

НЕОТЕКТОНИКА И ПАЛЕОГЕОГРАФИЯ

УДК 551.24.03+551.248.2

МОРФОСТРУКТУРНЫЕ И СТРУКТУРНО-ПАРАГЕНЕТИЧЕСКИЕ
ОСОБЕННОСТИ РАЗЛОМНЫХ ЗОН ПРИБАЙКАЛЯ

(на примере Бугульдейского дизъюнктивного узла)

А.В. Черемных, А.С. Черемных, А.А. Бобров

Институт земной коры СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия

На основе линеamentного анализа составлена схема разломно-блокового строения Обручевской системы разломов в районе пос. Бугульдейка, где сочленение разломов образует дизъюнктивный узел. Изучены зоны Ольхонского, Приморского, Прихребтового, Бугульдейского и Куртунского дизъюнктивов. Структурно-парагенетический анализ основных направлений линеamentов позволил реконструировать тектонические обстановки, в которых формировалась внутренняя структура этих разломных зон. Разрывы в зонах Ольхонского, Приморского и Прихребтового разломов сформировались в обстановках северо-запад—юго-восточного растяжения и сжатия. Растяжение в пределах этих зон восстанавливается при анализе линеamentов, хорошо выраженных в современном рельефе, а сжатие — слабопроявленных в рельефе. Однако структурный рисунок хорошо выраженных линеamentов в пределах слабонарушенного блока соответствует парагенезу разрывов зоны взброса, а рисунок линеamentов, слабопроявленных в рельефе, — левостороннего сдвига. Проведенное исследование подтвердило представления о том, что наиболее позднее региональное растяжение в Прибайкалье активизировало только разломные зоны и не деформировало блоковые структуры. В пределах последних сохранились остаточные деформации более ранних по времени тектонических этапов: регионального сжатия и сдвига. Полученные результаты соответствуют реконструкциям проведенного ранее тектонофизического анализа массовых замеров разломов и трещиноватости горных пород. Показаны возможности морфоструктурных и структурно-парагенетических методов при картировании разломов и реконструкции условий их формирования в районах с полихронными деформациями.

Разломно-блоковая структура, неотектоника, линеamentы, разломные зоны, структурные парагенезы.

FAULTS IN THE BAIKAL REGION:
MORPHOSTRUCTURAL AND STRUCTURE-GENETIC FEATURES
(case study of the Buguldeika fault junction)

A.V. Cheremnykh, A.S. Cheremnykh, and A.A. Bobrov

Lineament analysis is applied to map the pattern of the Obruchev fault system in the Buguldeika Village area, where several fault zones (Olkhon, Primorye, Prikhrebtovyi, Buguldeika, and Kurtun) make up a junction. As inferred from the predominant directions of genetically related lineaments, the Olkhon, Primorye, and Prikhrebtovyi faults originated under NW–SE extension and compression. The extension and compression settings within these zones are reconstructed by analysis of lineaments that have prominent and poor geomorphic expression, respectively. However, the pattern of lineaments well expressed in the surface topography within a weakly deformed block corresponds to reverse slip, while that of poorly pronounced lineaments corresponds to left-lateral strike slip. The study confirms the idea that the latest extension (rifting) stage in the Baikal region reactivated fault zones but did not deform blocks. The blocks store record of residual deformation produced by previous settings of regional compression and shear. The obtained results agree with earlier tectonophysical analysis of faults and fractures in the area and prove the applicability of the suggested approach to map the fault patterns and reconstruct their respective stress settings in areas that underwent multiple deformation events of different ages.

Faulted crust, neotectonics, lineaments, fault zone, standard fracture pattern

ВВЕДЕНИЕ

Современная разломно-блоковая структура верхней части земной коры Прибайкалья сформировалась на неотектоническом этапе развития региона, главным образом в результате кайнозойского рифтогенеза. Выделяют раннеорогенный (олигоцен—до среднего плиоцена) и позднеорогенный (поздний плиоцен—голоцен) этапы в развитии Байкальского рифта, отличающиеся характером тектонических напряжений: сдвиговым и сбросовым соответственно [Леви и др., 1997; Delvaux et al., 1997; San'kov et al., 1997; и др.]. Кроме того, по остаточным деформациям горных пород (разрывам и трещиноватости) реконструируется этап СЗ-ЮВ регионального сжатия [Ружич, 1972; Александров, 1990; Гладков, 1995; Семинский, 2003; Лунина и др., 2009; Черемных, 2010; и др.]. Мнения исследователей о возрасте последнего проявления этого сжатия варьируют от мезозойского до миоцен-плиоценового.

Неотектонически-активные дизъюнктивы обычно хорошо выражены в рельефе, поэтому их можно откартировать дистанционными методами (линеаментный анализ). Линеаменты, в нашем понимании, это протяженные линейные формы ландшафта, как правило, тектонического происхождения. Наиболее крупные линеаменты района исследования являются известными продольными и поперечными разломами Байкальского рифта — Приморский, Ольхонский, Бугульдейский [Шерман, 1977; Кузьмин, 1995; Аржанникова, Гофман, 2000; Mats et al., 2007; Лунина, 2016; и др.]. Значительное скопление локальных линеаментов в пределах вытянутого участка земной коры позволяет выявить зоны крупных разломов, а при наличии определенного структурного рисунка (парагенеза) линейных форм рельефа реконструировать кинематический тип основного разлома и оси тектонических напряжений в его окрестностях. На этом основан структурно-геоморфологический метод реконструкции сдвиговых тектонических напряжений [Сим, 1991, 2000]. Метод применяется для выделения разломов активных на неотектоническом и современном этапах развития регионов, особенно в пределах платформенных территорий, и является структурно-парагенетическим, так как основан на обобщенных М.В. Гзовским [1975] ориентировках по отношению к основному сместителю разрывов в зоне сдвига.

Помимо несомненных достоинств метода, таких как дистанционный характер сбора фактического материала и, соответственно, быстрое получение итоговых результатов, существуют и некоторые сложности, связанные с его реализацией в пределах подвижных поясов, формирование которых часто сопровождается кардинальной сменой регионального поля напряжений во времени. Как правило, проблема наложенного характера разрывных дислокаций на таких территориях решается проведением время- и

