения увеличивается на несколько порядков. Так, в ходе Чуйского землетрясения 2003 г. практически одномоментное смещение по зоне правого сдвига составило на линии разлома до 3–4 м (Высоцкий и др., 2021), на удалении 14 км — 0.3 м, на удалении 84 км — 0.02 м (Тимофеев и др., 2019).

Сжатие генерирует формирование субпараллельных простиранию мобильной зоны Большого Алтая системы новейших правых сдвигов, которые сопровождаются ансамблями стандартных оперяющих структур сжатия и растяжения (Новиков, 2001). Они разделяют земную кору мобильной зоны на отдельные блоки, формирующие основу орографической структуры территории, и определяют ее высокую сейсмичность (рис. 1). Хорошая геоморфологическая выраженность неотектонических дизъюнктивов позволяет отличать их от разрывных структур более ранних эпох активизации, неоднократно проявлявшихся в позднем палеозое и мезозое (Новиков, 2013), а также определять амплитуды смещения по ним на новейшем этапе. Проблема определения смещений по новейшим разломам геологическими методами связана с многократной активизацией в позднем палеозое, мезозое и кайнозое территории Алтае-Саянской горной области в разных полях напряжений (Жимулев и др., 2021), когда по одним и тем же структурным зонам происходили смещения в противоположном направлении (Новиков и др., 2023).

Новейшие разломы на территории Большого Алтая, начиная с работ В.А. Обручева (1915), выделяются по геоморфологическим данным. Они выражены в рельефе как протяженные уступы и прямолинейные участки дренажной сети решетчатого рисунка. Геоморфологическими методами надежно устанавливаются протяженность разломов и вертикальная амплитуда смещения по ним. Соотношение этих характеристик в ряде случаев свидетельствует о кинематике разломов. Протяженные структуры северо-западного простирания с вертикальными амплитудами только на транспрессионных изгибах — правые сдвиги, оперяющие их короткие разломы северного простирания с вертикальным смещением — сбросы или без смещения — раздвиги (микрограбены). Оперения западного простирания с существенными вертикальными амплитудами — взбросы и надвиги. Последние обычно образуют уступы на границах хребтов и межгорных впадин, остальные структуры выражены в рельефе в виде прямолинейных или слабоизогнутых широких долин.

Система разрывных нарушений, реконструированных по основным долинам и уступам в рельефе Горного Алтая, наряду с установленной ситуацией регионального сжатия по оси север–юг, полностью укладывается в структурный ансамбль “конского хвоста”, характерный для окончаний сдвиговых зон.

Горизонтальные смещения по новейшим разломам устанавливаются только в отдельных случаях по параметрам косейсмических разрывов сильных землетрясений, при пересечении их горными вы-



**Рис. 1.** Положение изученной территории в неотектонической структуре Горного Алтая.

*Новейшие разломы по (Новиков и др., 2014) с изменениями: 1 – правые сдвиги и взбросо-сдвиги, 2 – взбросы и надвиги, 3 – сбросы и раздвиги; 4 – территория проведения парagenетического анализа.*

**Fig. 1.** The position of the studied area in the neotectonic structure of the Altai Mountains.

*Cenozoic faults (according to Novikov et al., 2014) with modifications: 1 – right strike-slip faults and strike-slip reverse faults, 2 – reverse faults, 3 – normal faults; 4 – territory of paragenetic analysis.*

работками или по коленообразным смещениям элементов гидросети. В остальных случаях кинематические характеристики отдельных разломов реконструируются исходя из их положения в структурном ансамбле.

Системоформирующие магистральные правые сдвиги имеют максимальные амплитуды смещения (и максимальный сейсмический потенциал). Непосредственное измерение амплитуд смещения обычно затруднено из-за значительности этих смещений, осложняющих идентификацию маркирующих геоморфологических элементов. Судя по амплитудам сопряженных с ними сдвигов меньшего порядка, достигающим 5–10 км, смещение по магистральным сдвигам может на отдельных участках достигать 20–30 км.

Единственным геоморфологическим способом определения амплитуд сдвигов является анализ коленообразных в плане деформаций элементов гидросети. Для этого эрозионная долина должна пересекать разрыв со сдвиговой составляющей. Для крупных сдвигов это нереализуемо, поскольку вдоль их простираения формируются основные долины и другие эрозионные долины их не пересе-

кают, а вот горизонтальные амплитуды оперяющих сдвигов, которые пересекаются долинами притоков, определяются вполне уверенно (см. Новиков, 2004, рис. 48, 60–62).

Вертикальное смещение по оперяющим взбросам и надвигам составляет обычно 300–700 м. Судя по имеющимся данным, полученным при изучении штолен Акташского ртутного рудника (Бондаренко, 1976), горизонтальное перемещение по взбросам и надвигам может достигать 1100–2300 м. Горизонтальные смещения по структурам растяжения определяются труднее всего, поскольку они активно используются агентами эрозии при формировании долин. У большей части структур они, по-видимому, не превышают первых сотен метров. Вертикальная составляющая смещений при этом обычно близка к нулю.

Предположения о наличии горизонтальных новейших движений на отдельных участках Горного Алтая начали появляться еще в 1970-е гг. (Дергунов, 1972). Определяющая роль протяженных правосторонних сдвигов в неотектонической структуре региона была установлена на территории Монгольского Алтая в 1980-х гг. (Трифонов, 1985; Хилько и др.,

1985; Трифонов, Макаров, 1988; Ding Guoyu, 1984; Shi Jianbang et al., 1984). В середине 1990-х гг. были сформулированы представления о неотектонике Горного Алтая как о структуре “конского хвоста” на северо-западном окончании правосдвиговых зон Монгольского Алтая (Новиков, 1996), и проведены детальные структурно-геологические работы, полностью подтвердившие правосдвиговый характер смещений по его “магистральным разломам” северо-западного простирания (Cunningham et al, 1996).

## ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проведенное ранее выделение сети новейших разломов по степени детальности примерно соответствует масштабу 1:500000. При более детальных работах на базе геоморфологического картографирования в масштабе 1:50000 достоверность выделения позиции новейших разрывных нарушений резко возрастает. Однако при этом кратно увеличивается количество “немых” элементов, для которых нет достаточных геологических и геоморфологических данных для определения кинематического типа. Геоморфологическая съемка в крупном масштабе надежно выделяет все выражающиеся в масштабе линии новейших нарушений, но их количество и разнообразие простираний увеличиваются до такой степени, что интерпретировать их кинематику в рамках модели, примененной для структур 1-го порядка, становится невозможно. В связи с этим был использован парагенетический анализ разрывной сети, который проводился в два этапа. На первом из них для получения независимой объективной кинематической картины не использовались оценки типа смещения даже там, где они базировались на структурно-геологических данных. Анализировался исключительно плановый рисунок сети разрывных нарушений. На втором этапе парагенетические построения базировались на ориентации систем разрывов, кинематика которых была определена при геоморфологическом картографировании.

Таким образом, целью данной работы была верификация методом парагенетического анализа представлений о характере новейших тектонических движений Большого Алтая. Результаты были получены в ходе мелкомасштабных исследований на основе анализа разломной сети, выявленной для территории Центрального Алтая при проведении геоморфологического картографирования в масштабе 1:50000.