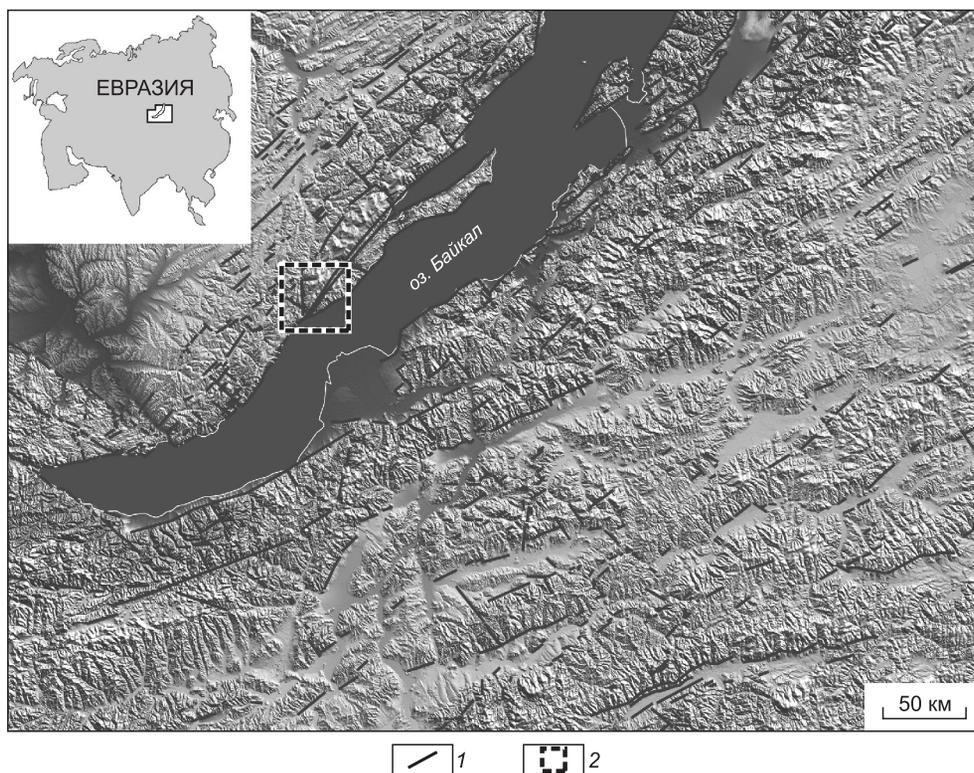


Рис. 1. Линеаменты и местоположение Бугульдейского дизъюнктивного узла на цифровой модели рельефа юга Восточной Сибири.

1 — линеаменты, 2 — участок детальных исследований.

трудозатратных геолого-структурных исследований [Соотношение ..., 1979]. Успешное применение структурно-парагенетического анализа линеаментов для реконструкции этапов формирования сдвиговых зон Алакит-Мархинского кимберлитового поля на Сибирской платформе реализовано в монографии [Семинский, Семинский, 2016]. Отличительной особенностью этого исследования является выделение двух сдвиговых этапов, при которых оси напряжений, сохраняя пространственную ориентировку, меняли знак. Однако примеров реализации подобных подходов в пределах подвижных территорий, претерпевших изменение региональных полей напряжений верхней части земной коры не только сдвигового типа, авторам статьи неизвестно.

В статье приводятся результаты применения морфоструктурных и структурно-парагенетических методических приемов для реконструкции тектонических обстановок в зонах разломов Центрального Прибайкалья. Исследования проведены в пределах области сочленения края Сибирской платформы и Центрально-Азиатского складчатого пояса, где в кайнозойе формируется Байкальская рифтовая система, ее морфотектоника охарактеризована Г.Ф. Уфимцевым [1992]. Цель работы: на основе адаптированной для Прибайкалья методики структурно-парагенетического анализа линейных элементов рельефа уточнить внутреннюю структуру основных дизъюнктивов и кинематический тип разноранговых разломов. Изучены окрестности Бугульдейского дизъюнктивного узла (рис. 1), так как для зон сочленения разломов характерно наибольшее разнообразие ориентировок разрывов и, соответственно, полей тектонических напряжений. Для выполнения поставленной цели и верификации полученных результатов применены геоморфологические, геологические и геофизические методы.

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ И ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Для достижения цели необходимо было последовательно решить три задачи: 1) откартировать разноранговые разрывы, выраженные в современном рельефе и формирующие разломно-блоковую структуру района исследования; 2) отделить разломные зоны от блоков; 3) систематизировать локальные линеаменты в пределах разломных зон по азимутам простирания и сопоставить преимущественные направления дизъюнктивов со структурными парагенезами зон растяжения, сжатия, левостороннего и правостороннего сдвигов для установления кинематических типов дизъюнктивов.

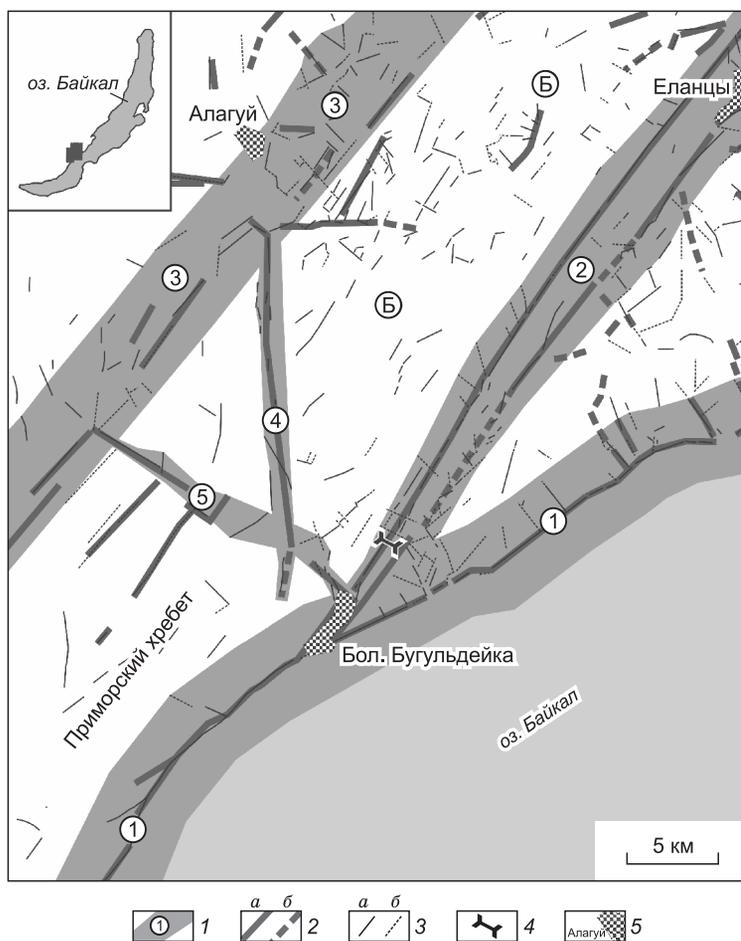
Во введении отмечено, что разрывы, активные на неотектоническом этапе, контрастно проявлены в рельефе земной поверхности, поэтому нами проведено картирование линейных форм рельефа — линеаментов. Линейные формы рельефа Прибайкалья, как правило, являются дизъюнктивными дислокациями [Геология ..., 1984]. Вертикальная компонента смещения крыльев разрывного нарушения отражается в рельефе в виде тектонического уступа; горизонтальная же компонента перемещения вдоль разломной зоны фиксируется смещением отрицательных или положительных его форм: русел рек и временных водотоков, конусов выноса, водоразделов или хребтов.

При проведении линеаментного анализа применена следующая методика. В качестве исходного материала использовались топографические карты разных масштабов и цифровые модели рельефа (SRTM, Aster GDEM2). На рис. 1 приведены результаты картирования линеаментов на цифровой модели рельефа, построенной на базе SRTM снимков с разрешением 90 м. Рельеф такого разрешения сопоставим с мелкомасштабными топоосновами, однако количественный характер данных позволяет создавать дополнительные графические материалы, контрастно отображающие линеаменты или их параметры (например, карта градиентов рельефа [Черемных и др., 2014]). Для картирования дизъюнктивов Бугульдейского разломного узла кроме цифровой модели рельефа мы применили топоосновы крупного — 1:25 000 и среднего — 1:100 000 масштабов (рис. 2). С целью картирования разноранговых разрывных нарушений территории линеаментный анализ осуществлялся вначале на картах крупного (1:25 000), затем среднего (1:100 000) масштаба. Такой подход позволяет выявлять не только разноранговые разломы, но и дизъюнктивы, находящиеся на разных стадиях своего развития. Остановимся подробнее на стадийности развития разломов и особенностях картирования крупных дизъюнктивов, не выраженных единым магистральным сместителем.

Согласно тектонофизическим представлениям, зона разлома — это объем геологической среды, в котором проявлены остаточные деформации, связанные с формированием дизъюнктива и последующими подвижками по его сместителю [Шерман и др., 1983]. Разломы в процессе своего развития переживают три главных стадии: раннюю дизъюнктивную, позднюю дизъюнктивную и стадию полного разрушения [Семинский, 2003]. На ранней стадии развития дизъюнктив представлен широкой областью формирования парагенетически связанных разрывов, отождествляемой с природными зонами повышенной трещиноватости. На поздней стадии в отдельных участках зоны происходит объединение сети разрывов предшествовавшего этапа и дробление областей их взаимодействия. Дизъюнктивная стадия полного разрушения характеризуется наличием единого непрерывного магистрального сместителя разлома и крупных опережающих его разрывов более высокого ранга.

Рис. 2. Схема разломов в районе Бугульдейского дизъюнктивного узла.

1 — элементы разломно-блоковой структуры (цифры в кружках), разломные зоны: 1 — Ольхонская (Морская), 2 — Приморская (Бугульдейско-Чернорудский грабен), 3 — Прихребтовая, 4 — Бугульдейская, 5 — Куртунская, Б — блок; 2 — линеаменты, закартированные на основе анализа топографических карт масштаба 1:100 000 (*а* — хорошо выраженные в рельефе, *б* — слабопроявленные); 3 — линеаменты, закартированные на топоосновах более крупного масштаба (*а* — хорошо выраженные, *б* — слабопроявленные); 4 — профиль электротомографии; 5 — населенные пункты.



Протяженные разломы стадии полного разрушения, у которых уже сформировался и, соответственно, контрастно выражен в рельефе магистральный сместитель, хорошо видны на мелкомасштабных топоосновах. Разломы поздней, а тем более ранней дизъюнктивной стадии развития легче откартировать на среднемасштабных картах, а уже потом анализировать все данные на топооснове мелкого масштаба. При этом зоны крупных разломов, как правило, маркируются областями повышенной концентрации локальных линеаментов.

Комплексные геолого-геофизические исследования, проведенные ранее [Семинский и др., 2012], позволили оценить ширину Приморской и Прихребтовой разломных зон в северо-восточной части площади, которая составила около 5 км для каждой. Очень близкие значения следуют из графиков среднегодовой скорости накопления деформаций земной поверхности по Ангинскому профилю, которые, кроме того, фиксируют современную активность земной поверхности в пределах разломных зон [Есиков, 1979]. Эти значения взяты за основу для соответствующих дизъюнктивов. При такой ширине в пределах зон наблюдаются разноранговые разрывы как параллельные простираению зоны, так и образующие с ней различные углы. В пределах разломных зон (см. рис. 2) наблюдаются локальные линеаменты, параллельные или причленившиеся к магистральному сместителю разлома (Приморский, Ольхонский и Бугульдейский дизъюнктивы), либо образующие скопления различно ориентированных дислокаций (Прихребтовый и Куртунский разломы). В результате контуры региональных разломных зон на карте (см. рис. 2) нами проведены по границам локальных разрывов-линеаментов, параллельных и причленившихся к магистральному сместителю разлома (Приморский, Ольхонский и Бугульдейский дизъюнктивы), либо образующих скопления различно ориентированных дислокаций (Прихребтовый и Куртунский разломы).

Реконструкции условий формирования разломных зон структурно-парагенетическими методами основаны на специфике пространственной позиции разрывов второго порядка в пределах зоны дизъюнктива первого порядка. Парагенез разрывов зон скалывания охарактеризован в многочисленных работах, базирующихся на результатах геолого-структурных и экспериментальных исследований разноранговых дизъюнктивов [Лукиянов, 1965; Гзовский, 1975; Стоянов, 1977; Hancock, 1985; Семинский, 2003; и др.]. Обобщение экспериментальных и натурных данных о разрывах разломных зон позволило К.Ж. Семинскому [2003, 2014] для условий транспрессивного скалывания разработать идеализированные парагенезы разрывов второго порядка зон сдвига, взброса и сброса. Последние выполнены в виде трафаретов, которые можно сопоставлять с имеющейся пространственной информацией о разноранговых природных разрывных дислокациях, что позволяет определить кинематику разломов и реконструировать напряженно-деформированное состояние, при котором происходило формирование и(или) активизация дислокаций.

В рамках данного исследования нами проведен структурно-парагенетический анализ линейных элементов рельефа Центрального Прибайкалья. Для этого были построены розы-диаграммы азимутов простираения линеаментов, выявленных при анализе карт крупного масштаба. Локальные линеаменты (мегатрещины по Л.А. Сим [1991, 2000]) систематизированы относительно откартированных разломных зон и блока, ограниченного Приморским, Прихребтовым и Бугульдейским разломами (см. рис. 2). Основное отличие нашего исследования от работ, выполненных ранее [Сим, 1991, 2000; Семинский, Семинский, 2016], заключается в применении структурно-парагенетического подхода для относительно активного по сравнению с платформами региона и сопоставлении преимущественных направлений линейных элементов рельефа не только со сдвиговыми парагенезами. Так, каждая роза-диаграмма была проверена на соответствие структурным парагенезам сброса, взброса, правостороннего и левостороннего сдвигов и выявлены наиболее вероятные решения (рис. 3).

Для наиболее крупных разломов северо-восточного простираения удалось построить по три розы-диаграммы, соответствующие общему числу линеаментов в зоне, а также линеаментам, хорошо и слабопроявленным в рельефе земной поверхности (см. рис. 3). Такая градация обусловлена тем, что линеаменты, хорошо выраженные и слабопроявленные в рельефе, бывают пространственно разобщены, о чем свидетельствуют карты их распространения по площади (рис. 4). Сопоставление роз-диаграмм для известных крупных разломов северо-восточного простираения со структурными парагенезами показало, что ориентировка хорошо выраженных в рельефе линеаментов соответствует парагенезу сброса, а максимумы роз-диаграмм всех дислокаций можно объяснить двумя морфолого-кинематическими типами разломов северо-восточного простираения — сброс и взброс. При этом ориентировка структурных элементов парагенеза взбросов повернута относительно дислокаций сбросов на $10\text{—}15^\circ$ по часовой стрелке (см. рис. 3).