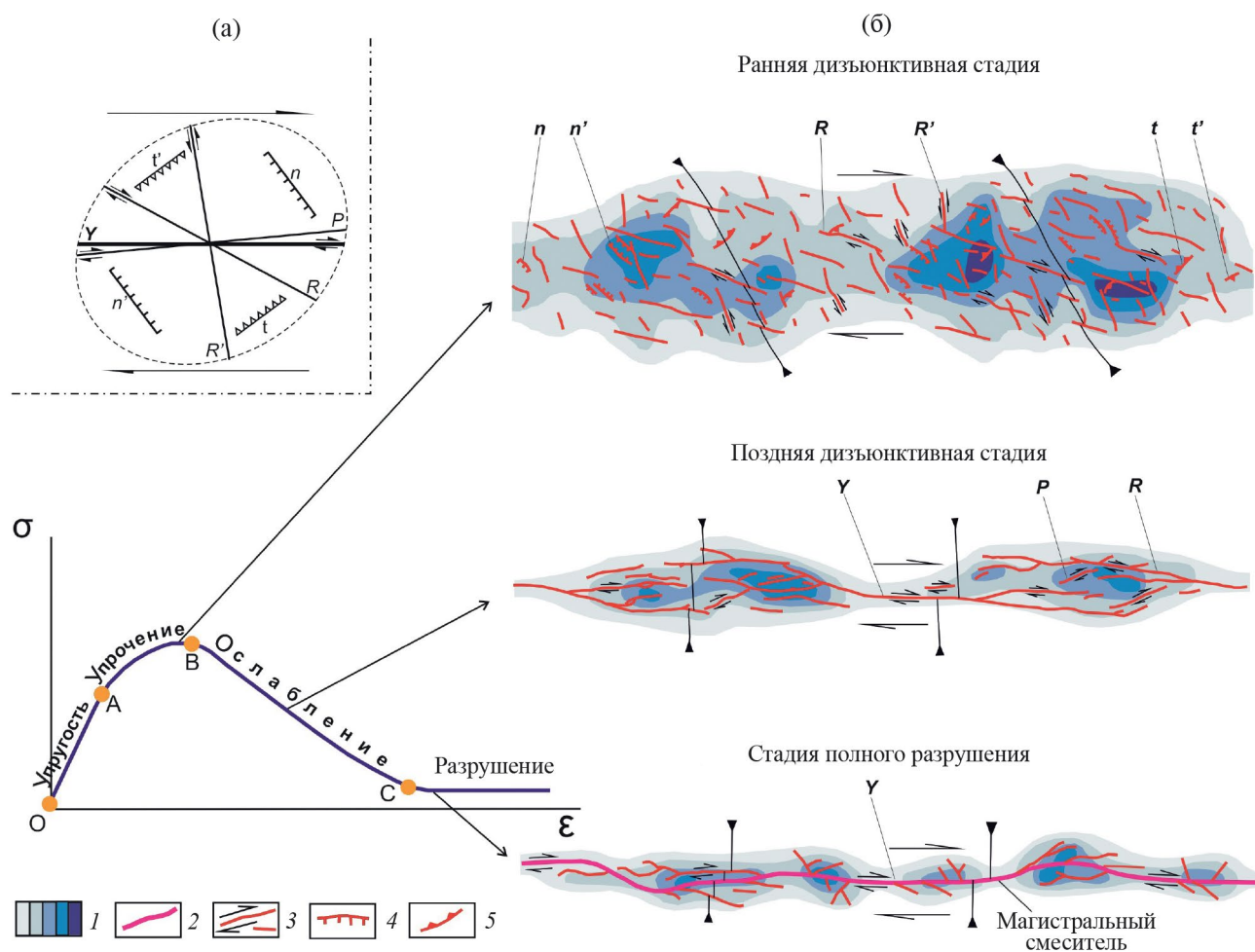
## МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основу внутренней структуры разломных зон разного кинематического типа составляет параге-

незис из трех примерно перпендикулярных друг другу систем трещин (Семинский, 1994; 2003), который формируется следующим образом. В зонах разломов небольшие объемы пород, находящиеся в условиях трехосного сжатия, вначале разрушаются с образованием двух сопряженных систем трещин — опережающих сколов Риделя. По данным массовых измерений вблизи разломных сместителей среднее значение двугранного угла при оси сжатия для классической пары сопряженных трещин равно  $\sim 80^\circ$ , так как в верхней коре угол скалывания, составляя в момент их возникновения  $\sim 35^\circ$ , увеличивается в ходе последующей деформации до  $45^\circ$  и более. После возникновения сколовых систем трещин в условиях характерного для разломных зон транспрессивного скалывания, когда напряженное состояние массива близко к осесимметрическому с примерным равенством абсолютных значений двух главных нормальных напряжений, происходит их переиндексация — изменение величин при сохранении направлений действия. Резкое падение напряжений приводит к формированию в этом новом поле напряжений не двух сколовых, а одной отрывной системы трещин, которая перпендикулярна простиранию образовавшихся ранее сколов. Процесс продолжается в виде циклов, когда накапливающиеся в разломной зоне напряжения снимаются за счет подвижек по сети уже возникших трещин. При этом характер перемещений по разрывам третьей системы будет не раздвиговым (как в момент возникновения), а сколовым, так как их ориентация совпадает с направлением транспортировки вещества при подвижках по нарушениям двух первых систем. Двойственная (скол—отрыв) природа третьей системы трещин, которая зачастую подтверждена наличием вещественного заполнителя и штрихов скольжения, отражает специфику стадийного формирования парагенезиса, составляющего внутреннюю структуру небольших разломных зон.

При переходе от уровня трещиноватости к разломам имеет место усложнение парагенезиса вторичных разрывов, в качестве которых выступают уже не трещины, а мелкие разломы (Семинский, 2003). Внутренняя структура разломных зон формируется в течение трех главных стадий, особенности которых показаны на рис. 2 на примере правого сдвига, так как подобная кинематика доминирует в истории разрывообразования для рассматриваемого региона.

На ранней дизъюнктивной стадии переиндексация осей напряжений, реализующаяся в зоне при деформации транспрессивного скалывания, приводит к формированию не одной отрывной (как на уровне трещин), а пары сопряженных сколовых



**Рис. 2.** Тектонофизические основы парагенетического анализа разломных зон (на примере правого сдвига): (а) – обобщенная диаграмма, иллюстрирующая системы эшелонированных разрывов, которые образуются в разломной зоне при простом скалывании (по (Шерман и др., 1983; Tchalenko, 1970; Wilcox et al., 1973; Harding, 1974; Hancock, 1985; Naylor et al., 1986; Sylvester, 1988; Kim et al., 2004) и др.):  $Y$ ,  $R'$ ,  $R$  и  $P$  – сдвиги;  $n'$  и  $n$  – сбросы;  $t'$  и  $t$  – взбросы; (б) – принципиальная схема формирования внутренней структуры разломной зоны. Главные стадии разрывообразования соответствуют трем характерным отрезкам на кривой “нагрузка ( $\sigma$ ) – деформация ( $\epsilon$ )” (Семинский, 2003; 2014).

1 – участки с различным количеством разрывов в единице площади; 2 – магистральный сместитель (разрыв 1-го порядка); разрывы 2-го порядка: 3 – сдвиги, 4 – сбросы, 5 – надвиги.

**Fig. 2.** Tectonophysical foundations of paragenetic analysis at the fault zones (using the example of dextral strike-slip): (a) – generalized diagram illustrating the sets of echelon fractures that form in a fault zone during simple shear [according to (Tchalenko, 1970; Wilcox et al., 1973; Harding, 1974; Sherman et al., 1983; Hancock, 1985; Naylor et al., 1986; Sylvester, 1988; Kim et al., 2004; et al.)]:  $Y$ ,  $R'$ ,  $R$  и  $P$  – strike-slip faults;  $n'$  и  $n$  – normal faults;  $t'$  и  $t$  – reverse faults; (b) – scheme of the formation of the internal structure of the fault zone. Main stages of faulting correspond to three segments of the ‘load ( $\sigma$ ) vs deformation ( $\epsilon$ )’ curve (Seminsky, 2014; 2015).

1 – sites with various quantities of fractures per square unit; 2 – main fault plane (fracture of the 1st order); fractures of the 2nd order: 3 – strike-slip faults, 4 – normal faults, 5 – thrusts.

систем. Эти разломы опережают появление в зоне магистрального сместителя. Их положение определяется углом  $55^\circ$  между осевой линией зоны и осью сжатия (следствие транспрессии), а также углом скалывания, равным  $\sim 30^\circ$ . После формирования разломов 1-й серии, которыми являются сколы Риделя ( $R'$  и  $R$  на рис. 2), могут образовываться сколы 2-й серии ( $n'$  и  $n$  на рис. 2) или сколы 3-й серии

( $t'$  и  $t$  на рис. 2), соответствующие всем возможным вариантам индексации осей напряжений. Исключение составляет лишь случай переиндексации осей  $\sigma_{сж}$  и  $\sigma_{раст}$ , реализации которого (и, следовательно, изменению типа подвижек в зоне на противоположный) препятствует действие внешних сил.

Эволюция сети перечисленных разрывов приводит к достижению для нагруженного объема



горных пород предела прочности и началу локализации деформации, которая осуществляется на поздней дизъюнктивной стадии развития разломной зоны посредством удлинения *R*-сколов и их сочленения друг с другом за счет формирования *P*-сколов (рис. 2). Это в итоге приводит к формированию магистрального разрыва (*Y*-тип), что свидетельствует о начале стадии полного разрушения, в течение которой в качестве опережающих разрывов обычно активизируются некоторые разломы из систем опережающих разрывов ранних этапов разломообразования.

Таким образом, парагенезис разрывов, формирующийся в течение полного цикла разломообразования, состоит из семи главных систем, так как *P*-сколы (восьмая система) в природных условиях трудно отделить от *Y*-сколов (см. рис. 2). Этот набор разрывных систем является исходным для составления эталонных трафаретов, используемых при структурном анализе в ходе обработки круговых диаграмм трещиноватости и соответствующих разломным зонам, которые формируются в обстановках сдвига, сжатия и растяжения земной коры. Поскольку сдвиги, взбросы и сбросы в механическом отношении подобны (формируются при скалывании), эталонные наборы разрывных систем для зон их влияния являются членами рассматриваемого парагенезиса, ориентированного в пространстве так, чтобы его положение и характер подвижек по семи сколам соответствовали правому или левому сдвигу, а также сбросам и взбросам с разными углами падения. Подобный принцип был использован для составления эталонных диаграмм, каждая из которых представляет полный набор разрывных систем для всех основных типов разломных зон (Семинский, 2003; Бурзунова, 2011): правого и левого сдвигов, взброса с углом падения 55°, надвига с углом падения 15°, сброса с углом падения 75° и сброса с углом падения 35°.

Таким образом, тектонофизические закономерности разрывообразования в зонах транспрессивного скалывания позволяют использовать для парагенетического анализа эталонные трафареты для лево- и правостороннего сдвигов, а также зон сбросов и взбросов с наиболее часто встречающимися углами падения сместителей. При обработке круговых диаграмм трещин сочетание максимумов их полюсов сопоставляется с набором всех показанных на трафарете систем разрывов. При исследованиях на разломном уровне иерархии учитываются только разломы 2-го порядка в зоне дизъюнктива более крупного ранга. На данном иерархическом уровне при отсутствии информации об углах падения сместителей анализ может быть проведен по их простираниям, что уменьшает количество систем

в эталонных трафаретах и делает построения менее трудоемкими (Семинский, 2014; 2015).

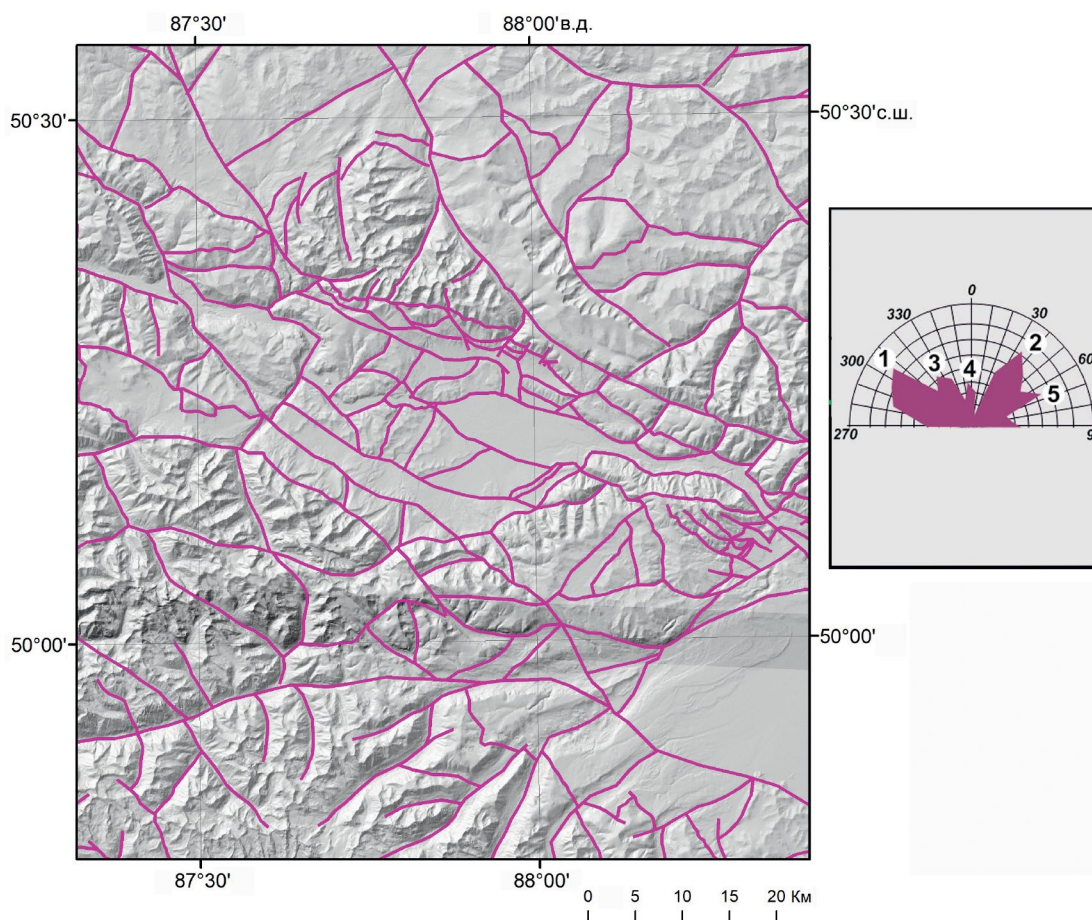
### ОПРЕДЕЛЕНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НОВЕЙШИХ РАЗЛОМОВ ЦЕНТРАЛЬНОГО АЛТАЯ МЕТОДОМ ПАРАГЕНЕТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Парагенетический анализ проводится путем сопоставления природной и эталонных сетей разломов, что позволяет при удовлетворительном совпадении отслеживать динамику (поле напряжений) формирования разрывных нарушений изучаемого региона. Отличие от других модификаций парагенетического анализа состоит в типе эталонов, которые в нашем случае, как было показано выше, представляют полный парагенезис разрывов 2-го порядка, имеющих место в зонах сжатия, растяжения, правого или левого сдвигов при формировании их внутренней структуры. Основу анализа для сети разломов с неизвестными падениями плоскостей составляет роза-диаграмма их простираний, отдельные лучи которой отражают ориентацию систем тектонических нарушений.

Роза-диаграмма была составлена для сети разломов Центрального Алтая, выявленных в ходе крупномасштабного геоморфологического картографирования. Выделено пять систем разрывов, из которых наиболее распространенными являются нарушения запад-северо-западного (система 1) и северо-восточного (система 2) простираний (рис. 3). Парагенетический анализ проводился в два этапа.

Первый этап парагенетического анализа сети разрывов Центрального Алтая (рис. 3) иллюстрируется рис. 4. Эталонные трафареты зон правого сдвига (рис. 4а), сжатия (рис. 4б), растяжения (рис. 4в) и левого сдвига (рис. 4г), на которые накладывалась ранее построенная роза-диаграмма простирания разломов, ориентировались в соответствии с ее главным лучом. То есть *Y*-сколы главного сместителя эталонных трафаретов располагались вдоль системы 1.

Анализ степени совпадения оставшихся четырех лучей розы-диаграммы с направлениями простираний разрывов 2-го порядка, составляющих каждый из эталонных парагенезисов, свидетельствует, что для территории Центрального Алтая лишь обстановка левого сдвига (см. рис. 4г) не была характерна в течение рассматриваемого периода времени формирования разломной сети. Остальные обстановки имеют совпадения 2–3 лучей с эталонными направлениями, т.е. могли играть определенную роль в разломообразовании. Степень участия или вероятность их существования рассматрива-



**Рис. 3.** Разломы, выявленные в ходе крупномасштабного геоморфологического картографирования и выделение их систем на розе-диаграмме.

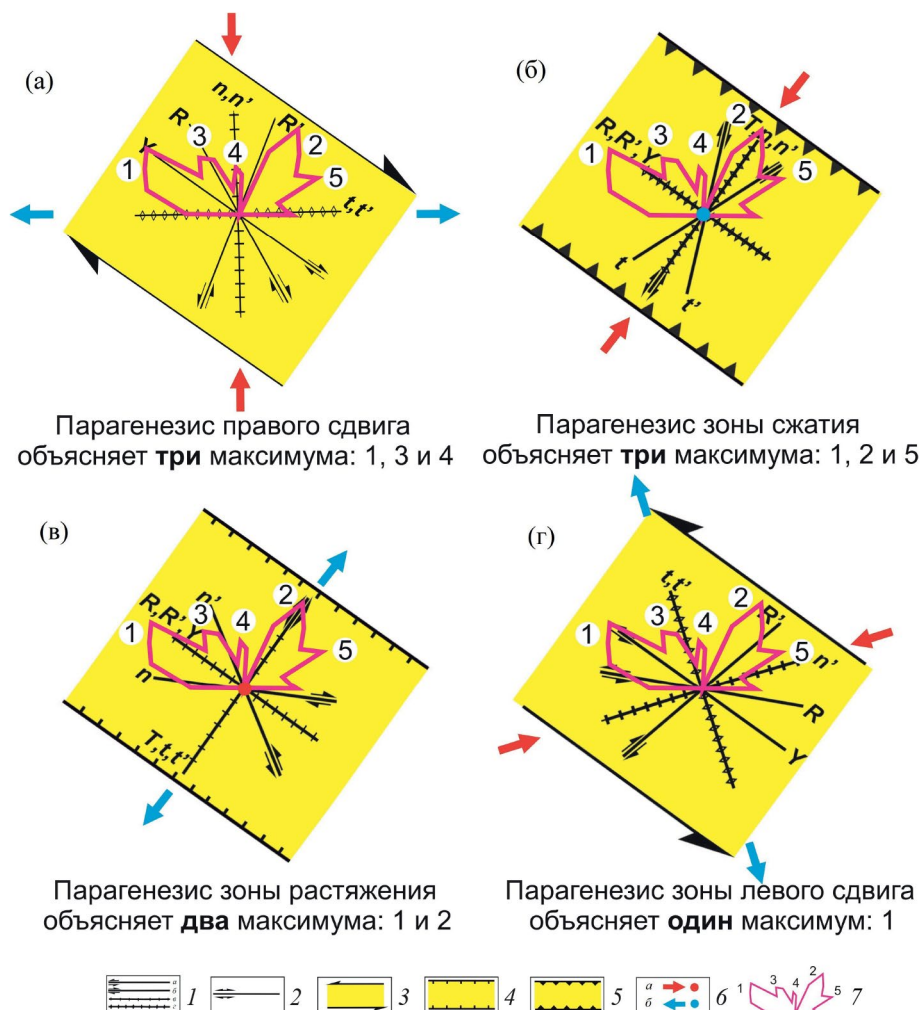
**Fig. 3.** Faults identified during large-scale geomorphological mapping and identification of their systems on a rose diagram.