Наиболее сложна интерпретация ориентировок линеаментов, слабо выраженных в рельефе. Так, в зоне Ольхонского [Леви и др., 1997; Мац и др., 2001; Mats et al., 2007] или Морского разлома [Аржанникова, Гофман, 2000; ten Brink, Taylor, 2002; Petit, Dévercherè, 2006; Jolivet et al., 2009; Семинский и др., 2012] слабопроявленные линеаменты отображают парагенез взброса. В зоне Приморского разлома структурный рисунок слабопроявленных линеаментов также близок парагенезу взброса, а в Прихребтовой разломной зоне все направления на розе-диаграмме объясняются наложением взбросового и сбросового парагенезов, причем в тех же угловых соотношениях, что и для всех линеаментов зоны этого дизъюнктива (см. рис. 3).

Для Бугульдейского и Куртунского разломов удалось получить только по одной диаграмме, так как это непротяженные дислокации с небольшой шириной зон. Результаты структурно-парагенетического анализа свидетельствуют о левосдвиговом характере перемещения по Бугульдейскому и правостороннем сдвиговом смещении по Куртунскому дизъюнктиву. Следует отметить, что субмеридиональные левосторонние сдвиги и правосторонние сдвиги северо-западной ориентировки либо являются элементами парагенеза зоны взброса СВ простираения, либо сброса ССЗ ориентировки. Последний реконструирован нами при анализе линеаментов зоны Куртунского разлома (см. рис. 3).

Для сравнения структурных парагенезов в зонах разломов и в слабонарушенных блоках построены розы-диаграммы простираения линеаментов в блоке. Результаты анализа, проведенного для линеаментов, хорошо проявленных в рельефе, свидетельствуют о том, что эти дислокации, вероятнее всего, сформировались в условиях сжатия. Угловые соотношения максимумов на розе-диаграмме азимутов простираения слабопроявленных в рельефе линеаментов характерны для парагенеза разлома, формирующегося при сдвиговых деформациях с левосторонним перемещением крыльев (см. рис. 3). Для других блоков района исследований подобный анализ не проводился из-за недостаточного количества откартированных линеаментов, однако в их пределах также отмечается соответствие структурного рисунка линеаментов парагенезу зон сжатия.

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты проведенного исследования в целом согласуются с выводами, полученными ранее на основе структурно-парагенетического анализа разрывов и трещиноватости горных пород Прибайкалья [Семинский, 2003, 2015; Черемных, 2010, 2015; Семинский, Черемных, 2011; Бурзунова, 2015; и др.]. Так, основные разломы района исследования претерпели несколько этапов деформации. Сжатие северо-запад—юго-восточной ориентировки отражено в остаточных деформациях как в зонах дизъюнктивов, так и в слабонарушенных блоках. Левосторонние сдвиги реконструированы на периферии разломных зон Приольхонья и сделан вывод о том, что данный этап был позднее этапа сжатия, но ранее этапа растяжения [Черемных, 2010]. В дальнейшем разломы активизировались при кайнозойском рифтогенезе, так как парагенез сбросов реконструируется для большинства дизъюнктивов Прибайкалья, имеющих достаточно древнее заложение. Эта особенность зафиксирована при детальном исследовании трещи-

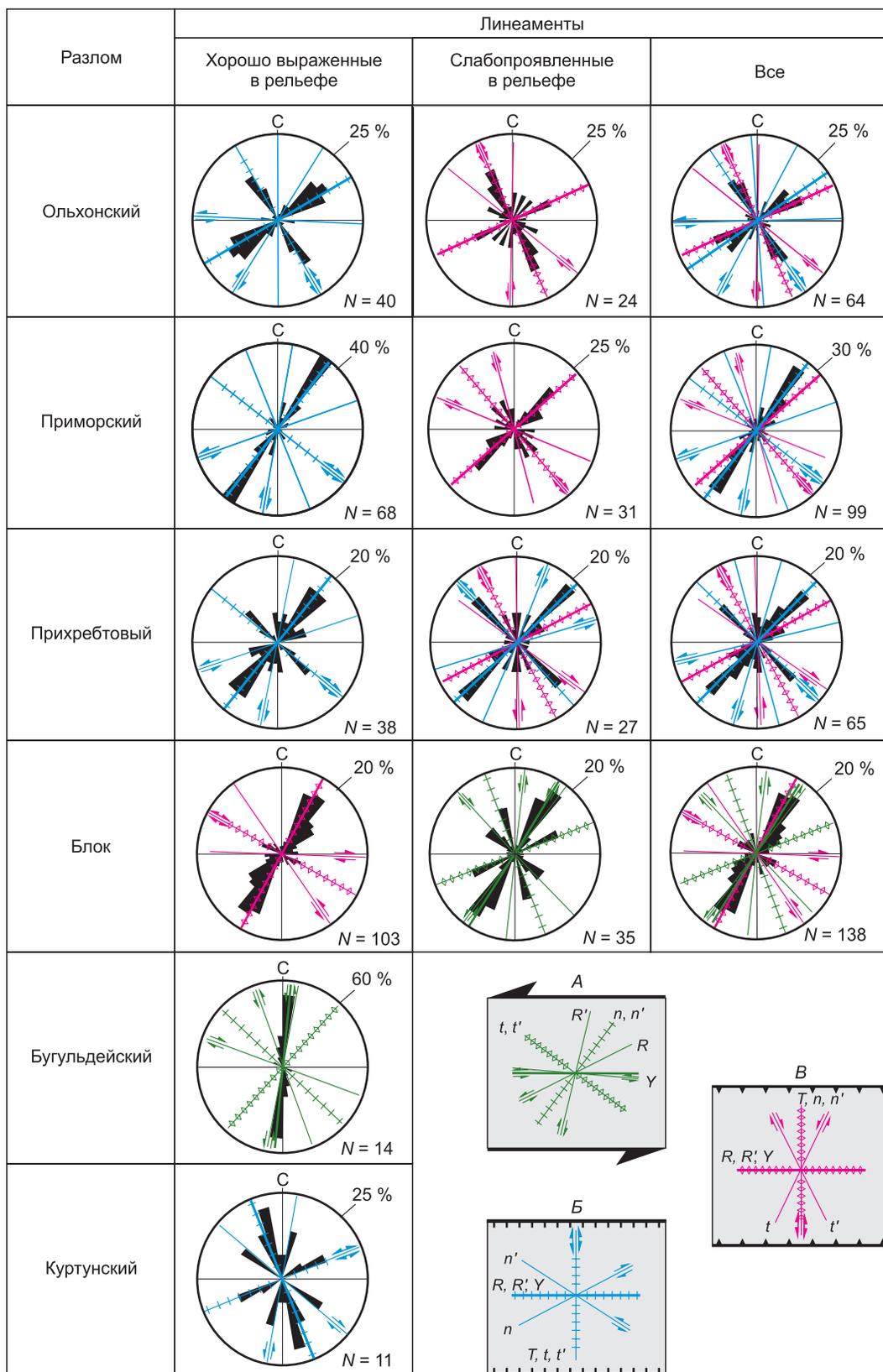


Рис. 3. Структурно-парагенетический анализ азимутов простирания линеаментов.

Структурные парагенезы разломных зон [Семинский, 2014]: *A* — сдвига, *B* — сброса, *B* — взброса. *Y, R, R', T, n, n', t, t'* — элементы структурных парагенезов. Пояснения см. в тексте.

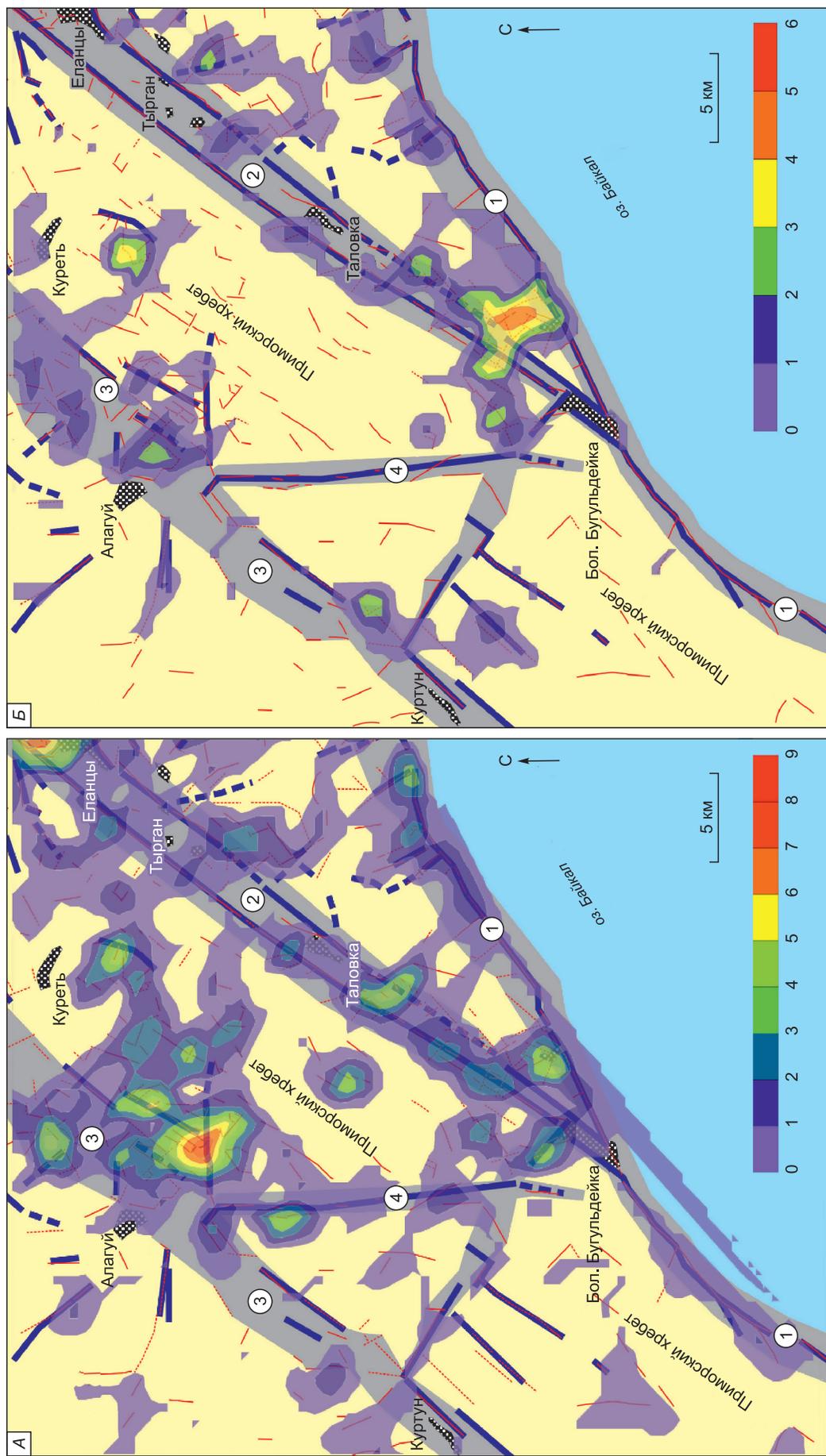


Рис. 4. Плотность линейных элементов в пределах района исследований.

А — количество линейных элементов, хорошо выраженных в рельефе; *Б* — количество линейных элементов, слабопроявленных в рельефе. Зоны разломов и их номера соответствуют рис. 2. Усл. обозн. см. на рис. 2. Цветовая шкала — количество линейных элементов в круглой палетке диаметром 2 км.

новатости и разломов в Приольхонье [Черемных, 2010; Семинский, 2015], а также при поранговом структурно-парагенетическом анализе разрывов в разломных зонах Прибайкалья [Семинский, Черемных, 2011; Черемных, 2015].

Структурно-парагенетический анализ линеаментов в окрестностях Бугульдейского дизъюнктивного узла позволил получить подобные выводы. В зонах крупных разломов северо-восточного простирания, в остаточных деформациях рельефа — линеаментах отчетливо выражены два тектонических этапа (см. рис. 3): взбросо- и сбросообразование. Сбросовый этап связан с кайнозойским рифтогенезом — наиболее поздними тектоническими деформациями в регионе, что подтверждается хорошей выраженностью в рельефе разломов-линеаментов. Разрывы более ранних этапов при этом либо претерпели активизацию и в настоящее время являются хорошо проявленными в рельефе элементами сбросовых зон, либо преимущественно за пределами разломных зон остались «пассивными», частично затуханными экзогенными процессами.

Парагенез левостороннего сдвига северо-восточного простирания, который выявлен при анализе слабовыраженных в рельефе линеаментов тектонического блока, по-видимому, является более поздним по отношению к этапу сжатия. Наличие этого этапа характерно для Приольхонья [Бурзунова, 2015; Семинский, 2015], а также за его пределами [Черемных, 2015]. Выше уже отмечено, что ряд исследователей связывает сдвигообразование с раннеорогенным этапом формирования Байкальского рифта [Леви и др., 1997; Delvaux et al., 1997; San'kov et al., 1997; и др.]. Слабая выраженность в рельефе линеаментов этого этапа, вероятно, обусловлена особенностью перемещения крыльев сдвигов, когда горизонтальные перемещения формируют менее контрастные по относительным высотам линейные формы ландшафта.