ются ниже при определении кинематических типов разломных зон, представленных на рис. 3.

Не вызывает сомнений ведущая роль в формировании или активизации разломной сети Центрального Алтая сдвиговой обстановки с ориентацией оси сжатия в меридиональном и оси растяжения в широтном направлениях (см. рис. 4а). Здесь имеется совпадение трех систем разломов (1, 3 и 4) с направлениями разрывов эталонного парагенезиса правого сдвига. При этом правосдвиговые смещения по разломам системы 1 (*Y*-сколы) и системы 3 (*R*-сколы), а также сбросовые подвижки по системе 4 соответствуют по простираию разломам, представленным на рис. 3. Для обстановки сжатия в северо-восточном направлении (см. рис. 4б) также характерно совпадение 3 систем (1, 2 и 5), но их кинематика не во всех случаях является тождественной. Если в системе 1 есть большой процент взбросов и надвигов, то для системы 2 они не характерны. В подавляющем большинстве

север-северо-восточные разломы являются сбросами. Это актуализирует существование для рассматриваемого региона обстановки растяжения (см. рис. 4в), в которой, несмотря на совпадение лишь двух лучей с эталоном, имеется отчетливое соответствие в кинематике смещений по разрывам. Сбросы имеют место среди разломов запад-северо-западной ориентации (система 1), а среди разрывов север-северо-восточного направления, как уже отмечалось, они доминируют.

Таким образом, 1-й этап анализа позволяет заключить, что формирование пяти систем разломов Центрального Алтая обусловлено обязательным существованием обстановки сдвига с меридиональной ориентацией оси сжатия и широтной ориентировкой оси растяжения. В этом поле напряжений могли формироваться и развиваться разломы, относящиеся к системам 1, 3 и 4 (см. рис. 4а). Происхождение системы 2 следует связывать с обстановкой растяжения (см. рис. 4в), а для объяснения



**Рис. 4.** Реконструкция обстановок формирования сети разрывов на основе парагенетического анализа их систем с применением эталонных трафаретов для зон правого сдвига (а), сжатия (б), растяжения (в) и левого сдвига (г). *Элементы эталонных парагенезисов разрывов в разломных зонах сброса, взброса, правого и левого сдвигов по (Семинский, 2014): 1–2 – разнотипные разрывы 2-го порядка в парагенезисах зон скалывания; 3–5 – зоны сдвига, сброса и взброса 1-го порядка; 6 – горизонтальное и вертикальное положения осей напряжений сжатия (а) и растяжения (б); 7 – роза-диаграмма простираний разломов изучаемой территории.*

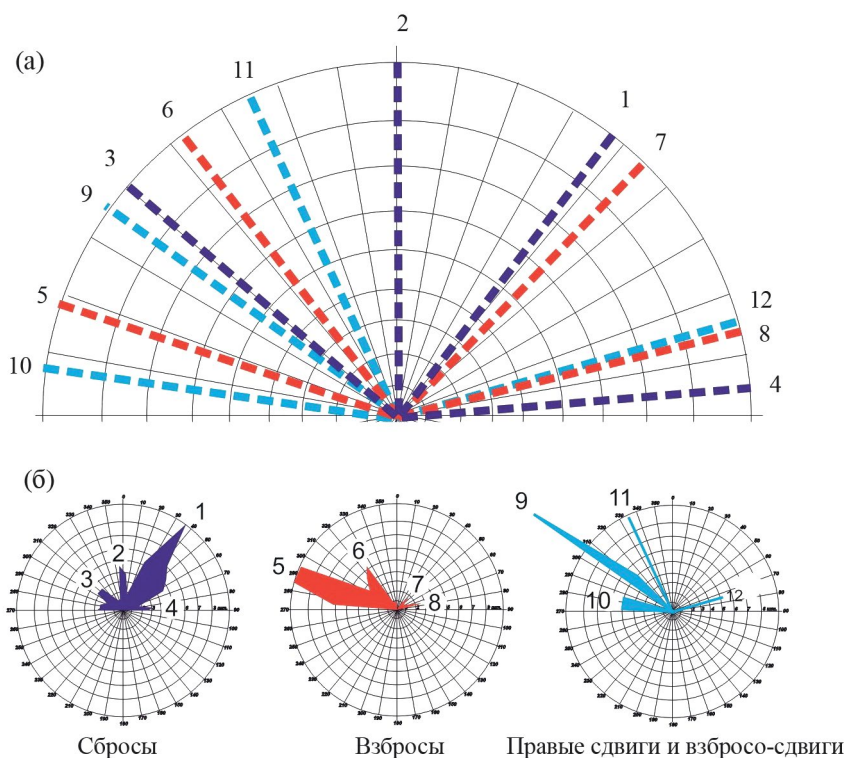
**Fig. 4.** Reconstruction of the conditions for the formation of a network of faults based on paragenetic analysis of their systems using reference stencils for zones of right shear (a), compression (б), extension (в) and left shear (г). *Elements of reference parageneses of ruptures in fault zones of normal fault, reverse fault, right and left shear, according to (Seminsky, 2014): 1–2 – different types of 2nd order faults in parageneses of shear zones; 3–5 – shear zones, fault and reverse fault 1st order; 6 – horizontal and vertical positions of the compression (a) and tensile (б) stress axes; 7 – rose diagram of fault strikes in the study area.*

образования разрывов системы 5 можно из всех имеющихся вариантов привлечь только обстановку сжатия в северо-восточном направлении (см. рис. 4б).

Второй этап парагенетического анализа был проведен для получения дополнительной информации об условиях разломообразования в Центральном Алтае. В его рамках во главу угла была поставлена не роза-диаграмма простираний всех

разломов, а розы-диаграммы простираний разломов, построенные отдельно для каждой кинематической разновидности. Такие диаграммы для сбросов, взбросов, а также правых сдвигов и взбросо-сдвигов представлены на рис. 5б. Для каждого кинематического типа разломов выделяется по четыре системы, положение которых показано на сводной диаграмме пунктирами (рис. 5а). Задачей дальнейшего анализа была реконструкция полей





**Рис. 5.** Результаты выделения систем разломов, отличающихся по ориентации и кинематике движений, что отражено на схеме участка исследований (см. рис. 3): (а) — диаграмма простираний 12 выделенных систем (цветом показано разделение систем разломов по кинематическим типам: синий — правые сдвиги и взбросо-сдвиги, красный — взбросы и надвиги, фиолетовый — сбросы и раздвиги); (б) — розы-диаграммы простираний разрывов разного кинематического типа, на основе которых построена диаграмма.

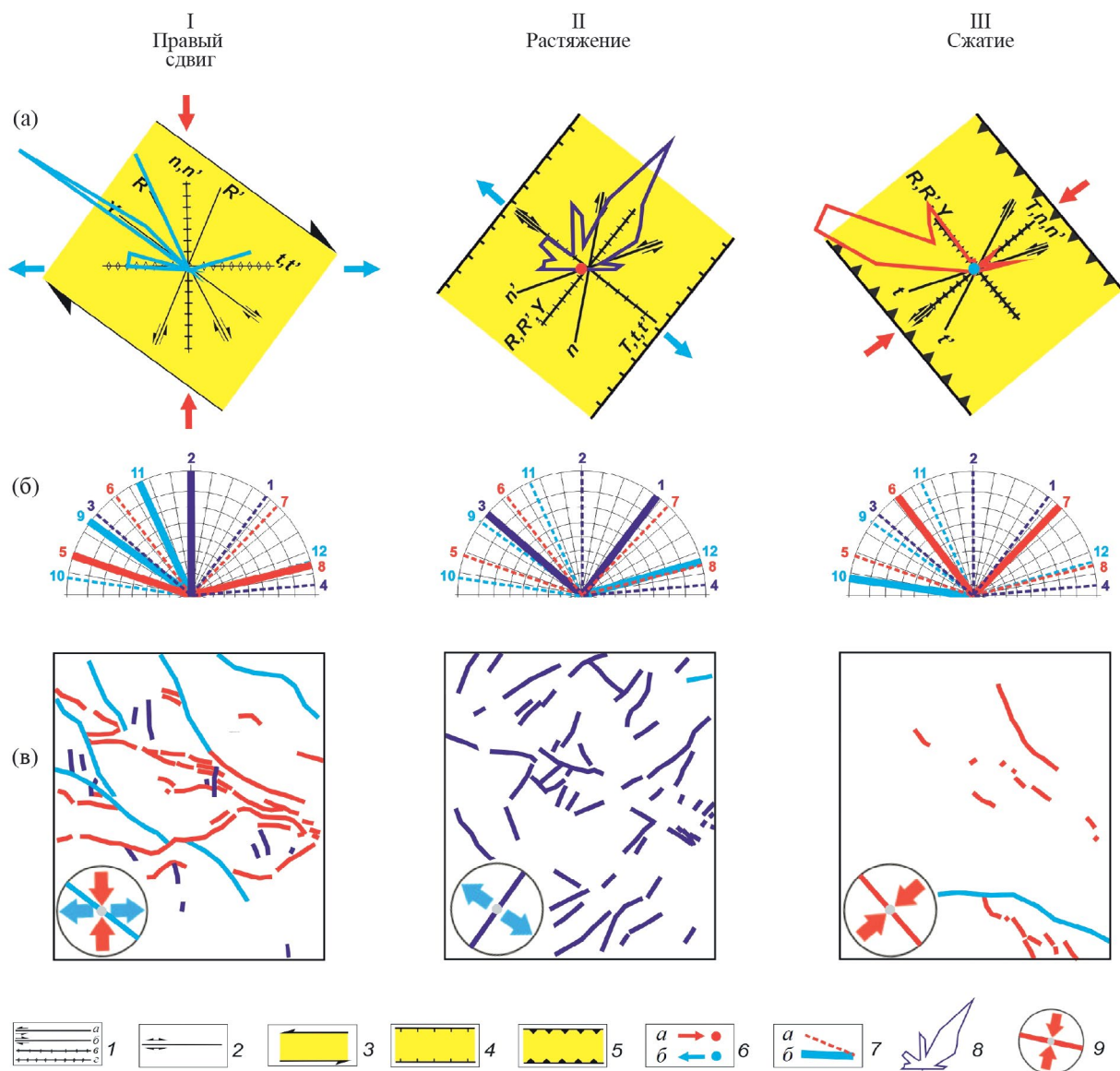
**Fig. 5.** Results of identifying fault systems that differ in orientation and kinematics of movements, which is reflected in the scheme of the research area (fig. 3): (a) — diagram of the strikes of the 12 identified systems (color shows the division of faults by kinematic types: blue — right-lateral strike-slip faults and reverse-slip faults, red — reverse faults and thrust faults, purple — normal faults and thrust faults); (b) — rose diagrams of the strikes of faults of different kinematic types, on the basis of which the diagram.

напряжений, объясняющих происхождения всех 12 выявленных разломных систем с последующим построением схем разрывов Центрального Алтая, активных в каждой из реконструированных динамических обстановок.

Отправным моментом парагенетического анализа 12 разломных систем был полученный на 1-м этапе исследования однозначный вывод о существовании для Центрального Алтая обстановки правостороннего сдвига. Как следствие, соответствующий ей эталонный парагенезис разрывов ориентировался в соответствии с положением главного луча розы-диаграммы, построенной для правых сдвигов (рис. 6а). Эта система (№ 9) отражает положение Y-сколов главного сместителя.

Далее сопоставлялись ориентировки всех систем разрывов 2-го порядка, образующих выбранный эталонный парагенезис, с направлениями простираний оставшихся 11 систем разломов,

составляющих природную сеть. В итоге установлено (рис. 6б), что кроме северо-западных правых сдвигов в рассматриваемой динамической обстановке могли развиваться север-северо-западные правые сдвиги (система 11) и меридиональные сбросы (система 2). Кроме того, есть две причины, чтобы к активным в данном поле напряжений разломам отнести взбросы, составляющие системы 5 и 8. Во-первых, эти разрывные нарушения в совокупности с северо-западными сдвигами образуют главный луч на розе-диаграмме (система запад-северо-западной ориентировки), построенной для всех разломов Центрального Алтая (см. рис. 3). Во-вторых, многие разломы сдвигового типа, согласно априорной информации (см. подпись под рис. 1), имеют взбросовую составляющую. Таким образом, объединение в одном парагенезисе сдвигов и взбросов близкой ориентировки для данного случая является правомерным, поскольку



**Рис. 6.** Разделение разломов изучаемой площади по динамическим обстановкам их формирования: (а) – эталонные трафареты разрывов 2-го порядка для трех главных динамических обстановок формирования разломов изучаемой площади и наложенные на них розы-диаграммы разрывов той кинематики, которая в каждой из динамических обстановок соответствует кинематике зоны 1-го порядка; (б) – диаграмма простираний разломных систем, среди которых жирной линией отмечены те, которые активны в рассматриваемой динамической обстановке; (в) – схемы разломов изучаемой площади, активные в рассматриваемой динамической обстановке.

1–5 – элементы эталонных трафаретов; 6 – горизонтальное и вертикальное положения осей напряжений сжатия ( $a$ ) и растяжения ( $b$ ); 7 – линии простирания разломных систем, не активных ( $a$ ) и активных ( $b$ ) в рассматриваемой динамической обстановке; 8 – роза-диаграмма простираний разломов; 9 – тензор напряжений (линия – простирание зоны 1-го порядка). Цветом окрашены элементы, относящиеся к разломам разного кинематического типа: синий – для правых сдвигов и взбросо-сдвигов, красным – для взбросов и надвигов, фиолетовым – для сбросов и раздвигов.

**Fig. 6.** Separation of faults in the study area according to the dynamic conditions of their formation: (a) – standard stencils of 2nd order discontinuities for the three main dynamic conditions of fault formation in the study area and superimposed on them are rose diagrams of discontinuities of the kinematics that in each of the dynamic conditions corresponds to the kinematics of the 1st order zone; (b) – diagram of the strikes of fault systems, among which those that are active in the dynamic setting under consideration are marked with a thick line; (v) – fault patterns of the study area that are active in the dynamic setting under consideration.

1–5 – elements of reference stencils; 6 – horizontal and vertical positions of the compression ( $a$ ) and tensile ( $b$ ) stress axes; 7 – lines of strike of fault systems, inactive ( $a$ ) and active ( $b$ ) in the dynamic setting under consideration; 8 – rose diagram of fault strikes; 9 – stress tensor (line – strike of the 1st order zone). The elements of fig. are colored (a–v), related to faults of different kinematic types: blue – for right-lateral strike-slip faults and reverse-slip faults, red – for reverse faults, purple – for normal faults.

обстановка сдвига реализуется в условиях дополнительного бокового (северо-восточного) сжатия, т.е. скалывание является сложным.

Среди систем разломов, происхождение которых не получило объяснения в рамках поля сдвига с меридиональной ориентацией оси сжатия и широтной ориентировкой оси растяжения, наиболее представительной по количеству составляющих разрывов является система северо-восточных сбросов (№ 1). Ее использование в качестве главного направления разрывов (У-сколы) позволяет применить парагенезис зоны растяжения северо-восточной ориентировки (рис. 6а) для объяснения происхождения во 2-м порядке северо-западных сбросов (система 3) и восток-северо-восточных сдвигов (система 12) (рис. 6б).

За рамками двух восстановленных решений – сдвиг (рис. 6б-I) и растяжение (рис. 6б-II) – остаются системы взбросов 6 и 7, система сдвигов 10 и система сбросов 4. Наиболее значимой из них по количеству разломов является система взбросов 6, которая и была выбрана в качестве направления У-сколов парагенезиса разрывов зоны сжатия (рис. 6б-III). Этот парагенезис позволяет объяснить происхождение во 2-м порядке взбросов системы 7 и сдвигов системы 10. Таким образом, результат парагенетического анализа с реконструкцией для Центрального Алтая трех полей напряжений является удовлетворительным, поскольку систему 4, оставшуюся не охваченной реконструкциями, образует небольшое количество сбросов (см. рис. 3).

В целом результаты второго этапа парагенетического анализа подтверждают предварительный вывод о формировании разломной сети Центрального Алтая в трех динамических обстановках, сделанный после реализации первого этапа. Более того, они позволяют построить схемы разрывов, активных в каждом из трех реконструированных полей напряжений (см. рис. 6в).

Две обстановки практически идентичны и свидетельствуют о деформации коры в условиях северо-восточного сжатия (см. рис. 4б, 6а-III) и правостороннего сдвига с ориентацией оси сжатия в меридиональном и оси растяжения в широтном направлении (см. рис. 4а, 6а-I). Третья обстановка по результатам обоих этапов анализа является растяжением, но в первом случае оно ориентировано в северо-восточном (см. рис. 4в), а во втором – в северо-западном (см. рис. 6а-II) направлениях. Однако в обоих полях напряжений (см. рис. 4в, 6а-II) активные северо-западные и северо-восточные разломы (за единственным исключением) являются сбросами (см. рис. 6в-II). Следовательно, можно предположить, что это одна динамическая

обстановка, а реконструкция двух полей связана с разными результатами формального выбора системы главного сместителя для ориентации эталонного трафарета.

Проведение парагенетического анализа позволило существенно дополнить кинематические характеристики сети новейших разломов Центрального Алтая, установленные в ходе крупномасштабного геоморфологического картографирования (рис. 7). Полученные результаты на более высоком уровне детальности показали высокую сходимость с данными морфотектонического анализа (рис. 1).