Таким образом, морфоструктурный анализ рельефа в сочетании со структурно-парагенетическим подходом позволил откартировать разноранговые разрывы разломных зон и реконструировать морфолого-кинематические типы наиболее крупных разрывных нарушений. Внутренняя структура Ольхонского, Приморского и Прихребтового разломов сформировалась в результате двух этапов: более раннего сжатия и последующего растяжения с СЗ-ЮВ ориентировкой осей главных напряжений, отличающихся на $10\text{--}15^\circ$. При этом растяжение активизировало только зоны разломов и практически не затронуло ограниченные ими блоки. Определение возраста выявленных этапов неоднозначно. Наиболее интенсивное сбросообразование подавляющим большинством исследователей относится к плиоцен-четвертичному времени. Этот этап продолжается в настоящее время, что отражено в механизмах очагов землетрясений Байкальского рифта [Delvaux et al., 1997; Мельникова, Радзиминович, 1998, 2007]. Абсолютный возраст более раннего этапа регионального взбросообразования определить сложно. Масштабное надвигообразование, характерное для мезозоского времени [Александров, 1990; Гладков, 1995; Delvaux et al., 1995; Семинский, 2003; Лунина и др., 2009; и др.], связывают с коллизией Северо-Китайского континента и фундамента Сибирской платформы [Буслов, 2012]. Возможно, в вершинной поверхности Приморского хребта, в пределах тектонически-стабильных блоков, сохранился слаборасчлененный рельеф мел-палеогенового возраста, который не был идеальной равниной [Геология ..., 1984]. Кроме того, имеются представления о миоцен-плиоценовом возрасте СЗ-ЮВ сжатия земной коры [Лунина и др., 2009]. При любом из этих возрастов этап регионального сжатия предшествовал этапу интенсивного растяжения. Последний этап наиболее контрастных тектонических движений в пределах Центральной Азии и собственно Прибайкалья охватывает период 5 млн лет — настоящее время [Буслов, 2012; Добрецов и др., 2016]. За это время сформировался современный облик рельефа, морфоструктуры которого отчетливо отображаются в геофизических полях [Добрецов и др., 2016].

Нами проведены комплексные исследования по профилю вкрест основного сместителя Приморского глубинного разлома, в ходе которых рассчитан градиент рельефа, изучена трещиноватость горных пород геолого-структурными методами и выполнена электротомография приповерхностной части разреза комплексом «Скала-48». При замерах электрического сопротивления использовалась симметричная установка Шлюмберже, применение которой позволило построить разрез до глубины 40 м. Данные о сопротивлениях инвертированы программным обеспечением Res2DInv [Loke, 2010]. Основному сместителю Приморского разлома, проявленному здесь в виде линейно вытянутого уступа высотой первые десятки метров, соответствует пик максимальных значений градиента рельефа (рис. 5, А), рассчитанного по методике, изложенной в [Черемных, 2016]. При этом на геоэлектрическом разрезе отмечается контрастный переход от высоких значений удельного электрического сопротивления к низким. Кроме того, на разрезе, в поле удельного электрического сопротивления, наблюдается ряд областей с низкими значениями, которые, вероятно всего, соответствуют разрывам второго порядка в дизъюнктивной зоне (см. рис. 5, В). Часть из них также сопоставляется с максимумами градиента рельефа. Анализ тектонической трещиноватости вблизи профиля (см. рис. 5, В) свидетельствует, что линеамент-сместитель Приморского разлома окончательно сформировался в условиях растяжения, типичного для Байкальского рифта на позднеорогенном этапе. Этот крупный, длиной более 200 км, разлом активизировался в позднем кайнозое как шарнирный сброс, при этом даже небольшой амплитуды смещения

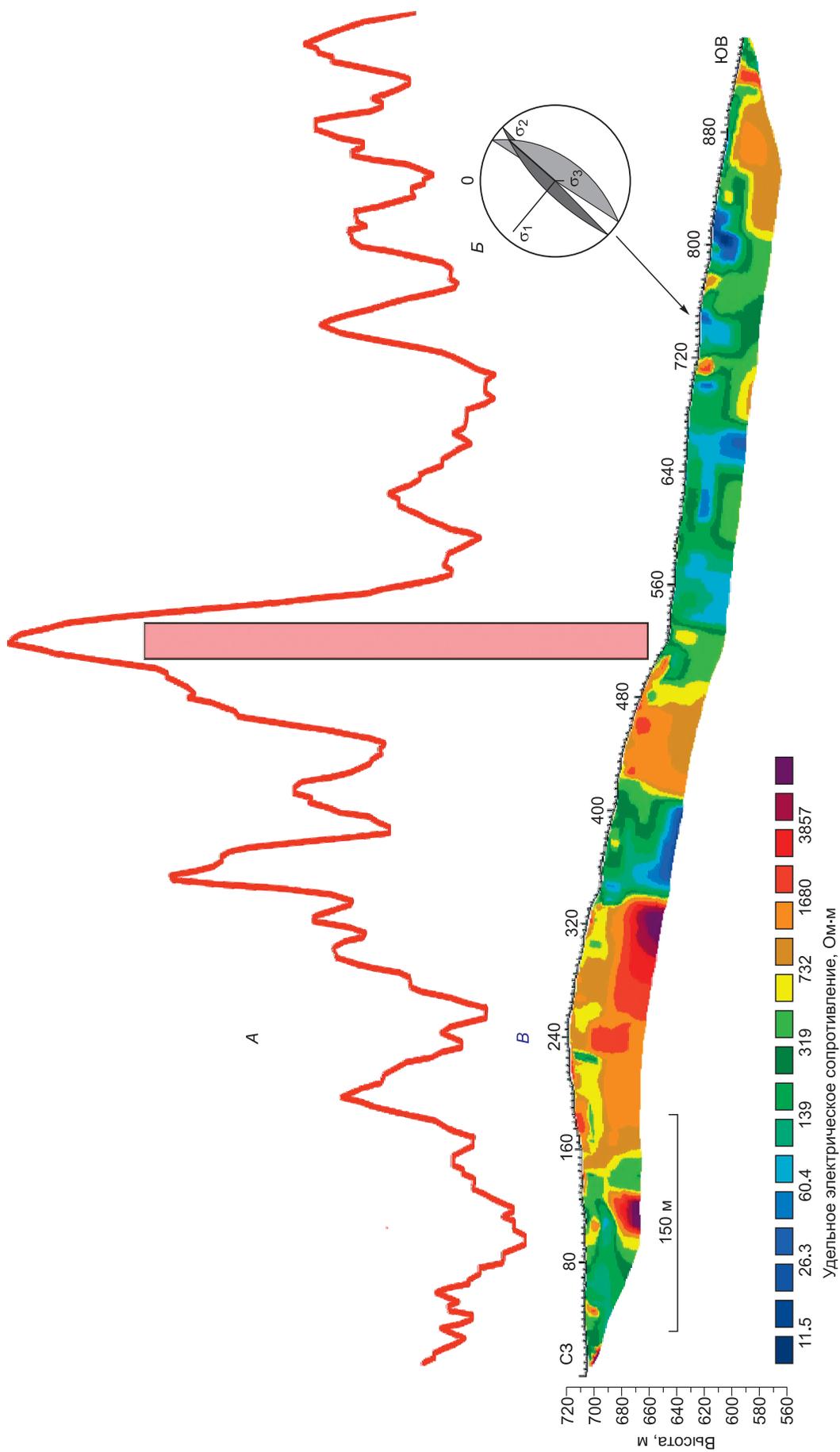


Рис. 5. Результаты комплексных исследований в зоне Приморского разлома.