## ВЫВОДЫ

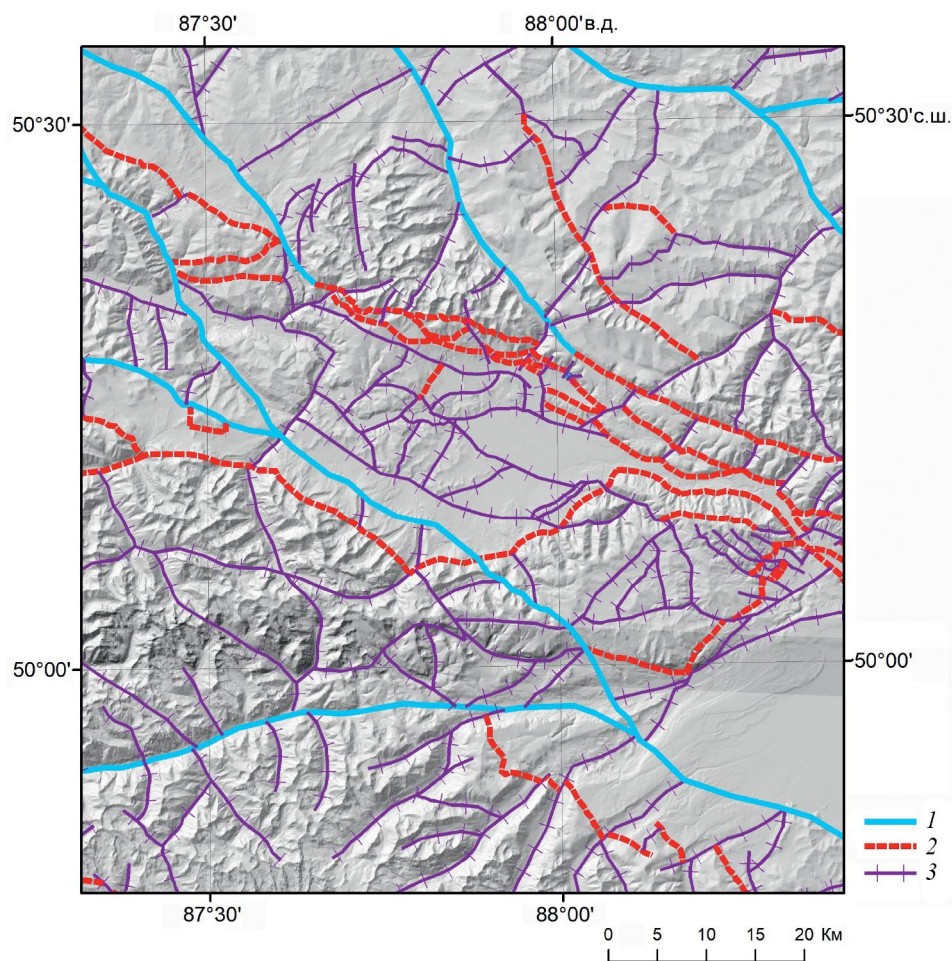
Судя по результатам проведенного анализа, массив горных пород центральной части Горного Алтая находится на третьей стадии разрушения, когда разрывы образуют законченную сеть с характерным структурным рисунком, и земная кора представляет систему блоков, контактирующих по разломам. Парагенетический анализ также подтверждает представления о том, что на ранних стадиях неотектонической активизации территории Горного Алтая преобладали пликативные деформации с ограниченным развитием разрывных нарушений и лишь в ходе главной стадии новейшего орогенеза оформилась законченная блоковая неотектоническая структура (Новиков, 1986).

Блоковая делимость Центрального Алтая формируется системой разломов, образующих ансамбль правостороннего сдвига. В крупном масштабе разломная сеть центральной части Горного Алтая в значительной степени повторяет на более низком иерархическом уровне закономерности структурного рисунка неотектонического строения Большого Алтая. Ее образуют правые сдвиги северо-западной ориентировки, а также второстепенные взбросы субширотного и сбросы субмеридионального простирания.

Парагенетический анализ позволяет с высокой надежностью реконструировать кинематические характеристики новейших разломов Центрального Алтая по их положению в структурном ансамбле. Его результаты показали высокую сходимость с данными ранее проведенного мелкомасштабного морфотектонического анализа (Новиков, 2001), при этом они позволяют определить кинематику новейших разломов, для которых ранее она определялась не вполне уверенно. В частности, это касается новейшего разлома, разделяющего Северо-Чуйский и Южно-Чуйский хребты, который по результатам парагенетического анализа является правосторонним сдвигом.

Полученные схемы новейших разломов в совокупности с характером реконструированных





**Рис. 7.** Новейшие разломы центральной части Горного Алтая по результатам парагенетического анализа.

1 – правые сдвиги и взбросо-сдвиги, 2 – взбросы и надвиги, 3 – сбросы и раздвиги.

**Fig. 7.** Newest faults in the central part of Gornyy Altai based on the results of paragenetic analysis.

1 – right strike-slip faults and strike-slip reverse faults, 2 – reverse faults and thrust faults, 3 – normal faults and thrust faults.

динамических обстановок являются основой для дальнейшего обсуждения механизмов деструкции коры в регионе с привлечением сейсмологических, GPS-геодезических и других материалов.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена по государственным заданиям ИГМ СО РАН и ИЗК СО РАН.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бондаренко П.М. (1976) Моделирование надвиговых дислокаций в складчатых областях (на примере акташских структур Горного Алтая). Новосибирск: Наука. Сиб. отд. 118 с.
- Бурзунова Ю.П. (2011) Углы между сопряженными системами приразломных трещин в идеализированных и природных парагенезисах, формирующихся в раз-

личных динамических обстановках. *Литосфера*. № 2. С. 94–110.

Высоцкий Е.М., Новиков И.С., Лунина О.В. и др. (2021) Сейсмогенные разрывы Чуйского (Горный Алтай) землетрясения 2003 года: морфология, кинематика, пространственное распределение. *Геология и геофизика*. Т. 62. № 3. С. 348–363.

<https://doi.org/10.15372/GiG2020133>

Дергунов А.Б. (1972) Структуры сжатия и растяжения на востоке Алтая в четвертичное время. *Геотектоника*. № 3. С. 99–110.

Жимулев Ф.И., Ветров Е.В., Новиков И.С. и др. (2021) Мезозойский внутриконтинентальный орогенез в тектонической истории Колывань-Томской складчатой зоны, синтез геологических данных и результатов треккового анализа апатита. *Геология и геофизика*. Т. 62. № 9. С. 1227–1245. <https://doi.org/10.15372/GiG2020151>

Новиков И.С. Высоцкий Е.М., Агатова А.Р. (2004) Геолого-геоморфологические свидетельства позднекай-



- нозойских обстановок сжатия, сдвига и растяжения в пределах Горного Алтая. *Геология и геофизика*. Т. 45. № 11. С. 1303–1312.
- Новиков И.С. (1996) Геоморфологические эффекты внутриконтинентальной коллизии на примере Горного Алтая. *Геология и геофизика*. Т. 37. № 11. С. 52–60.
- Новиков И.С. (2001) Кайнозойская сдвиговая структура Алтая. *Геология и геофизика*. Т. 42. № 9. С. 1377–1388.
- Новиков И.С. (2004) Морфотектоника Алтая. Новосибирск: Изд-во СО РАН. Филиал ГЕО. 313 с.
- Новиков И.С. (2013) Реконструкция этапов горообразования обрамления Джунгарской впадины по литостратиграфии позднепалеозойских, мезозойских и кайнозойских отложений. *Геология и геофизика*. Т. 54. № 2. С. 184–202.  
<https://doi.org/10.1016/j.rgg.2013.01.002>
- Новиков И.С., Дядьков П.Г., Козлова М.П. и др. (2014) Неотектоника и сейсмичность западной части Алтае-Саянской горной области, Джунгарской впадины и Китайского Тянь-Шаня. *Геология и геофизика*. Т. 55. № 12. С. 1802–1814.  
<https://doi.org/10.1016/j.rgg.2014.11.008>
- Новиков И.С., Зольников И.Д., Глушкова Н.В. и др. (2023) соотношение разломных ансамблей палеозойского и кайнозойского возраста на территории западной части алтае-саянской складчатой области. *Геодинамика и тектонофизика*. Т. 14. № 3. С. 1–12. <https://doi.org/10.5800/GT-2023-14-3-0705>
- Обручев В.А. (1915) Алтайские этюды (этюды второй). О тектонике Русского Алтая. *Землеведение*. № 3. С. 1–71.
- Семинский К.Ж. (1994) Принципы и этапы спецкартирования разломно-блоковой структуры на основе изучения трещиноватости. *Геология и геофизика*. № 9. С. 112–130.
- Семинский К.Ж. (2003) Внутренняя структура континентальных разломных зон. Тектонофизический аспект. Новосибирск: Изд-во СО РАН. Филиал ГЕО. 243 с.
- Семинский К.Ж. (2014) Спецкартирование разломных зон земной коры. Ст. 1: Теоретические основы и принципы. *Геодинамика и тектонофизика*. Т. 5. № 2. С. 445–467.
- Семинский К.Ж. (2015) Спецкартирование разломных зон земной коры. Ст. 2: Основные этапы и перспективы. *Геодинамика и тектонофизика*. Т. 6. № 1. С. 1–43.
- Тимофеев В.Ю., Ардюков В.Г., Тимофеев А.В., Бойко Е.В. (2019) Современные движения земной поверхности Горного Алтая по GPS-наблюдениям. *Геодинамика и тектонофизика*. Т. 1. № 1. С. 123–146.  
<https://doi.org/10.5800/GT-2019-10-1-0407>
- Трифонов В.Г. (1985) Особенности развития активных разломов. *Геотектоника*. № 2. С. 16–26.
- Трифонов В.Г., Макаров В.И. (1988) Активные разломы (Монголия). В сб.: *Неотектоника и современная геодинамика подвижных поясов*. М.: Наука. С. 239–272.
- Хилько С.Д., Курушин Р.А., Кочетков В.М. и др. (1985) Землетрясения и основы сейсмического районирования Монголии. М.: Наука. 225 с.
- Шерман С.И., Борняков С.А., Буддо В.Ю. (1983) Области динамического влияния разломов (результаты моделирования). Новосибирск: Наука. 112 с.
- Calais E., Dong L., Wang M. et al. (2006) Continental deformation in Asia from a combined GPS solution. *Geophys. Res. Lett.* Vol. 33. L24319.  
<https://doi.org/10.1029/2006GL028433>
- Cunningham W.D., Windley B.F., Dorjnamjaa D. et al. (1996) A structural transect across the Mongolian Western Altai: Active transpressional mountain building in central Asia. *Tectonics*. Vol. 15. Iss. 1. P. 142–156.  
<https://doi.org/10.1029/95TC02354>
- Ding Guoyu (1984) Active faults in China. In: *A collection of papers of International Symposium on continental seismicity and earthquake prediction (ISCSEP)*. Beijing: Seismol. Press. P. 225–242.
- England P., Molnar P. (2005) Late Quaternary to decadal velocity fields in Asia. *J. Geophys. Res.* Vol. 110. Iss. B12. B12401. <https://doi.org/10.1029/2004JB003541>
- England P., Molnar P. (1997) The field of crustal velocity in Asia calculated from Quaternary rates of slip-on faults. *Geophysics J. Int.* Vol. 130. Iss. 3. P. 551–582.  
<https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1997.tb01853.x>
- Hancock P.L. (1985) Brittle microtectonics: Principles and practice. *J. Struct. Geol.* Vol. 7. No. 3–4. P. 437–457.  
[https://doi.org/10.1016/0191-8141\(85\)90048-3](https://doi.org/10.1016/0191-8141(85)90048-3)
- Harding T.P. (1974) Petroleum traps associated with wrench faults. *AAPG Bull.* Vol. 58. P. 365–378.  
<https://doi.org/10.1306/83D91669-16C7-11D7-8645000102C1865D>
- Kim Y.S., Peacock D.C.P., Sanderson D.J. (2004) Fault damage zones. *J. of Struct. Geology*. Vol. 26. Iss. 3. P. 503–517. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2003.08.002>
- Naylor M.A., Mandl G., Superteyn C.H.K. (1986) Fault geometries in basement-induced wrench faulting under different initial stress states. *J. Struct. Geology*. Vol. 8. No. 7. P. 737–752.
- Novikov I.S., Sokol E.V. (2007) Combustion metamorphic events as age markers of orogenic movements in Central Asia. *Acta Petrologica Sinica*. Vol. 23. No. 7. P. 1561–1572.
- Shi Jianbang, Feng Xian Yue, Ge Shumo et al. (1984) The Fuyun earthquake fault zone in Xinjiang, China. In: *A collection of papers of International Symposium on continental seismicity and earthquake prediction (ISCSEP)*. Beijing: Seismol. Press. P. 225–242.
- Sylvester A.G. (1988) Strike-slip faults. *GSA Bull.* Vol. 100. No. 11. P. 1666–1703. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1988\)100<1666:SSF>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1988)100<1666:SSF>2.3.CO;2)
- Tchalenko J.S. (1970) Similarities between shear zones of different magnitudes. *GSA Bull.* Vol. 81. No. 6. P. 1625–1640.  
[https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1970\)81\[1625:SBSZOD\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1970)81[1625:SBSZOD]2.0.CO;2)
- Wilcox R.E., Harding T.P., Seely D.R. (1973) Basic wrench tectonics. *AAPG Bull.* Vol. 57. P. 74–96.  
<https://doi.org/10.1306/819A424A-16C5-11D7-8645000102C1865D>
- Yang S.-M., Wang Q., You X.-Z. (2005) Numerical analysis of contemporary horizontal tectonic deformation fields in

China from GPS data. *Acta Seismologica Sinica*. Vol. 18. P. 135–146.  
<https://doi.org/10.1007/s11589-005-0060-6>  
 Zhao B., Huang Y., Zhang C. et al. (2015) Crustal defor-

mation on the Chinese mainland during 1998–2014 based on GPS data. *Geodesy and Geodynamics*. Vol. 6. No. 1. P. 7–15.  
<https://doi.org/10.1016/j.geog.2014.12.006yy>

## PARAGENETIC ANALYSIS OF THE RECENT FAULT NETWORK IN CENTRAL ALTAI<sup>1</sup>

I. S. Novikov<sup>a,#</sup>, K. Zh. Seminsky<sup>b,##</sup>, and A. A. Krivov<sup>c,###</sup>

<sup>a</sup> Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia

<sup>b</sup> Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russia

<sup>c</sup> Novosibirsk Higher Military Command School of the Ministry of Defense of the Russian Federation, Novosibirsk, Russia

<sup>#</sup> E-mail: novikov@igm.nsc.ru

<sup>##</sup> E-mail: seminsky@crust.irk.ru

<sup>###</sup> E-mail: krivov\_ka@mail.ru

Geomorphological survey revealed a network of the recently active faults that control the formation of main features of the modern relief in the central part of the Altai Mountains. A paragenetic analysis of the identified latest faults has been performed. The result of the paragenetic analysis with reconstruction of three stress fields turned out to satisfy the formal reliability criteria. In general, the results of the paragenetic analysis confirm the preliminary conclusion about the formation of the fault network of the Central Altai in three dynamic settings made after the implementation of the first stage. They made it possible to construct schemes of faults active in each of the three reconstructed stress fields. Judging by the results of the analysis, the rock massif of the central part of the Altai Mountains is at the third stage of destruction, when individual faults are connected into a complete fault network with a characteristic structural pattern, and the earth's crust is broken into a system of blocks contacting along faults. The block subdivision of the Central Altai is formed by a system of faults forming an ensemble of a right-lateral strike-slip dislocation. As the scale of the studies increases, the number of identified faults increases as well. On the regional neotectonics maps of 1:1,000,000 scale only major ridges and depressions are expressed in the relief as boundaries of large blocks. A network of faults outlining blocks within the ridges and depressions is identified on neotectonic maps of 1:50,000 scale. In the central part of the Altai Mountains, the fault network follows the lower-level hierarchical structural patterns and orographic structure of the Greater Altai, e.g., northwestern right-lateral strike-slip faults, sublatitudinal reverse faults, and extension zones with a predominant submeridional extension. Paragenetic analysis resulted in a reliable reconstruction of the kinematic characteristics of the most recent faults of the Central Altai based on their position in the structural ensemble. The obtained schemes and settings of the recent faults can serve as a foundation for further discussion about the nature and mechanisms of crustal destruction in the region using seismological, GPS-geodetic and other materials.

**Keywords:** Altai; neotectonics; recent faults; kinematic analysis; tectonophysics; structural ensemble; morphotectonics

### ACKNOWLEDGMENTS

The work was performed according to the state assignments of IGM SB RAS and IZK SB RAS.

### REFERENCES

Bondarenko P.M. (1976) Modelirovanie nadvigovykh dislokatsii v skladchatykh oblastiakh (na primere aktashskikh struktur Gornogo Altaya) (Modeling of thrust dislocations in folded areas (using the example of the Aktash structures

of the Altai Mountains)). Novosibirsk: Nauka. Sibirskoe otделение (Publ.). 118 p. (in Russ.).

Burzunova Yu.P. (2011) Angles between conjugate systems of near-fault cracks in idealized and natural parageneses formed in different dynamic environments. *Litosfera*. No. 2. P. 94–110 (in Russ.).

Calais E., Dong L., Wang M. et al. (2006) Continental deformation in Asia from a combined GPS-solution. *Geophys. Res. Lett.* Vol. 33. L24319.