A — градиент рельефа; *B* — структурная диаграмма, построенная в проекции верхней полусферы (цветом показаны плоскости разрывов: темно-серым — основной сместитель разлома, светло-серым — сопряженный разрыв второго порядка, σ — оси главных напряжений: σ_1 — растяжения, σ_2 — промежуточная, σ_3 — сжатия); *B* — геологический разрез. Розовым цветом отмечено положение главного сместителя разлома, по данным линейментного анализа.

крыльев, характерной для его юго-западной части, было достаточно для формирования соответствующего структурного парагенеза приразломной трещиноватости горных пород.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Тектонические деформации, особенно неотектонические, зафиксированы в рельефе земной поверхности в виде линеаментов. Линеаментный анализ с использованием разномасштабных топооснов и цифровых моделей рельефа позволил получить материал о разноранговых разломах. Откартированы как локальные линеаменты двух типов — хорошо проявленные и слабовыраженные в рельефе, так и региональные зоны концентрации линейных форм рельефа, соответствующие разломам, находящимся на разных стадиях развития. Парагенетический анализ структурных рисунков разрывов-линеаментов в пределах разломных зон позволил реконструировать морфолого-кинематические типы региональных дизъюнктивов. Проведенное исследование показало возможность применения структурно-парагенетического анализа для регионов, морфоструктура которых сформировалась в результате наложения деформаций различных тектонических этапов.

Таким образом, сочетание морфоструктурного и структурно-парагенетического анализов способствует реконструкции напряженно-деформированного состояния для территорий со сложной многоэтапной историей развития. Предложенная методика позволяет дистанционными методами получить информацию о вероятном кинематическом типе разноранговых разломов и реконструировать поле тектонических напряжений в их окрестностях. Однако совершенствование метода требует проведения дополнительных объемов морфометрических, геофизических и геолого-структурных исследований. Так, применение тектонофизического подхода к интерпретации данных малоуглубинной электротомографии [Семеновский и др., 2016] позволит выделить на геоэлектрическом разрезе границы разломной зоны в целом и ее внутренние подзоны, связанные с формированием главного сместителя и разрывов второго порядка. Ранее эта задача решалась при детальном анализе геолого-структурных данных о разрывах и трещиноватости коренных выходов горных пород, что возможно только в условиях хорошей обнаженности геологической структуры. Сейчас картирование разломных зон представляется возможным на основе анализа рельефа с последующей верификацией геолого-структурными или геофизическими наблюдениями.

Авторы благодарны д.г.-м.н. К.Ж. Семинскому за обсуждение работы и полезные советы; сотрудникам лаборатории тектонофизики Института земной коры СО РАН к.г.-м.н. Ю.П. Бурзуновой и А.К. Семинскому, принимавшим активное участие в сборе полевых геофизических и геолого-структурных данных; Е.А. Маслову за помощь в первичной обработке фактического материала и оформлении рисунков. Мы также признательны д.г.-м.н. М.М. Буслову за ценные замечания, исправление которых позволило улучшить текст рукописи.

Некоторые виды представленных исследований выполнены при поддержке РФФИ (проекты 16-05-00154, 16-35-00141).

ЛИТЕРАТУРА

Александров В.К. Надвиговые и шарьяжные структуры Прибайкалья. Новосибирск, Наука, 1990, 102 с.

Аржанникова А.В., Гофман Л.Е. Проявление неотектоники в зоне влияния Приморского разлома // Геология и геофизика, 2000, т. 41 (6), с. 811—818.

Бурзунова Ю.П. Разломные зоны Тажеранского массива сиенитов (Западное Прибайкалье) по результатам структурно-парагенетического анализа трещиноватости // Изв. Сибирского отделения Секции наук о Земле РАЕН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений, 2015, № 1 (50), с. 58—67.

Буслов М.М. Геодинамическая природа Байкальской рифтовой зоны и ее осадочного выполнения в мел-кайнозойское время: эффект дальнего воздействия Монголо-Охотской и Индо-Евразийской коллизий // Геология и геофизика, 2012, т. 53 (9), с. 1245—1255.

Геология и сейсмичность зоны БАМ. Неотектоника / Ред. Н.А. Логачев. Новосибирск, Наука, 1984, 207 с.

Гзовский М.В. Основы тектонофизики. М., Наука, 1975, 536 с.

Гладков А.С. Надвиги Прибайкалья (тектонофизический анализ): Автореф. дис. ... к. г.-м. н. Иркутск, ИЗК СО РАН, 1995, 16 с.

Добрецов Н.Л., Буслов М.М., Василевский А.Н., Ветров Е.В., Неведрова Н.Н. Эволюция кайнозойского рельефа юго-восточной части Горного Алтая и её отображение в структурах геоэлектрического и гравитационного полей // Геология и геофизика, 2016, т. 57 (11), с. 1937—1948.