<https://doi.org/10.1029/2006GL028433.2006>

Cunningham W.D., Windley B.F., Dorjnamjaa D. et al. (1996) A structural transect across the Mongolian Western Altai: Active transpressional mountain building in central Asia. *Tectonics*. Vol. 15. Iss. 1. P. 142–156.

<https://doi.org/10.1029/95TC02354>

<sup>1</sup> *For citation:* Novikov I. S., Seminsky K. Zh., and Krivov A. A. (2025) Paragenetic analysis of the recent fault network in Central Altai. *Geomorfologiya i Paleogeografiya*. Vol. 56. No. 2. P. 307–322. <https://doi.org/10.31857/S2949178925020092>; <https://elibrary.ru/GQEBWR>

- Dergunov A.B. (1972) Structures of compression and extension in the east of Altai in Quaternary time. *Geotectonika*. No. 3. P. 99–110 (in Russ).
- Ding Guoyu. (1984) Active faults in China. In: *A collection of papers of International Symposium on continental seismicity and earthquake prediction (ISCSEP)*. Beijing: Seismol. Press. P. 225–242.
- England P., Molnar P. (1997) The field of crustal velocity in Asia calculated from Quaternary rates of slip-on faults. *Geophysics J. Int.* Vol. 130. Iss. 3. P. 551–582. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1997.tb01853.x>
- England P., Molnar P. (2005) Late Quaternary to decadal velocity fields in Asia. *J. Geophys. Res.* Vol. 110. Iss. B12. B12401. <https://doi.org/10.1029/2004JB003541>
- Hancock P.L. (1985) Brittle microtectonics: Principles and practice. *J. Struct. Geol.* Vol. 7. No. 3–4. P. 437–457. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(85\)90048-3](https://doi.org/10.1016/0191-8141(85)90048-3)
- Harding T.P. (1974) Petroleum traps associated with wrench faults. *AAPG Bull.* Vol. 58. P. 365–378. <https://doi.org/10.1306/83D91669-16C7-11D7-8645000102C1865D>
- Khilko S.D., Kurushin R.A., Kochetkov V.M. et al. (1985) Earthquakes and fundamentals of seismic zoning of Mongolia. Moscow: Nauka (Publ.). 225 p. (in Russ).
- Kim Y.S., Peacock D.C.P., Sanderson D.J. (2004) Fault damage zones. *J. of Struct. Geology*. Vol. 26. Iss. 3. P. 503–517. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2003.08.002>
- Naylor M.A., Mandl G., Superteyn C.H.K. (1986) Fault geometries in basement-induced wrench faulting under different initial stress states. *J. Struct. Geology*. Vol. 8. No. 7. P. 737–752.
- Novikov I.S. (1996) Geomorphological Effects of Intracontinental Collision on the Example of Gornyy Altay. *Russian Geology and Geophysics*. Vol. 37. No. 11. P. 51–58.
- Novikov I.S. (2001) Cenozoic Strike-slip Tectonics in Altai. *Russian Geology and Geophysics*. Vol. 42. No. 9. P. 1311–1321.
- Novikov I.S. (2013) Reconstructing the stages of orogeny around the Junggar basin from the lithostratigraphy of Late Paleozoic, Mesozoic, and Cenozoic sediments. *Russian Geology and Geophysics*. Vol. 54. No. 2. P. 138–152. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2013.01.002>
- Novikov I.S. (2004) Morfotektonika Altaya (Morphotectonics of Altai). Novosibirsk: SB RAS. GEO (Publ.). 313 p. (in Russ).
- Novikov I.S., Dyad'kov P.G., Kozlova M.P. et al. (2014) Recent tectonics and seismicity of the western Altai–Sayan mountainous region, Junggar basin, and Chinese Tien Shan. *Russian Geology and Geophysics*. Vol. 55. No. 12. P. 1441–1451. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2014.11.008>
- Novikov I.S., Sokol E.V. (2007) Combustion metamorphic events as age markers of orogenic movements in Central Asia. *Acta Petrologica Sinica*. Vol. 23. No. 7. P. 1561–1572.
- Novikov I.S., Vysotsky E.M., Agatova A.R. (2004) Neotectonic Type Structure of Contraction, Shear, and Extension of the Northern Part of Great Altai. *Russian Geology and Geophysics*. Vol. 45. No. 11. P. 1248–1258.
- Novikov I.S., Zolnikov I.D., Glushkova N.V. et al. (2023) The relationship between fault ensembles of Paleozoic and Cenozoic age in the western part of the Altai-Sayan folded region. *Geodinamika i tektonofizika*. Vol. 14. No. 3. P. 1–12 (in Russ). <https://doi.org/10.5800/GT-2023-14-3-0705>
- Obruchev V.A. (1915) Altai sketches (second sketch). On the tectonics of Russian Altai. *Zemlevedenie*. No. 3. P. 1–71. (in Russ).
- Seminsky K. Zh. (1994) Principles and stages of special mapping of a fault-block structure based on the study of fracturing. *Geologia i geofizika*. No. 9. P. 112–130 (in Russ).
- Seminsky K. Zh. (2003) Vnutrennyaya struktura kontinental'nykh razlomnykh zon. Tektonofizicheskii aspekt (Internal structure of continental fault zones. Tectonophysical aspect). Novosibirsk: SB RAS. GEO (Publ.). 243 p. (in Russ).
- Seminsky K. Zh. (2014) Special mapping of fault zones of the earth's crust. Article 1: Theoretical foundations and principles. *Geodinamika i tektonofizika*. Vol. 5. No. 2. P. 445–467 (in Russ).
- Seminsky K. Zh. (2015) Special mapping of fault zones of the earth's crust. Article 2: Main stages and prospects. *Geodinamika i tektonofizika*. Vol. 6. No. 1. P. 1–43 (in Russ).
- Sherman S.I., Bornyakov S.A., Buddo V.Yu. (1983) Oblasti dinamicheskogo vliyaniya razlomov (rezul'taty modelirovaniya) (Areas of dynamic influence of faults (modeling results)). Novosibirsk: Nauka (Publ.). 112 p. (in Russ).
- Shi Jianbang, Feng Xianye, Ge Shumo et al. (1984) The Fuyun earthquake fault zone in Xinjiang, China. In: *A collection of papers of International Symposium on continental seismicity and earthquake prediction (ISCSEP)*. Beijing: Seismol. Press. P. 225–242.
- Sylvester A.G. (1988) Strike-slip faults. *GSA Bull.* Vol. 100. No. 11. P. 1666–1703. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1988\)100<1666:SSF>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1988)100<1666:SSF>2.3.CO;2)
- Tchalenko J.S. (1970) Similarities between shear zones of different magnitudes. *GSA Bull.* Vol. 81. No. 6. P. 1625–1640. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1970\)81\[1625:SBSZOD\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1970)81[1625:SBSZOD]2.0.CO;2)
- Timofeev V. Yu., Ardyukov V.G., Timofeev A.V., Boyko E.V. (2019) Modern movements of the earth's surface in Gornyy Altai according to GPS observations. *Geodinamika i tektonofizika*. Vol. 10. No. 1. P. 123–146 (in Russ). <https://doi.org/10.5800/GT-2019-10-1-0407>
- Trifonov V.G. (1985) Features of the development of active faults. *Geotectonika*. No. 2. P. 16–26 (in Russ).
- Trifonov V.G. Makarov V.I. (1988) Active faults (Mongolia). In: *Neotektonika i sovremennaya geodinamika podvizhnykh poyasov*. Moscow: Nauka (Publ.). P. 239–272.
- Vysotsky E.M., Novikov I.S., Lunina O.V. et al. (2021) Co-seismic surface ruptures of the 2003 Chuya earthquake (Gornyy Altai): slip geometry and spatial patterns. *Russian Geology and Geophysics*. Vol. 62. No. 3. P. 781–792. <https://doi.org/10.2113/RGG20194133>

- Wilcox R.E., Harding T.P., Seely D.R. (1973) Basic wrench tectonics. *AAPG Bull.* Vol. 57. P. 74–96.  
<https://doi.org/10.1306/819A424A-16C5-11D7-8645000102C1865D>
- Yang S.-M., Wang Q., You X.-Z. (2005) Numerical analysis of contemporary horizontal tectonic deformation fields in China from GPS data. *Acta Seismologica Sinica*. Vol. 18. P. 135–146. <https://doi.org/10.1007/s11589-005-0060-6>
- Zhao B., Huang Y., Zhang C. et al. (2015) Crustal deformation on the Chinese mainland during 1998–2014 based on GPS data. *Geodesy and geodynamics*. Vol. 6. No. 1. P. 7–15.  
<https://doi.org/10.1016/j.geog.2014.12.006yy>
- Zhimulev F.I., Vetrov E.V., Novikov I.S. et al. (2021) Mesozoic Intracontinental Orogeny in the Tectonic History of the Kolyvan'–Tomsk Folded Zone (Southern Siberia): a Synthesis of Geological Data and results of Apatite Fission Track Analysis. *Russian Geology and Geophysics*. Vol. 62. No. 4. P. 1006–1020.  
<https://doi.org/10.2113/RGG20204172>