- Есиков Н.П.** Тектонофизические аспекты анализа современных движений земной поверхности. Новосибирск, Наука, 1979, 182 с.
- Кузьмин С.Б.** Геоморфология зоны Приморского разлома (Западное Прибайкалье) // Геоморфология, 1995, № 4, с. 53—61.
- Леви К.Г., Аржанникова А.В., Буддо В.Ю., Кириллов П.Г., Лухнев А.В., Мирошниченко А.И., Ружич В.В., Саньков В.А.** Современная геодинамика Байкальского рифта // Разведка и охрана недр, 1997, № 1, с. 10—20.
- Лукьянов А.В.** Структурные проявления горизонтальных движений земной коры. М., ГИН АН СССР, 1965, 232 с. (Тр. ГИН АН СССР, вып. 136).
- Лунина О.В.** Цифровая карта разломов для плиоцен-четвертичного этапа развития земной коры юга Восточной Сибири и сопредельной территории Северной Монголии // Геодинамика и тектонофизика, 2016, т. 7, № 3, с. 407—434.
- Лунина О.В., Гладков А.С., Неведрова Н.Н.** Рифтовые впадины Прибайкалья: тектоническое строение и история развития. Новосибирск, Академ. изд-во «Гео», 2009, 316 с.
- Мац В.Д., Уфимцев Г.Ф., Мандельбаум М.М., Алакшин А.М., Поспеев А.В., Шимараев М.Н., Хлыстов О.М.** Кайнозой Байкальской рифтовой впадины: строение и геологическая история. Новосибирск, Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2001, 252 с.
- Мельникова В.И., Радзиминович Н.А.** Механизм очагов землетрясений Байкальского региона за 1991—1996 годы // Геология и геофизика, 1998, т. 39 (11), с. 1598—1607.
- Мельникова В.И., Радзиминович Н.А.** Параметры сейсмоструктурных деформаций земной коры Байкальской рифтовой зоны по сейсмологическим данным // ДАН, 2007, т. 416, № 4, с. 543—545.
- Ружич В.В.** О динамике тектонического развития Прибайкалья в кайнозой // Геология и геофизика, 1972, (4), с. 122—126.
- Семинский К.Ж.** Внутренняя структура континентальных разломных зон. Тектонофизический аспект. Новосибирск, Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2003, 244 с.
- Семинский К.Ж.** Спецкартирование разломных зон земной коры. Статья 1. Теоретические основы и принципы // Геодинамика и тектонофизика, 2014, т. 5, № 2, с. 445—467.
- Семинский К.Ж.** Спецкартирование разломных зон земной коры. Статья 2. Основные этапы и перспективы // Геодинамика и тектонофизика, 2015, т. 6, № 1, с. 1—43.
- Семинский К.Ж., Черемных А.В.** Трещинные сети и напряженное состояние кайнозойских осадков Байкальского рифта: новые возможности структурно-парагенетического анализа // Геология и геофизика, 2011, т. 52 (3), с. 450—469.
- Семинский К.Ж., Семинский Ж.В.** Спецкартирование разломных зон земной коры и его возможности в исследовании структурного контроля кимберлитов в Алакит-Мархинском поле Якутской алмазонасной провинции. Иркутск, Изд-во ИРНИИТУ, 2016, 204 с.
- Семинский К.Ж., Кожевников Н.О., Черемных А.В., Поспеева Е.В., Бобров А.А., Оленченко В.В., Тугарина М.А., Потапов В.В., Бурзунова Ю.П.** Межблоковые зоны северо-западного плеча Байкальского рифта: результаты комплексных геолого-геофизических исследований по профилю пос. Баяндай — м. Крестовский // Геология и геофизика, 2012, т. 53 (2), с. 250—269.
- Семинский К.Ж., Зарипов Р.М., Оленченко В.В.** Тектонофизический подход к интерпретации данных малоглубинной электротомографии разломных зон // Геология и геофизика, 2016, т. 57 (9), с. 1715—1729.
- Сим Л.А.** Изучение тектонических напряжений по геологическим индикаторам (методы, результаты, рекомендации) // Изв. вузов. Геология и разведка, 1991, № 10, с. 3—22.
- Сим Л.А.** Влияние глобального тектогенеза на новейшее напряженное состояние платформ Европы // М.В. Гзовский и развитие тектонофизики. М., Наука, 2000, с. 326—350.
- Соотношение древней и кайнозойской структур в Байкальской рифтовой зоне / С.М. Замаараев, Е.П. Васильев, А.М. Мазукабзов, В.В. Ружич, Г.В. Рязанов.** Новосибирск, Наука, 1979, 126 с.
- Стоянов С.С.** Механизм формирования разрывных зон. М., Недра, 1977, 144 с.
- Уфимцев Г.Ф.** Морфотектоника Байкальской рифтовой зоны. Новосибирск, Наука, 1992, 216 с.
- Черемных А.В.** Внутренняя структура разломных зон Приольхонья и эволюция напряженного состояния верхней коры Байкальского рифта // Геодинамика и тектонофизика, 2010, т. 1, № 3, с. 273—284.
- Черемных А.В.** Разломы Центрального Прибайкалья: результаты структурно-парагенетического анализа // Вестн. СПб. ун-та. Серия 7. Геология. География, 2015, вып. 2, с. 59—72.
- Черемных А.В., Бобров А.А., Черемных А.С., Зарипов Р.М., Семинский А.К.** Джида-Удинский разлом (Байкальский регион): специфика внутренней структуры // Изв. ИГУ. Серия «Науки о Земле», 2014, т. 8, с. 145—158.

Черемных А.С. Морфоструктурные и тектонофизические особенности разломных зон, формирующихся в обстановке сдвига и растяжения (результаты физического моделирования) // Геология и геофизика, 2016, т. 57 (9), с. 1730—1744.

Шерман С.И. Физические закономерности развития разломов земной коры. Новосибирск, Наука, 1977, 102 с.

Шерман С.И., Борняков С.А., Буддо В.Ю. Области динамического влияния разломов. Новосибирск, Наука, 1983, 112 с.

ten Brink U.S., Taylor M.H. Crustal structure of central Lake Baikal: Insights into intracontinental rifting // J. Geophys. Res., 2002, v. 107, № B7, P. 2132, doi:10.1029/2001JB000300.

Delvaux D., Moyes R., Stapel G., Melnikov A., Ermikov V. Paleostress reconstruction and geodynamics of the Baikal region, Central Asia. Part I: Palaeozoic and Mesozoic pre-rift evolution // Tectonophysics, 1995, v. 252, p. 61—101.

Delvaux D., Moyes R., Stapel G., Petit C., Levi K., Miroshnitchenko A., Ruzhich V., San'kov V. Paleostress reconstruction and geodynamics of the Baikal region, Central Asia. Part II: Cenozoic rifting // Tectonophysics, 1997, v. 282, p. 1—38.

Jolivet M., De Boissrollier T., Petit C., Fournier M., Sankov V.A., Ringenbach J.-C., Byzov L., Miroshnitchenko A.I., Kovalenko S.N., Anisimova S.V. How old is the Baikal Rift Zone? Insight from apatite fission track thermochronology // Tectonics, 2009, v.28, TC3008, p. 21, doi:10.1029/2008TC002404.

Hancock P.L. Brittle microtectonics: Principles and practice // J. Struct. Geol., 1985, v. 7, № 3—4, p. 437—457.

Loke M.H. Tutorial: RES2DINV ver. 3.59. Rapid 2-D resistivity & IP inversion using the least-squares method. Malaysia. Geotomo Software, 2010, 148 с.

Mats V.D., Lobatskaya R.M., Khlystov O.M. Evolution of faults in continental rift: morphotectonic evidence from the south-western termination of the North Baikal basin // Earth Sci. Front., 2007, v. 14, № 1, p. 207—219.

Petit C., Dévercherè J. Structure and evolution of the Baikal rift: a synthesis // Geochem. Geophys. Geosyst., 2006, v. 7, № 11, doi:10.1029/2006GC001265.

San'kov V.A., Miroshnitchenko A.I., Levi K.G., Lukhnev A.V., Melnikov A.I., Delvaux D. Cenozoic stress field evolution in the Baikal rift zone // Bull. Centre Rech. Elf Explor. Prod., 1997, v. 21, № 2, p. 435—455.

*Рекомендована к печати 1 марта 2018 г.
И.С. Новиковым*

*Поступила в редакцию 30 января 2017 г.,
после доработки — 9 января 2018 г.*